



HAL
open science

Contrôle souple de la dynamique éolienne sur un littoral artificialisé et propositions de gestion : le cas de la façade maritime du Grand Port Maritime de Dunkerque

Antoine Tresca

► To cite this version:

Antoine Tresca. Contrôle souple de la dynamique éolienne sur un littoral artificialisé et propositions de gestion : le cas de la façade maritime du Grand Port Maritime de Dunkerque. Ingénierie de l'environnement. Université du Littoral Côte d'Opale, 2013. Français. NNT : . tel-00825877v1

HAL Id: tel-00825877

<https://theses.hal.science/tel-00825877v1>

Submitted on 24 May 2013 (v1), last revised 17 Jul 2013 (v2)

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 LOG 8187

LABORATOIRE D'Océanologie et de Géosciences

Equipe 4 – Morphodynamique des littoraux

ECOLE DOCTORALE SMRE

(Sciences de la Matière, du Rayonnement et de l'Environnement)

**CONTROLE SOUPLE DE LA DYNAMIQUE EOLIENNE SUR UN
LITTORAL ARTIFICIALISE ET PROPOSITIONS DE GESTION :
LE CAS DE LA FACADE MARITIME
DU GRAND PORT MARITIME DE DUNKERQUE**

Thèse de Doctorat GEPO (Géosciences, Ecologie, Paléontologie, Océanographie)

Présentée par Antoine TRESKA

Soutenue publiquement à Wimereux le 04.04.2013

Directrice de recherche

Marie-Hélène RUZ, *Professeur, Université du Littoral Côte d'Opale*

Rapporteurs

Edward ANTHONY, *Professeur, Université d'Aix-Marseille*

Catherine MEUR-FEREC, *Professeur, Université de Bretagne Occidentale*

Examineurs

Yvonne BATTIAU-QUENEY, *Professeur Emerite, Université de Lille 1*

Pascal GREGOIRE, *Docteur, Grand Port Maritime de Dunkerque*

Arnaud HEQUETTE, *Professeur, Université du Littoral Côte d'Opale*

Remerciements

Avant de présenter ce travail de thèse qui je le rappelle, est basé sur un partenariat laboratoire/entreprise (convention CIFRE), je souhaite exprimer ma reconnaissance envers les personnes et organismes qui ont contribué à son amélioration.

Tout d'abord, ce travail a pu être mené grâce aux financements du Grand Port Maritime de Dunkerque (GPMD) et de l'Association Nationale de la Recherche et de la Technologie (ANRT).

Je tiens premièrement à remercier Mylène Ruz, directrice de cette thèse, qui a été très présente et m'a aidé à recentrer mon travail sur les objectifs les plus importants. Vous m'avez apporté beaucoup de méthode et de rigueur et c'est grâce à votre appui sur ces aspects que je peux espérer aujourd'hui mener ce travail à son terme.

Je remercie ensuite Nicolas Forain, chef de bureau d'études au port de Dunkerque. Je pense que tu es la personne au sein du port qui s'est le plus investie pour faire en sorte que le financement de cette thèse aboutisse. Merci aussi pour les nombreux échanges d'idées et discussions que nous avons eues, qui ont fait avancer mon travail.

J'ai également une pensée pour Stéphane Raison, Préfigurateur du Grand Port Maritime de la Réunion, anciennement Directeur de l'Aménagement à Dunkerque. Bien que votre carrière vous ait éloigné de la région depuis quelques mois, c'est vous qui avez donné l'impulsion pour que le port puisse approfondir cette notion fondamentale de la gestion de sa façade maritime.

Mes remerciements vont ensuite aux membres du jury :

- Edward Anthony, professeur à l'Université d'Aix-Marseille, et Catherine Meur-Férec, professeur à l'Université de Bretagne Occidentale, pour avoir accepté cet important travail de rapporteur et de vous être déplacés pour la soutenance ;
- Arnaud Héquette, Professeur à l'Université du Littoral, pour votre rôle au sein de ce jury, mais également pour m'avoir apporté votre aide sur le terrain lors d'une froide matinée de février 2011 ;
- Pascal Grégoire, Directeur du département Management de l'Environnement du GPMD, pour avoir accepté d'être le garant de ce travail au sein de l'entreprise, et d'avoir trouvé du temps pour les comités de thèse, entre deux urgences !
- Yvonne Battiau-Queney que je me dois de remercier de manière plus appuyée pour sa fidélité. Nous avons commencé à travailler ensemble lors de mon mémoire de maîtrise en 2004 et sommes ensuite restés en contact. C'est vous qui m'aviez transféré l'annonce pour cette thèse en 2009 et qui aviez appuyé ma candidature. Je ne l'oublie pas, et j'espère que nous continuerons à travailler ensemble par la suite.

De nombreux collègues ou amis ont contribué à ce que ce travail s'effectue dans des conditions que tout doctorant souhaiterait, je tiens donc ici à leur exprimer ma reconnaissance.

Je souhaite remercier chaleureusement Adrien Cartier pour son aide précieuse sur le terrain, pour la relecture du manuscrit, et aussi pour de nombreux conseils au jour le jour. Travailler avec toi, c'est un vrai v'lours ! J'en profite pour te dire que je suis désolé pour la courroie de distribution de ta voiture, pleine de sable ... ! Merci pour les BPE, les chouals, Trackmania etc., que de bons moments !

Un grand merci à Aurélie Maspataud, qui m'a beaucoup aidé pour les piégeages éoliens au début. Pour une fois, je ne te ferai pas l'affront de t'appeler par ce surnom que tu n'aimes pas. Je te suis également gré de m'avoir légué ton bureau, il est beaucoup plus lumineux que celui que j'avais avant !

Merci à Adrien Crapoulet, le dernier arrivant. Ça fait chaud au cœur de pouvoir parler comme à Gouyen-Artois dans le bureau !

Merci à Denis Marin, le cartographe de l'équipe. Je te suis reconnaissant de toujours être disponible lorsque l'on a une question, pour le café (très important), les séries TV et j'en passe. Merci à Vincent Sipka, qui m'a aidé à me former à l'utilisation de plusieurs appareils, et pour l'assistance lors de nombreuses mesures *in situ*. Les bons gueuletons en revenant de la plage à plusieurs reprises sont un bon souvenir. Merci à Olivier Cohen pour son irremplaçable macro Profiler, et également à Christine Dobroniak.

Je garderai un très bon souvenir de ces trois ans au bureau de la MREI 2 grâce à vous tous, mais également grâce à Aline Aubry et Mathieu Jeanson, même si nous nous sommes côtoyés moins longtemps.

Je remercie également François Schmitt, directeur du LOG, pour sa participation aux comités de thèse et pour m'avoir consacré du temps pour une introduction à la mécanique des fluides.

Un grand merci à Marcel Stive qui a répondu à ma demande de stage au sein de son département à l'Université de Technologie de Delft, ainsi qu'à Sierd de Vries, qui m'a accueilli de manière très chaleureuse et simple pour un séjour de deux semaines au sein de son bureau. Je t'accueillerai à mon tour à Dunkerque lorsque tu le souhaiteras.

Je remercie chaleureusement S.M. Arens pour les pièges à coupelles qu'il m'a cédés, ainsi que R. Davidson-Arnott, pour les plans des pièges triangulaires.

Vient maintenant le tour de la fine équipe du port. Ces 3 années au sein du bureau d'études ont été un réel plaisir. On y travaille bien, dans la bonne humeur et il y a toujours quelque chose à grignoter : Aline ce serait plutôt les souris caramel-chocolat, Daniel les nougati et les carambar, tandis que du côté de Virginie les produits de la ferme ne manquent pas. Le SIG c'était pas mal non plus : Séverine avec les bons petits plats de Maman et Arnaud avec ses pintades. Un peu plus loin dans le couloir il ya également Emilie qui, si elle ne cuisine pas, n'en est pas moins gourmande, et Pierre qui ne refuse jamais une petite gaufre ! Je pense aussi à Jérôme qui rapportait tout ce qui pouvait contenir du sucre, et Alice qui nous avait fait un super pot de départ. Bref, vous allez me manquer bande de « bouches à sucre » !

Du côté du port je n'oublie pas l'équipe de géomètres-topographes, et notamment Michaël Allemand, qui m'a formé à l'utilisation du Trimble, ainsi que l'atelier mécanique qui a construit les pièges à sable et les supports.

Enfin, je voudrais remercier les personnes de mon entourage qui ont indirectement contribué à enrichir mon travail. Il s'agit en premier lieu de mes parents, qui ont financé mes études jusqu'au Master et grâce à qui, donc, j'ai pu m'inscrire en thèse.

Un grand merci aussi à tous les copains qui m'ont régulièrement demandé des nouvelles de l'avancement de mon travail, je pense à Benoît, Rémy, Nicolas, et j'en passe ...

Je garde la meilleure pour la fin : merci à Frankie, pour ta relecture, ta grande patience de ces dernières semaines, et le fait d'avoir su me supporter tous les jours. Je garderai un très bon souvenir du break à la dune du Pyla !

Alors, elle pousse ta dune ?

Nicolas Fl.

Sommaire

Remerciements	3
Sommaire	6
Introduction générale.....	8
CHAPITRE 1 - PRESENTATION DU SITE D'ETUDE.....	17
1. Localisation et évolution historique du site d'étude	18
2. Conditions météorologiques et hydrodynamiques générales et contexte sédimentaire régional	24
CHAPITRE 2 - MÉTHODOLOGIE, TECHNIQUES D'ACQUISITION ET D'ANALYSE DES DONNÉES..	34
1. Quantification de l'accumulation éolienne à l'aide de structures brise-vent	35
2. Mesures topographiques de terrain et restitution 2D/3D	41
3. Evolution de la limite de végétation et des superficies dunaires par analyse diachronique de photographies aériennes	51
4. Evaluation du transport éolien par piégeages in situ.....	57
5. Caractérisation des paramètres environnementaux influençant le transport éolien	63
CHAPITRE 3 - EVOLUTION PLURIANNUELLE DES SUPERFICIES DUNAIRES ET DE LA LIMITE DE VEGETATION	73
1. Evolution de la plage du Clipon de 1983 à 2011	74
2. Typologies dunaires de l'UG4 et évolution des superficies.....	85
CHAPITRE 4 - EVOLUTION A COURT TERME DES PROFILS DE PLAGE ET REPONSE AUX EVENEMENTS MORPHOGENES	108
1. Caractérisation de 6 unités morpho-sédimentologiques sur l'UG4.....	109
2. Evolution du versant dunaire et du haut de plage des profils types	115
3. Bilan de l'évolution du versant dunaire et du haut de plage sur les profils types	125
4. Evolution des profils types et échanges estran / haut de plage - dune	128
5. Bilan volumétrique et morphologique	134
6. Etude de deux cas d'érosion du haut de plage en septembre 2010 et août 2011	139
CHAPITRE 5 - TRANSPORT EOLIEN : RESULTATS DES EXPERIMENTATIONS <i>IN SITU</i>	148
1. Caractérisation du transport éolien sur le haut de plage et le versant externe de la dune bordière de la plage du Clipon	149
2. Caractérisation du transport éolien sur la digue du Braek : expérimentations in situ du printemps 2011	167
3. Conditions optimales et transport éolien potentiel.....	185
CHAPITRE 6 - QUANTIFICATION DE L'ACCUMULATION EOLIENNE A L'AIDE DE STRUCTURES BRISE-VENT	199
1. Structures de captage du sable sur la plage du Clipon	200
2. Structures de captage sur la digue du Braek	228
3. Evolution saisonnière et comparaison des dispositifs de captage du sable sur la plage du Clipon et la digue du Braek	250
CHAPITRE 7 - DYNAMIQUE EOLIENNE ET PROPOSITIONS DE GESTION SUR L'UG4	260
1. Dynamique dunaire.....	261
2. Structures de captage et propositions de gestion.....	278
Conclusion générale	305
Références bibliographiques	310
Table des figures	326
Table des tableaux	335
Table des matières.....	338
Annexes.....	343

Introduction générale

L'impact humain sur les dunes côtières est ancien. En Europe du Nord-Ouest, la présence humaine est attestée depuis le Néolithique en France (Joly, 2004) et en Belgique (De Ceunynck, 1992 ; Baeteman et al., 1984). A cette époque et jusqu'au Moyen-Age, on y pratiquait le pâturage, la chasse et la pêche (Huddart et al., 1999). L'ensemble de ces activités nécessitait déjà de pouvoir contrôler les envols de sable afin d'éviter les menaces dues à l'envahissement des cultures et des habitations. En Europe, des plantations d'oyats sont effectuées depuis le Moyen-Age dans les dunes côtières (Ashton, 1909 ; Case, 1914 ; Van Dieren, 1934 ; Provoost et al., 2009), pour empêcher la transgression du sable vers l'intérieur des terres (Petit-Berghem, 1996). Des brise-vent de types fascines (en saule) ayant pour fonction de réduire la vitesse du vent et forcer le dépôt du sable sont utilisés dès le 16^{ème} siècle (Norman, 1981). A partir du 18^{ème} siècle dans les Landes, et sous l'impulsion de l'Etat (Ponts et Chaussées, Eaux et forêts) (Favenec (coord.), 2002), de nombreuses actions de fixation de vastes champs de dunes mobiles ont été engagées (Bremontier, 1833 ; Harlé, 1914 ; Fenley 1948). De nombreux écrits relatent également la mise en place de programmes d'incitation à la stabilisation des sables mobiles sur les côtes des Etats-Unis à la même période (Savage and Woodhouse, 1969 ; Manohar and Bruun, 1970 ; Woodhouse, 1978 ; Knutson, 1980). Des techniques de gestion des sables mobiles ont donc été mises au point depuis plusieurs siècles. Cependant, la littoralisation du peuplement (Noir, 1999) est un phénomène récent. En France notamment, les côtes sont longtemps restées un « territoire du vide » (Corbin, 1988). Une densification de l'occupation des côtes françaises s'effectue surtout à partir du 20^{ème} siècle, ce qui a engendré des modifications du milieu beaucoup plus importantes qu'auparavant, jusqu'à devenir un « territoire d'empoigne » dans les années 1990 (Paskoff, 1993).

Jusqu'alors, l'installation des hommes près des côtes se faisait pour des raisons utilitaires, mais la perception du littoral change (Meur-Férec, 2006) avec l'essor du tourisme balnéaire tout d'abord (Corbin, 1988). Très rapidement, l'espace littoral devient la cible de projets immobiliers (Meur-Férec et Morel, 2004), qui s'accélérent après 1945 avec les stations balnéaires (Ehlers and Kunz, 1993 ; Fabbri, 1996). Les plages sableuses attirent de plus en plus de monde, et les formes dunaires sont altérées, calibrées ou remplacées par de grands ensembles touristiques (habitat collectif). C'est particulièrement le cas en Espagne par

exemple, où ces milieux n'étaient pas du tout protégés jusque dans les années 1960 à 1970 (Pina et al., 2002). Les activités industrielles se développent également tout au début du 20^{ème} siècle. Sur les côtes de la Mer du Nord, les ports littoraux s'étendent et accueillent des usines sidérurgiques. En effet, la révolution des transports maritimes à la même époque rend disponible à moindre coût le minerai dont les gisements sont situés à des milliers de kilomètres (Rivière et Oddone, 2010), et c'est le début de la sidérurgie sur l'eau dans plusieurs villes des côtes de la Mer du Nord : d'Ijmuiden (1924), Brême (1959), Dunkerque (1963) et Gand (1967) (Malezieux, 1979). D'importantes transformations sont dues à une croissance continue et accélérée de leur potentiel de production, et ces ports occupent de vastes espaces auparavant vierges ou faiblement exploités (Malezieux, 1979). L'artificialisation des territoires engendrée par la concentration de l'ensemble de ces nouvelles activités sur les espaces littoraux a exacerbé les problèmes liés à la dynamique éolienne. Aujourd'hui en France, la part moyenne des terres artificialisées à moins de 250 m de la côte est estimée à 23 % (ONML, 2012). Dans le Nord-Pas-de-Calais, cette part monte à 28,9 % (ONML, 2012). Dans le seul département du Nord, 80 % des 37 km de côtes sont entièrement artificialisés (Meur-Férec, 1995), et comprennent l'ensemble des ouvrages de défense contre la mer (digues, épis, jetées). Il existe de ce fait de nombreux territoires côtiers qui sont potentiellement sujets à des problèmes d'invasion par des envols de sable non contrôlés. Ces dernières années, la maîtrise de ces envols se fait de plus en plus par l'intermédiaire de techniques dites « souples » (ou douces), dont le but est la modération de l'érosion éolienne en s'appuyant sur les processus naturels. A cet effet, un éventail de différentes techniques sont disponibles (Favenec, 2001) qui permettent soit de forcer le dépôt du sable par l'intermédiaire de barrières brise-vent (fascines, ganivelles, filets synthétiques) ou par des plantations, soit de réduire la déflation en couvrant les surfaces sableuses par des débris végétaux. Ce mode de gestion ne cherche pas à fixer totalement et définitivement le sable, mais à conserver une certaine souplesse au système. Cette souplesse permet dans certains cas de maintenir ou de recréer les échanges sédimentaires entre la plage et les dunes, ce qui donne au système une meilleure capacité d'adaptation aux changements (résilience) (Favenec (coord.), 2002 ; Heurtefeux et Richard, 2005). Ces modes de gestion ont été l'objet de nombreuses expérimentations sur les plages sableuses et les dunes bordières, mais ils ne sont que très peu utilisés sur les terrains artificialisés

Problématique et contexte scientifique

Beaucoup de questions se posent sur la gestion du transport éolien en front de mer urbanisé ou modifié par l'homme, que ce soit au niveau des processus ou sur les formes résultantes. Bien que des systèmes de brise-vent soient couramment employés même au droit de digues promenades dans certaines stations balnéaires, aucun retour d'expérience à ce sujet n'a été recensé. Pourtant, si les techniques douces sont efficaces pour éviter l'invasion du sable et favorisent le renforcement des cordons dunaires, on peut se demander quelle pourrait être leur efficacité sur des terrains artificialisés. En effet, de telles méthodes pourraient trouver des applications afin d'éviter les problèmes d'invasion par le sable sur les espaces à forte valeur économique comme les ports.

Ces dernières années, plusieurs ouvrages et études portant sur la meilleure manière de gérer les sables mobiles sur le front de mer des espaces densément peuplés ont été publiés (Nordstrom et al., 2002 ; Nordstrom, 1988 ; Nordstrom and Jackson, 1998). Dans ce cadre, des scientifiques sont parfois sollicités afin d'établir des guides de gestion décrivant les meilleures techniques existantes pour provoquer l'accumulation du sable et favoriser le développement de dunes ou pour limiter la déflation éolienne, que ce soit sur les littoraux (Adriani and Terwindt, 1974 ; Avis, 1989 ; SNH, 2000 ; NSW, 2001 ; Favennec (coord.), 2002 ; Hotta and Harikai, 2010). Ce type de travaux est également mené pour les régions désertiques (Berte et al., 2010 ; Zhang et al., 2007 ; 2010). Ces publications techniques se contentent toutefois de ne présenter qu'un éventail de solutions. Elles ne sont pas toujours adaptées aux situations locales qui peuvent être très spécifiques. De plus, ces techniques de gestion peuvent paraître inadaptées aux environnements portuaires, qui sont soumis à des contraintes différentes que celles des plages adossées à des cordons dunaires (présence de digues et jetées).

La façade maritime du Grand Port Maritime de Dunkerque est un site fortement artificialisé de 17 km de long, caractérisé par plusieurs fonctions différentes : (1) il s'agit en premier lieu d'un site industrialo-portuaire qui combine entre autres des fonctions industrielles (13 sites SEVESO) et commerciales (accueil de navires) ; (2) Ce site est accessible au public, de ce fait il cumule une fonction récréative et de loisirs, surtout en été ; (3) Il s'agit enfin d'une réserve de biodiversité puisqu'il subsiste plus de 6 km de dunes bordières, avec une

faune et une flore d'intérêt patrimonial. Il s'agit avant tout d'un territoire à vocation économique et logistique où les sables mobiles génèrent des contraintes d'exploitation importantes. En effet, les accumulations sableuses ensevelissent des routes qui deviennent parfois impraticables, et nécessitent d'être déblayées (Figure 0.1 - A). Le sable se dépose également dans un bassin portuaire dans lequel il est nécessaire d'effectuer régulièrement des dragages d'entretien pour maintenir le tirant d'eau nécessaire à l'accueil des plus gros navires (Figure 0.2). Parallèlement à cet excès de sable, d'autres parties du site sont sujettes à un recul du trait de côte ce qui rend difficile les échanges éoliens plage/dune (Figure 0.1 - B). Il est parfois nécessaire d'avoir recours à des enrochements pour éviter l'érosion et protéger des installations proches de la côte. L'ensemble de ces mesures a un coût et gêne l'exploitation du site.



Figure 0.1. (A) dépôts éoliens sur une route portuaire (11.01.10) et (B) Erosion du trait de côte (28.02.10) (photographies, Tresca)



Figure 0.2. (A) Dépôt de sable en bordure de bassin portuaire (05.06.12) et (B) et minéralier en manœuvre dans un bassin portuaire avec au premier plan des dépôts éoliens de sable colonisés par des oyats (13.04.11) (photographies, Tresca)

Objectifs

Dans ce contexte d'approfondissement des connaissances sur la dynamique éolienne d'un site portuaire, et pour répondre aux contraintes d'exploitation engendrées par les accumulations de sable sur les infrastructures du port de Dunkerque, cette étude se propose de répondre à des questionnements regroupés selon trois thématiques différentes.

→ Les formes dunaires sur un site portuaire

Quelles formes dunaires sont susceptibles de se développer dans ce type d'environnement ? A quel rythme et sur quelle étendue ? Ces formes sont-elles différentes de celles que l'on rencontre sur les plages peu modifiées par l'homme ?

Cette façade maritime a été fortement modifiée par l'homme au fil des années, on peut se demander quelles ont été exactement ces modifications, et quelles en ont été les conséquences sur les formes dunaires que l'on retrouve le long de cette côte. Certains auteurs ont étudié les dunes bordières et proposé différentes typologies permettant de classer les formes en les associant à des dynamiques (érosion, stabilité, accrétion) (Hesp, 1984, 2002 ; Hesp & Short, 1980 ; Pye, 1983 ; Short, 1988). Les études qui tentent d'intégrer dans ces typologies les dunes modifiées par l'homme sont plus rares (Nordstrom and Arens, 1998), tout comme les travaux portant sur les conséquences de la dégradation des dunes ou sur les formes dunaires engendrées par les actions humaines et les infrastructures (Nordstrom et al., 1986). Comme Nordstrom and Arens (1998) en faisaient l'hypothèse par exemple, les digues pourraient favoriser le transport de sable, ou son dépôt lorsqu'elles créent des zones d'abri, ce qui pourrait engendrer le développement de formes dunaires spécifiques. Il existe des lacunes concernant l'observation et le recensement de ces formes dunaires (Jackson and Nordstrom, 2011). En effet, à notre connaissance, il existe très peu de travaux concernant le transport éolien et la caractérisation des formes dunaires sur des sites artificialisés, et plus spécifiquement en milieu portuaire. Des études ont pu être menées dans le cadre restreint d'autres sites portuaires, mais elles ne sont pas toujours disponibles car elles ne sont pas publiées dans des revues internationales. En outre, elles sont parfois rédigées en langue étrangère (flamand) ce qui les rend difficilement accessibles.

Afin de mieux expliquer la genèse des formes dunaires que l'on retrouve sur le site, on peut se demander quelles sont les spécificités dans les processus du transport éolien, et quelles sont les quantités de sable transportées.

→ **Le transport éolien sur une façade littorale artificialisée**

Quelles sont les caractéristiques principales du transport éolien sur un littoral artificialisé (quantités, sources) ? Existe-t-il des particularités liées à la présence d'infrastructures ou à des modifications humaines qui pourraient influencer le transport du sable par le vent ?

Dans la littérature scientifique, les principes théoriques du transport éolien ont d'abord été développées dans les régions désertiques par [Bagnold \(1937, 1941\)](#), et par la suite de nombreux auteurs ont tenté de mettre au point des modèles ([Zingg, 1963](#) ; [Kawamura, 1964](#) ; [Kadib, 1965](#) ; [Lettau & Lettau, 1978](#) ; [White, 1979](#) ; [Horikawa et al., 1984](#) ; [Hsu, 1971](#)). Les résultats de ces modèles se sont avérés très approximatifs sur les plages du fait de la complexité de ces milieux et du nombre de variables à prendre en compte ([Bauer et al., 1996](#)), et ils surestiment la plupart du temps le transport réel ([Bauer et al., 1996](#) ; [Sherman et al., 1998](#) ; [Sherman & Li, 2012](#)). A partir de ces travaux, l'essor des études portant sur la dynamique éolienne des plages sableuses se fait au début des années 1990 à partir de mesures *in situ* d'abord en contexte micro- à mésotidal ([Arens, 1994](#) ; [Bauer et al., 1996, 2002, 2009](#) ; [Nickling & Davidson-Arnott, 1990](#) ; [Psuty, 1990, 1992](#) ; [Sherman, 1990](#)), et plus récemment également sur les plages macrotidales ([Meur-Férec et Ruz, 2002](#) ; [Ruz and Meur-Férec, 2004](#) ; [Anthony et al., 2006 ; 2009](#)). L'ensemble de ces travaux ont été menés sur des plages « naturelles », mais les études sur les plages artificielles et/ou fortement anthropisées restent rares en dehors d'expérimentations menées sur des côtes où ont eu lieu des rechargements en sable ([van der Wal, 1998 ; 2001 ; 2004](#)).

Les réponses à ces questions permettraient de mieux connaître la dynamique éolienne sur la façade maritime du GPMD, ce qui permettrait de trouver des solutions afin de gérer les envols de sable sur ce site et favoriser le dépôt aux endroits voulus. C'est pourquoi nous proposons d'étudier la thématique de l'utilisation de méthodes douces du transport éolien sur un littoral artificialisé.

→ **Gestion de la dynamique éolienne sur un site artificialisé à l'aide de méthodes douces**

La plupart des guides de gestion étant adaptés à des plages et donc des substrats sableux, des tests visant à connaître l'efficacité des structures brise-vent classique sur d'autres types de surfaces telles que l'asphalte des digues seraient à mener. Nous nous posons donc la question suivante : **est-il possible d'utiliser des techniques de gestion douces habituellement utilisées en haut de plage sur d'autres types de substrats que le sable (asphalte) ?**

Organisation du manuscrit

Afin de répondre aux questions que nous avons posées, l'étude du transport éolien sur la façade maritime du port de Dunkerque s'articulera en sept chapitres. Le site sera étudié à plusieurs échelles temporelles, et à l'aide de plusieurs techniques différentes.

Dans le chapitre 1, nous présenterons tout d'abord la façade maritime du Grand Port Maritime de Dunkerque, sa localisation, ses particularités et les caractéristiques des forçages météo-marins qui l'affectent. Le chapitre 2 passera en revue l'ensemble des méthodes d'acquisition et techniques d'analyses qui ont été utilisées dans cette étude, à plusieurs échelles temporelles, de la mesure instantanées, jusqu'à l'évolution du site sur une trentaine d'années.

Les chapitres 3 à 6 analyseront les données obtenues à partir des méthodes décrites au chapitre 2. Le chapitre 3 présentera l'évolution des superficies dunaires et de la limite de végétation du site sur le moyen terme. Cette étude portant sur l'évolution du site sur une durée de 28 ans sera réalisée à partir de l'analyse diachronique de photographies aériennes, et permettra de mettre en évidence une tendance dans l'évolution de la superficie des dunes. Elle permettra également de préciser l'influence des facteurs anthropiques sur la configuration actuelle du site. Dans le chapitre 4, des levés topographiques le long de profils de plage transversaux répartis sur l'ensemble du site nous permettront de décrire les formes dunaires plus précisément et de préciser leur évolution actuelle sur le court terme (2 ans). Le chapitre 5 présentera les résultats de mesures *in situ* de quantification du transport éolien à l'aide de

pièges à sédiments. Ces données permettront de se faire une meilleure idée des processus à une échelle de temps quasi-instantanée. Dans le chapitre 6, nous comparerons l'efficacité de différents procédés de captage du sable (de type brise-vent) qui ont été installés sur le site, à la fois sur substrat sableux ainsi que sur l'asphalte.

Dans le dernier chapitre, nous synthétiserons et discuterons des résultats obtenus dans les chapitres de résultats afin d'avoir une vision globale de l'évolution des dunes sur le site, de son évolution actuelle et de la dynamique éolienne. L'ensemble de ces informations nous permettra de préconiser des mesures de gestions les plus adaptées à la façade maritime du Grand Port Maritime de Dunkerque.

CHAPITRE 1 - PRESENTATION DU SITE D'ETUDE

1. Localisation et évolution historique du site d'étude

1.1. Localisation : façade de la plaine maritime flamande

La façade maritime du Grand Port Maritime de Dunkerque s'étend sur 17 km et fait face à la mer du Nord, le long des côtes de la plaine maritime flamande (Figure 1.1). Il s'agit de la limite sud-occidentale de la vaste plaine côtière de la Mer du Nord (Sommé, 1975). Cette région basse est délimitée à l'Ouest par Sangatte, au pied des falaises du Blanc-Nez. Sa limite méridionale se prolonge vers l'Est en passant par Guînes jusqu'à Saint-Omer, où elle remonte vers le NE et la frontière Belge en passant par Bergues (Gosselet, 1893) (Figure 1.1). Les terres de la plaine maritime Flamande se situent à une altitude moyenne de 1 à 2 m NGF, ne dépassant pas 5 m, et se situent en partie sous le niveau de Pleines Mers de Vives Eaux (Pin et al., 2007).

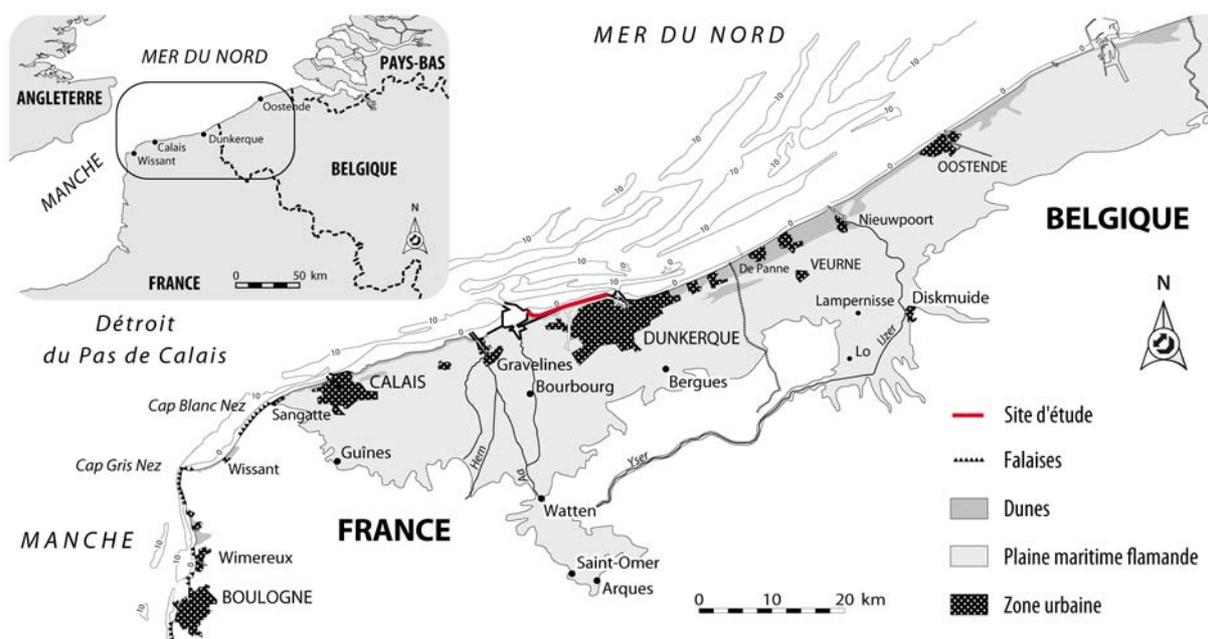


Figure 1.1 Carte de localisation de la façade maritime du port de Dunkerque et de la plaine maritime Flamande (d'après Oblinger, 2008)

Les dépôts de remplissage Holocène de cette plaine peuvent atteindre 30 m dans l'axe des anciennes vallées (Sommé, 1975 ; Baeteman et al., 1999 ; Anghony et al., 2010). Ce sont des terres inondables que l'on appelle des polders : terres conquises sur la mer par l'endiguement de marais maritimes ou de marais estuariens (Goeldner-Gianella, 2007 ; Verger, 2011). Dans le cas de la plaine maritime flamande, les terres ont été gagnées sur les espaces marécageux du delta de l'Aa au X^{ème} siècle grâce à des mesures d'assèchement et un

réseau de digues (IIW, 2007). Elle est protégée par un cordon dunaire rectiligne quasiment continu, d'une hauteur moyenne de 10 m. Ces dunes, appelées « dunes flamandes » (Briquet, 1930 ; Sommé, 1975), constituent l'unique rempart naturel de 100 à 600 m de large protégeant la plaine maritime des incursions marines.



Figure 1.2 Délimitation du site d'étude (Source de la photographie aérienne : Ortholittorale 2000)

La façade maritime du Port de Dunkerque constitue aussi la limite septentrionale d'un complexe industrialo-portuaire. De ce fait, elle est délimitée par des infrastructures (Figure 1.2) : les jetées du Clipon et du Ruytingen à l'Ouest, la jetée de St-Pol à l'Est. La limite Sud est constituée par le canal des dunes sur la moitié Ouest, et sur la moitié Est par une digue en enrobé bitumineux de 6 km de long appelée « Digue du Braek ». L'avant-côte est caractérisée par la présence de nombreux bancs sableux, ici le Braek et le Snouw, qui sont séparés de la côte par un chenal de navigation.

1.2. Evolution historique

1.2.1. L'extension du port de Dunkerque

Les premières grandes infrastructures apparaissent au XVIème siècle, dont 2 jetées de 350 m et un quai de 450 m de long à l'Est (Figure 1.3), mais l'essor et l'extension du port de Dunkerque commencent véritablement au début du XIXème siècle : Nouvelles fortifications en 1818, construction de 736 mètres de quais en 1820, arrivée de la voie ferrée en 1848, début de la construction d'un bassin à flot (future Darse 1) relié au chenal par une écluse à sas (future écluse Guillain) en 1861 (Figure 1.5). En 1903, le port de Dunkerque disposait de plus de 6 kilomètres de quais, et de 48 hectares de terre-pleins (archives du port de Dunkerque).

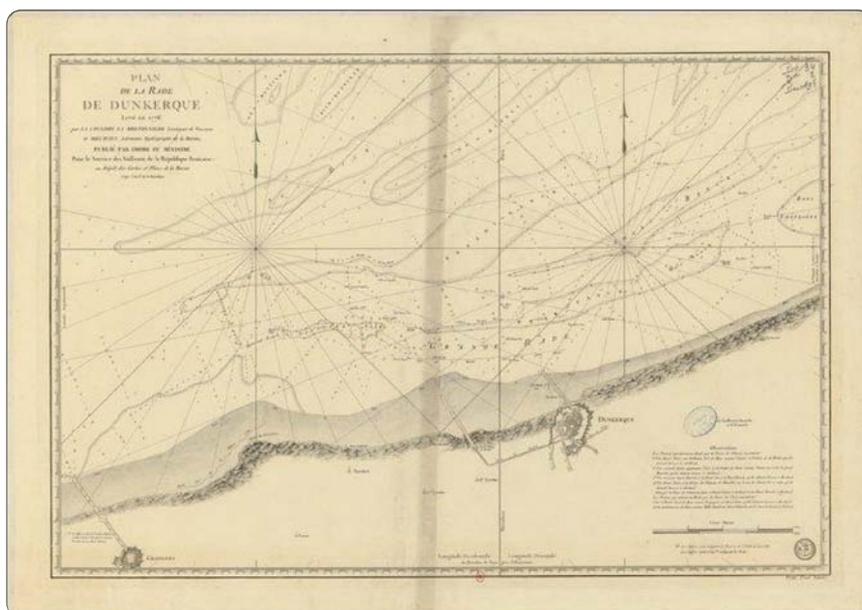


Figure 1.3 Plan de la rade de Dunkerque en 1792. Le développement de la ville se fait en arrière de l'actuel avant-port Est. Les deux anciennes jetées portuaires parallèles apparaissent sur ce plan. (Auteur : Pierre Méchain ; Source : Bibliothèque Nationale de France)



Figure 1.4 Peinture représentant les deux jetées du port ainsi que la ville de Dunkerque, à l'arrière plan, au XVII^{ème} siècle (source : musée portuaire de Dunkerque ; Photographie : M-H Ruz)

Après la première guerre mondiale, l'extension du port s'accélère, résultat d'une politique volontariste du Ministère des travaux publics et de la chambre de commerce : creusement du canal exutoire des wateringues et, de 1931 à 1934, construction d'un nouvel avant-port constitué de deux jetées convergentes, dont la jetée Ouest mesure 700 m de plus que la précédente, soit 750 m en tout. A l'aube de la deuxième guerre mondiale, 5 darses du port Est ont été creusées, et la sixième est en préparation. Les combats entre 1939 et 1945 ont détruit 90% de la ville et du port.

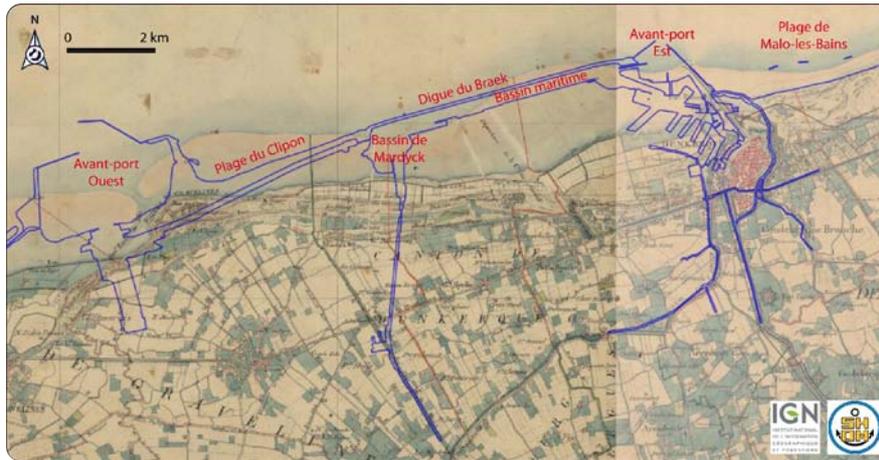


Figure 1.5 Carte d'Etat Major au 1:40.000 datant du 19^{ème} siècle, et superposition du trait de côte actuel (en bleu) Source : Geoportail, Serveur de visualisation de données géographiques et géolocalisées, © IGN 2012

Après la reconstruction, l'Etat choisit de développer « la sidérurgie sur l'eau » en 1957, afin de compenser le retour de la Sarre au sein de la République Fédérale Allemande. La ville de Dunkerque est choisie afin d'accueillir ce projet de développement industriel, en raison de l'importante réserve foncière disponible et pour sa proximité avec les centres de production et de consommation d'acier (bassin minier, Ruhr, Lorraine) (Bruyelle, 1964 ; Berger, 2006 ; Rivière et Oddone, 2010).

L'extension vers l'Ouest débuta donc en 1958 avec l'aménagement d'un nouveau bassin minéralier (Bassin Maritime) construit sur 2 km (1962) puis 5,5 km (1969) (Figure 1.6). Ce bassin est connecté l'Ouest au bassin de Mardyck, lui-même relié au sud au canal de Bourbourg. Cet ensemble est protégé de la mer au Nord par la digue du Braek qui fait 6 km de long.

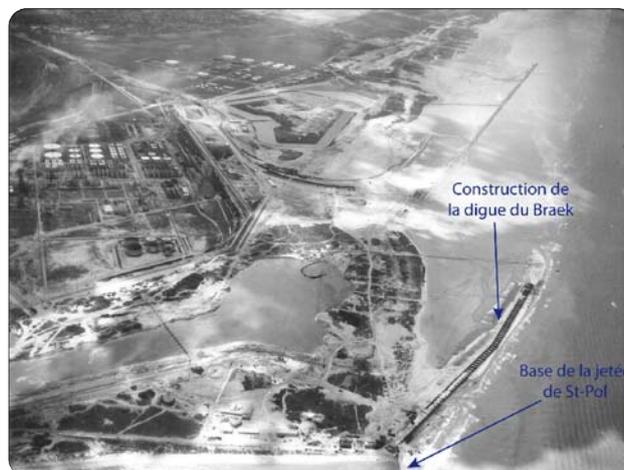


Figure 1.6 Vue aérienne oblique orientée vers le SO montrant les débuts de la construction du bassin maritime et de la digue du Braek (source : archives GPMD, 1962)

Afin de répondre aux exigences des navires de plus en plus grands (23 m de tirant d'eau, impossibilité de passer par les écluses pour accéder au bassin maritime), l'extension se poursuit par la construction d'un nouvel avant-port de 560 hectares (avant-port Ouest, Figure 1.2) à Loon-Plage, de 1971 à 1974. En 1984, un nouveau canal (canal des dunes) servant à relier l'avant-port Ouest au bassin de Mardyck est inauguré (Figure 1.7). Ce chantier a été accompagné de travaux de rechargements ainsi que de la création d'une plateforme supratidale artificielle sur la plage du Clipon (Meur-Férec et Ruz, 1998 ; Bertier, 2009) (Figure 1.7 – 1984).



Figure 1.7 Photographies prises avant (1970), pendant (1984) et après (2004) le creusement du canal des dunes (Sources : Archives GPMD, 1970 ; PAD, 1984 ; PAD, 2004)

L'ensemble de ces aménagements a modifié la façade maritime qui est aujourd'hui totalement artificielle (Figure 1.8). Les territoires gagnés sur la mer entre 1949 et 2000 représentent 10 km² (Bertier, 2009). Le trait de côte a avancé de près de 2 km par endroits. De nos jours, la façade maritime du Grand Port Maritime de Dunkerque est délimitée par deux jetées portuaires à l'Est et à l'Ouest, correspondant aux deux avant-ports. Il s'agit d'une cellule sédimentaire artificielle (Unité de Gestion n°4 – UG4) qui a été définie lors de l'élaboration du Plan Littoral d'Actions pour la Gestion de l'Erosion (PLAGE, SMCO, 2003).

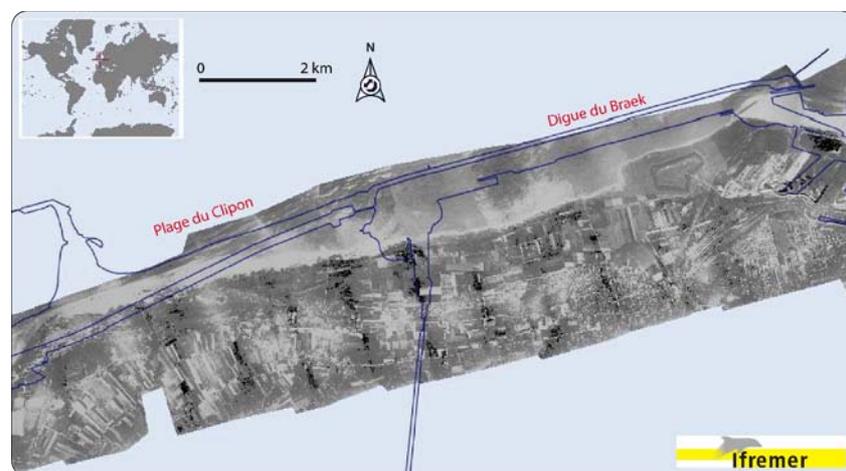


Figure 1.8 Vue aérienne de la côte en 1932 et superposition du trait de côte actuel (en bleu). Source : Sextant, Serveur de donnée géoréférencées marines, © Ifremer 2011

Le développement de cette façade maritime s'est stabilisé depuis le creusement du canal des dunes il y a 28 ans. Cependant, de nouvelles modifications sont en cours depuis la fin de l'année 2011, avec l'implantation d'un terminal méthanier en arrière du cordon bordier à l'Ouest de la plage du Clipon.

1.2.2. Un littoral artificiel où la nature reprend ses droits

L'ensemble des modifications induites par l'extension du port font de cette façade maritime de 17 km un espace totalement artificiel, gagné sur la mer. Néanmoins, la nature a commencé à reprendre ses droits, si bien que cette côte fait partie intégrante de différents périmètre de protection et d'inventaires du patrimoine naturel.

La façade maritime du GPMD constitue une Zone Naturelle d'Intérêt Ecologique Faunistique et Floristique (ZNIEFF) de type I (annexe 1.1). Ce programme initié par le Ministère de l'Environnement en 1982 a pour objectif de se doter d'un outil de connaissance des milieux naturels français. Il s'agit de secteurs caractérisés par leur intérêt biologique remarquable, ce sont donc des espaces d'inventaire, et non de protection.

L'estran de la façade maritime appartient à une Zone de Protection Spéciale, la ZPS des Bancs des Flandres (annexe 1.2). Les ZPS sont des directives européennes du réseau Natura 2000 qui doivent assurer un bon état de conservation des espèces d'oiseaux menacées, vulnérables ou rares ([Directive Européenne 92/43/CEE](#)). Au sein de la ZPS Bancs des Flandres, 25 espèces d'oiseaux ont été recensés, dont 10 espèces pour lesquelles un régime de protection doit être établi ([Directive Européenne 79/409/CEE](#)).

Le Grand Port Maritime de Dunkerque, par l'intermédiaire du service Management de l'Environnement, met en œuvre une politique environnementale, et à ce titre protège et développe la biodiversité au sein de sa circonscription à l'aide d'un document intitulé Schéma Directeur du Patrimoine Naturel (SDPN). Dans le cadre de l'élaboration de ce document d'orientation, des inventaires de la biodiversité ont été réalisés (faune et flore) ([Biotope, 2007](#) ; [TBM, 2008](#)). Dans les dunes du Clipon et sur la digue du Braek, trois espèces patrimoniales d'oiseaux ont été recensées (Sterne naine, Grand gravelot et Gravelot à collier interrompu), ainsi que 8 espèces végétales protégées (annexe 1.3 à 1.5).

2. Conditions météorologiques et hydrodynamiques générales et contexte sédimentaire régional

2.1. Les différents types de temps

Les distributions de la vitesse et de la direction du vent le long du littoral de la plaine maritime flamande ont des caractéristiques bien distinctes selon les saisons. L'étalement directionnel est plus fort en automne et en hiver, les vents faibles soufflant dans toutes les directions. On y observe une part importante de vents forts en provenance du NE et du secteur OSO (Figure 1.9). Au printemps et en été, les vents du SO dominant.

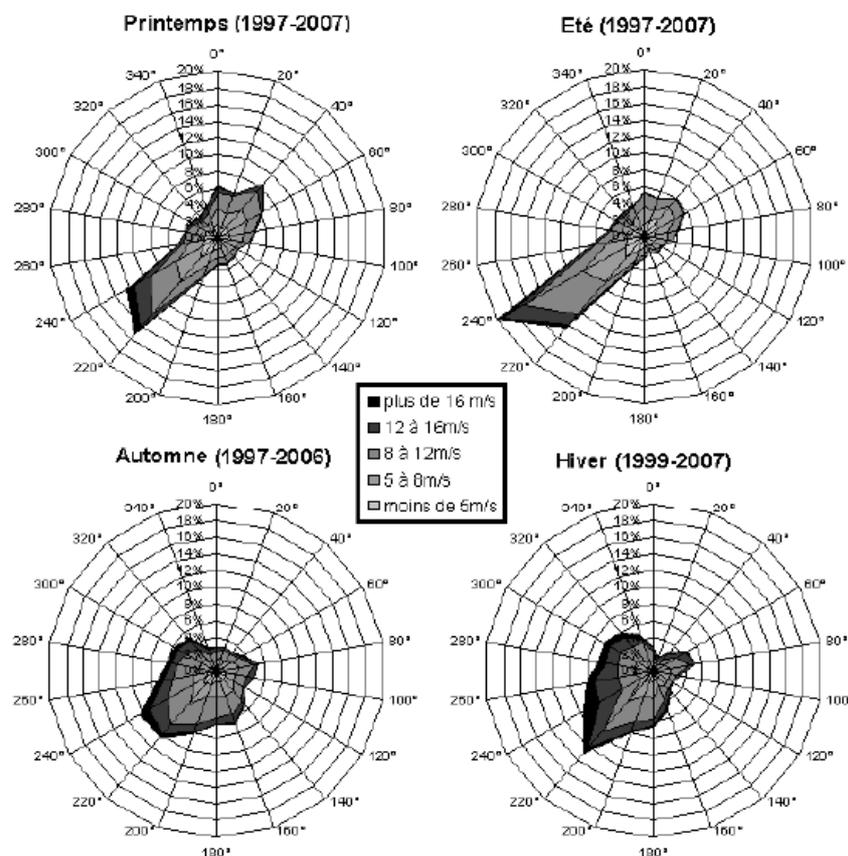


Figure 1.9 Roses des vents saisonnières (Données VLIZ, pas de temps de 10 minutes, Westhinder, 1997-2007, d'après Guerber et al., 2008)

Les variations saisonnières peuvent être expliquées par différents types de temps qui se produisent selon la position des masses d'air, et les changements d'état de surface (terres, océans) qui engendrent de forts contrastes thermiques (SHOM, 1999). Ces observations ont été synthétisées à plusieurs reprises (Sipka, 1998 ; Vanhée, 2002).

Des perturbations sont généralement à l'origine des vents du secteur O à SO, du fait de la présence d'un anticyclone au sud des Açores, qui s'étend jusqu'au SO de l'Europe, et d'une zone dépressionnaire au NE de l'Atlantique (SHOM, 1999).

Les coups de vents de Nord se produisent généralement en hiver jusqu'au début du printemps. A cette période de l'année, l'anticyclone subtropical remonte l'océan Atlantique vers l'Islande, tandis que la dépression qui est au Nord se déplace vers la Scandinavie, à l'Est. Les vents qui en résultent sont souvent irréguliers et peuvent être violents, en raison du fort contraste entre les masses d'air froides d'origine Arctique, et la température de la surface de la mer.

Enfin, les vents de NE à E sont engendrés par un flux d'Est perturbé ou non, lorsque l'anticyclone qui se trouve au niveau de la Scandinavie se prolonge par une dorsale en direction de l'Ouest du Golfe de Gascogne. Cette configuration entraîne à la fin de l'hiver de l'instabilité due au fort contraste entre l'air originaire du continent et la mer.

2.2. Rose des vents à Dunkerque

Les vents qui affectent le littoral Dunkerquois sont caractérisés par une forte proportion de vitesses intermédiaires, comprises entre 4 et 8 m.s⁻¹ (43,7%) (Figure 1.10-A). Les vents forts, compris entre 8 et 12 m.s⁻¹, représentent 17,5% du total, et les vents très forts supérieurs à 12 m.s⁻¹ seulement 3,6%.

Deux provenances de vents principales affectent la côte (Figure 1.10-A). Les vents dominants proviennent du secteur O à OSO. Ils soufflent parallèlement à l'orientation générale du trait de côte de l'UG4 (Figure 1.10-B) et représentent 31,9% du total. La part de vents de terre, notamment en provenance de SSE à SSO (Figure 1.10-B), est presque équivalente avec 29,3%. En revanche, 57,4% des vitesses supérieures à 12 m.s⁻¹ (et 52,8% des vitesses comprises entre 8 et 12 m.s⁻¹) sont issues de vents longitudinaux du secteur SO à ONO, alors que cette part représente seulement 5,2% (et 11,9% pour les vents de 8 à 12 m.s⁻¹) pour les vents de terre (SSO à SE) (Figure 1.10-A).

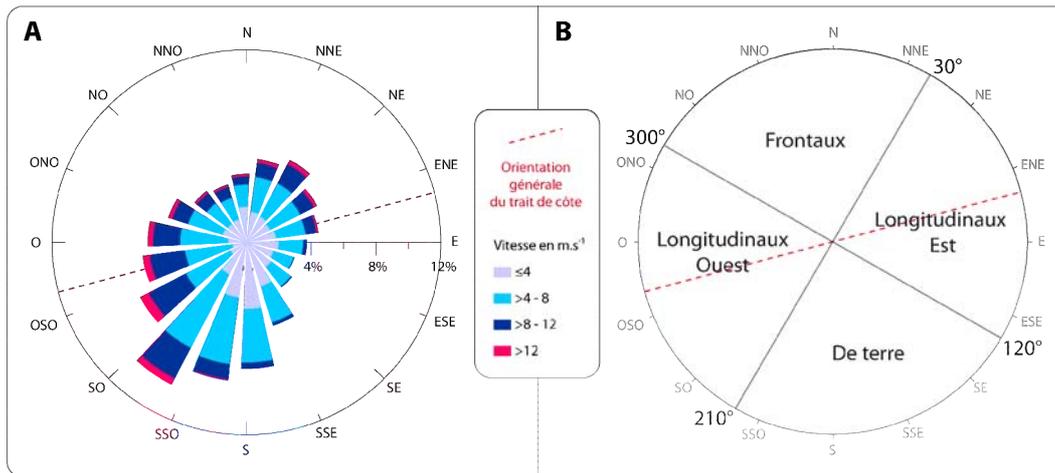


Figure 1.10 (A) Rose des vents à Dunkerque (données trihoraires MétéoFrance 01.01.1991-31.08.2007) ; (B) Schéma des vents frontaux, de terre et longitudinaux par rapport à l'orientation générale du trait de côte

La seconde composante principale provient du secteur N à ENE (Figure 1.10 Figure 1.9-A). Ce sont des vents qui soufflent de manière parallèle à oblique par rapport à la côte (Figure 1.10-B). Les vents longitudinaux en provenance de NE à ESE représentent 19,9% du total, et les vents frontaux 18,9%. Ces vents frontaux sont, de manière générale, plus intenses (22,1% des vents supérieurs à 12 m.s^{-1}) que les vents longitudinaux en provenance d'Est (15,3% des vents supérieurs à 12 m.s^{-1}).

2.3. Précipitations

La hauteur moyenne annuelle de précipitations à Dunkerque est de 687,9 mm. La pluviométrie est relativement bien répartie sur toute l'année (Figure 1.11), bien que la saison la plus arrosée se situe entre septembre et janvier. La hauteur moyenne mensuelle de précipitations est de 58 mm.

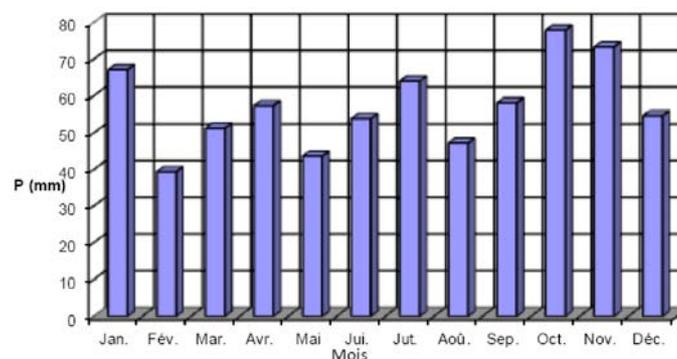


Figure 1.11 Répartition mensuelle des précipitations au sémaphore de Dunkerque (IDRA Environnement, 2012)

2.4. Les conditions hydrodynamiques générales

2.4.1. La marée

Le régime tidal de la côte d'Opale est semi-diurne, soit une périodicité marquée par deux pleines mers et deux basses mers par jour, et une période moyenne de 12 heures et 24 minutes. Le régime de marée présente également des oscillations cycliques (SHOM, 2011) :

- Un cycle semi-lunaire (morte eau / vive eau) sur une période de 14 jours.
- Un cycle lunaire (grande vive-eau / petite vive-eau) sur une période de 28 jours.
- Un cycle semi-annuel (solstice / équinoxe) sur une période de 6 mois.
- Le cycle Saros sur une période de 18,6 ans. Le niveau moyen des pleines mers augmente de 3% par an durant 9 ans, puis diminue de 3% par an pendant 9 ans (Gratiot et al., 2008).

Le marnage au niveau du littoral Dunkerquois est de type macrotidal. A Dunkerque, la valeur du marnage de vive-eau (coef. 95) est de 5,45 m, et 3,50 m lors du marnage de morte-eau (coef. 45) (Tableau 1.1).

Tableau 1.1. Cotes des niveaux marins calés sur le zéro hydrographique à Dunkerque (CM : Cote Marine)
(Source : SHOM, 2011)

		CM (m)
Plus Hautes Mers Astronomiques	PHMA	6,48
Pleines Mers de Vives-Eaux	PMVE	6,05
Pleines Mers de Mortes-Eaux	PMME	5,00
Niveau Moyen	NM	3,24
Basses Mers de Mortes-Eaux	BMME	1,50
Basses Mers de Vives-Eaux	BMVE	0,60
Plus Basses Mers Astronomiques	PBMA	-0,01

La circulation des masses d'eau liée à la marée est caractérisée par l'alternance de deux courants s'écoulant parallèlement à la côte. Le courant de flot est lié à la phase montante de la marée, il est dirigé vers l'Est sur la façade de la mer du Nord. Le courant de jusant est lié à la phase descendante, et dirigé vers l'Ouest. En raison de la forte amplitude de la marée, la vitesse des courants de marée est élevée (jusqu'à $1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$), et il existe une dissymétrie : le courant de flot est caractérisé par une vitesse plus élevée et par un temps d'action plus court que le courant de jusant (Bonnefille et al., 1971 ; Vicaire, 1991).

2.4.2 Les houles

Les houles dominantes au large de Dunkerque (Bouée Westhinder) (Figure 1.11) proviennent du SO et de l'OSO. Il s'agit des houles de la Manche qui se propagent en Mer du Nord. Une deuxième composante dominante est caractérisée par des houles de secteur NO à NE en provenance de la Mer du Nord. Lors de conditions modales, les hauteurs de houles au large sont modérées, les hauteurs significatives ne dépassant pas 1 m dans plus de 50% des observations (Figure 1.12). Lors de tempêtes, la hauteur significative des vagues peut dépasser 5 m.

Dans le Sud de la Mer du Nord, les vagues à la côte sont généralement de secteur N à NO, ce qui sous-entend une réfraction importante des vagues de secteur SO à OSO (ce secteur représente 40 % des observations contre 47 % du secteur Nord) enregistrées au large (Corbau, 1995 ; Sipka, 1998). Ce secteur SO à OSO correspond à celui des vents dominants. Cette réfraction résulte des nombreux bancs tidaux qui parsèment l'avant-côte peu profonde de la Mer du Nord. Il en découle une forte diminution de la hauteur des vagues et donc une atténuation importante de l'énergie de la houle à la côte. Près du littoral, 80% des vagues ont une hauteur inférieure à 1,2 m à Dunkerque (Cliques et al., 1986).

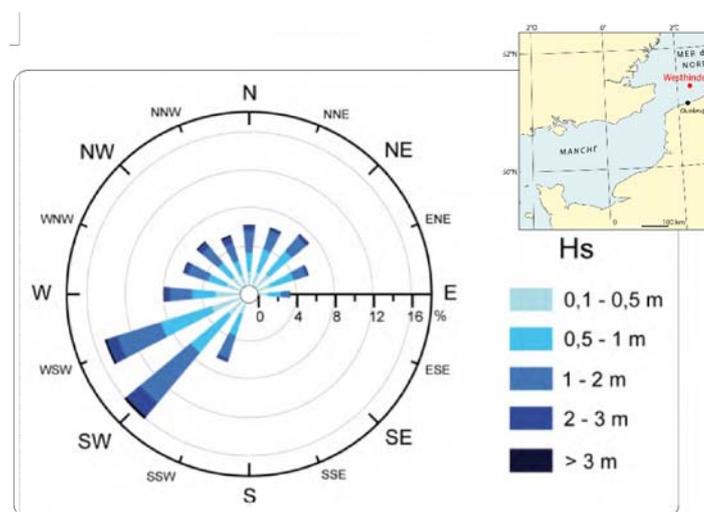


Figure 1.12 Rose des houles (Hs : hauteurs significatives) (Bouée Westhinder 1997-2007, Héquette et Moses, 2008 ; Maspataud, 2011) (Source des données : Agency for Maritime Services and Coast – Division COAST, Belgique)

La distribution des houles au large se différencie en deux saisons qui coïncident avec celles du vent (Bonnetille et al., 1971). D'avril à octobre, les houles les moins hautes (inférieures à 1,25 m) sont fortement dominantes (70 à 90 %). De mai à août, 45 à 50 % des hauteurs sont inférieures à 0,5 m. Les vagues de 1,25 à 2,5 m représentent ici environ 30 % des cas, et environ 10 % des vagues ont des hauteurs comprises entre 2,5 et 6 m.

Les mois d'octobre à mars sont caractérisés par une plus grande agitation du plan d'eau. Les vagues inférieures à 0,5 m représentent moins de 40 % des observations. Si les vagues comprises entre 0,5 et 1,25 m restent aussi fréquentes, on note une sensible augmentation des vagues les plus hautes. Celles comprises entre 1,25 et 2,5 m représentent entre 30 et 40 % des cas et celles entre 2,5 et 6 m entre 10 et 20 % des cas. Les vagues supérieures à 6 m ne représentent que 1 % des cas (Sipka, 1998).

2.5. Les surcotes

Des surcotes peuvent venir s'ajouter ou se soustraire aux cotes de marnage (tab. 1) (Chaverot, 2006 ; Maspataud, 2011). Ces surcotes peuvent premièrement provenir de variations de la pression atmosphérique. Une baisse ou une hausse d'un hectopascal se traduira respectivement par une élévation ou un abaissement d'un centimètre du niveau du plan d'eau. En outre, les surcotes peuvent être engendrées par des vents d'afflux (vents persistants soufflant vers ou parallèlement à la côte) qui engendrent des forces de pression accumulant les eaux de surface vers le littoral. Ces deux phénomènes peuvent s'ajouter et engendrer des surcotes importantes, c'est-à-dire la différence entre les cotes de pleine mer observée et prédite. A Dunkerque, la surcote annuelle a été estimée à 1,04 m, la surcote décennale à 1,49 m, et la surcote centennale à 1,94 m (Clique et Lepetit, 1986). Plus récemment, ces périodes de retour ont été actualisées à 1,80 m (décennale), 2,15 m (cinquantennale) et 2,25 m (centennale) (Maspataud et al., 2012). Lorsque le phénomène de surcote se produit à marée haute, il induit souvent des événements érosifs majeurs (Vasseur et Héquette, 2000 ; Clabaut et al., 2000 ; Ruz et Meur-Férec, 2004 ; Ruz et al., 2009).

2.6. Dynamique sédimentaire régionale

En raison de la dissymétrie des courants de marée et de la provenance dominante des houles d'OSO, le transport sédimentaire résiduel induit est parallèle à la côte et dirigé vers la Belgique le long de la plaine maritime Flamande (Anthony et Héquette, 2007 ; Héquette et al., 2008a ; Cartier et Héquette, 2011). Les courants de flot peuvent en outre être renforcés par les vents de secteur ouest qui sont les vents dominants dans la région. A long-terme, en Manche et en Mer du Nord, cette circulation résiduelle résulte de la dominance, soit du flot, soit du jusant, associée à un courant de dérive littorale unidirectionnelle, vers l'Est, par la houle (Kenyon et Stride, 1970 ; Augris et al., 1990).

Dans les petits fonds, ce transport résiduel dominant peut cependant être localement perturbé par la présence des bancs sableux de l'avant-côte (Figure 1.13) au niveau desquels on observe des transports en directions contraires entre les deux flancs opposés des bancs (De Moor et Lanckneus, 1989 ; Trentesaux *et al.*, 2004 ; Héquette *et al.*, 2008b). Ces nombreux bancs tidaux complexes constituent, à l'avant côte, un domaine morpho-sédimentaire particulier. En effet, ils représentent un important stock sédimentaire (Battiau-Queney *et al.*, 2003), sous forme de bancs sableux, au large, surtout remarquables lors d'une forte houle avec un déferlement important sur leurs crêtes. Sous l'action conjuguée des houles de tempête et des courants de marée, les bancs longitudinaux les plus proches ont tendance à migrer vers la côte (Tessier *et al.*, 1999 ; Héquette et Aernouts, 2010).

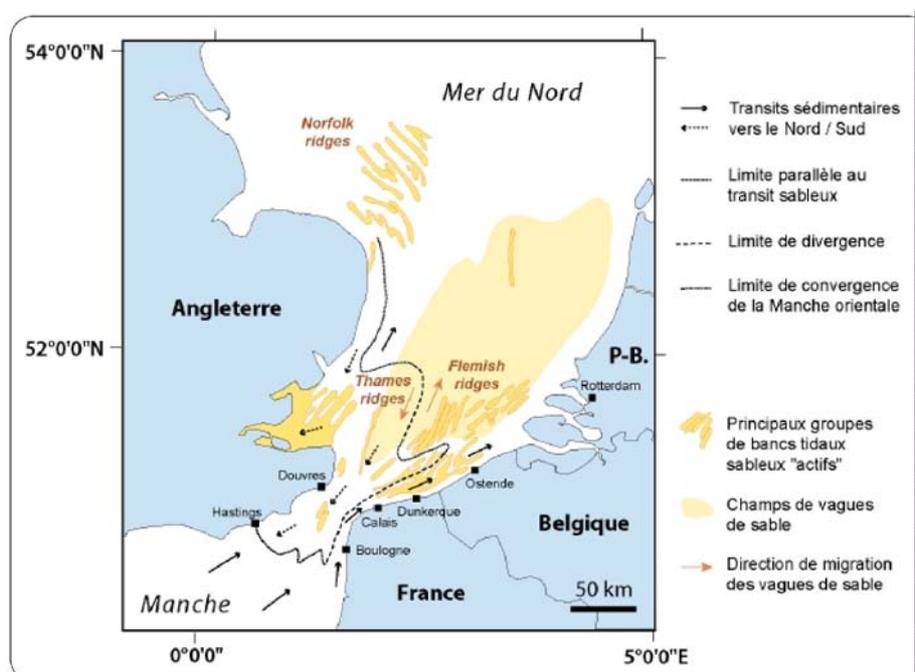


Figure 1.13 Orientation des transits sédimentaires à la jonction Manche-Mer du Nord et localisation des principaux groupes de bancs tidaux et vagues de sable (modifié, d'après Dewez *et al.*, 1989 ; Stride, Belderson *et al.*, 1982 ; McCave, 1971 ; Houbolt, 1968 in Maspataud, 2011)

2.7. Variations du niveau marin relatif

La remontée du niveau marin a été très faible pendant plusieurs millénaires, mais depuis le milieu du XXe siècle, il semble qu'il y ait une tendance à l'accélération de l'élévation du niveau de la mer, comme le long de très nombreuses côtes dans le monde (Paskoff, 2001). Les données marégraphiques au niveau du port de Dunkerque sont très fragmentaires, les enregistrements ayant fait défaut pendant parfois plusieurs années

consécutives (près de 10 ans dans les années 1990 pour Dunkerque) (Chaverot *et al.*, 2005). En revanche, les données marégraphiques du service permanent du niveau moyen des mers (PSMSL) sont plus complètes pour la station marégraphique d'Oostende située à peu de distance à l'Est de Dunkerque (Figure 1.1).

À Ostende, l'élévation du niveau de la mer a été de 1,18 mm/an en moyenne entre 1937 et 2010 (Figure 1.14). A Dunkerque, le rythme de la hausse du niveau marin aurait été de l'ordre d'1,74 mm/an pour la période 1942-2011. Cependant, les observations faites à Ostende montrent une accélération plus importante à la fin de la période de mesure, avec une hausse moyenne de 4,84 mm/an entre 1991 et 2010. Ces données très disparates soulèvent le problème de la fiabilité des mesures et ne permettent pas d'estimer avec la précision souhaitée l'élévation récente du niveau de la mer ; elle serait comprise entre 1 et 2 mm/an le long de la côte d'Opale.

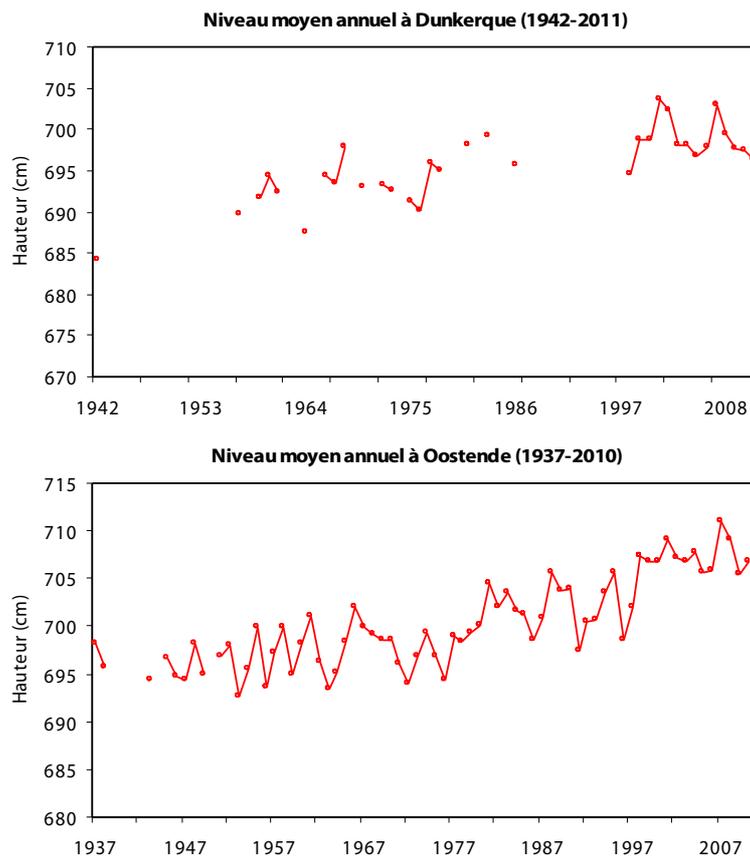


Figure 1.14 Variations récentes du niveau marin relatif pour les stations de Dunkerque et Oostende (Source : PSMSL)

CONCLUSION

La façade maritime du Grand Port Maritime de Dunkerque est un littoral totalement artificialisé qui s'étend sur 17 km de long. Il s'agit d'une cellule sédimentaire encadrée par deux jetées portuaires de plusieurs centaines de mètres de long. Elle se situe sur la côte de la plaine maritime flamande, qui est un polder dont les terres se situent sous le niveau des Pleines Mers de Vives Eaux, dans un contexte de remontée du niveau moyen de la mer.

Le site d'étude, orienté OSO-ENE, est soumis à des vents dominants originaires du secteur SO à OSO, donc parallèles à la côte. Ces vents, ainsi qu'une deuxième composante comprenant les vents de N à NE qui soufflent longitudinalement à obliquement, peuvent induire des surcotes. Le régime macrotidal est dominé par le courant de flot, et les houles dominantes au large proviennent de l'Ouest, induisant un transport sédimentaire résultant orienté vers l'Est.

CHAPITRE 2 - MÉTHODOLOGIE, TECHNIQUES D'ACQUISITION ET D'ANALYSE DES DONNÉES

INTRODUCTION

Les résultats de cette thèse sont basés en grande partie sur des mesures *in situ*, complétées par une étude de photographies aériennes pour déterminer l'évolution du site depuis 30 ans. Les objectifs des différentes techniques utilisées étaient de : (1) caractériser l'évolution du site (plage et dunes) à moyen et à court terme ; (2) quantifier le transport éolien sur le haut de plage, le versant dunaire et sur la digue ; (3) trouver des solutions pour capter le sable sur la digue, et renforcer la dune bordière au niveau de la plage du Clipon.

Ce chapitre présentera tout d'abord les différentes structures mises en place pour favoriser le captage du sable et quantifier l'accumulation éolienne le long de l'UG4.

Dans une deuxième partie, nous détaillerons les instruments utilisés pour les mesures topographiques qui ont permis de quantifier l'accumulation éolienne dans les structures ; le même matériel a servi à suivre l'évolution topographique du site à court terme par l'intermédiaire de 14 profils topographiques.

Dans la troisième partie, nous présenterons les techniques et logiciels utilisés pour l'étude de l'évolution des dunes et de la végétation à moyen terme.

Enfin, nous détaillerons les types de pièges à sédiments qui ont servi à mesurer le transport éolien *in situ*, ainsi que les appareils qui ont permis d'enregistrer les paramètres environnementaux (vitesse et direction du vent, humidité, précipitations, hauteur d'eau).

1. Quantification de l'accumulation éolienne à l'aide de structures brise-vent

Des structures brise-vent ont été implantées à la fois en pied de dune sur la plage du Clipon et sur la digue du Braek afin de quantifier le dépôt éolien. Il s'agit d'obstacles verticaux de perméabilité et de hauteur variable qui réduisent la vitesse du vent à proximité du sol, ce qui limite la déflation et provoque le dépôt du sédiment transporté ([Rosenberg, 1974](#)). Le choix des types de structures a été fait en fonction de plusieurs critères. Des barrières semi-perméables reliées entre-elles par des pieux ont été utilisées, car il s'agit d'une technique couramment utilisée chez les gestionnaires pour le renforcement des dunes bordières ([Favenec, 2001](#)). Parmi des différents types de matériaux habituellement utilisés, trois types ont été choisis : ganivelles (lattes de châtaignier), fascines (branches de saules plantées verticalement) et filets synthétiques. Il s'agit de brise-vent légers, faciles à mettre en œuvre, contrairement aux palissades de planches et cordons tressés utilisés au siècle dernier

(Favenec, 2001). Le faible coût de ces matériaux a également permis l'installation de plus de structures, étant donné le budget financier alloué à cette étude. La hauteur des brise-vent a été établie à 1,2 m et la porosité à 50 %. Il s'agit des critères de dimensionnement qui favorisent le plus l'accumulation (Hotta & Horikawa, 1990 ; Cornelis & Gabriels, 2005). Quant à l'espacement entre les rangées, il doit être de 4 m minimum pour cette hauteur. Des rangées plus serrées provoqueraient un effet contreproductif pour des raisons aérodynamiques (Hotta et al., 1991 ; Cornelis & Gabriels, 2005).

1.1. Expérimentations de renforcement de la dune bordière

1.1.1. Types de structures test

Des structures test visant à favoriser le dépôt de sable pour le renforcement de la dune bordière sur la plage artificielle du Clipon ont été déployées au mois de juillet 2010. Outre le fait de tester le dépôt potentiel le long de ce trait de côte artificiel, cette méthode avait plusieurs objectifs :

→ Comparer l'efficacité de piégeage de structures identiques installées à des emplacements différents afin d'évaluer le rôle de la distance de fetch sur l'accumulation potentielle. Deux secteurs (C1 & C2) (Figure 2.1) ont été aménagés à cet effet avec 3 rangées de fascines (branches de saule d'1,20 m hors sol) érigées par rangées parallèles de 6 m de long et séparées de 4 m, disposées perpendiculairement au trait de côte et aux vents dominants. Ces deux secteurs sont séparés par une distance de 400 mètres. Dans les deux cas, les fascines ont été plantées de part et d'autre de la limite des Plus Hautes Mers Astronomiques (PHMA).

→ Comparer différents procédés de renforcement du pied de la dune bordière, proches les uns des autres afin qu'ils soient exposés aux mêmes conditions. A cet effet, 4 emplacements ont été aménagés dans la partie Ouest de la plage du Clipon (Figure 2.1), où les structures ont été placées au-delà du niveau des PHMA :

- **C3a** : deux casiers contigus de ganivelles de 4 m x 3 m, d'une porosité de 50%, ancrés sur des pieux en châtaignier, et d'une hauteur d'1,20 m hors sol.
- **C3b** : une falaise dunaire reprofilée à la pelle selon la même pente que les secteurs dunaires voisins.
- **C3d** : trois rangées de fascines (branches de saule) de 3 m de long disposées parallèlement les unes aux autres avec un espacement de 4 m et perpendiculairement au trait de côte, d'une hauteur d'1,20 m hors sol.

- **C3e** : trois rangées de filets synthétiques de 3 m de long et d'une porosité de 50%, disposées parallèlement les unes aux autres avec un espacement de 4 m et perpendiculairement au trait de côte, ancrées sur des pieux en châtaignier, et d'une hauteur d'1,20 m hors sol.

→ Suivre le comblement d'une brèche dans la dune bordière. Dans cette zone nommée **C3c** (Figure 2.1), une importante brèche dunaire de 30 m de large a été fermée par 7 casiers de ganivelles (porosité de 50 %) de 4 m x 3 m, fixés sur des pieux en châtaignier, et situés dans l'alignement de la dune bordière située de part et d'autre. Au devant des casiers ont été disposées, sur le haut de plage, 8 rangées de fascines (branches de saule) de 3 m de long, parallèles et espacées de 4 m. Les ganivelles et fascines ont une hauteur de 1,20 m hors sol.

1.1.2 Localisation des structures de captage sur la plage du Clipon

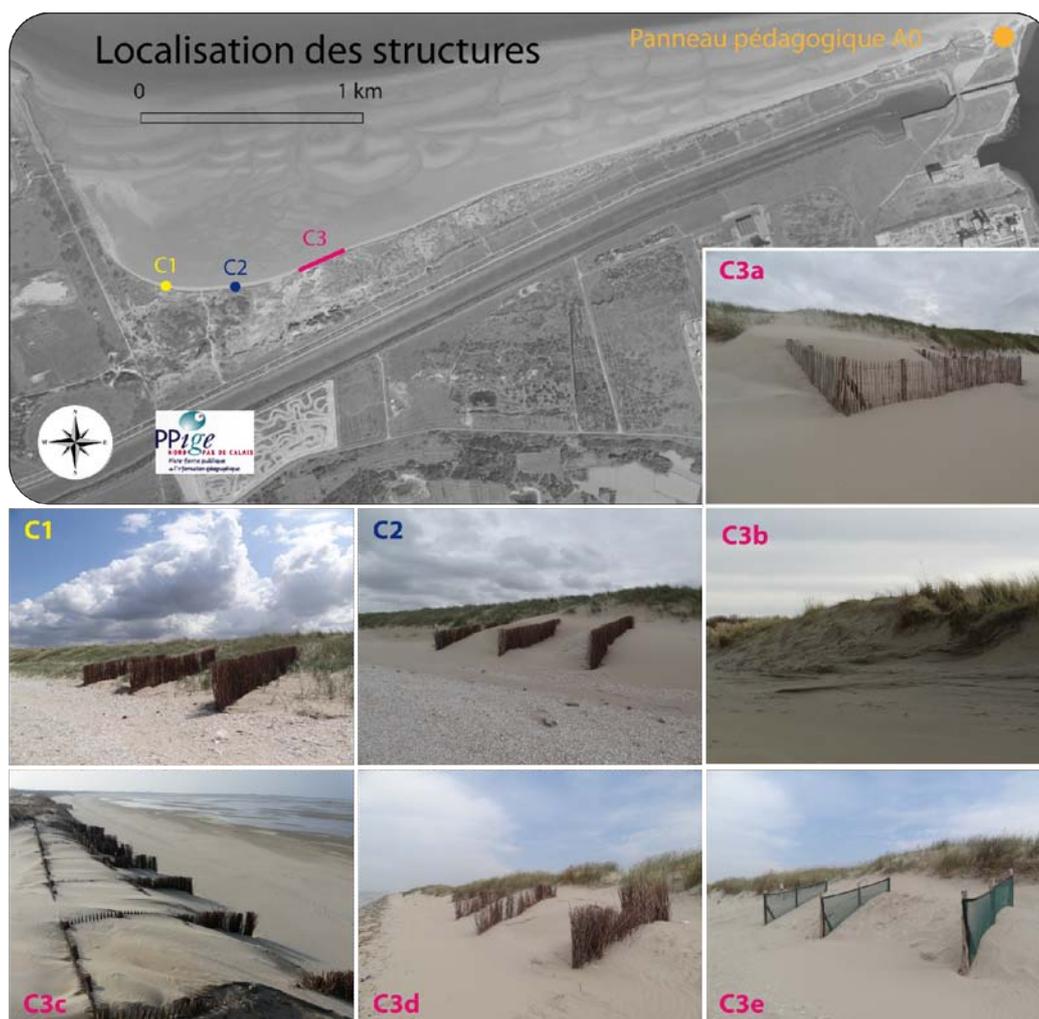


Figure 2.1. Localisation des structures de captage du sable sur la plage du Clipon

Chaque emplacement (C1, C2 & C3) est séparé par une distance d'environ 400 m. Au niveau de C3, les structures sont espacées de 50 à 100 m. L'implantation de chaque structure a été accompagnée de la pose d'une signalisation par l'intermédiaire de 5 panneaux pédagogiques au format A3 au niveau des principales zones d'accès piétonnes à la plage, ainsi qu'un panneau A0 au niveau de la seule route d'accès à la plage du Clipon (route de la capitainerie, qui longe le canal des dunes) (Figure 2.1).

1.2. Expérimentations de captage du sable sur la digue du Braek

Dix structures ont été installées sur la digue du Braek à partir du mois de février 2011. Plusieurs objectifs différents ont guidé le choix de l'emplacement des structures. L'objectif principal était de trouver le meilleur endroit pour piéger le sable, afin d'éviter l'ensevelissement de la route située en arrière de la digue. De plus, ces tests nous aideront à déterminer s'il est possible de favoriser le développement de dunes sur ce type de substrat en asphalté, afin de protéger le pied de digue et d'améliorer le paysage et la biodiversité.

1.2.1. Types de structures et technique d'implantation

Le même type de brise-vent que ceux habituellement utilisés sur le haut de plage a été testé sur la digue en asphalté. L'impossibilité de faire des trous dans le substrat afin d'ancrer les structures nous ont amené à imaginer un système de fixation différent. Ainsi, ganivelles et filets synthétiques (les fascines n'ont pas été testées car trop difficiles à implanter), tous d'une hauteur d'1,2 m avec une porosité de 50 %, ont été fixés sur des pieux en châtaignier eux-mêmes fichés dans des blocs en béton de 100 kg chacun, afin de résister au basculement lors de grands vents.

1.2.2. Localisation sur la digue

Sept structures espacées d'une centaine de mètres maximum les unes par rapport aux autres ont été installées dans la partie Est, près de dunes qui se sont développées en pied de digue. Trois autres ont été disposées au centre et à l'Ouest, afin de comparer le captage de sable à ces différents emplacements (Figure 2.2). Les structures expérimentales ont été implantées à différents endroits sur le profil (Figure 2.2 et **Figure 2.3**), toujours hors d'atteinte des plus hauts niveaux d'eau :

→ **D1** : En pied de digue au contact du haut de plage : deux casiers de ganivelles de 4,5 m x 3 m placés longitudinalement au trait de côte et situés dans le prolongement Ouest de dunes qui se sont développées en pied de digue.

→ **D2** : A la base du versant interne de la digue (au niveau de la route), une palissade linéaire en filets synthétiques de 12 m de long placée parallèlement à la digue.



Figure 2.2. Localisation des structures expérimentales de captage du sable sur la digue du Brack.

→ **D3** : Sur le versant externe (côté mer), un brise-vent en étoile composée de filets synthétiques. Un pieu est placé au centre de la structure, sur lequel 4 filets seront ancrés, et à partir duquel ils se répartiront en étoile à 90° les uns par rapport aux autres. L'intérêt de cette disposition réside dans le fait de pouvoir observer où se dépose le sable autour de la structure (dans l'un des quatre compartiments) en fonction de la direction du vent.

→ **D4** (avec ses 3 déclinaisons D4a, b et c, installés plus à l'Ouest) : sur la pente de la digue côté mer, un casier de ganivelles de 4,5 m x 3m, à l'intérieur duquel 50 cm de sable a été déposé et où des plantations d'oyats ont été effectuées. L'objectif de ces plantations était d'observer comment se comportait l'oyat dans ces conditions à priori inhospitalières (présence d'asphalte).

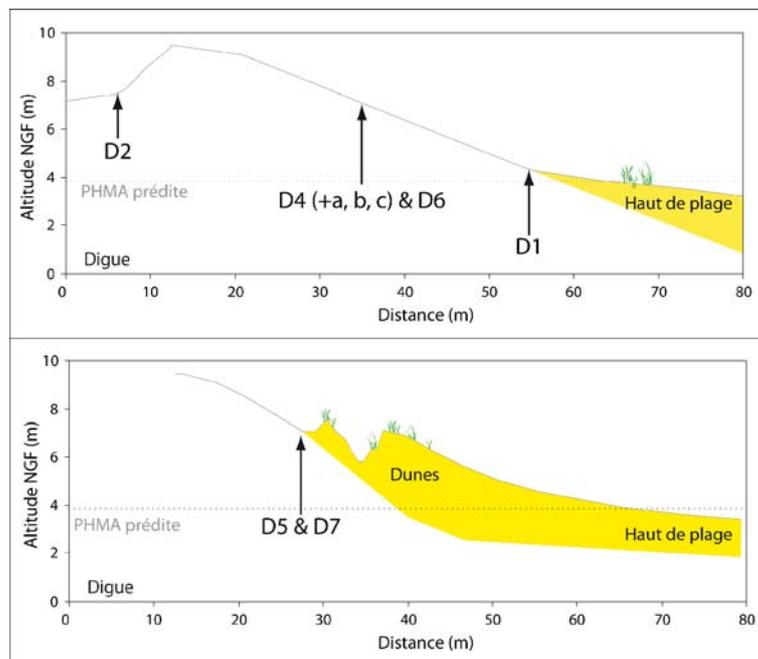


Figure 2.3. Localisation des structures expérimentales de captage du sable sur le profil de digue.

→ **D5** : un casier de ganivelles de 4,5 m x 3 m placé sur le versant externe, en arrière d'un couloir de déflation orienté Nors-Sud traversant des dunes qui se sont développées en pied de digue.

→ **D6** : la même configuration que D4, avec un brise-vent composé de filets synthétiques.

→ **D7** : un casier de filets synthétiques de 4,5 m x 3 m placé sur le versant externe, en arrière d'un couloir de déflation dans les dunes de pied de digue (même configuration que D5, une centaine de mètres plus à l'Est).

Afin de communiquer au maximum sur la raison d'être de ces équipements, des panneaux pédagogiques ont également été disposés au niveau de chaque structure (format A3), ainsi qu'aux deux points d'accès à la digue du Braek (format A0, Figure 2.2).

2. Mesures topographiques de terrain et restitution 2D/3D

2.1. Levés à l'aide de systèmes de positionnement par satellite GNSS

2.1.1. Matériel

De nombreuses mesures topographiques de terrain ont été réalisées grâce à deux systèmes de positionnement par satellite GNSS (Global Positioning Satellite System), comprenant les signaux du système américain GPS (Global Positioning System) et russe GLONASS. L'utilisation de deux récepteurs différents, avec néanmoins une précision de mesure comparable, a été rendue nécessaire pour des raisons d'indisponibilité de l'un ou de l'autre selon les périodes. Les deux matériels différents utilisés dans cette étude sont :

→ *Leica TPS Syst 1200*

Ce système différentiel est composé d'une base fixe et d'une antenne mobile qui communiquent par signal radio. La base fixe est positionnée sur un point haut, généralement le sommet de dune au centre de la surface à mesurer, afin d'éviter les masques topographiques qui peuvent altérer le signal radio. La partie mobile est constituée d'une canne sur laquelle sont fixés une antenne de réception du signal satellite et un ordinateur de bord permettant l'enregistrement des données. Les deux récepteurs (fixe et mobile) se positionnent et se synchronisent par rapport aux mêmes satellites. La base fixe compare ensuite sa position avec celle rentrée par l'opérateur lors de l'installation du matériel et en déduit des corrections qu'elle envoie à l'antenne mobile, pour lui permettre de calculer le plus précisément possible sa position en x, y et z. La marge d'erreur matériel du constructeur est estimée à ± 2 cm en planimétrique, et ± 3 cm en z. Le système de référence spatial de ce récepteur est le Lambert 1 zone.

→ *Trimble R8*

Ce système n'est constitué physiquement que d'une partie mobile, matérialisée par une canne portant une antenne de réception du signal satellite, ainsi que d'un ordinateur de bord enregistrant les données. Le récepteur est connecté au réseau orphéon, comportant 170 stations permanentes réparties sur l'ensemble du territoire métropolitain (Figure 2.4), et auquel on accède par un système d'abonnement (abonnement annuel du GPMD). Le Réseau Orphéon associé au récepteur *Trimble R8* permet une précision de mesure de 3 cm en

planimétrique, et 5 cm pour les mesures altimétriques. Pour être certain de ne pas dépasser ce seuil de précision, des bornes d'acquisition des points ont été paramétrées au début de chaque lever afin de n'être en mesure d'enregistrer des données que lorsque l'on se trouvait en dessous de cette limite. Le système de référence spatial de ce récepteur est le Lambert 93 CC50.



Figure 2.4. Carte de répartition des stations permanentes Orphéon sur le territoire métropolitain.

2.1.2. Etude comparative des récepteurs Leica 1200 et Trimble R8 et systèmes de coordonnées

Afin de vérifier la précision altitudinale des récepteurs GNSS utilisés pour les campagnes topographiques, trois points de référence de la Communauté Urbaine de Dunkerque aux coordonnées connues et de précision millimétrique ont été mesurés (Tableau 2.1). L'antenne Leica a été testée à deux reprises sur les 2 premiers points et une fois sur le troisième, et l'erreur en z moyenne résultante est de 0,8 cm. L'antenne Trimble semble légèrement moins précise puisque sur 6 essais répartis sur ces 3 mêmes points, l'erreur moyenne est de 2,8 cm. Les valeurs obtenues sont inférieures à la marge d'erreur du constructeur dans les deux cas. Néanmoins, ces levés ont été réalisés dans des conditions de vent nul sur terrain plat et solide (asphalte), et ont donc une meilleure précision que lors de levés topographiques sur la plage ou dans les dunes, où d'autres types d'erreurs peuvent être générées, sans compter celles liées à l'interpolation dans le cas de Modèles Numériques de Terrain. L'ensemble des mesures effectuées avec l'un ou l'autre des récepteurs GNSS a été harmonisé dans le système géodésique RGF 93, avec le système de projection Lambert 93 CC50. Ce système de référence et cette projection ont été choisis car il s'agit non seulement

des plus adaptés au Nord de la France, en outre c'est le système de référence légal et obligatoire pour les échanges de données géoréférencées dans le domaine public.

Tableau 2.1. Etude comparative de la précision altitudinale des deux récepteurs GNSS utilisés pour cette étude : la colonne Topo CUD donne les coordonnées de 3 points de références de la Communauté Urbaine de Dunkerque, matérialisés sur le terrain par des clous topographiques.

	Topo CUD			Leica				Trimble			
	X (m)	Y (m)	Z (m)	X (m)	Y (m)	Z (m)	Ecart z (m)	X (m)	Y (m)	Z (m)	Ecart z (m)
Point 5103	603064	372253	6,47								
Mesure 1				603064	372254	6,486	0,016	1656532	9316810	6,439	-0,031
Mesure 2				603064	372254	6,485	0,015	1656532	9316810	6,457	-0,013
Point 1783	603307	372113	7,72								
Mesure 1				603307	372113	7,723	0,003	1656774	9316667	7,693	-0,027
Mesure 2				603307	372113	7,724	0,004	1656774	9316667	7,682	-0,038
Point 1820	603064	372261	7,61								
Mesure 1				603064	372261	7,61	0	1656532	9316817	7,578	-0,032
Mesure 2								1656532	9316817	7,585	-0,025
Ecart moyen							0,008				-0,028

2.1.3. Marge d'erreur altimétrique globale des mesures GNSS

Plusieurs types de biais peuvent intervenir lors de mesures topographiques de terrain, en plus de la marge d'erreur constructeur. L'opérateur est une source d'incertitude puisque, lors de levés par tous temps et sur tous types de topographies, notamment dans les dunes, le vent et la pente peuvent amener à pencher involontairement la canne, ou à l'enfoncer dans le sol qui est meuble. En conséquence, les enregistrements peuvent subir une altération estimée à ± 3 cm. En additionnant cette approximation à celle liée au matériel, on obtient une marge d'erreur globale de ± 8 cm, que l'on étendra à ± 10 cm. En effet, un dernier type de dégradation de la mesure intervient lors de la restitution sur ordinateur pour transformer les points en lignes (profils transversaux) ou en surfaces (Modèles Numériques de Terrain). L'interpolation entre les points génère une erreur, puisque malgré les semis les plus denses possibles pour caractériser les formes de terrain les plus évidentes, certaines bosses ou creux ne peuvent être mesurés, il en résulte une approximation de la topographie. A cette marge d'erreur finale de 10 cm correspondra un « volume d'erreur » que l'on ramène au m^2 , soit $\pm 0,1 m^3.m^2$.

2.2. Suivi des profils de plage transversaux

2.2.1. Localisation et répartition

Afin de pouvoir caractériser au maximum la diversité morphologique du site et son évolution, 14 profils transversaux ont été répartis sur l'ensemble de l'UG4, dont 7 à l'Ouest sur la plage du Clipon, et 7 sur la digue du Braek à l'Est (Figure 2.5). Chaque profil disposait d'une tête de station physique, généralement un pieu en bois fixe situé en sommet de dune, qui a servi de point de référence lors de la restitution pour pouvoir superposer des profils de différentes dates. Sur la digue, les têtes de profils étaient matérialisées par des clous topographiques.

2.2.2. Densité de points

Les mesures topographiques des profils transversaux ont été réalisées en enregistrant des points de manière à représenter de manière la plus fidèle possible toutes les formes rencontrées (barres, bâches, dunes embryonnaires etc.). Afin de ne pas dévier de la trajectoire de plus d'1 m en largeur, des lignes représentant les profils ont été dessinées sur un logiciel de SIG (ArcGIS 9.1), géoréférencées, puis importées dans le récepteur GNSS. De cette manière, il n'y avait plus qu'à se guider en suivant la ligne représentée à l'écran de l'ordinateur embarqué sur la canne mobile.

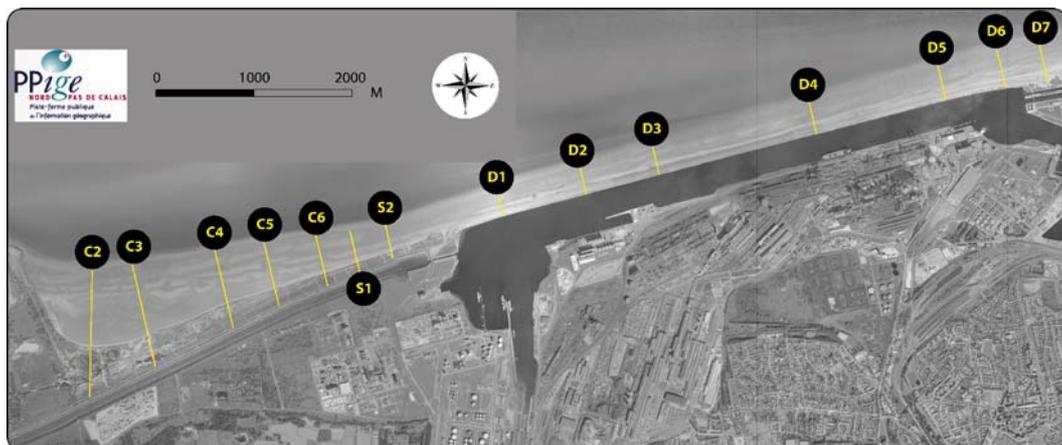


Figure 2.5. Carte de localisation des profils transversaux.

Le semis de points sur un profil peut être irrégulier : sur les surfaces planes il n'est pas nécessaire d'avoir une densité importante par rapport aux portions où l'on a des formes topographiques plus prononcées (Figure 2.6). En moyenne, la densité est d'environ **1 point tous les 10 m**.

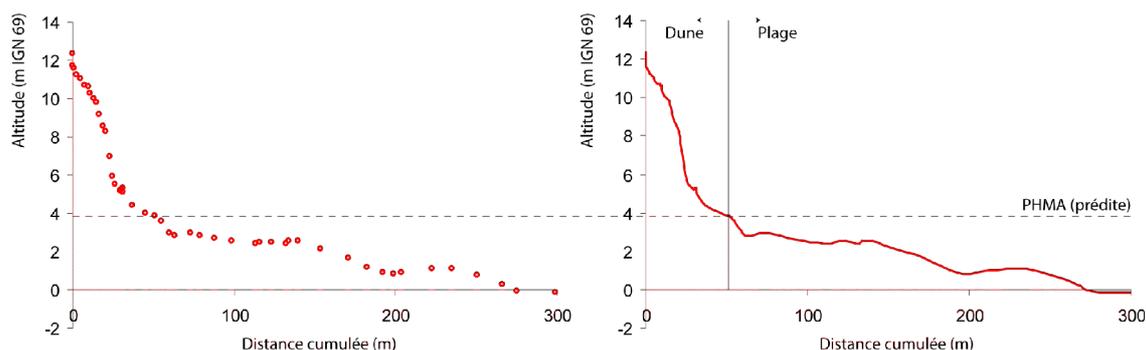


Figure 2.6. Exemple de semis de points et extrapolation en ligne sur le profil C6 du 26.10.2011. La densité de mesure moyenne dans cet exemple est d'un point tous les 6 m. Les Plus Hautes Mers Astronomiques prédites par le SHOM constituent la limite entre la dune et la plage pour le calcul des volumes.

2.2.3. Restitution en 2D et calculs de volumes

Les fichiers de points de mesure en format texte (.txt) ont été exportés à partir du récepteur GNSS puis importés dans le logiciel Excel. La macro *Profiler 3.0* développée par O. Cohen (ULCO) a été utilisée afin de tracer les profils, calculer des différentiels altimétriques entre différents levés, ainsi que des volumes par mètre linéaire de plage (calcul basé sur l'intégrale du profil). Concernant le calcul des volumes, le profil a été divisé en deux parties afin de pouvoir distinguer l'évolution du versant dunaire et de la plage. La limite choisie pour séparer ces deux compartiments est le niveau des Plus Hautes Mers Astronomiques Prédites (PHMA) sur la station de référence du SHOM à Dunkerque (Port Est) pour l'ensemble de l'UG4, à savoir **3,787 m NGF** (6,48 m en cote marine) (Figure 2.6).

2.2.4. Dates des mesures

Les intervalles de temps plus ou moins longs entre les mesures sont dus aux contraintes de disponibilité du matériel, mais également aux difficultés de trouver les conditions de terrain propices : la réalisation des mesures dépend des horaires de marée, mais également des conditions météorologiques. En effet, un temps brumeux ou nuageux altère la communication entre le récepteur GNSS et les satellites, et si cela n'influe pas sur le degré de précision du matériel, la communication ne se faisait tout simplement pas, il était donc impossible d'enregistrer le moindre point lors de sorties par ces conditions. C'est la raison pour laquelle certains profils ont été mesurés lors de faibles coefficients de marée et sont donc assez courts. De plus, étant donné le nombre de mesures à effectuer (y compris les MNT pour les structures), la fréquence des levés a été inégale et s'est espacée en fin d'années 2010 et 2011. Afin de pouvoir comparer les variations volumétriques lors des résultats, les volumes seront exprimés en m³/jour. De plus, les profils n'ayant pas tous la même longueur, il a fallu

pondérer les volumes et les exprimer en $m^3.m^2$. L'ensemble des dates des mesures, du type d'appareil utilisé et de la longueur de chaque profil est synthétisé dans le Tableau 2.2. La longueur de profil indiquée correspond à la longueur de plage, à partir de l'altitude zéro utilisée comme limite plage/dune (PHMA) (Figure 2.6).

Tableau 2.2. Synthèse des dates de levé des profils transversaux, ainsi que de la longueur de chacun, du coefficient de marée et du type de récepteur GNSS utilisé. Les valeurs en gras indiquent les dates choisies pour l'étude de l'évolution de l'estran.

Date	Récepteur GNSS	Coefficient de marée	Longueur (m)													
			C2	C3	C4	C5	C6	S1	S2	D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7
01/04/10	Trimble R8	107	606	584	297	309	264	318	300	143	183	215	232	235	245	270
01/06/10	Trimble R8	68	363	398	347	225	224	258	212	114	126	44	65	90	61	199
14/09/10	Trimble R8	65	85	69	80	100	105	62	127	70	76	44	51	81	52	91
15/02/11	Leica 1200	59	641	612	441	374	301	285	261	142	165	170	169	219	232	210
13/04/11	Leica 1200	48	535	495	259	262	215	211	219	146	175	186	205	241	269	287
29/06/11	Trimble R8	60	572	517	369	353	87	94	86	173	71	92	132	189	247	269
26/10/11	Trimble R8	102	616	641	279	273	254	246	224	175	195	211	204	295	338	330

2.3. Suivi des structures expérimentales de captage du sable

Afin de suivre l'évolution des volumes de sable dans les secteurs où ont été installées des structures de captage, des levés réguliers ont été effectués à l'aide des récepteurs GNSS. Les semis de points obtenus ont été convertis en Modèles Numériques de Terrain (MNT) à l'aide d'un logiciel d'extrapolation, et des volumes ont été calculés sur la base de ces restitutions en 3 dimensions.

2.3.1. Dates des mesures

Les structures de captage ont été installées plus tôt au niveau de la plage du Clipon, le suivi est donc plus long dans ce secteur : il s'étale du 30/07/2010 au 26/10/2011 au Clipon, et du 14/02/2011 au 21/12/2011 pour la digue du Braek (Tableau 2.3). Concernant les secteurs suivis sur la digue du Braek, certaines structures ont été installées par l'entreprise avec du retard (D4a, D4b, D4c et D7), de ce fait le début des levés a été retardé, et d'autres structures ont été vandalisées avant la fin de l'étude (Figure 2.7), ce qui explique un suivi stoppé prématurément (D4a, D4b, D4c, D5) (Tableau 2.3). A partir du mois de janvier 2011, le suivi des structures s'est espacé, du fait du nombre important de mesures topographiques à effectuer (17 MNT, 15 profils topographiques), des contraintes de disponibilité du matériel, ainsi que des autres expérimentations de transport *in situ* à mener en parallèle.

Tableau 2.3. Synthèse des dates de levés topographiques au niveau des secteurs d’implantation des structures de captage du sable sur les secteurs de la plage du Clipon et de la digue du Braek. (Les croix indiquent que le secteur a été levé)

Date	Récepteur GNSS	Secteur																
		Plage du Clipon							Digue du Braek									
		C1	C2	C3a	C3b	C3c	C3d	C3e	D1	D2	D3	D4	D4a	D4b	D4c	D5	D6	D7
30/07/10	Trimble R8	x	x	x	x	x	x	x										
30/08/10	Trimble R8	x	x	x	x	x	x	x										
13/09/10	Trimble R8	x	x	x	x	x	x	x										
28/09/10	Leica 1200	x	x	x	x	x	x	x										
20/10/10	Leica 1200	x	x	x	x	x	x	x										
21/12/10	Leica 1200	x	x	x	x	x	x	x										
28/01/11	Leica 1200	x	x	x	x	x	x	x										
14/02/11	Leica 1200								x	x	x	x				x	x	x
04/03/11	Leica 1200								x	x	x	x				x	x	
11/04/11	Leica 1200	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
10/05/11	Leica 1200								x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
17/05/11	Leica 1200	x	x	x	x	x	x	x										
14/06/11	Leica 1200								x	x	x	x		x	x	x	x	x
30/06/11	Trimble R8	x	x	x	x	x	x	x										
28/07/11	Trimble R8								x	x	x	x		x		x	x	x
15/09/11	Trimble R8								x	x	x	x				x	x	x
26/10/11	Trimble R8	x	x	x	x	x	x	x										
21/12/11	Trimble R8								x	x	x	x					x	x



Figure 2.7. Illustration des dégâts causés à certaines structures, ici au niveau de D4c et D5 (Photographies Tresca 16.12.2011)

2.3.2. Limites de quadrats et densité de points

Les mesures effectuées pour le suivi volumétrique et topographique s’étendent sur plusieurs mètres (entre 5 m et 10 m) autour de chaque structure de captage. Les secteurs entiers comprenant la structure et l’espace situé autour seront nommés des quadrats de référence. Sur le même principe que pour les profils topographiques, le maximum de points ont été levés pour représenter le plus fidèlement possible toutes les formes et les inflexions du terrain, surtout à l’intérieur des structures (Figure 2.8). Préalablement à chaque levé, la délimitation de la zone a été dessinée sur un logiciel SIG (ArcGIS 9.1) et exportée vers le récepteur GNSS, ce qui a permis de se situer sur le terrain à l’aide de l’ordinateur embarqué sur la canne, et de mesurer toujours le même quadrat d’une date à l’autre. En moyenne, le

semis de points pour les MNT est d'environ **0,5 point / m²** ; dans l'exemple de la Figure 2.8, la densité de points est de 0,76 points / m². Une telle densité de points est nécessaire pour avoir une représentation fidèle du terrain après extrapolation par le logiciel de traitement (Andrews et al., 2002).

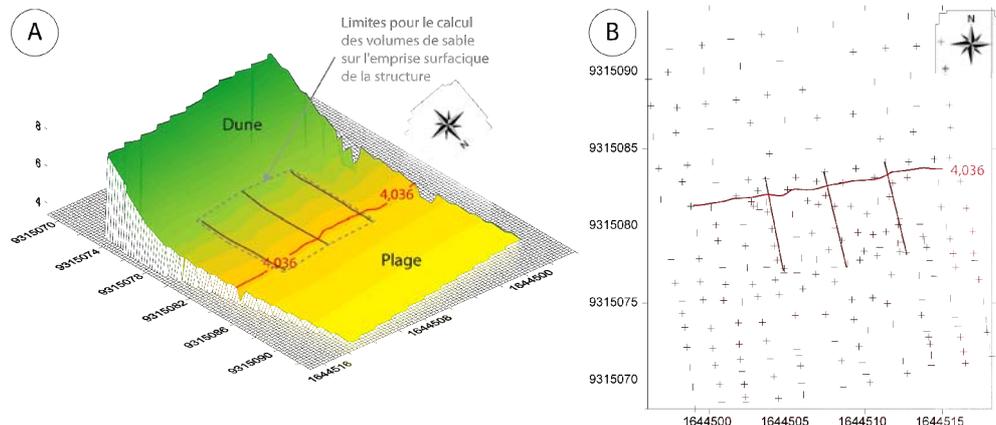


Figure 2.8. (A) Modèle Numérique de Terrain et (B) semis de points au niveau de la structure C2 – levé du 30.08.2010. Les coordonnées sont exprimées en mètres (référentiel Lambert 93 CC50). La ligne d'altitude rouge à 4,036 m est la limite entre la plage et le versant dunaire (PHMA) au port Ouest, le plus proche des structures. Les lignes marron représentent les fascines.

2.3.3 Modèles Numériques de Terrain (M.N.T.)

2.3.3.1. Restitution cartographique et techniques d'extrapolation

Le semis de points obtenu par levé sur le terrain a généré un fichier texte (.txt), qui a été importé dans *Excel* afin de créer une table compatible avec le logiciel *Surfer* de *Golden Software*. Ce fichier de points *Excel* à quatre colonnes (Nom, coord. X, coord. Y, alt. Z), est ensuite importé dans *Surfer*, et l'étape suivante est de choisir une méthode d'interpolation afin de créer une grille. La méthode choisie est la triangulation avec interpolation linéaire.

2.3.3.2. Calculs de volumes et différentiels

Différents compartiments ont été délimités afin de différencier l'évolution volumétrique du versant dunaire, du haut de plage, et de la quantité de sable accumulée à l'intérieur de la structure. La limite choisie entre la plage et la dune correspond, comme pour les profils, au niveau des PHMA prédites (Figure 2.8). Les structures installées sur la digue du Braek ont été placées bien au dessus du niveau de la plage, elles ne sont donc pas concernées par ce découpage plage/dune, seule la quantité de sable à l'intérieur de l'emprise de la structure sera différenciée de celle du quadrat entier. Les structures de pied de dune de la plage du Clipon étant bien plus proches du port Ouest que du port Est, c'est donc le

marégraphe du port Ouest qui a servi de référence pour cette partie. Le niveau d'eau choisi est donc **4,036 m NGF** (6,88 m en cote marine).

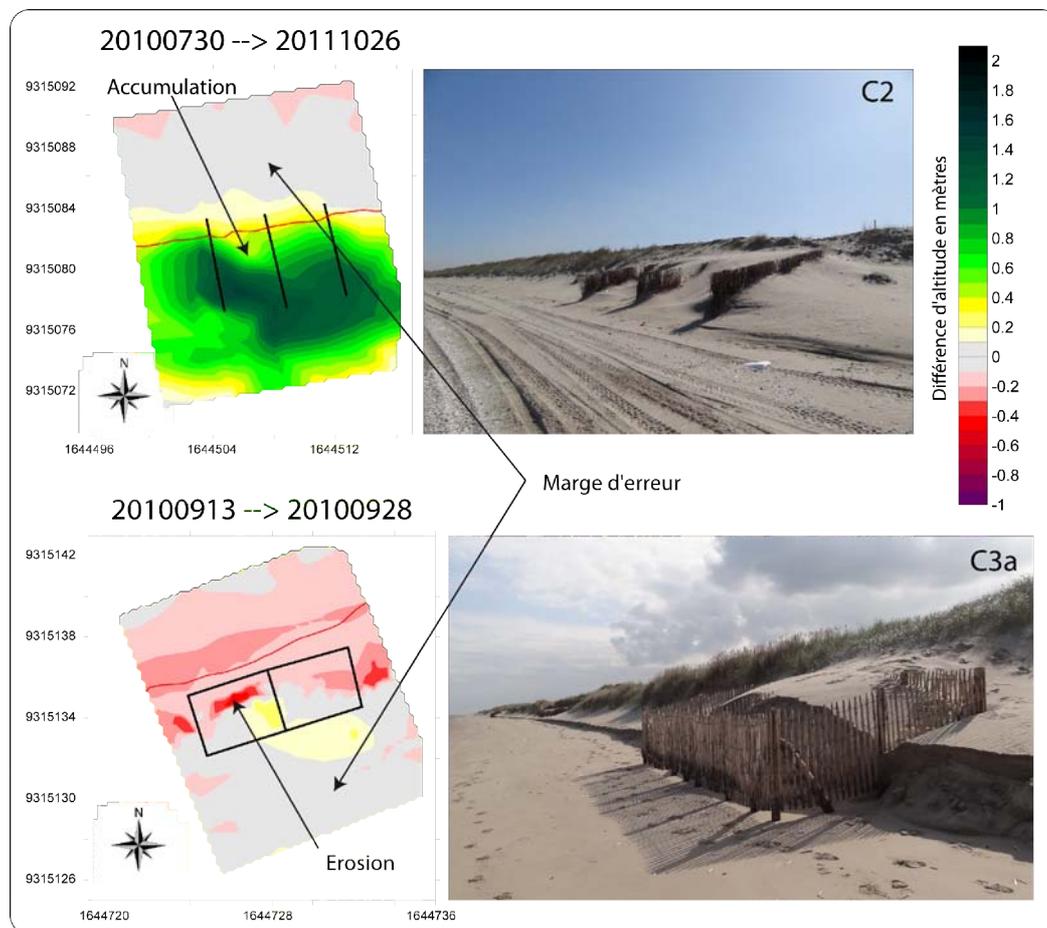


Figure 2.9. Exemple de deux cartographies différentielles présentant de l'accumulation (C2) et de l'érosion (C3a). Les unités sont en mètres (Lambert 93 CC50). Les lignes de couleur noire représentent les brise-vent.

Bien que les quadrats aient eu les mêmes limites d'une date à l'autre, l'imprécision des mesures terrain a nécessité la création d'un masque autour (*blank* selon la terminologie *Surfer*), dont les limites ont été définies par les coordonnées maximum et minimum de l'ensemble des levés. Les MNT ont donc été découpés selon la même emprise afin de ne garder que la zone souhaitée en occultant tout ce qu'il y a autour pour les calculs. Cela a permis de comparer des grilles et de calculer des volumes sur exactement la même emprise surfacique pour chaque date. La même technique a été utilisée pour calculer les volumes des différentes unités morphologiques définies plus haut (versant dunaire, plage, structure) (Figure 2.8).

Afin de calculer des volumes différentiels entre deux dates, la fonction *Grid > Math* a été utilisée, ce qui permet de « soustraire » la plus ancienne grille à la plus récente. Il est également possible de créer des cartographies différentielles auxquelles sont appliqués des dégradés de couleur afin de mettre en évidence l'accrétion et/ou l'érosion entre deux dates (Figure 2.9). La couleur grise a été choisie afin de représenter les espaces compris à l'intérieur de la marge d'erreur sur chaque MNT différentiel.

2.4. Suivi de la limite de végétation

2.4.1. Définition de la limite de végétation

Il n'existe pas de définition du trait de côte universelle, tant les littoraux peuvent être différents (côte sableuse, falaise) et soumis à des marnages et pentes très variés. Sur les côtes basses sableuses, cette ligne peut être de nature hydrologique, il s'agit dans ce cas de la limite terre/eau (Grenier et Dubois, 1990), mais elle ne peut dans ce cas s'appliquer qu'au domaine microtidal. L'autre type de limite est morphologique, il s'agira de la rupture de pente, qui est aussi la plupart du temps la limite de végétation, marquant le pied de dune ou le pied de falaise dunaire dans le cas de secteurs en érosion. Cette définition présente également des inconvénients (Ruggiero et al., 2003) : en effet, il faut choisir une limite qui soit la même que l'on travaille sur le terrain ou sur photographie aérienne, or le pied de dune ne correspond pas forcément à la limite de végétation par exemple lors d'apports sableux récents en haut de plage. Ces particularités sont décelables sur le terrain, mais il est très difficile de les remarquer sur les clichés aériens. La végétation comporte l'inconvénient de ne pouvoir distinguer par cliché la végétation pionnière, qui est susceptible de se développer l'été et de disparaître l'hiver, de la végétation pérenne qui délimite de manière plus exacte la position du pied de dune. La limite retenue dans cette étude sera tout de même la limite de végétation, car malgré ces quelques incertitudes, il s'agit du marqueur le plus fiable et le plus pratique s'appliquant aux différentes techniques utilisées. De plus, l'étude de l'évolution du trait de côte matérialisé par la limite morphologique (rupture de pente) a déjà été réalisée sur l'UG4 par J. Bertier (2009).

2.4.2. Densité de points et dates de mesures

La délimitation de la limite de végétation a été faite le long de la plage du Clipon le 31.08.2011, avec une densité de mesure d'en moyenne **1 point tous les 10 mètres** (Figure 2.10).



Figure 2.10. Exemple du semis de points (en rouge) obtenu lors d'un lever du trait de côte à l'aide du récepteur GNSS le 07/09/2010 (superposé à une vue aérienne de 2005), et tableau des dates de lever du trait de côte.

2.4.3. Restitution cartographique

La conversion des points de mesures en une ligne de trait de côte a été effectuée à l'aide du logiciel ArcGIS 9.1. Le semis de points au format texte (.txt) exporté par le récepteur GNSS a été importé au format shapefile (.shp) dans ArcGIS. Une nouvelle couche de type ligne a été tracée à la main en cliquant à l'aide de l'outil « capture » du logiciel sur l'ensemble des points terrain matérialisés à l'écran.

3. Evolution de la limite de végétation et des superficies dunaires par analyse diachronique de photographies aériennes

3.1. Evolution de la limite de végétation dunaire de 1983 à 2009 le long de la plage du Clipon

3.1.1. Dates et source des campagnes aériennes

La mesure de la limite de végétation à l'aide des récepteurs GNSS a été complétée par 10 missions aériennes qui ont permis de suivre l'évolution de la limite de végétation et ainsi analyser la superficie occupée par les dunes au Clipon depuis 1983 (Tableau 2.4).

Tableau 2.4. Dates, sources et résolution des photographies aériennes utilisées pour l'analyse de l'évolution du trait de côte et des dunes de la plage du Clipon

Année	Résolution	Source	Type de cliché
2009	0,4m	PPIGE	Orthophotographie / couleur + IR
2008	0,08 m	CUD-GPMD	Orthophotographie / couleur
2005	0,5 m	PPIGE	Orthophotographie / couleur
2001	0,5 m	IGN	Redressement géométrique / Couleur
1999	0,5 m	IGN	Redressement géométrique / Couleur
1997	0,5 m	AGUR	Orthophotographie / Couleur
1994	0,5 m	IGN	Redressement géométrique / Couleur
1992	0,5 m	IGN	Redressement géométrique / N&B
1988	0,5 m	IGN	Redressement géométrique / N&B
1983	0,5 m	IGN	Redressement géométrique / N&B

3.1.2. Calcul des valeurs de variations de la limite de végétation à l'aide du programme *Digital Shoreline Analysis System*

Pour chaque date de photographie aérienne, la limite de végétation a été tracée au format shapefile (.shp) sur le logiciel ArcGIS 9.1. Toutes ces lignes ont ensuite été exportées dans une seule et même géodatabase (format .mdb du logiciel *Access*) contenant également des informations sur la date de chaque ligne de végétation afin de pouvoir effectuer des calculs grâce à l'outil *Digital Shoreline Analysis System 4.3* (DSAS). Cette extension gratuite d'ArcGIS (utilisable uniquement à partir de la version ArcGIS 9.2, c'est donc cette version qui a été utilisée pour cette partie), développée par l'US Geological Survey ([Thieler et al., 2009](#)), permet de tracer de manière automatique des transects de mesure le long d'une ligne de référence selon un espacement défini par l'utilisateur (Figure 2.11). Cet outil a été utilisé pour analyser l'évolution de la limite de végétation au niveau du Clipon, et l'équidistance choisie entre les transects de mesure est de 50 mètres, il y a donc eu 89 points de mesure sur un linéaire côtier d'environ 4500 m.

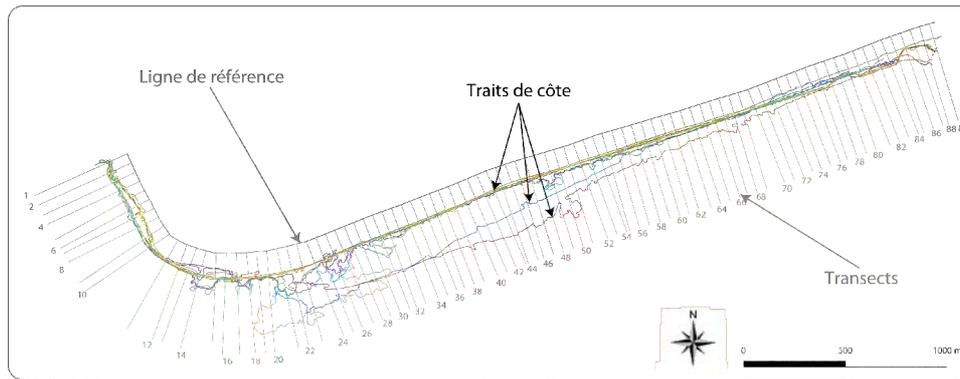


Figure 2.11. Illustration de la position des différents traits de côte de la plage du Clipon, de la ligne de référence et des différents transects espacés de 50 m.

Il est ensuite possible d'extraire différentes informations sur la position relative entre les différentes lignes sous forme de tableur, au format dbase (.dbf) lisible dans *Excel*. Les options statistiques calculées et utilisées dans cette étude sont :

→ *Shoreline Change Envelope (SCE)*

Cette option permet de calculer la distance entre le trait de côte le plus éloigné et le plus proche de la ligne de référence (Figure 2.12-A). Cette valeur représente donc la plus large amplitude dans le mouvement de la végétation, et ne tient pas compte de leur date.

→ *Net Shoreline Movement (NSM)*

Cette option permet de calculer la distance entre la limite la plus récente et la plus ancienne (Figure 2.12-B). Le NSM a été calculé non seulement entre chaque année intermédiaire et la plus récente, mais également pour les années intermédiaires entre-elles.

→ Méthode des points extrêmes ou *End Point Rate (EPR)*

Cette valeur correspond au taux moyen d'évolution par an entre deux positions de la limite de végétation. Pour le calculer l'EPR, il suffit donc de diviser la distance qui sépare deux traits de côte (NSM) par le nombre d'années qui s'est écoulé entre ces deux positions :

$$EPR = \frac{NSM}{\text{Nombre d'années entre le plus ancien trait de côte et le plus récent}}$$

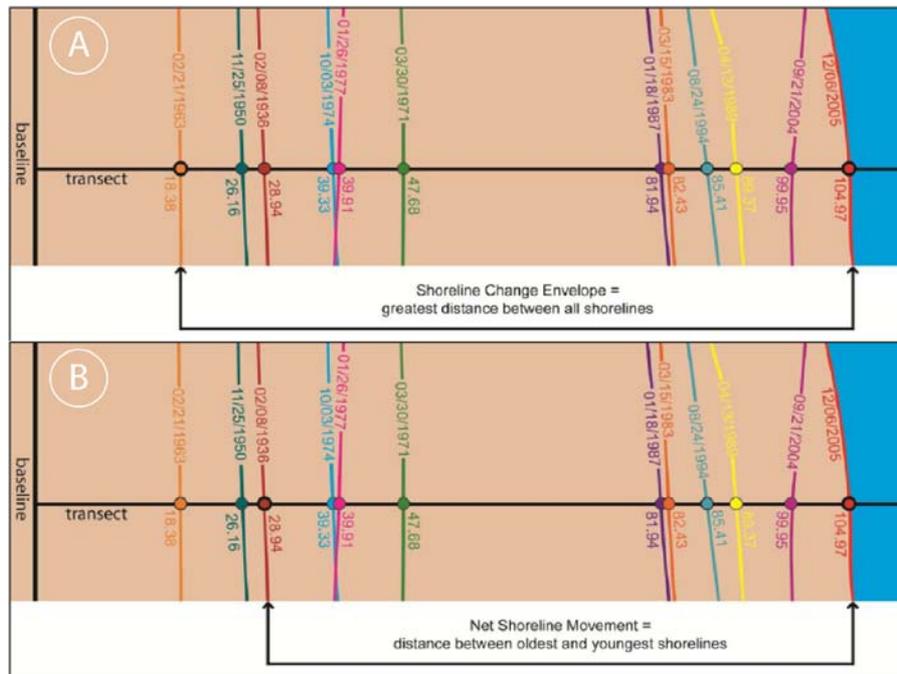


Figure 2.12. (A) Méthode de calcul de l'enveloppe (SCE = Shoreline Change Enveloppe) et (B) méthode de calcul de l'évolution nette de la position du trait de côte (NSM = Net Shoreline Movement) (Thieler et al., 2009).

3.1.3. Délimitation des dunes

Afin de suivre l'évolution de la superficie occupée par les dunes, il a fallu les délimiter par SIG (ArcGIS 9.1), selon la même méthode déjà utilisée par Sabatier (2001) sur le delta du Rhône. Pour cela, les mêmes campagnes aériennes que pour suivre l'évolution de la limite de végétation ont été utilisées, et pour ces années, des polygones représentant l'ensemble du massif dunaire ont été digitalisés (Figure 2.13). La limite de ces polygones a été matérialisée par les lignes de végétation préalablement tracés pour le côté Mer, et côté Terre, par une route longeant le canal des dunes. Pour les limites latérales, il a fallu définir une limite arbitraire : à l'Est il s'agissait de la jonction entre la plage du Clipon et la digue du Braek, et à l'Ouest la ligne de végétation la plus courte. On disposait alors d'un polygone par année, et leur superficie a été calculée à l'aide de l'outil « *AjouterInfosGeometrie.dll* » d'ArcGIS.

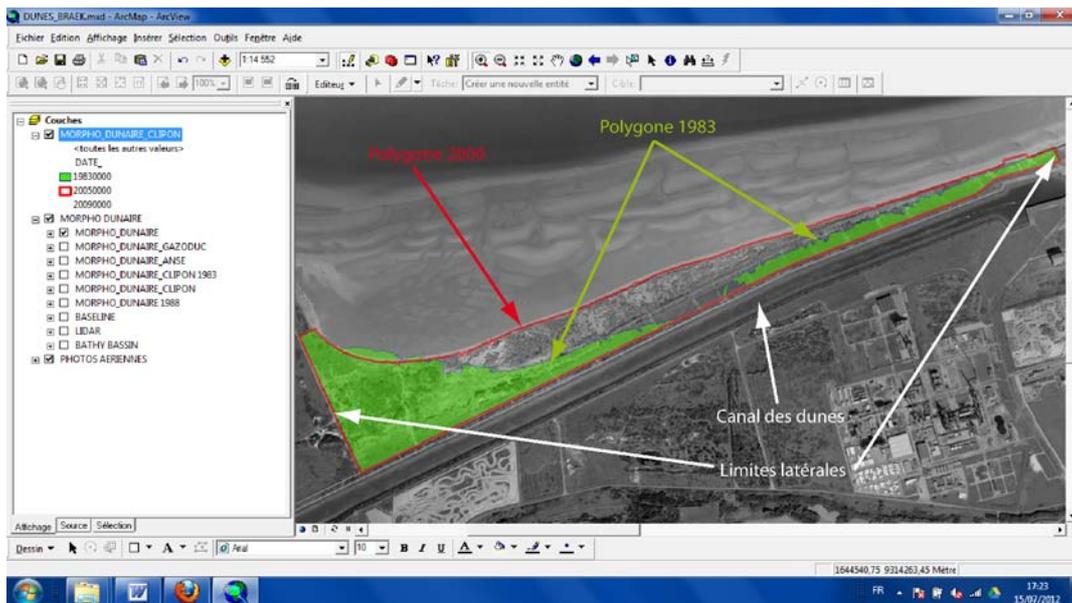


Figure 2.13. Illustration de la méthode de délimitation du massif dunaire du Clipon (avec les exemple de 1983 et 2009), et localisation du canal des dunes.

3.1.4. Marges d'erreurs

3.1.4.1. Evolution de la limite de végétation

L'analyse diachronique d'un littoral à partir de photographies aériennes conduit à un certain nombre d'erreurs engendrées par l'imprécision des documents de référence, la détermination des amers, le calcul lors du traitement informatique, et les erreurs de mesure du trait de côte sur les photographies (Durand, 1998). La marge d'erreur totale du positionnement du trait de côte est estimée à ± 10 m (Suanez, 1997 ; Crowell, 1991 ; Chaverot, 2006). Les sources d'erreur sont diverses. La qualité du redressement géométrique est conditionnée par le nombre d'amers (points invariants dans le temps) et leur répartition spatiale sur le cliché. A cela s'ajoute l'erreur résiduelle calculée par le logiciel pour l'ensemble des amers. Enfin, la précision de la délimitation du trait de côte dépend de la résolution de la photographie (taille du pixel), ainsi que de l'appréciation selon l'opérateur.

3.1.4.2. Délimitation des dunes

Les limites latérales et côté terre étant arbitraires et les mêmes pour toutes les années, la source d'erreur ne peut provenir que de la position de la ligne de végétation, et la marge d'erreur a été estimée ici en appliquant une zone tampon de 10 m. Selon les années, les lignes représentant la limite de végétation étaient plus ou moins linéaires et discontinues, donc plus ou moins longues. Plus la ligne est longue, plus la marge d'erreur est importante et, par

défaut, c'est donc la marge d'erreur s'appliquant à la ligne de trait de côte la plus longue qui a été retenue (6650 m en 1992), soit une valeur de **133000 m²**.

3.2. Analyse de l'évolution des dunes de 1988 à 2009 sur la digue du Braek

3.2.1. Dates des campagnes aériennes

Neuf campagnes aériennes ont été utilisées afin de suivre le développement des dunes sur la digue du Braek entre 1988 et 2009 (Tableau 2.5. Dates, sources et résolution des photographies aériennes utilisées pour l'analyse de l'évolution des dunes sur la digue du Braek.).

Tableau 2.5. Dates, sources et résolution des photographies aériennes utilisées pour l'analyse de l'évolution des dunes sur la digue du Braek.

Année	Résolution	Source	Type de cliché
2009	0,4m	PPIGE	Orthophotographie / couleur + IR
2008	0,08 m	CUD-GPMD	Orthophotographie / couleur
2005	0,5 m	PPIGE	Orthophotographie / couleur
2001	0,5 m	IGN	Redressement géométrique / Couleur
2000	0,5 m	Ortholittorale	Orthophotographie / Couleur
1999	0,5 m	IGN	Redressement géométrique / Couleur
1994	0,5 m	IGN	Redressement géométrique / Couleur
1991	0,5 m	IGN	Redressement géométrique / N&B
1988	0,5 m	IGN	Redressement géométrique / N&B

3.2.2. Délimitation des dunes

Pour chaque mission aérienne, l'ensemble des dunes qui se sont développées sur la digue du Braek ou en bordure du bassin maritime qui se trouve en arrière ont été délimitées en polygones à l'aide d'ArcGIS 9.1 (Figure 2.14). De même que pour le Clipon, c'est la végétation qui a servi de marqueur, car le contraste entre la couleur de l'asphalte et la couleur du sable n'était pas toujours visible sur les clichés. L'ensemble des polygones de chaque année a été fusionné en un seul polygone multiparties, et leur superficie a été calculée grâce à l'outil « *AjouterInfosGeometrie.dll* ».

3.2.3. Marge d'erreur

La marge d'erreur ici doit être calculée différemment de ce qui a été fait précédemment, car les polygones multiparties (représentant les dunes) qui ont été conçus sont composés d'une multitude de petits polygones (plus de 3000 toutes années confondues) dont la taille est parfois inférieure au mètre. L'ensemble des erreurs évoquées lors du point 3.1.4.1

sont présentes, car nous avons travaillé ici sur le même type de photographies aériennes, avec la même méthode. Seulement, lorsque l'on repère une dune d'un mètre de diamètre environ, on est certain de sa présence mais l'on ne peut appliquer une marge d'erreur de ± 10 m, qui ne signifierait rien. Cette marge d'erreur influe éventuellement sur la localisation exacte de la dune, mais moins sur la taille de celle-ci. Ainsi, la source d'erreur principale est liée à l'interprétation de l'opérateur, et afin de la déterminer, il est nécessaire de cartographier ces formes de manière répétitive, et de faire la moyenne des variations surfaciques obtenues lors des différentes tentatives. Les résultats montrent une erreur moyenne quadratique (plus communément nommée RMS = Root Mean Square) de **28 %** (Dolan et al., 1991).

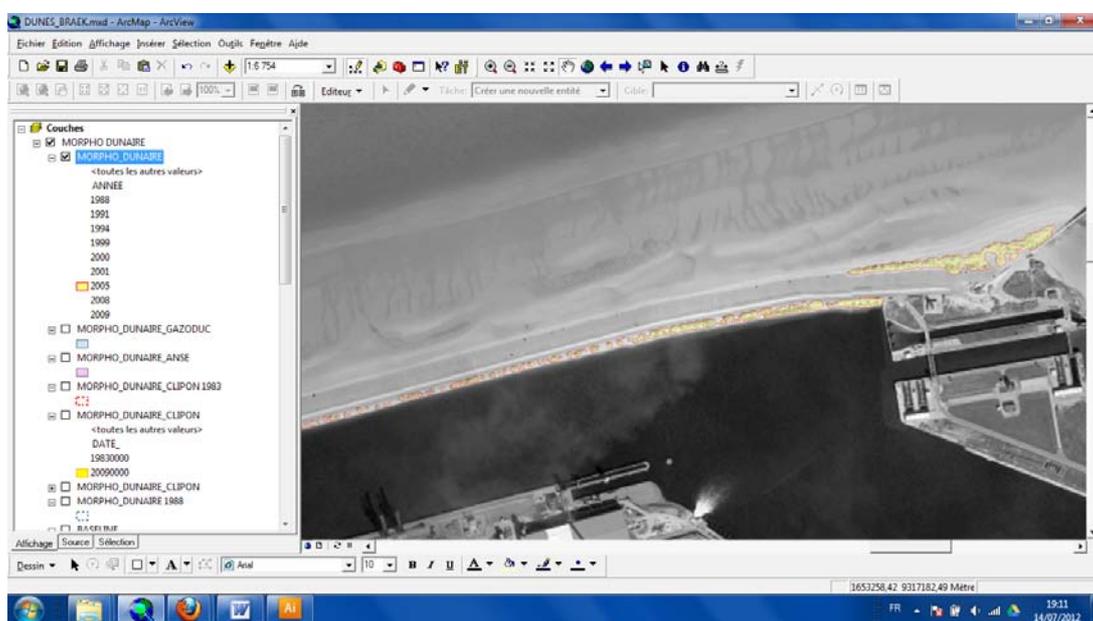


Figure 2.14. Exemple de délimitation des dunes le long de la digue du Braek à l'aide du logiciel ArcGIS.

4. Evaluation du transport éolien par piégeages in situ

Le transport éolien devant être évalué tant sur le haut de plage, présentant un substrat sableux, que sur la digue, il a fallu imaginer et faire construire des pièges et des supports pour anémomètres adaptés à l'asphalte. Les expérimentations de fin 2009/début 2010 ont donc été menées avec un matériel différent et plus léger, donc plus rapidement déployé, par rapport à celles qui se sont déroulées fin 2010/début 2011. L'utilisation de pièges à sable afin de quantifier le transport se justifie premièrement par la facilité d'accès et d'utilisation de cette technique : les pièges sont facilement reproductibles à partir de plans, leur construction est peu onéreuse, et leur déploiement sur le terrain est rapide. En outre, il s'agit d'une méthode reconnue et utilisée dans de nombreuses études depuis le début des années 1990 (e.g. Bauer et

al., 1990), même si comme le faisait remarquer [Bagnold \(1938\)](#) les résultats obtenus doivent être considérés comme approximatifs, compte tenu de la perturbation des flux d'air créée par la présence même du piège. Néanmoins, si la donnée quantitative est à manier avec précaution, la donnée qualitative permet de comparer le transport à différents endroits, puisque la méthode reste la même quelque soit le lieu de l'expérimentation.

4.1. Expérimentations du printemps 2010 : plage du Clipon et digue du Braek

Des pièges à sables verticaux de type Leatherman modifiés ([Goldsmith et al., 1988](#)) ont été utilisés. Ils sont constitués d'un tube de PVC de 10 cm de diamètre et de 1 m de long (Figure 2.15). La partie inférieure du tube (collecteur) est enfoncée dans le sable ; la partie supérieure est percée de deux ouvertures de 46 cm de long, en vis-à-vis (6 cm de large au vent et 10 cm de large sous le vent). L'ouverture arrière, destinée à laisser ressortir les filets d'air, est « fermée » par un filet en géotextile d'une maille de 63 μm (diamètre minimal des grains de sable) qui permet de piéger les grains. Les extrémités du piège sont obturées par un bouchon à vis. Le sable piégé tombe donc dans le collecteur enfoncé dans le sol. A la fin de la période de piégeage de 10 minutes, le sable est récupéré du collecteur et pesé. L'interaction entre le vent et le piège crée une déflexion, en conséquence une partie du sable n'entre pas dans le piège. En outre, les turbulences engendrées par l'obstacle que constitue le piège peuvent créer un affouillement à la base de celui-ci (Figure 2.15- photographie).

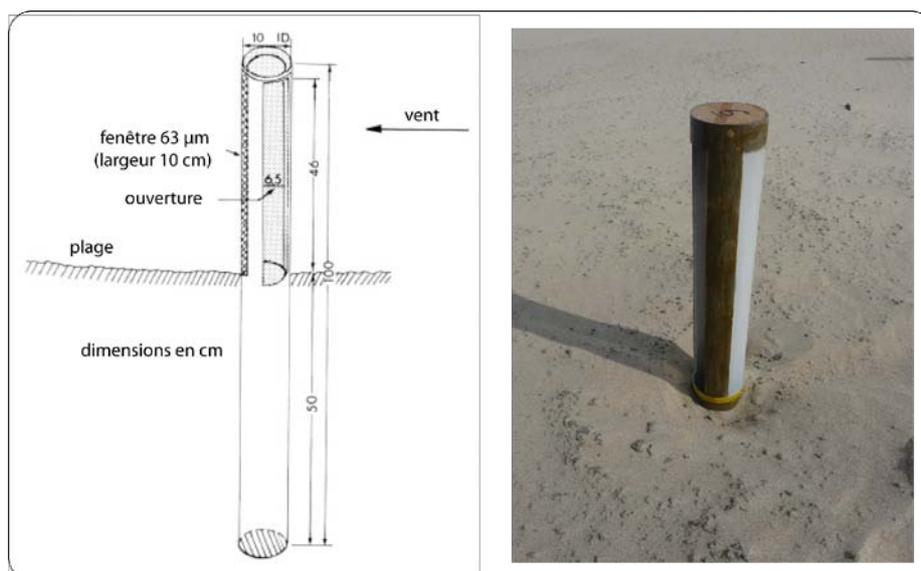


Figure 2.15. Piège à sable vertical de type « Leatherman » (schéma d'après [Goldsmith et al., 1988](#)), et affouillement créé à la base du piège (photographie A. Tresca)

4.2. Expérimentations du printemps 2011 : digue du Braek

En plus des pièges Leatherman décrits précédemment, deux autres types d'instruments ont été utilisés lors de la deuxième phase d'expérimentations sur le transport éolien.

4.2.1. Pièges verticaux triangulaires de type « GTW »

Les pièges à sable verticaux triangulaires (de type « Guelph-Trent wedge - GTW », (Figure 2.16) sont constitués de plaques d'aluminium d'une épaisseur de 2 mm d'une hauteur de 500 mm s'évasant vers l'arrière selon un angle de 34°. L'ouverture unidirectionnelle permettant au sable d'entrer fait 20 mm de large. La base et la partie supérieure du piège sont constituées d'une plaque de bois de 10 mm d'épaisseur. L'arrière est fermé par un filet d'une maille de 63 μm , collé sur les parois du piège, et permettant de retenir la fraction sableuse à l'intérieur. L'angle d'incidence du vent sur les parois inclinées à 34° en fait un piège à sable d'une très grande efficacité de piégeage, bien que le transport soit tout de même sous estimé (Nickling & McKenna Neuman, 1997).

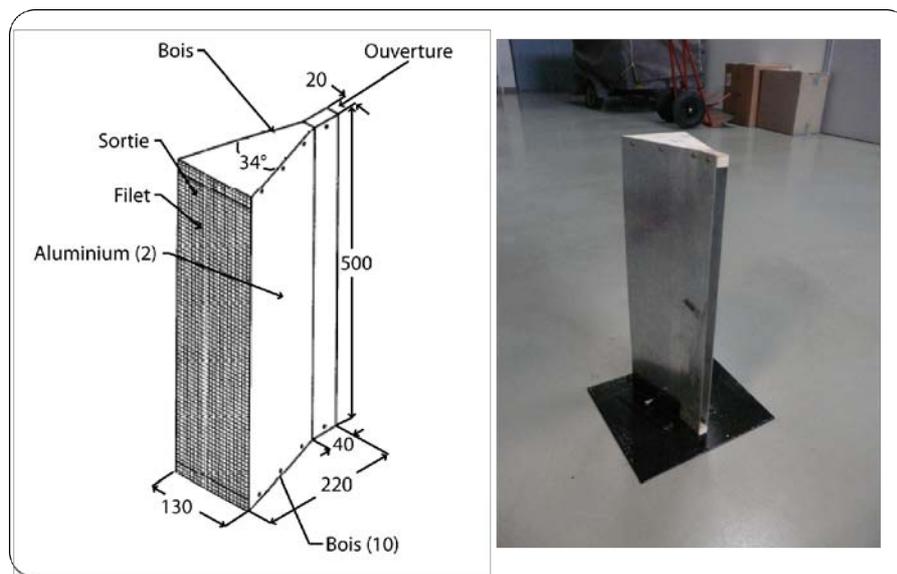


Figure 2.16. Piège à sable vertical de type « GTW » (schéma d'après Nickling & McKenna Neuman, 1997), et photographie de l'un des pièges construit pour cette étude, fixé sur une plaque en métal
Cotes en mm (Photographie A. Tresca)

Une étude en soufflerie de l'efficacité du type de piège original (White, 1982), dont la forme était très similaire à celui utilisé dans cette étude, a démontré qu'il captait entre 83 et 90% du transport pour des vents de 9 à 12 m.s^{-1} (Shao et al., 1993). Une deuxième étude (Rasmussen & Mikkelsen, 1991) a obtenu des résultats similaires avec une efficacité de 91% en moyenne. En revanche, il semble que l'angle d'incidence du piège par rapport à la

direction du vent, lorsqu'il est supérieur à 5°, génère une baisse importante de l'efficacité de piégeage (Nickling & McKenna Neuman, 1997). C'est la raison pour laquelle ils sont utilisés pour des temps de piégeage courts de 10 minutes, cette durée étant également limitée par la faible capacité de stockage à l'intérieur en l'absence de réservoir. En effet, afin de pouvoir capter le sable en transit sur l'asphalte, le réservoir, qui constitue normalement la partie enterrée sous le sable comme pour les Leatherman (Figure 2.15), et qui permet également la stabilité du piège en position verticale, a été ôté. Le piège a été fixé sur une plaque en fonte carrée de 2 mm d'épaisseur et d'une dimension de 300 x 300 mm pour éviter que le vent ne le renverse.

4.2.2. Pièges à coupelles

Afin de tenter d'évaluer à quelle hauteur le sable est transporté sur la digue, des pièges à coupelles imaginés par Arens & Van der Lee (1995), et généreusement prêtés par S.M. Arens, ont été utilisés sur le haut de plage et sur la digue. Ces pièges sont constitués de coupelles évasées d'une vingtaine de centimètres de diamètre, entassées les unes sur les autres avec un espacement de 5 cm (Figure 2.17). Un fond d'eau est versé dans chaque coupelle afin de servir de « colle » au sable qui s'y dépose pour éviter qu'il ne s'envole à nouveau, du fait de l'ouverture à 360°. Si, sur le haut de plage, la coupelle du bas peut-être enterrée afin de capter dès le premier centimètre de hauteur, ce n'est pas possible sur la digue, et le captage ne peut se faire qu'à partir de la deuxième coupelle, à 10 cm au dessus de la surface du sol (photographie Figure 2.17). Les résultats issus de ce type de piège sont surtout qualitatifs, car l'efficacité de piégeage, testée en soufflerie (Arens & Van der Lee, 1995), est de 15 à 20 %, avec une efficacité maximum pour des vents de 8 m.s⁻¹.

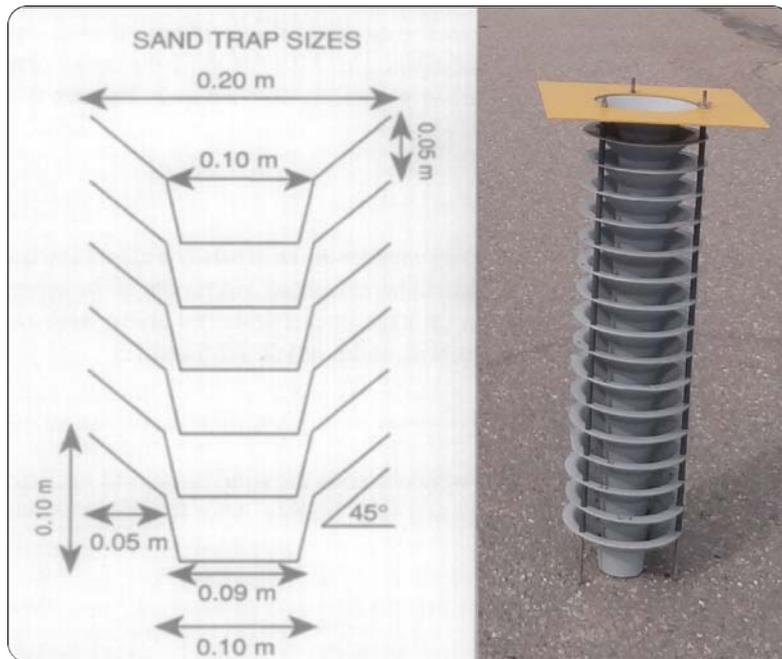


Figure 2.17. Piège à sable à coupelles (d'après Arens & Van der Lee, 1995), et photographie de terrain (Tresca, 2011)

4.3. Comparaison de l'efficacité des différents types de pièges utilisés

Quatre types de pièges ont été comparés lors d'une sortie de terrain le 14.01.2011 (Figure 2.18) sur la plage située à l'extrême Est du site. En plus des trois types de pièges utilisés dans cette étude, un piège horizontal de type Owens (Owens, 1927), disponible au laboratoire LOG, a été testé à titre de comparaison. Afin de pouvoir comparer les résultats obtenus avec les différents types de matériels, les quantités de sable obtenues lors de chaque piégeage ont toujours été converties en kilogrammes par mètre linéaire de plage et par heure ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$).



Figure 2.18. Photographies de l'expérimentation de terrain visant à comparer différents types de pièges à sable (Photographie A. Tresca, 14.01.11)

Lors de cette expérimentation, le vent moyen (mesuré à l'aide d'une station *Oregon Scientific WMR 200*) à 2 m était de $7,1 \text{ m.s}^{-1}$, et la vitesse limite de mise en mouvement (u^*_t), pour un sable de diamètre moyen de $0,265 \text{ mm}$ (échantillon prélevé devant les pièges) a été estimée à $4,5 \text{ m.s}^{-1}$ à l'aide de l'équation de [Bagnold \(1941\)](#), et l'humidité de la surface de la plage était comprise entre 3,1 et 4,3 %. Les résultats du piégeage et des conditions de vent sont présentés Figure 2.19.

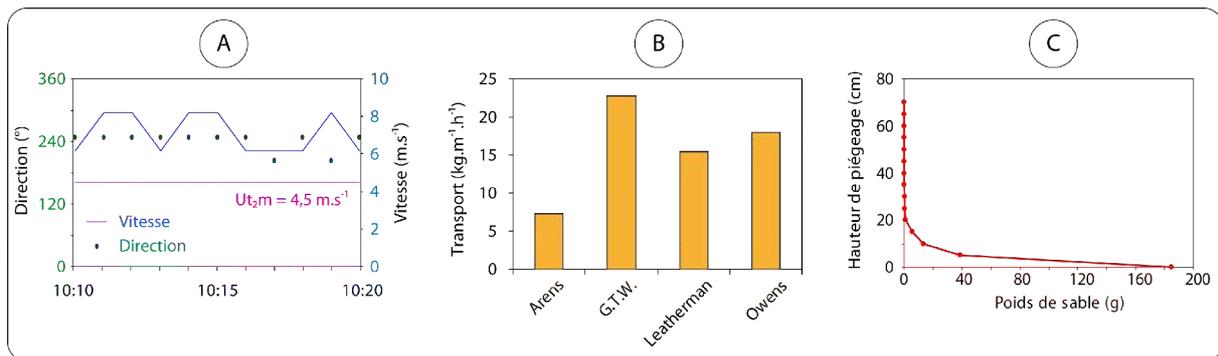


Figure 2.19. Résultats de la comparaison de l'efficacité de différents types de pièges : (A) conditions de vent ; (B) transport mesuré lors du piégeage de 10 min ; (C) Hauteur de piégeage au niveau du piège de type Arens.

On note tout d'abord que la vitesse du vent est restée supérieure à la limite d'envol pendant toute la durée de l'expérimentation (Figure 2.19-A). La direction du vent était comprise entre 200 et 240° , soit une provenance du secteur OSO. Les quantités de sable piégées sont comprises entre $7 \text{ kg.m}^{-1}.\text{h}^{-1}$ pour le type Arens, et $22 \text{ kg.m}^{-1}.\text{h}^{-1}$ pour le type GTW (Figure 2.19-B). Alors que pour les trois pièges à ouverture unidirectionnelle (GTW, Leatherman et Owens) les résultats sont comparables, malgré des différences (entre 15 et $22 \text{ kg.m}^{-1}.\text{h}^{-1}$), le transport semble largement sous-estimé au niveau du piège Arens ($7 \text{ kg.m}^{-1}.\text{h}^{-1}$). La plus importante quantité de sable a été captée dans le piège GTW, ce qui tend à confirmer l'efficacité de son aérodynamisme lors de séances de piégeage courtes. Les deux derniers pièges (Leatherman et Owens) ont des résultats similaires, avec 15 et $18 \text{ kg.m}^{-1}.\text{h}^{-1}$. Enfin, à titre d'information, on note que lors de ces conditions de vent et d'humidité, l'essentiel du transport s'est effectué à une hauteur inférieure à 20 cm (Figure 2.19-C). Au sein de cette couche de 20 cm , plus on se rapproche de la surface du sol, plus le transport est important selon les résultats obtenus avec le piège Arens.

5. Caractérisation des paramètres environnementaux influençant le transport éolien

5.1. Conditions météo-marines

5.1.1. Conditions de vent et profils de vitesse

5.1.1.1. Enregistrement de la vitesse et de la direction du vent

Deux types d'instruments ont été utilisés pour caractériser les conditions de vent lors des expérimentations de piégeage éolien *in situ*. Lors de la première partie de l'étude (Printemps 2010), une station météorologique *Professional Oregon Scientific WMR 200* a été déployée (Figure 2.20). Cette station comprend plusieurs capteurs installés en haut d'un mât de 2 m de hauteur, dont un anémomètre-girouette, et un *data logger* embarqué ayant permis le stockage des données de vent avec une fréquence d'enregistrement d'une minute. Selon le constructeur, la précision de cet appareil est de $\pm 3\%$ pour les vitesses comprises entre 3 m.s^{-1} et 10 m.s^{-1} , et de $\pm 10\%$ pour les vitesses comprises entre 10 m.s^{-1} et 56 m.s^{-1} (notice constructeur). Si cet appareillage a fonctionné correctement durant la première partie des campagnes de terrain, des erreurs d'enregistrement qui ont été remarquées lors du dépouillement et l'analyse des données n'ont pas permis d'exploiter les mesures recueillies lors des expérimentations de la deuxième moitié de l'étude (Printemps 2011).



Figure 2.20. Station météorologique *Professional Oregon Scientific WMR 200* : data logger, capteurs, et photographie sur le terrain (Photographie A.Tresca)

Concernant les données de direction du vent lors des expérimentations pour lesquelles les données de la station *WMR 200* n'ont pas pu être exploitées, ce sont les mesures faites au niveau des girouettes du GPMD situées au sein des avant-ports Est et Ouest qui ont été

utilisées (cf. carte de localisation des capteurs, Figure 2.21). Il s'agit donc d'une information indicative sur la provenance générale du vent, qui ne peut être utilisée pour une analyse précise des variations de la direction lors des piégeages *in situ*. Ces capteurs mesurent la vitesse et la direction du vent avec un pas de temps de 5 minutes. Les données sont enregistrées et mises à disposition en temps réel ou sous forme de données archivées (historique d'un an maximum) à l'aide d'une interface informatique intitulée « Supervision VTS » (Vessel Traffic System), et mises à disposition sur un serveur accessible en interne au GPMD.



Figure 2.21. Carte de localisation des capteurs de vent, précipitations (MétéoFrance) et des marégraphes.

Les capteurs de vents sont, aussi bien à l'avant port Est qu'à l'avant port Ouest, des stations Deolia 96 situées à 24 m de hauteur. Ce sont également ces données de vitesse et de direction qui ont été utilisées lors de l'analyse de l'évolution des structures de captage du sable expérimentales et des profils topographiques transversaux.

5.1.1.2. Profils de vitesse du vent

Les mesures de la vitesse du vent lors de la période Printemps 2011 ont été effectuées à l'aide de 12 anémomètres à coupelles *Vector* de type Gill déployés par série de 4 à différentes hauteurs sur 3 mâts. Sur les mâts de 2 m de hauteur, les anémomètres étaient placés à 0,25, 0,5, 1 et 2 m, et sur les mâts d'1m de hauteur, ils étaient placés à 0,25, 0,5, 0,75 et 1 m. Chaque anémomètre était relié par câble à un *data logger* « *Delta 3000* » permettant l'enregistrement simultané sur tous les capteurs à une fréquence de cinq secondes. Les mâts installés sur la plage sont disposés sur des supports ancrés dans le sable, tandis que pour ceux qui étaient déployés sur l'asphalte, il a fallu concevoir des supports lourds, consistant en quatre plaques en fonte de 50 cm x 50 cm chacune, sur lesquelles ont été soudés une barre sur

laquelle vient s'emboîter le mât. Les barres ont été soudées avec un angle spécifique sur chaque plaque, afin que les mâts aient une position verticale quelque soit la pente de la digue (Figure 2.22). Ces mâts ont été déployés le long d'un profil transversal :

- soit par lot de 3 sur la pente de la digue située « côté mer » (front de digue), avec un mât sur le haut de plage, un deuxième au contact digue/haut de plage, et le troisième sur la partie supérieure de la digue
- soit par lot de 2 sur la pente de la digue située « côté terre » (revers de digue), avec un mât en sommet de digue et un mât à la base du revers.

Ce type de déploiement a pour but d'étudier les vitesses du vent sur la digue, notamment au niveau de la rupture topographique au contact sable/asphalte, afin de pouvoir comparer les profils de vitesse à ceux obtenus lors d'études sur les versants dunaires (Sherman et Hotta, 1990 ; Bauer et al., 1990 ; Arens, 1994). Les profils de vitesse ont été établis en faisant la moyenne des enregistrements aux différentes hauteurs au cours des 10 minutes de piégeages.

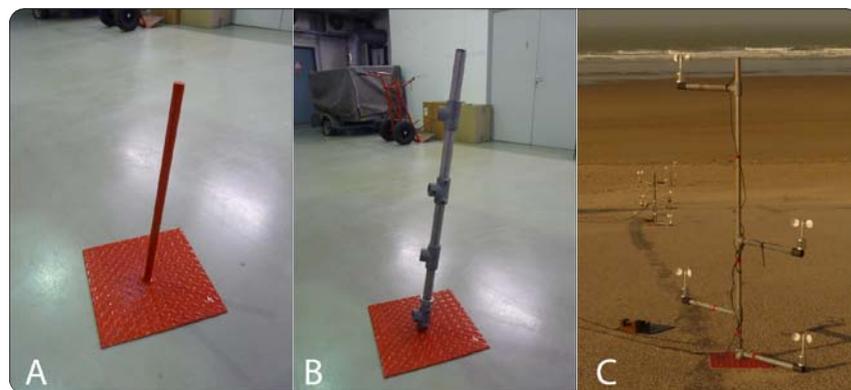


Figure 2.22. Support des mâts à anémomètres inclinés (A et B) et disposition des anémomètres sur le mât lors d'une expérimentation sur la digue (C) (photographies A. Tresca)

5.1.1.3. *La vitesse de mise en mouvement des sédiments*

Les vitesses de cisaillement (u_*) utilisées dans les équations théoriques de transport éolien potentiel (dont Bagnold, 1941 ; Kawamura, 1964 ; Lettau and Lettau, 1978 ; White, 1979) sont calculées à partir des profils de vitesse, établis en fonction des vitesses de vent moyennes enregistrées aux différentes hauteurs sur des mâts au cours de la durée des piégeages. Cette vitesse, difficile à déterminer par une mesure directe, peut être estimée à

l'aide de l'équation de [von Kármán–Prandtl \(1934\)](#) décrivant le profil vertical de la vitesse du vent, celle-ci augmentant de façon logarithmique avec la hauteur au-dessus du sol (Equation 1) :

$$u_z = (u_* / k) \ln(z / z_0) \quad \text{Équation 1}$$

où u_z est la vitesse moyenne de vent mesurée à une distance z au-dessus de la surface du sol et k est la constante de von Kármán (0.41). La vitesse de cisaillement (u_*) et la longueur de rugosité (z_0) peuvent être calculées par le biais d'une régression linéaire entre la vitesse du vent mesurée aux différentes hauteurs et le logarithme de la hauteur ([Arens, 1994](#)) (Equation 2 et Equation 3) :

$$u_* = a k \quad \text{Équation 2}$$

$$z_0 = e^{-k b / u_*} \quad \text{Équation 3}$$

En utilisant la vitesse de vent comme variable dépendante et le logarithme de la hauteur comme variable indépendante, les vitesses de cisaillement (u_*) et la longueur de rugosité (z_0) peuvent être calculées à partir des paramètres de régression a (pente) et b (constante de régression). Pour les vitesses de vent mesurées à 2 m de hauteur, la vitesse de cisaillement a été calculée à partir de la relation proposée par [Hsu \(1971\)](#) (Equation 4) :

$$u_* = 0,044 u_{2m} \quad \text{Équation 4}$$

u_{2m} étant la vitesse horaire moyenne enregistrée à 2 m au-dessus du sol.

A titre purement indicatif et pour apprécier rapidement l'efficacité de l'intensité du vent, la vitesse de mise en mouvement des sédiments (u_{*t}) a été rapportée à une hauteur de deux mètres à partir de la relation proposée par [Hsu \(1971\)](#). Elle est notée U_{2m} (chapitre 5).

Certaines équations ([Kawamura, 1964](#) ; [Lettau et Lettau, 1978](#) ; [White, 1979](#)) intègrent la vitesse de cisaillement minimale nécessaire pour entraîner le mouvement du sédiment (u_{*t}). Le paramètre (u_{*t}) a été évalué à l'aide de l'équation de [Bagnold \(1941\)](#) (Equation 5) :

$$u_{*t} = A [gd(\rho_s - \rho) / \rho]^{0.5} \quad \text{Équation 5}$$

où A est une constante égale à 0,1 dans l'air (Sarre, 1987), g est l'accélération due à la gravité ($9,81 \text{ m.s}^{-2}$), d est la taille moyenne du sédiment, ρ_s étant la densité du sédiment ($2,65 \text{ g.cm}^{-3}$ pour un sable quartzueux) et ρ la densité de l'air ($1,23 \text{ kg.m}^{-3}$).

5.1.2. Humidité du sédiment

L'humidité de la couche superficielle de sable a été évaluée sur des échantillons prélevés soit devant les pièges lorsqu'ils étaient disposés sur substrat sableux, soit au niveau de la source de sable uniquement lorsque les pièges étaient déployés sur asphalte. Dans tous les cas, l'humidité du sédiment contenu à l'intérieur du piège à la fin de l'expérimentation a également été mesurée. Les échantillons ont été pesés, séchés à l'étuve, puis pesés à nouveau, et une humidité pondérale (w , exprimée par rapport au poids sec) a été obtenue par la simple opération suivante (Namikas et Sherman, 1995) (Equation 6):

$$w = [(w_t - w_d) / w_d] 100 \quad \text{Équation 6}$$

où w_t est le poids total de l'échantillon humide et w_d est le poids sec de l'échantillon après passage à l'étuve.

5.1.3. Hauteur d'eau et vagues au large

5.1.3.1. Hauteur d'eau

Les hauteurs d'eau prédites et mesurées sont issues de deux sources différentes. Des données de niveaux d'eau pour la station de référence à Dunkerque sont issues du marégraphe du port Est (cf. carte de localisation des capteurs **fig. 2.21**). Les observations du marégraphe de Dunkerque Est sont la propriété du SHOM, du grand port maritime de Dunkerque et sont mises à disposition sur le site des Réseaux de référence des observations marégraphiques (refmar.shom.fr). Les données utilisées sont horaires et ont subi un contrôle qualité. Les données brutes ont éventuellement pu être corrigées.

La deuxième source de données provient du marégraphe du port Ouest de Dunkerque (cf. carte de localisation des capteurs **fig. 2.21**), dont les données, enregistrées avec un pas de

temps de 10 minutes, sont moins précises (données brutes non validées) et comportent davantage de lacunes. Il en résulte parfois des différences par rapport aux données validées du port Est, notamment lors du recensement du nombre de niveaux d'eau supérieurs aux PHMA sur une période donnée. Les données du port Ouest sont mises à disposition en temps réel ou sous forme de données archivées sur le même serveur VTS mettant à disposition les données de vent.

5.1.3.2. *Vagues au large*

Les données de houle proviennent du Centre d'Archivage National de Données de Houle In-Situ (CANDHIS). Le site internet met à disposition les caractéristiques (hauteurs, périodes et direction des vagues) enregistrées par des bouées situées au large (Figure 2.23). La bouée la plus proche du site d'étude est celle qui est nommée « Dunkerque » (bouée 1, Figure 2.23), mais elle n'a pas pu être exploitée en raison de l'absence de données pour l'ensemble de la période d'étude. De ce fait, ce sont les données de la bouée « Vergoyer » (bouée 2, Figure 2.23) qui ont été exploitées, cependant là aussi un nombre important de lacunes est à noter. Sur notre période d'étude qui s'étend d'avril 2010 à octobre 2011, des données sont disponibles uniquement entre mars 2011 et octobre 2011.

Lorsque des données étaient disponibles nous disposions des caractéristiques suivantes : Hauteur significative, Hauteur significative spectrale, Hauteur maximale et Période significative.



Figure 2.23. Localisation des bouées CANDHIS

5.1.4. Précipitations

Deux types de données de précipitations ont été utilisées, issues d'une station météorologique METEO-France située à Dunkerque à une altitude de 11 m (localisation **fig. 2.21**). Les deux paramètres mesurés sont la hauteur de précipitations quotidienne (RR en mm) ainsi que la durée des précipitations quotidienne (DRR en min).

5.2. Granulométrie

Les données de granulométrie de surface caractérisant l'UG4 sont celles qui ont été analysées dans les rapports de suivi morpho-sédimentaire de l'UG4 (Héquette et al., 2010 ; 2011 ; 2012). Dans ces rapports, les paramètres granulométriques ont été évalués par voie humide à l'aide d'un granulomètre laser Beckman Coulter LS 230. Cet appareil permet de mesurer l'ensemble du spectre granulométrique compris entre 0,04 μm et 2000 μm , par la technique de diffraction de la lumière émise par un laser. Le calcul de la taille des particules est basé sur la théorie de diffraction de Mie. L'analyse granulométrique des sédiments a permis de définir, selon la méthode de Folk et Ward (1957), le grain moyen ainsi que les indices de tri et d'asymétrie, les valeurs étant exprimées en unité phi (ϕ) (Equation 7) :

$$\phi = -\log_2 X \quad \text{Équation 7}$$

où X est la taille du grain en millimètres.

Parmi les paramètres mesurés, le grain moyen donne une bonne idée de l'éventail granulométrique moyen d'un échantillon donné (Equation 8) :

$$Mz = \frac{\phi 16 + \phi 50 + \phi 84}{3} \quad \text{Équation 8}$$

Deux autres paramètres que sont le classement (sorting, Equation 9), renseignant sur la dispersion des tailles par rapport à la moyenne de l'échantillon, et l'asymétrie (skewness, Equation 10) indiquant la prépondérance ou non de particules fines (valeurs positives) ou grossières (valeurs négatives) par rapport à la moyenne de l'échantillon, sont également mesurés.

$$\sigma = \frac{\phi 84 - \phi 16}{4} + \frac{\phi 95 + \phi 5}{6,6} \quad \text{Équation 9}$$

Avec :

0 < σ < 0,35 : très bien classé

0,35 < σ < 0,50 : bien classé

0,50 < σ < 0,71 : assez bien classé

0,71 < σ < 1,00 : moyennement classé

1,00 < σ < 2,00 : médiocrement classé

2,00 < σ < 4,00 : très mal classé

$$Sk_i = \frac{\emptyset 16 + \emptyset 84 - 2 \emptyset 50}{2(\emptyset 84 - \emptyset 16)} + \frac{\emptyset 5 + \emptyset 95 - 2 \emptyset 50}{2(\emptyset 95 - \emptyset 5)}$$

Équation 10

Avec :

+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 : symétrie granulométrique de l'échantillon

-0,10 > Sk_i > -0,30 : asymétrie vers les grandes tailles

-0,30 > Sk_i > -1,00 : forte asymétrie vers les grandes tailles

CONCLUSION DU CHAPITRE 2

Certains problèmes météorologiques, logistiques ou techniques ne nous ont pas permis d'exploiter autant de données que prévu au départ, et les techniques utilisées ont leur limites. Néanmoins, les résultats présentés dans les chapitres suivants prennent en compte la marge d'erreur des instruments utilisés, ainsi que les données les plus fiables possible, obtenues en respectant le mieux possible les protocoles décrits dans la littérature scientifique.

L'ensemble des méthodes et des techniques décrites dans ce chapitre ont permis l'acquisition de données pour caractériser le site à trois échelles de temps différentes :

- Sur le moyen terme (28 ans), il sera possible d'analyser l'évolution des dunes et de la limite de végétation sur l'ensemble de l'UG4 à l'aide de l'analyse de photographies aériennes anciennes (chapitre 3).

- Sur le court terme (2 ans), nous pourrions caractériser la morphologie du versant externe de la dune bordière, du haut de plage et de l'estran grâce à des levés topographiques le long de profils (chapitre 4).
- Sur une échelle de temps quasi-instantanée, il sera possible de donner un ordre de grandeur du transport éolien sur la façade maritime du GPMD sous différentes conditions de vitesse et de direction du vent, en analysant les données de piégeage *in situ* (chapitre 5).

Le dernier chapitre de résultats (n°6) présentera les données de captage du sable dans les structures tests installées en pied de dune sur la plage du Clipon d'une part, et sur la digue du Braek d'autre part.

CHAPITRE 3 - EVOLUTION PLURIANNUELLE DES SUPERFICIES DUNAIRES ET DE LA LIMITE DE VEGETATION

INTRODUCTION

La plus ancienne photographie aérienne traitée est de 1983 pour la plage du Clipon, et de 1988 pour la digue du Braek. Les photographies aériennes de 1983 n'ont pas été utilisées pour l'étude de la digue, car la résolution spatiale était insuffisante pour délimiter les dunes les plus petites et la luminosité était trop importante, ce qui ne permettait pas toujours de distinguer les dunes de l'asphalte. Les aménagements les plus importants sur la côte se sont produits jusqu'au début des années 1980 (chap. 1), c'est pourquoi nous nous avons choisi de commencer cette étude à partir de cette période.

Dans ce chapitre, nous analyserons l'évolution de la superficie des dunes sur l'UG4, et nous comparerons les résultats de la dynamique de la limite de végétation à l'étude d'évolution du trait de côte effectuée par [Bertier \(2009\)](#). Nous nous attacherons également à caractériser la morphologie des dunes bordières.

1. Evolution de la plage du Clipon de 1983 à 2011

Cette étude vient en complément de celle qui a été réalisée par [Bertier \(2009\)](#), qui portait sur la dynamique du trait de côte de la plage du Clipon entre 1949 à 2000. Ici, onze limites de végétation ont été analysées au total, dont 10 sur des clichés aériens par photo-interprétation pour les années s'échelonnant de 1983 à 2009, et le dernier levé en 2011. Les positions relatives de la limite de végétation ainsi que les transects de mesure ont été représentés sur la Figure 3.1, où l'on peut également observer l'évolution respective entre chaque année traitée. Le premier élément que l'on remarque est une régularisation de la limite de végétation depuis 28 ans. En 1983 et 1988 plus particulièrement, cette limite était très irrégulière sur la moitié Ouest (entre les transects T18 et T51) et les espaces végétalisés évoluaient rapidement. Plus on avance dans le temps, moins les mouvements sont importants et à partir de 2001, il devient difficile de déceler une évolution significative compte tenu de la marge d'erreur inhérente aux techniques utilisées. Trois principaux secteurs ont été délimités, en tenant compte de l'orientation du trait de côte, des aménagements qui y ont été réalisés dans le passé, ainsi que du rythme d'évolution de la couverture végétale (Figure 3.1).

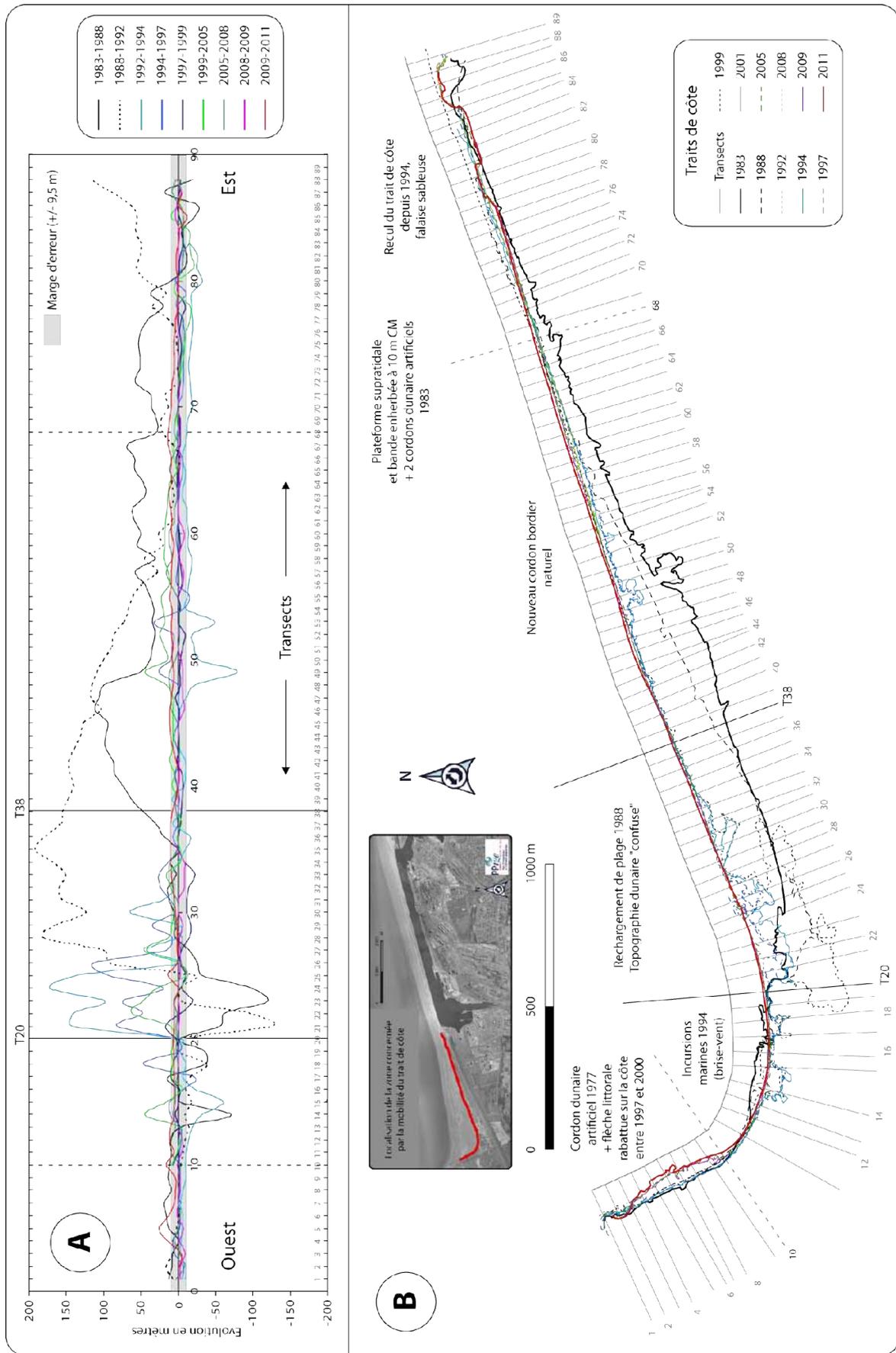


Figure 3.1 Positions successives de la limite de végétation de la plage du Clipon depuis 1983

1.1. Extrémité Ouest : sans intervention majeure depuis 1983 (transects 1 à 20)

Ce premier secteur se situe à l'extrémité Ouest du site, et a une orientation incurvée, d'abord NO-SE puis ONO-ESE, ce qui lui donne la forme d'une anse. Deux sous-secteurs ont été distingués selon l'orientation du trait de côte (Figure 3.1).

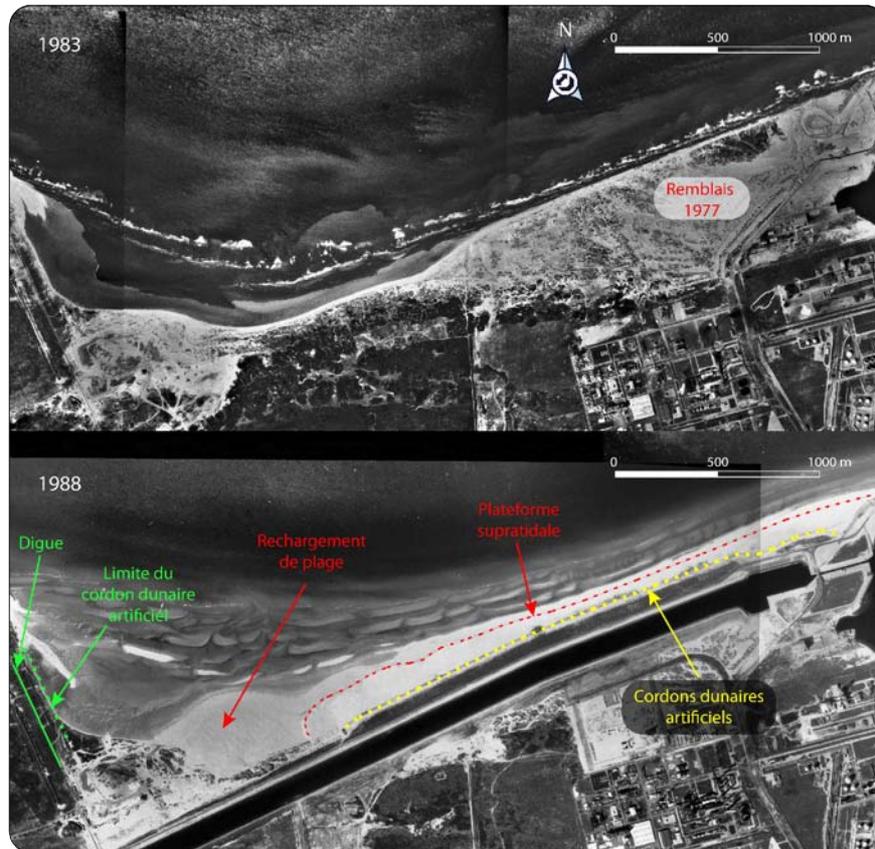


Figure 3.2 Evolution de la plage du Clipon avant (1983) et après (1988) rechargement à l'Ouest et plateforme supratidale à l'Est. Le « lobe » dans la partie Ouest en 1988 correspondant à un rechargement de plage (Clichés IGN 1983, 1988)

La première partie, orientée NO-SE (transects T1 à T10), se trouve le long de la digue du Ruytingen. Lors de la construction de cette digue (entre 1971 et 1977), un cordon dunaire artificiel a été mis en place de part et d'autre sur une largeur de 100 m (Figure 3.2, en vert). La limite de végétation correspondait à la limite de ce cordon en 1983. Elle est restée stable jusqu'en 1997. A l'avant du cordon dunaire, on observe dès 1983 la formation d'une flèche littorale enracinée dans la partie nord du cordon artificiel de la jetée de Ruytingen (Figure 3.2). Au fil des années, cette flèche se développe et a tendance à se rabattre en direction de la côte, et une deuxième flèche externe commence à se former légèrement plus au nord en 1988 (Figure 3.3). C'est à la même époque (1988) que l'on remarque le début d'un estran plat dans cette anse (Figure 3.2). Ensuite, la flèche littorale interne vient se rabattre contre la côte entre

1997 et 2000, ce qui correspond à une avancée de la limite de végétation pour la même période (Figure 3.1).



Figure 3.3. Cliché aérien de 1994 montrant une incursion marine au niveau du transect T14 ainsi que les deux flèches littorales et l'érosion au nord de la digue de Ruytingen (Photographie : Objectif Vidéo, 1994)



Figure 3.4. (A) En bleu, limite entre, à gauche la végétation recouverte à marée haute, et à droite, la végétation du versant dunaire (photo prise en direction du SE au niveau du transect 10) – (B) En rouge, le trait de côte actuel, et en jaune, le trait de côte avant 1997 (photo prise vers le SE au niveau du transect T5) (Clichés Tresca, 2010, 2011)

Aujourd'hui, du fait du rabattement de la flèche sur la côte et de la formation d'une plateforme intertidale, les formes géomorphologiques sont complexes, et plusieurs types de végétation se développent. Il s'agit d'un secteur à l'abri de l'agitation du fait de la localisation en aval-dérive de l'avant-port Ouest (Hemdane, 2006 ; Bertier, 2009), et propice à la sédimentation sablo-vaseuse (Héquette et al., 2012). De la salicorne s'est développée sur l'estran, et il est parfois difficile sur les photographies aériennes de différencier la végétation

dunaire de la végétation de la plateforme intertidale (Figure 3.4-A). Il est également possible sur le terrain de différencier l'ancienne limite de végétation (cordon dunaire artificiel) des dunes qui se sont formées à partir de la flèche littorale collée à la côte (Figure 3.4-B). Sur la Figure 3.3, on remarque également très nettement que le cordon dunaire artificiel d'une largeur de 100 m a été érodé au nord de la jetée de Ruyntingen (nord de la flèche).

Le deuxième sous secteur, plus à l'Est (transects 10 à 20) (Figure 3.1), est caractérisé par un trait de côte orienté ONO-ESE. La limite de végétation a évolué essentiellement du fait d'incursions marines qui ont érodé le cordon bordier, notamment en 1994 (Figure 3.3 et Figure 3.5). La morphologie dunaire a longtemps été marquée par la présence de larges brèches qui ont permis des incursions marines récurrentes, entraînant un recul du trait de côte entre 1983 et 1994 (Figure 3.1). Entre 1983 et 1988, un recul de la végétation de 70 m se produit de façon très localisée dans la partie centrale (T14), ce qui crée une brèche qui est ensuite élargie à l'Est (T15) entre 1992 et 1994 où un recul de 50 m se produit (Figure 3.1). Par la suite, des interventions humaines ont permis de renforcer la dune bordière à l'aide de fascines et de plantations d'oyats (Figure 3.5). Ces actions correspondent à une période de stabilisation (1994 à 1999) puis d'avancée de la limite de végétation de 45 m (1999 à 2005, Figure 3.1). La limite de végétation se stabilise ensuite jusqu'en 2011.



Figure 3.5. Incursion marine et rideaux de fascines longitudinaux en 1994 dans les dunes du Clipon au niveau des transects T14 et T15 (Cliché archives GPMD, 1994).

1.2. Centre de la plage du Clipon : rechargement de plage (transects 20 à 38)

Cette partie du littoral, orientée OSO-ENE, est la plus dynamique de l'UG4 depuis 28 ans. On observe d'abord deux reculs majeurs de la végétation à l'Ouest : -119 m entre 1983 et 1988 (T23) et -127 m de 1988 à 1992 (T21), et l'apparition d'une brèche importante dans le massif dunaire (Figure 3.1). Le canal des dunes a été creusé entre 1983 et 1984, et les produits de dragage ont par la suite été utilisés pour créer une plage artificielle dans ce secteur entre

1983 et 1988. Ce rechargement représentait 500 000 m³ de matériaux déposés à l'avant de cette partie centrale (témoignage oral M. Mariette, responsable du service Environnement du port lors de cette intervention, [Meur-Férec et Ruz, 1998](#)). Il est visible et prend la forme d'un lobe sableux en avant de la côte sur la photographie aérienne de 1988 (Figure 3.2). La végétation colonise ce sable principalement entre 1988 et 1992 dans la partie Est (avancée de la limite de végétation régulièrement supérieure à 150 m, Figure 3.1), puis dans la partie Ouest à partir de 1992. A partir de 2005, la progression de la végétation se stabilise jusqu'en 2011. En arrière de ce rechargement, au sein des dunes internes, de nombreux remaniements sont à noter, notamment lors de la construction de l'avant-port Ouest de Dunkerque (Figure 3.6).



Figure 3.6. Carrière de sable dans l'anse de la plage du Clipon en 1975 (Source : livret CUD)

1.3. Partie Est du Clipon : plage artificielle (transects 38 à 89)

L'aménagement de ce secteur a été davantage planifié que plus à l'Ouest et deux parties peuvent être distinguées sur la base des interventions humaines passées et de l'évolution depuis 1983 :

→ Partie Ouest (T38 à T68)

De 1983 à 1988, une avancée généralisée de la limite de végétation se produit, pour des valeurs comprises entre 30 m et 111 m (Figure 3.1). Cette avancée correspond à la colonisation d'une plateforme supratidale artificielle à une altitude de 10 m CM (7,307 m NGF), et de 250 m de large en tout, composée de plusieurs parties (Figure 3.2) : une bande enherbée de 100 m de large, un double cordon dunaire artificiel, et une plateforme

sableuse supratidale de 100 m de large (source : archive GPMD 28W60). Ces travaux ont été effectués à l'aide du sable extrait au niveau du canal des dunes. Le double cordon dunaire bordier artificiel était constitué de matériel hétérogène et recouvert de buissons. En avant, sur la plateforme supratidale sableuse, deux rangées de fascines parallèles à la côte, et distantes de 5 m ont été plantées pour favoriser l'accumulation éolienne (Meur-Férec et Ruz, 1998).

A la suite de ces travaux, la végétation continue à gagner du terrain de façon très soutenue entre 1988 et 1992 sur la moitié Ouest (T39 à T55), et colonise la plateforme supratidale sableuse. Les valeurs d'avancée sont comprises entre +60 m et +147 m (Figure 3.1). Entre 1992 et 1994, deux formes d'érosion apparaissent et s'agrandissent entraînant un recul très localisé compris entre 10 m (T53) et 20 m (T49) (Figure 3.1), puis cette érosion se résorbe entre 1994 et 1997. Sur la moitié Est (T56 à T68), les valeurs sont comprises dans la marge d'erreur. Une dernière avancée se produit entre 1999 et 2005 (T58 à T64), puis le trait de côte a une forme rectiligne, et se stabilise jusqu'en 2011.

→ Partie Est (T68 à T89)

Entre 1972 et 1977, 2 millions m³ de déblais sablo-limoneux (1,5 million provenant du creusement du bassin de Mardyck et 0,5 million en provenance de l'avant-port Ouest) (M. Mariette, comm. pers. et Meur-Férec et Ruz, 1998) sont rejetés dans ce secteur, en prévision de travaux liés au canal des dunes. Ces remblais sont visibles sur la photographie aérienne de 1983 (Figure 3.2). Entre 1983 et 1988, la plage est de nouveau remaniée dans ce secteur comme pour la partie Ouest (bande enherbée, cordon dunaire artificiel, plateforme supratidale, fascines) (Figure 3.2-1988). Pendant cette période, le domaine terrestre gagne jusqu'à 57 m à l'Ouest (T72), alors qu'à l'Est on observe un recul d'une valeur maximum de -25 m (T86) (Figure 3.1). Cette érosion s'arrête en 1988 et la végétation avance jusqu'en 1992 qui constitue une année charnière.



Figure 3.7. Photographies prises entre les transects T70 et T85 : (A) Sur le terrain lors d'une tempête en 1994 aux environs de T75 (Cliché GPMD, 1994) ; (B) Vue aérienne oblique suite à la tempête de 1994, on peut voir les restes de fascines qui ont été déblayées par la mer (Cliché GPMD, 1994) ; (C) Exemple de fascines implantées sur le haut de plage en 1998 près du transect T70 (Cliché Ruz, 1998).

Entre 1992 et 2011, une érosion du trait de côte d'une moyenne de 50 m se produit pour l'ensemble de ce sous secteur (T68 à T89) (Figure 3.1), de manière plus prononcée au niveau de la jonction avec la digue du Braek (extrémité Est). En raison de l'implantation d'un terminal gazier en 1997 (entre T78 et T81), et étant donné la tendance au retrait de la ligne de rivage au cours de cette période, des brise-vent ont été implantés plusieurs années de suite sur le haut de plage, dans le but de stopper l'érosion en favorisant l'accumulation éolienne (Figure 3.7-C). Ces mesures se sont avérées inefficaces étant donné l'absence de haut de plage (falaise sableuse) et la récurrence de tempêtes pendant durant cette décennie (Maspataud, 2011) Figure 3.7-A et B). Des enrochements ont donc été posés en pied de falaise dunaire afin de stabiliser le trait de côte, ce qui explique la présence d'un saillant à cet endroit (transects T85 à T89) (Figure 3.1).

1.4. Bilan de l'évolution de la limite de végétation de 1983 à 2011

Une grande variabilité spatiale et temporelle caractérise la dynamique de la végétation de la plage du Clipon depuis 28 ans. Le bilan de 1983 à 2011 (Figure 3.8) montre que de manière globale les dunes végétalisées avancent, bien que la mer ait gagné du terrain dans deux secteurs situés aux extrémités Est (T80 à T85) et Ouest (T10 à T20). Cette évolution ne s'est pas faite de manière régulière. La Figure 3.8 représente en pointillés l'évolution

maximale du trait de côte, c'est-à-dire l'écart qui sépare, entre 1983 et 2011, la limite de végétation la plus en retrait de celle la plus en avant. Cette valeur caractérise donc la variabilité de la limite de végétation sur la période et, si cette ligne en pointillés se confond avec la ligne pleine représentant le bilan 1983-2011, cela signifie que la position la plus ancienne (1983) correspond à la position la plus en retrait, et que la position la plus avancée correspond à la date la plus récente (2011).

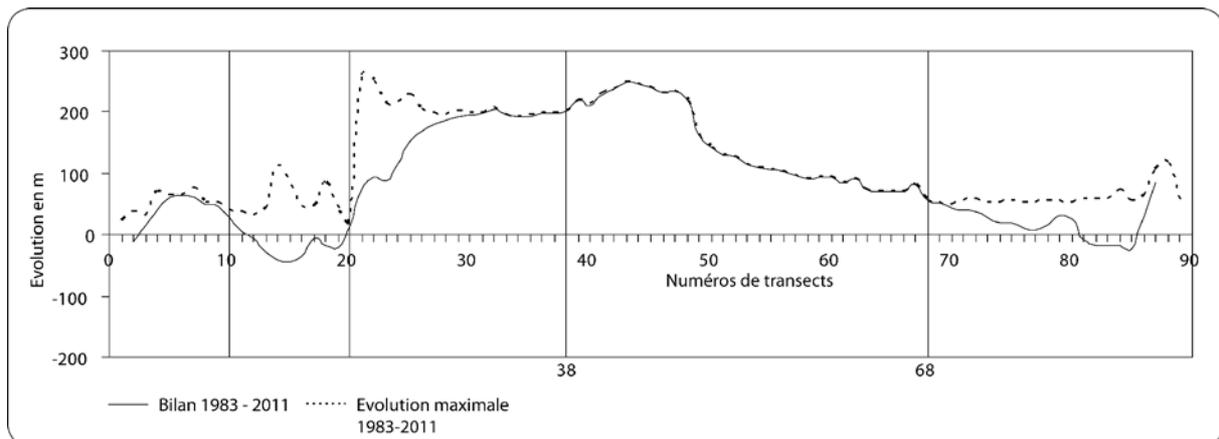


Figure 3.8. Evolution de la position de la limite de végétation et variabilité maximale de 1983 à 2011

Cette situation se produit à l'Ouest de la partie centrale (T38 à T68), et correspond au rechargement de plage. Sur ce tronçon, l'avancée du trait de côte s'est produite de manière plus régulière que sur les autres secteurs. De part et d'autre, l'évolution maximale est supérieure au bilan, signifiant que des périodes de recul ou d'avancée plus importantes que le bilan sont intervenues.

La topographie actuelle permet également de confirmer les évolutions décrites jusqu'à présent (Figure 3.9). Une recherche dans les archives du GPMD a permis de retrouver les plans de la plateforme supratidale et de la bande enherbée qui ont été faits sur la moitié Est du Clipon (Figure 3.9-A). Les dimensions du double cordon dunaire artificiel n'ont pas été retrouvées en revanche. L'ensemble des profils topographiques représentés ont été recalés par rapport à la route qui se trouve en arrière, entre les dunes et le canal. Les profils C4 à S2 passent sur ces anciens aménagements. A l'Ouest, le profil C4 montre clairement le double cordon dunaire artificiel. La dune interne (C4a) est d'une altitude moins élevée que la dune externe (C4b) (Figure 3.9-A-C4). Entre ces cordons dunaires artificiels et le cordon bordier actuel se trouve la plateforme supratidale qui a été colonisée par la végétation. Cette

topographie, qui est le résultat d'une évolution naturelle sur une base anthropique artificielle, est clairement visible sur les photographies aériennes obliques (Figure 3.9-B).

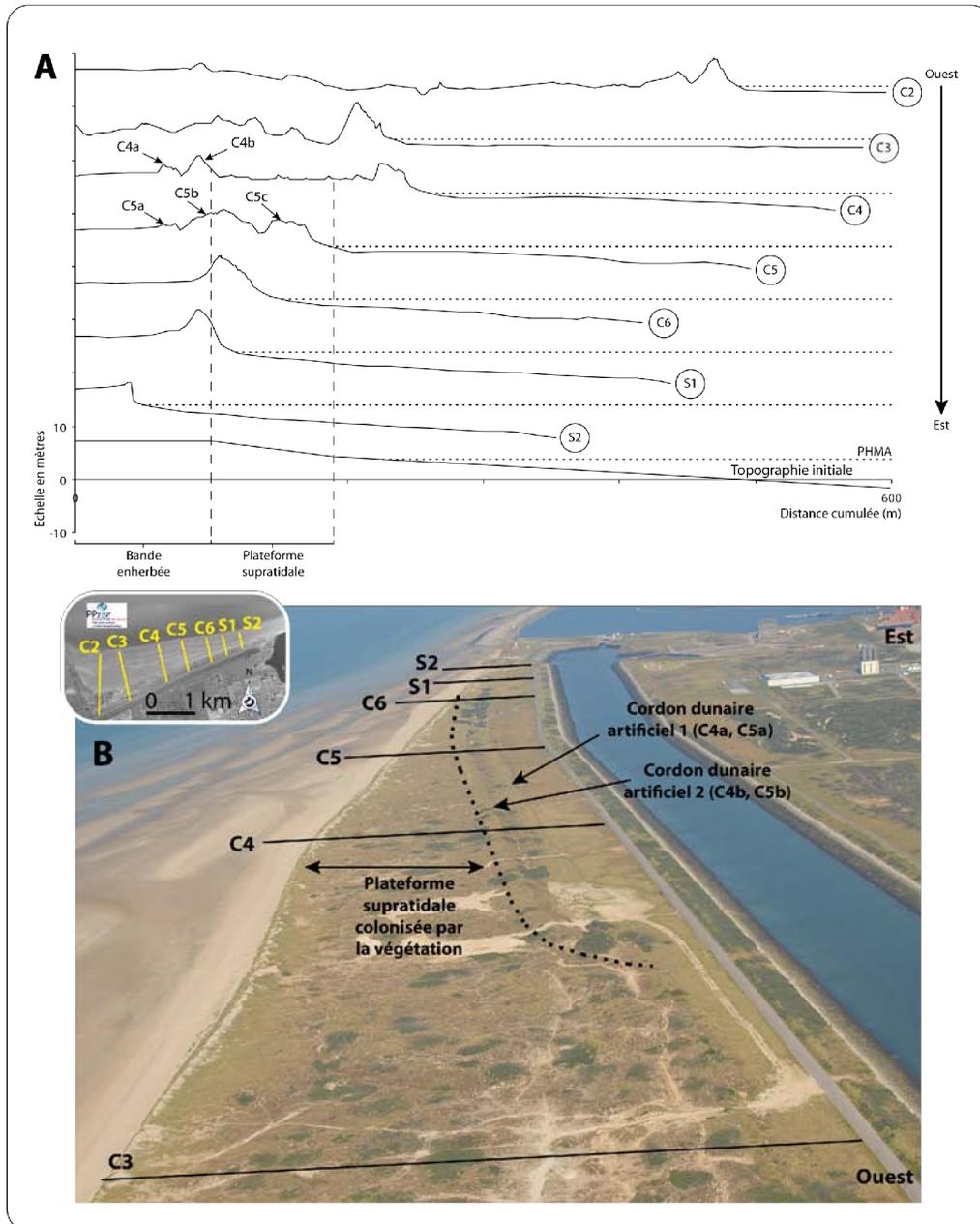


Figure 3.9. Topographie du Clipon le long de 7 profils topographiques transversaux et topographie initiale de la plateforme artificielle supratidale à l'Est (A), et photographie aérienne oblique (B) (Cliché PAD, 1994)

Au niveau du profil C5 (Figure 3.9-A), la dune artificielle interne est également visible (C5a), et la dune artificielle externe (C5b) correspond à la dune bordière actuelle qui s'est élargie et exhaussée et à l'avant de laquelle un nouveau cordon dunaire est en cours de formation (C5c : Figure 3.9-A) (*incipient foredune*, Hesp, 2002).

Entre les profils C5 et S1, on retrouve la dune artificielle externe mais elle est de moins en moins large (Figure 3.9-A). En effet, plus on se dirige vers l'Est, plus la plateforme supratidale a été érodée, et la dune bordière contrainte de réduire en largeur. A l'Est, le profil S2 montre qu'un recul important s'est produit, puisque la plateforme supratidale a cette fois totalement disparu, et la moitié de la bande enherbée a été érodée (Figure 3.9-A-S2). Cela confirme les observations faites jusqu'à présent.

A l'Ouest, le profil C2 montre qu'un cordon bordier s'est formé. En arrière, la topographie des dunes est confuse, elle est le résultat de nombreux remaniements, travaux et passages de véhicules depuis des années. Le profil C3, localisé plus à l'ouest, présente une topographie similaire à celle du profil C2 (Figure 3.9-A et B).-

1.5. Comparaison de l'évolution de la limite de végétation et du trait de côte

L'évolution du site est très liée aux aménagements humains : les dépôts de sable au centre (rechargement : entre 1983 et 1988) et à l'Est (rechargement entre 1972 et 1977 puis plateforme supratidale entre 1983 et 1988), effectués au début de la période d'étude, ont été colonisés par la végétation. De ce fait, il existe un décalage entre l'évolution du trait de côte effectuée par Bertier (2009) et l'évolution de la limite de végétation analysée dans cette étude. J. Bertier a utilisé une limite morphologique pour étudier la dynamique du trait de côte, qui correspondait à la limite du rechargement de plage au centre, et de la plateforme supratidale à l'Est, qui se situaient à une altitude supérieure aux pleines mers. Une micro-falaise d'érosion est en effet visible par stéréoscopie. De ce fait, l'avancée du trait de côte se produit essentiellement entre 1982 et 1988 (Figure 3.10-B), tandis que la colonisation du sable par la végétation (principalement oyats et argousiers ainsi que quelques espèces patrimoniales, cf. chap. 1) se fait plus tard, entre 1988 et 1994 (Figure 3.10-A).

A l'Ouest du site, la limite de végétation est également d'origine anthropique au départ, avec la formation d'un cordon dunaire artificiel le long de la digue de Ruytingen. Puis, la flèche littorale est venue se coller à la côte, et a été colonisée par la végétation, expliquant une avancée entre 1994 et 2000 (Figure 3.10 - A).

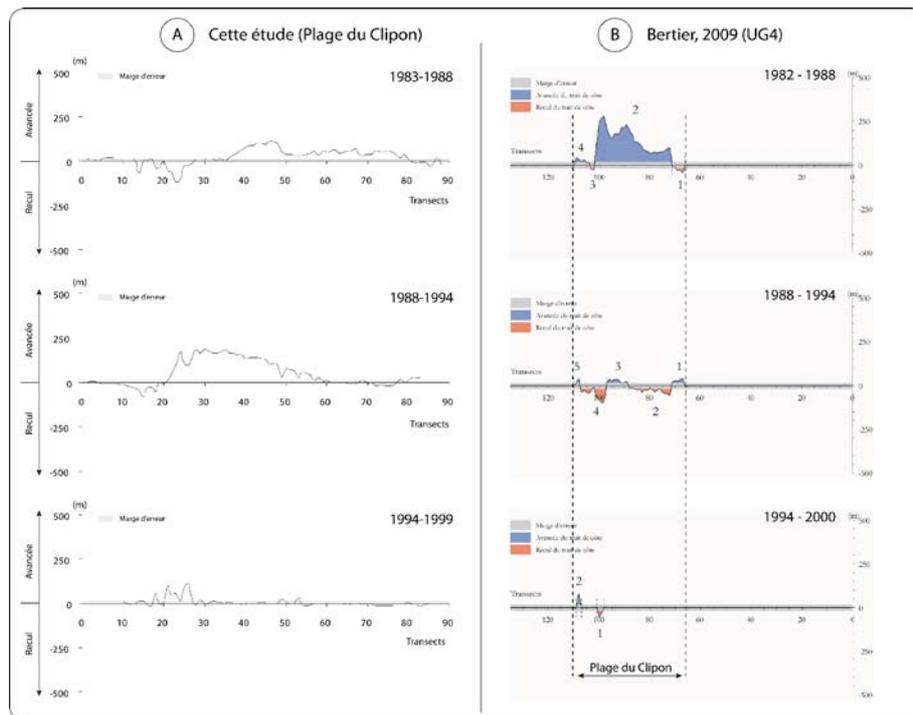


Figure 3.10. Comparaison de l'évolution de la limite de végétation (A) et de la dynamique du trait de côte de Bertier (2009) (B).

2. Typologies dunaires de l'UG4 et évolution des superficies

Les variations du trait de côte ne sont possibles que dans la partie Ouest de l'UG4, au niveau de la plage du Clipon. Sur le reste du site, la position de la digue du Braek ne peut fluctuer qu'en cas de rupture de l'ouvrage. Il était judicieux de pouvoir disposer d'un autre indicateur afin d'étudier les éventuelles marques d'érosion ou d'apport de sédiments à la côte sur cette deuxième partie du site. Depuis la construction de la digue, des dunes se sont petit à petit développées sur l'ouvrage, si bien qu'aujourd'hui elles sont devenues coalescentes à certains endroits, et recouvrent la digue sur des portions longues de plusieurs centaines de mètres. Ce développement n'a pas été aidé, il ne s'agissait pas d'une volonté du GPMD de rendre à ce site un aspect plus « naturel » en recouvrant le bitume avec du sable. Cette partie décrira les formes dunaires sur l'ensemble de l'UG4, et analysera l'évolution de leur superficie au cours du temps. Au Clipon, cette analyse portera sur l'ensemble du massif dunaire, délimité au nord par le trait de côte, et au sud par une limite commune matérialisée par la route longeant le canal des dunes. Sur la digue du Braek, les dunes sont coalescentes la plupart du temps, mais plusieurs ensembles disjoints peuvent être distingués. Pour chaque année, c'est le total de la superficie qu'elles représentent globalement qui sera considéré.

2.1. Typologie et évolution des dunes le long de la plage du Clipon

La description des dunes au niveau de la plage du Clipon sera basée sur la typologie proposée par P. Hesp (1984 ; 2002 ; 2011) (annexe 2), qui est une classification basée sur la géomorphologie et le couvert végétal caractérisant les cordons bordiers. Le terme de dune bordière désigne le premier cordon de dunes continu qui borde le haut de plage (Guilcher, 1954). La typologie de Hesp distingue deux grands types de cordons bordiers : les « *incipient foredunes* », qui correspondent à de nouvelles dunes ou dunes embryonnaires selon la terminologie européenne (Paskoff, 2005), et « *established foredunes* » qui correspondent au cordon bordier « établi », nommé aussi avant-dune (Paskoff, 2005). La classification dynamique de P. Hesp classe les dunes bordières en cinq stades, de la dune bordière adulte et stable (stade 1), à la dune bordière totalement érodée (stade 5). Pour les dunes qui se sont développées sur la digue du Braek, une nouvelle typologie sera proposée, étant donné le peu d'informations dans la littérature à ce sujet (Jackson & Nordstrom, 2011).

2.1.1. Typologie des dunes bordières de la plage du Clipon

2.1.1.1. Double cordon bordier et dunes embryonnaires hémisphériques

Dans la partie occidentale de la plage du Clipon, où le trait de côte est orienté ENE-OSO (Figure 3.11-A), la topographie est constituée de deux cordons dunaires successifs (Figure 3.11-B). Le premier, interne, correspond au cordon artificiel le long de la digue de Ruytingen. Le couvert végétal est très dense (90 à 100%) (Figure 3.11-C1) et le sommet se trouve à 7 m NGF. Le deuxième cordon, externe, correspond à la flèche littorale qui s'est accolée à la côte entre 1997 et 2000. Il culmine à moins de 6 m NGF, et la couverture végétale est dense également (*established foredunes* - stade 1, Hesp, 2002). Il s'agit de dunes stables, rarement atteintes et érodées par les vagues, colonisées par *Ammophila arenaria*.

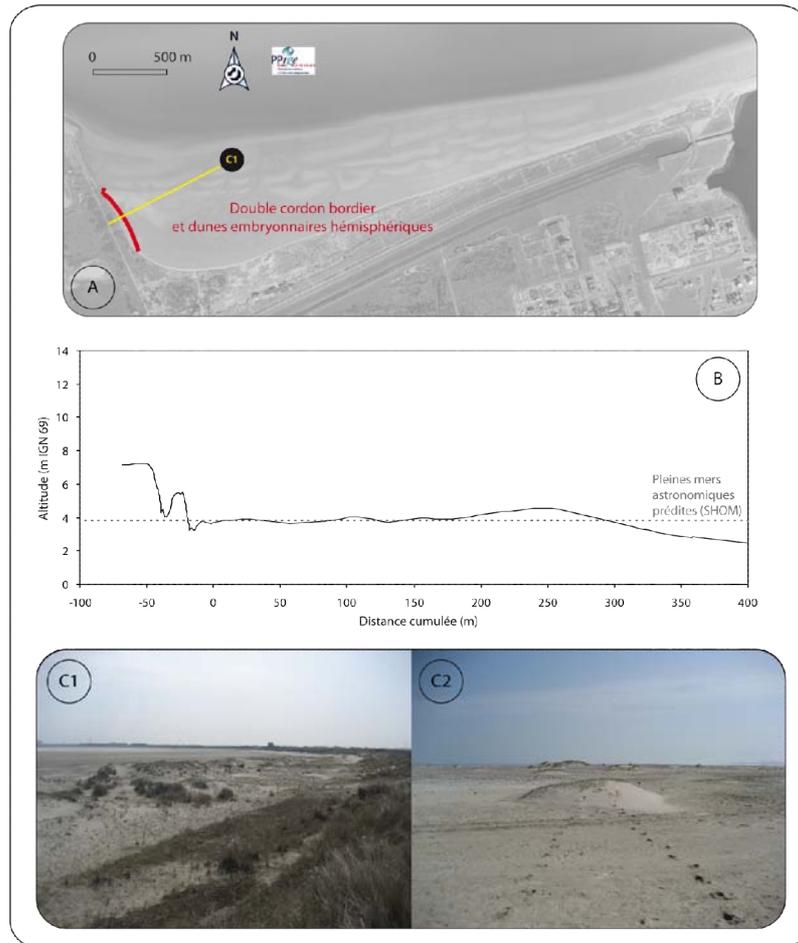


Figure 3.11. Localisation de la portion de trait de côte avec les dunes hémisphériques (A) en plan, (B) sur un profil transversal représentatif, et (C) photographies prises vers l'ESE (C1) et le NE (C2).

A l'avant de ce double cordon dunaire et en arrière de la flèche littorale, on trouve un vaste estran sableux de 200 m de large dont l'altitude moyenne se situe au niveau des plus hautes mers astronomiques. Cet estran est parcouru de dunes embryonnaires hémisphériques aux tailles variées (quelques dizaines de centimètres à plusieurs mètres de large) (Figure 3.11-C2), dont la partie sommitale se situe à peine au dessus du niveau des plus hautes mers de vive eau. Ces dunes embryonnaires hémisphériques (Arche & Vilas, 2001), également appelées « *coppice dunes* » (Cooke & Warren, 1973 ; Gile, 1975 ; Bowler, 1968 ; 1973), ont été initiées par des obstacles topographiques de petite taille (coquilles, algues), puis colonisées par *Elymus farctus* par dispersion des graines par le vent ou les vagues sur la plage. Ces dunes embryonnaires sont entourées d'eau à marée haute (dunes insulaires, Tekin, 2004). En bas de plage, l'altitude s'élève à nouveau à 5 m NGF (Figure 3.11-B), il s'agit de la flèche littorale évoquée précédemment.

2.1.1.2. Dunes bordières densément végétalisées

Les dunes bordières établies peuvent avoir des formes différentes en fonction des apports sédimentaires, du type de végétation qui les colonise, de la densité du couvert végétal et des formes d'érosion qui sont ou pas présentes. Ce secteur, situé directement à l'Est de celui précédemment décrit (Figure 3.12-A), est constitué de dunes bordières d'une largeur de 40 m environ, avec une altitude maximum de 9,5 m NGF (Figure 3.12-B).

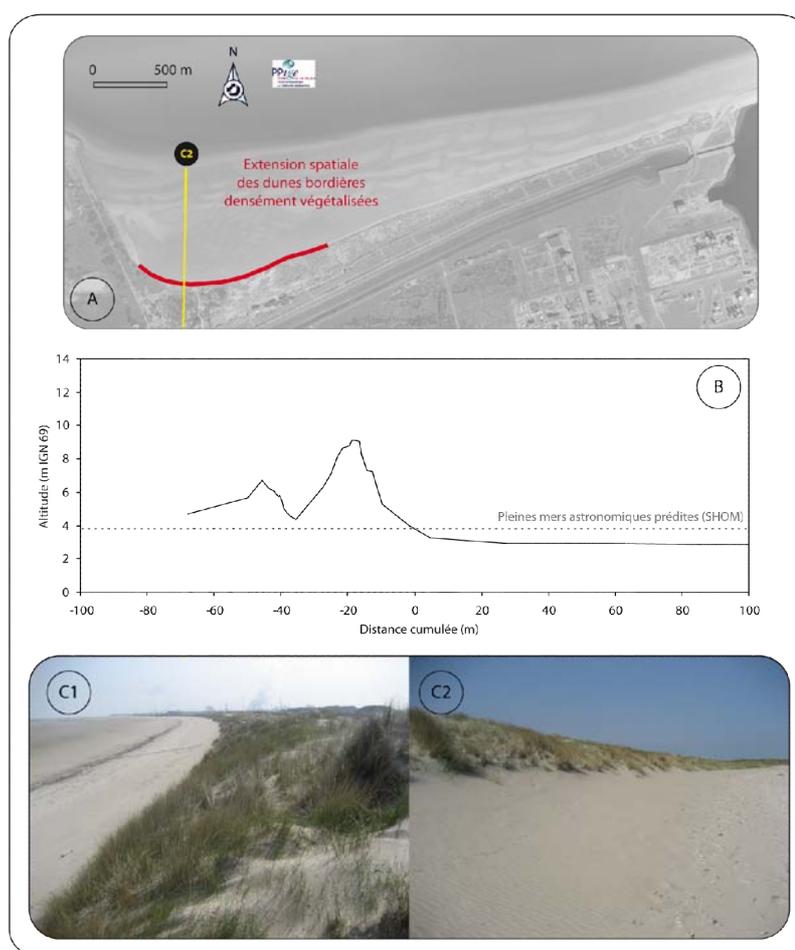


Figure 3.12. Localisation des dunes bordières densément végétalisées (A) en plan, (B) sur un profil transversal représentatif, et (C) photographies prises vers l'E (C1) et l'O (C2).

On observe que le profil transversal que les pentes des versants interne et externe sont symétriques, néanmoins la couverture végétale (composée essentiellement d'*Ammophila arenaria*) est moins dense sur le versant externe (75 à 90 % - stade 2 du modèle de Hesp, 2002) (Figure 3.12-C1 & C2), qui est également moins régulier. Des formes d'érosion sont présentes telles que des amorces de brèches dunaires, siffle-vent et sentiers piétonniers, ou, de façon épisodique, des micro-falaises provoquées par l'action des vagues lors de tempêtes. En

arrière de la dune bordière se trouve un deuxième cordon à l'altitude moins élevée (7 m NGF). La couverture végétale est proche de 100%.

Ces dunes correspondent, à l'Ouest au secteur touché par des submersions marines (1994) et réhabilité à l'aide de fascines et plantations d'oyats (Figure 3.3 et **Figure 3.5**) et à l'Est au secteur du rechargement de plage effectué entre 1983 et 1988. En arrière du cordon bordier, la topographie des dunes est chaotique (Figure 3.12-C2 et C3).

2.1.1.3. *Dunes bordières au versant externe plus irrégulier*

Ce type de dunes bordières (Figure 3.13-A) présente un couvert végétal moins dense est moins densément couvert de végétation (45 à 75%), et la topographie du versant externe, par ailleurs à plus faible pente (13%), est très irrégulière, constituée d'une multitude de buttes végétalisées (stade 2, [Hesp, 2002](#)) (Figure 3.13-C1). Il s'agit en réalité d'un cordon dunaire en formation (*incipient foredune*), d'une altitude proche de 9,5 m NGF, et d'une largeur de 60 m en moyenne. On retrouve en arrière le cordon bordier établi (*established foredune*), d'une d'altitude supérieure avec un sommet à 11 m NGF (Figure 3.13-B). Le sommet de la dune en formation est alimenté par des apports éoliens comme en attestent des observations terrain (Figure 3.13-C2). Enfin, cette dune bordière est parfois devancée par de petites nebkhas colonisées par *Elymus farctus*, ce qui témoigne également d'une dynamique d'accumulation.

Ce secteur correspond à la partie occidentale de la bande enherbée et de la plateforme supratidale. En arrière du cordon bordier établi, on retrouve, à l'Ouest, la plateforme supratidale colonisée par la végétation puis le double cordon artificiel (Figure 3.9-C4). Dans la moitié Est, on retrouve directement en arrière le double cordon artificiel, qui se confond petit à petit avec le cordon bordier actuel (à partir du profil C5, Figure 3.9).

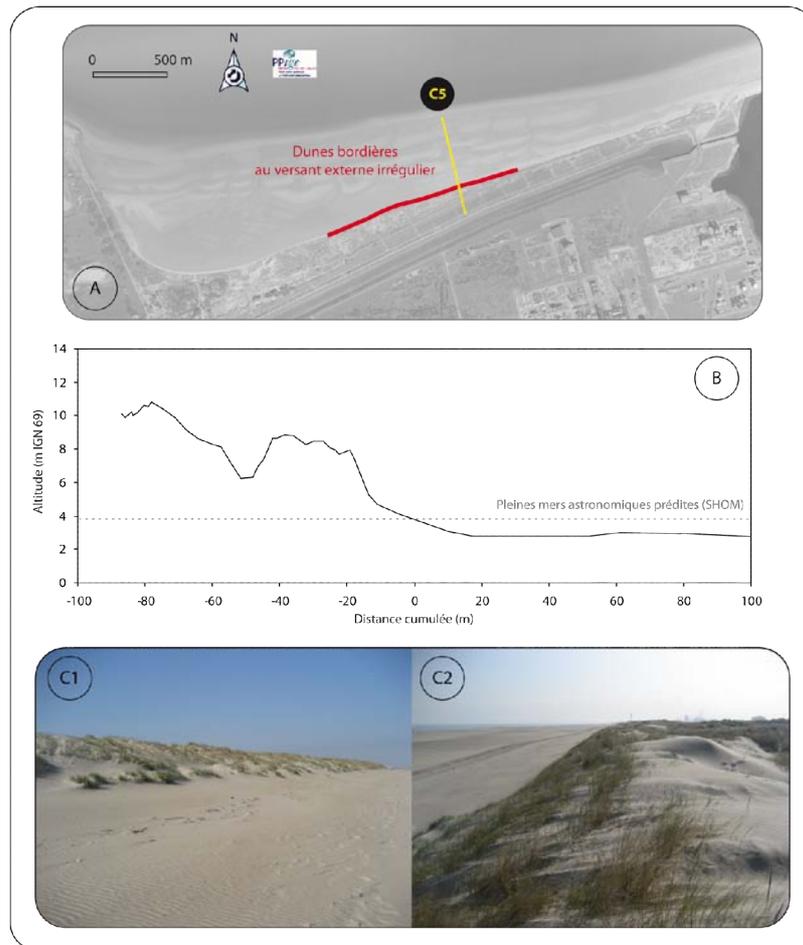


Figure 3.13. Localisation des dunes bordières au versant externe irrégulier (A) en plan, (B) sur un profil transversal représentatif, et (C) photographies prises vers l'O (C1) et l'E (C2).

2.1.1.4. *Dunes bordières hautes au versant externe irrégulier*

Sur cette portion de la côte (Figure 3.14-A), la morphologie du cordon bordier établi est similaire à ce qui a été décrit précédemment (2.1.1.3 - stade 2, Hesp, 2002), mais son altitude est plus haute puisqu'elle atteint 12 m NGF (Figure 3.14-B). La largeur de la dune bordière est de 40 m environ, et l'on observe des formes d'érosion (amorces de siffle-vent et de couloirs de déflation) sur le versant externe. En arrière du cordon bordier la topographie est aplanie à une altitude proche de 7 m NGF, on se trouve sur la bande enherbée artificielle. Le cordon bordier se confond avec le cordon artificiel ancien, il est plus haut et moins large que plus à l'Ouest (Figure 3.13), et l'on se trouve sur un secteur en légère érosion sur le moyen terme (Figure 3.9-C6 et S1).

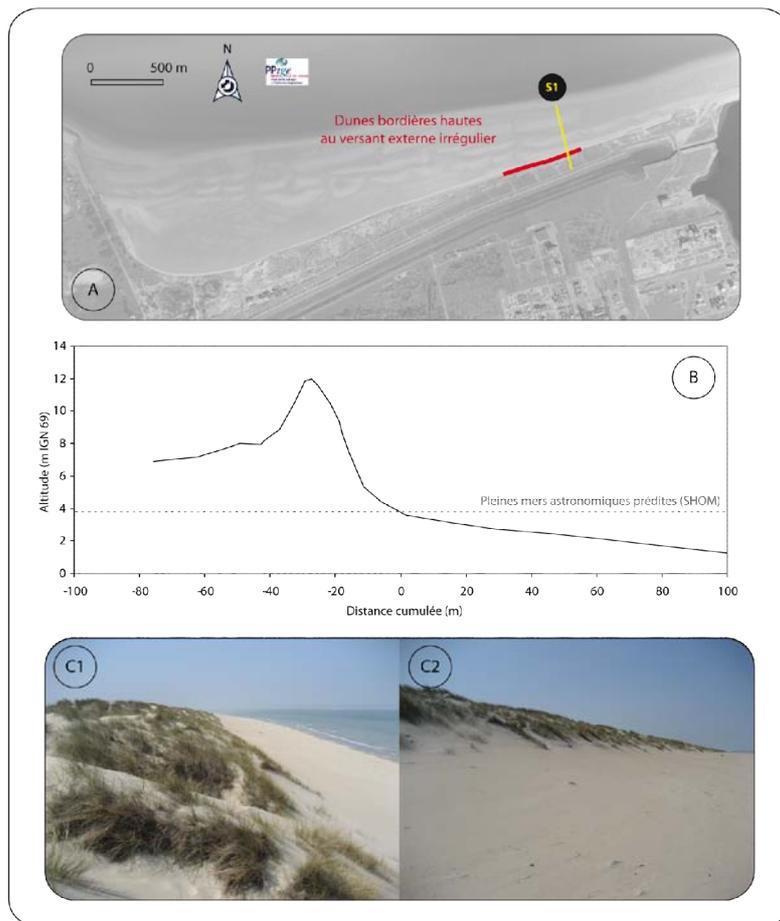


Figure 3.14. Localisation des dunes bordières hautes au versant externe irrégulier (A) en plan, (B) sur un profil transversal représentatif, et (C) photographies prises vers l'O (C1) et l'OSO (C2).

2.1.1.5. *Plateforme artificielle sableuse en érosion*

La morphologie de cette partie est caractéristique des secteurs en érosion chronique et se trouve à l'Est du Clipon (Figure 3.15-A). Il s'agit de la bande enherbée qui a été érodée, il n'y a donc plus à cet endroit de cordon dunaire. Une falaise sableuse de 3 à 4 m de hauteur, culminant à 8 m NGF, témoigne de cette dynamique d'érosion (Figure 3.15-B) et correspond au secteur du trait de côte qui recule depuis 1992. Des enrochements ont été déposés sur deux portions du trait de côte pour protéger le pied de falaise.

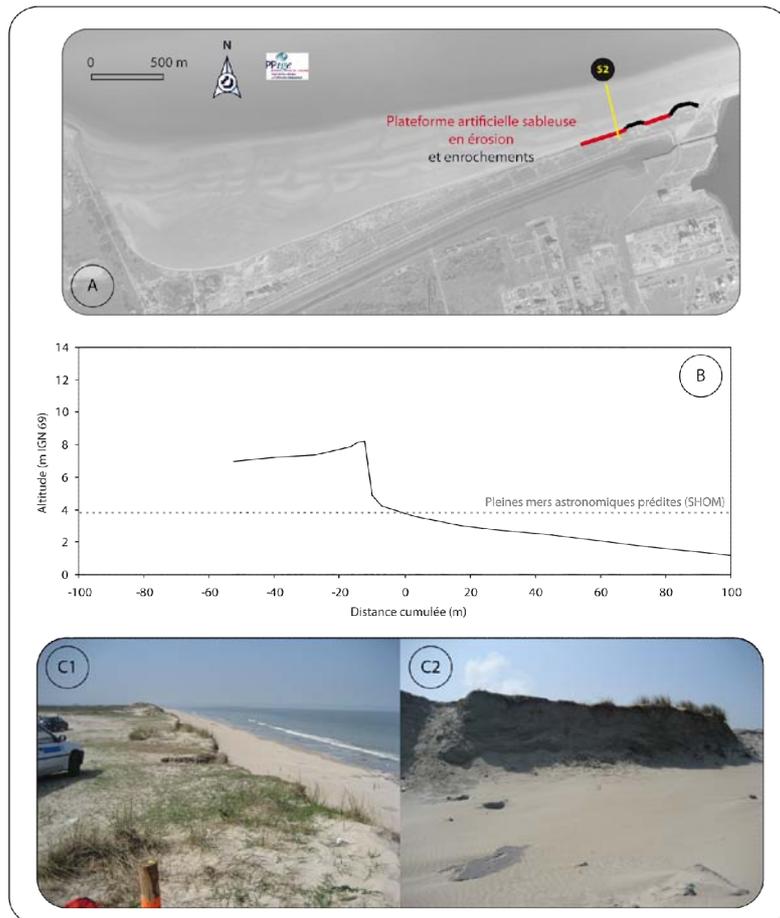


Figure 3.15. Localisation de la plateforme artificielle sableuse en érosion (A) en plan, (B) sur un profil transversal représentatif, et (C) photographies prises vers l'O (C1) et l'OSO (C2).

2.1.2. Evolution de la superficie dunaire au Clipon depuis 1983

Suite à ce qui a été mis en avant dans la partie précédente relative à la dynamique de la végétation, trois secteurs ont été identifiés (Figure 3.16). A l'Ouest, le secteur de la plateforme intertidale a subi des incursions marines à plusieurs reprises au cours des années 1990, ainsi qu'un rechargement de plage de 500.000 m³. Il s'agit de la partie qui occupe le plus d'espace avec 407 000 m² en 1983. Conformément à ce qui se passe pour la limite de végétation (Figure 3.1), la superficie des dunes végétalisées est en retrait jusqu'en 1992 (358 000 m²). Puis elle s'étend à nouveau, particulièrement entre 1992 et 1994 (+ 76 000 m²), puis plus lentement, et stagne même à partir de 2005 pour atteindre 489 000 m² en 2009 (Figure 3.16-A). A l'arrière du cordon bordier, la topographie dunaire est chaotique (Figure 3.9 – profil C2) et ne présente pas de morphologie particulière du fait des nombreuses interventions humaines du passé dans ce secteur. On trouve de nombreuses buttes colonisées par des fourrées à argousiers, ainsi que des prairies sableuses à oyats et des pannes dunaires.

La trace des actions humaines passées est révélée également par la présence de végétations halophiles sur dépôts de dragages, sables perturbés et remaniés (TBM, 2008).

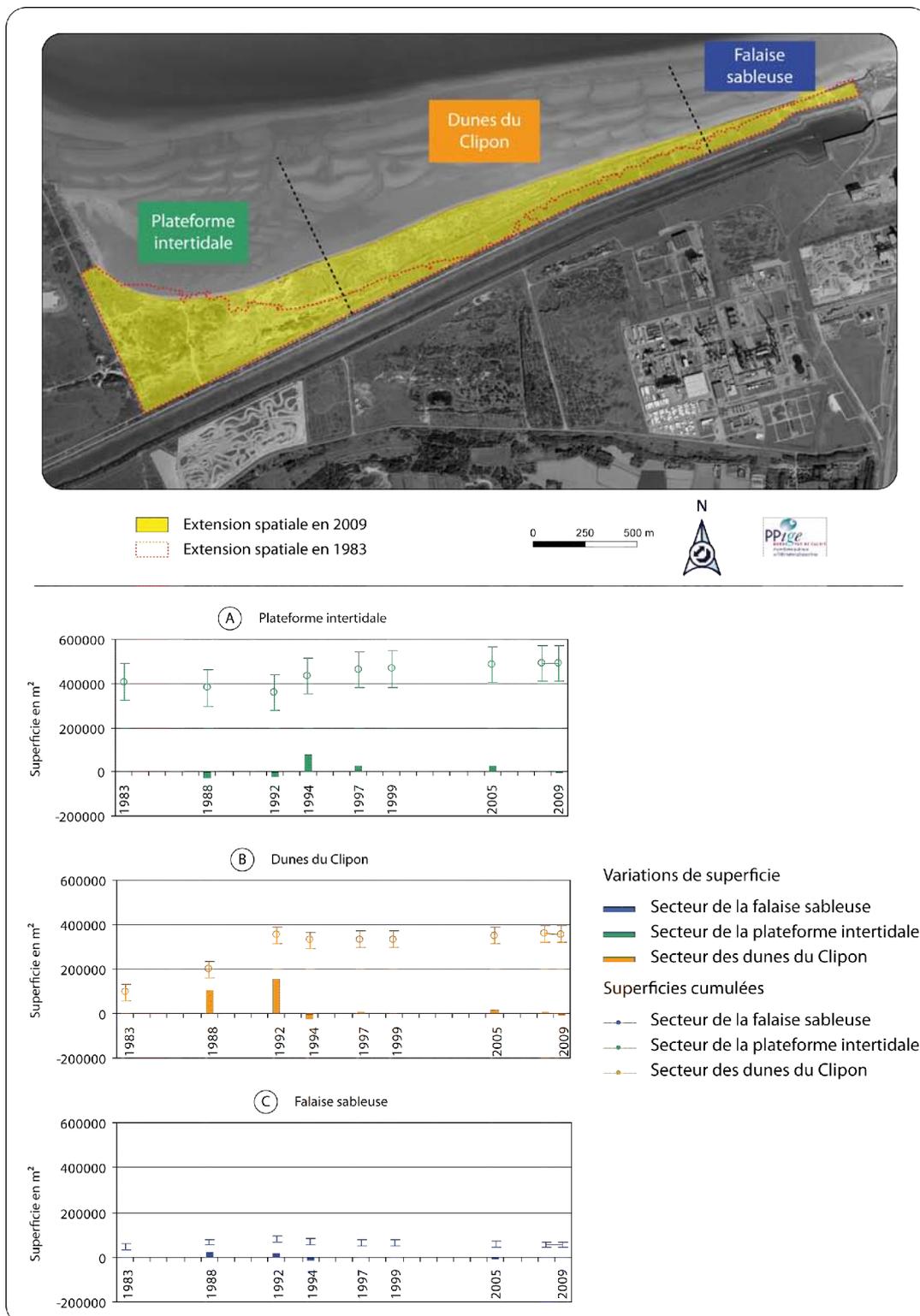


Figure 3.16. Evolution de l'extension spatiale de la végétation de la plage du Clipon de 1983 à 2009. (A) Plateforme intertidale; (B) Dunes du Clipon; (C) Falaise sableuse

A l'Est, il s'agit de la partie située en avant de la plateforme supratidale artificielle. Un premier secteur, à l'Ouest, a été nommé Dunes du Clipon. Cette partie est en accumulation sur le moyen terme. En 1983, la superficie occupée par les dunes végétalisées est restreinte (95 000 m²) (Figure 3.16-B). Contrairement à ce qui se passe pour le secteur de la plateforme intertidale, leur extension spatiale est multipliée par 3,5 entre 1983 et 1992 pour atteindre 351 000 m². Par la suite, après un léger retrait entre 1992 et 1994 (-21 000 m²), la superficie stagne jusqu'en 2009 où les dunes du Clipon occupent 355 000 m² (Figure 3.16-B).

Enfin, le secteur de la falaise sableuse, à l'extrémité Est du Clipon, est restreint et en retrait, surtout depuis 1992. En effet, au début de la période d'étude, ce secteur bénéficie des rechargements de plage jusqu'en 1992 et sa superficie passe de 46 000 m² à 82 000 m² (+ 36 000 m²) (Figure 3.16-C). Après cette date, c'est une érosion continue qui caractérise cette unité, qui occupe néanmoins 55 000 m² en 2009, soit 9 000 m² de plus qu'en 1983. Aujourd'hui, il n'existe plus de cordon bordier, et la plateforme artificielle créée en 1983 est érodée en falaise vive.

Sur l'ensemble de ce secteur Est (Dunes du Clipon et plateforme sableuse), la plateforme artificielle a été stabilisée par de la végétation, et aujourd'hui est colonisée par des espèces rudérales et invasives. On observe localement quelques prairies hygrophiles et roselières. Entre cette plateforme et le cordon bordier, les espèces sont typiques des prairies sableuses à Oyats, et l'on trouve également des fourrés à Argousier (TBM, 2008).

2.2. Typologie et évolution des dunes le long de la digue du Braek

2.2.1. Typologie des dunes de la digue du Braek

Depuis sa construction en 1963, des dunes ont petit à petit colonisé la digue du Braek. Comme l'ont souligné Jackson et Nordstrom (2011), les aménagements qui sont créés sur les littoraux peuvent considérablement modifier le transport éolien. Ces modifications peuvent donner lieu à des formes dunaires qui se développent à des endroits originaux, que ces auteurs ont nommé « *niche dunes* ». Si des modèles conceptuels de l'évolution des dunes bordières existent (Carter, 1988 ; Hesp, 1984 ; 2002 ; Psuty, 1992 ; Short et Hesp, 1982), considérant

parfois l'influence anthropique (Arens et Wiersma, 1994), ces typologies ne prennent que rarement en compte les formes dunaires qui se développent sur des terrains artificiels. Leur recensement permettrait de mieux les appréhender dans l'aménagement du littoral et ainsi mieux prévoir les contraintes qu'elles peuvent engendrer (ensablement d'infrastructures), mais aussi faire en sorte qu'elles se développent, ce qui dans certains cas peut aider à une « renaturation » des sites. Sur la digue du Braek, la répartition des dunes est diverse, plusieurs cas de figure se présentent.

2.2.1.1. *Dunes de pied de digue de la jetée de St-Pol*

Ce type de dunes est localisé à un endroit bien précis, il s'agit de la partie Est de l'UG4, au contact de la jetée de St-Pol (Figure 3.17-A). A cet endroit, des quantités de sable importantes se sont accumulées en amont-transit de l'épi formé par la jetée de St-Pol, aboutissant au développement d'un champ de nebkhas coalescentes en pied de digue. Ce sont donc des formes dunaires communes. L'accumulation de sables éoliens est si importante qu'elles mesurent plusieurs mètres de haut à cet endroit et s'étendent sur plus de 13.000 m² en 2009. Ces dunes culminent à environ 7 m NGF, soit bien au dessus des plus hautes mers (3,787 m NGF au port Est (SHOM, 2011)) (Figure 3.17-B). Le haut de plage est également à une altitude supérieure par rapport au centre et à l'Ouest de la digue, si bien que les plus hautes mers n'atteignent que rarement la base de ces dunes et il subsiste habituellement un haut de plage sec à marée haute (Figure 3.17-C).

Le couvert végétal est très inégal et de multiples couloirs de déflation parcourent ces dunes de pied de digue (Figure 3.18-A). Ces couloirs sont orientés Nord-Sud et relient le haut de plage à la digue. Cette couverture végétale peu dense permet au vent de facilement mobiliser le sable dans ces dunes. La végétation est essentiellement composée d'*Ammophila arenaria*, et sur le haut de plage, des dunes embryonnaires de taille restreinte se développent en été au niveau de la laisse des plus hautes mers et sont colonisées par *Cakile maritima* (Figure 3.18-B).

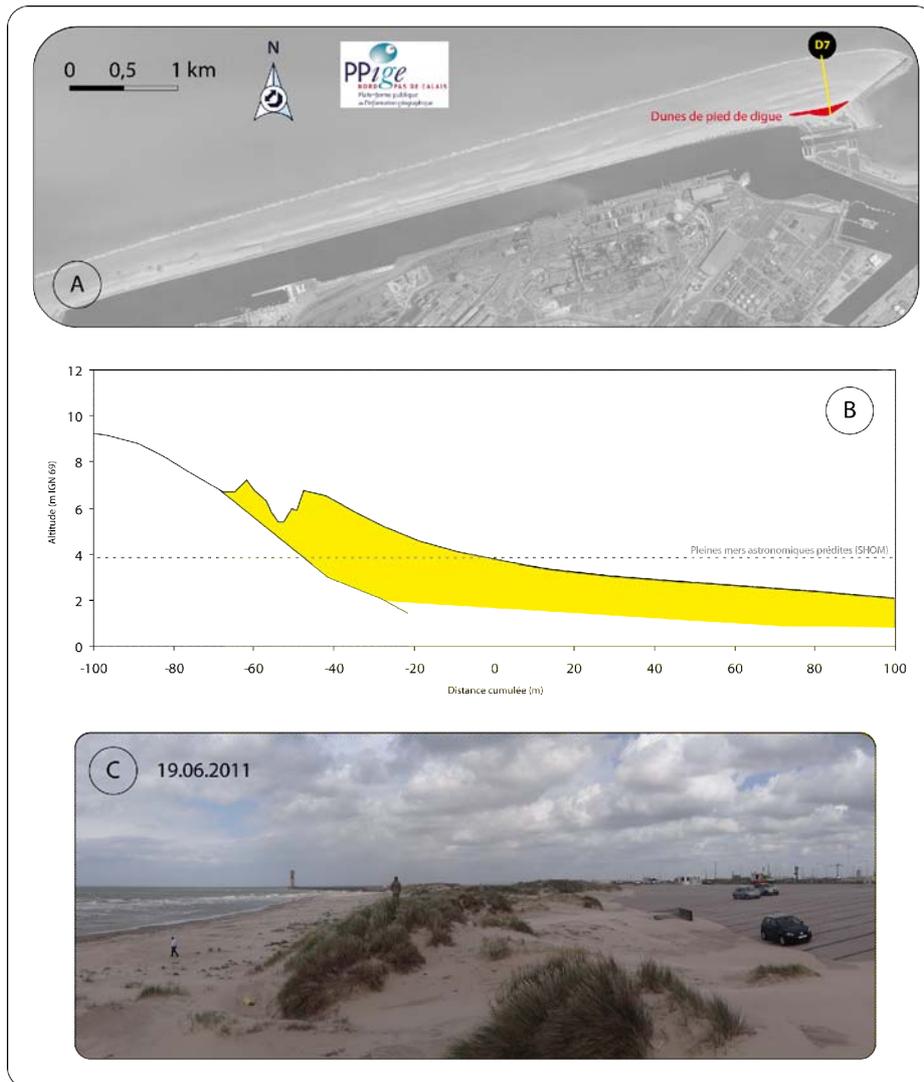


Figure 3.17. Localisation des dunes de pied de digue (A) en plan et (B) sur un profil transversal représentatif, et (C) photographie prise vers le NNE (Cliché, Tresca, 2011).



Figure 3.18. Couloir de déflation reliant la digue à la plage (A) et colonisation de *Cakile maritima* sur le haut de plage en avant des dunes de pied de digue (B) (clichés Tresca 19/06/2011)

2.2.1.2. Dunes en bordure du bassin maritime

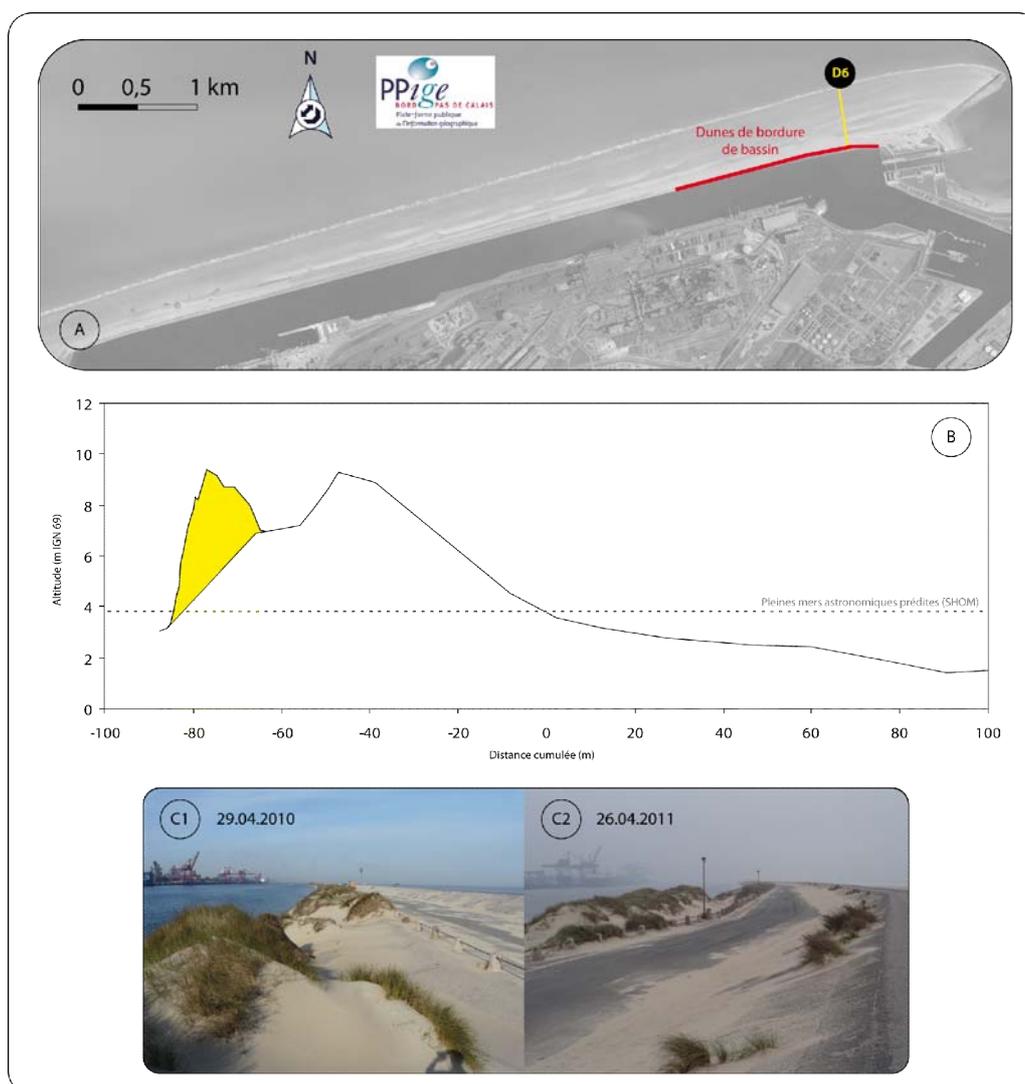


Figure 3.19. Localisation des dunes en bordure du bassin maritime (A) en plan et (B) sur un profil transversal représentatif, et (C1 & C2) photographies prises vers l'OSO (Clichés, Tresca, 2010).

Le bassin maritime accueillant les minéraliers se situe en arrière de la digue du Braek. Comme l'on noté [Nordstrom and Arens \(1998\)](#), les ouvrages de défense contre la mer parallèles au rivage facilitent le transfert de sable de la plage vers l'intérieur des terres, du fait de leur pente douce, et de la dureté de l'asphalte qui facilite la saltation. C'est ce qui s'est produit en arrière de la digue du Braek au fil des années. L'accumulation de sable éolien dans ce bassin a permis là aussi le développement de dunes en bordure du bassin maritime sur plus d'1 km de long (Figure 3.19-A). Ces dunes culminent à plus de 9 m NGF d'altitude par endroits (Figure 3.19-B), soit plus haut que la crête de digue, et leur forme se rapproche de celle des cordons bordiers. Elles ne sont que partiellement végétalisées (Figure 3.19-C1), ce qui donne lieu régulièrement à des envols de sable sur la route qui longe le bassin. Enfin, en

fonction des coups de vents et de leur direction, des accumulations sableuses se produisent également sur cette même route, ainsi qu’au niveau de la base du revers de digue (Figure 3.19-C2). Ces dépôts ne forment pas de dunes à cet endroit, car le sable est régulièrement déblayé pour qu’il n’envahisse pas la route.

2.2.1.3. Dunes de revers de digue

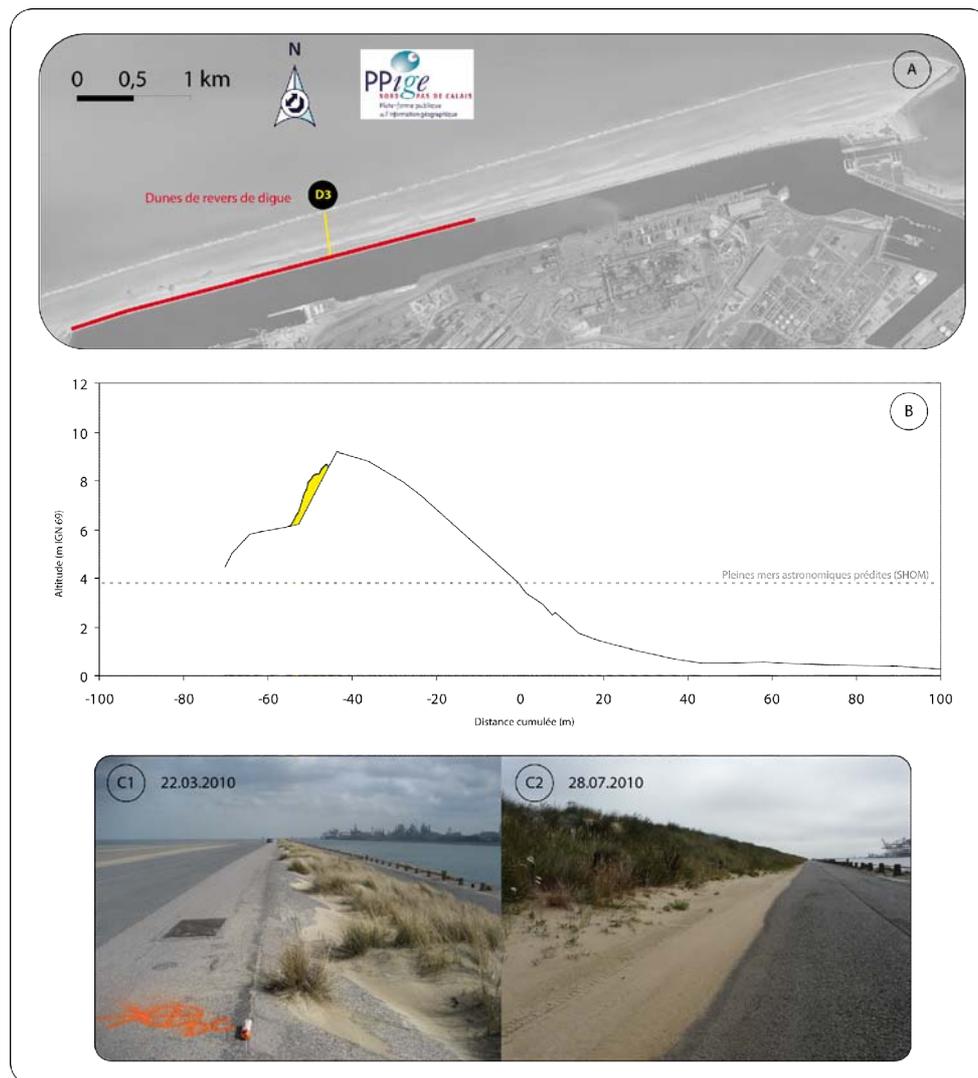


Figure 3.20. Localisation des dunes de revers de digue (A) en plan et (B) sur un profil transversal représentatif, et (C1) photographie prise de la crête vers le NNE et (C2) sur la route en arrière vers l’OSO (Tresca, 2010).

Il s’agit des formes dunaires qui occupent le plus long linéaire de digue, puisqu’on les trouve sur une longueur d’environ 3 km (Figure 3.20-A), sur la moitié Ouest de la digue du Braek. Elles sont peu volumineuses, ne dépassent pas le sommet de digue (Figure 3.20-B) et

sont plaquées contre le versant interne, côté terre. Ces dunes sont presque intégralement couvertes de végétation (Figure 3.20-C1 et C2), ce qui réduit considérablement toute mobilisation du sable par le vent. La végétation (oyats) s'installe en exploitant des fissures dans la digue afin de traverser l'enrobé, et venir s'enraciner dans le sable qui se trouve en dessous (Figure 3.21-A).

Les fissures se développant sur le revers sont généralement comblées par le sable provenant de la plage qui passe au dessus de la digue. Elles s'étendent de la crête vers la base, les dunes sont donc de forme allongée et transversale lorsqu'elles commencent à se développer (Figure 3.21-B). Au fur et à mesure que les oyats piègent le sable, les dunes deviennent coalescentes, jusqu'à recouvrir le revers de digue sur des centaines de mètres de long.



Figure 3.21. Photographies de la naissance de dunes sur la digue par l'exploitation des fissures dans l'enrobé (Clichés, Tresca, 28/07/2010)

La végétation qui recouvre ces dunes est principalement composée d'*Ammohpila arenaria*, mais des espèces pionnières se développent également (*Cakile maritima*, Figure 3.22 A et B), ainsi que des espèces patrimoniales telles que le panicaut maritime (*Eryngium campestre*, TBM, 2008) (Figure 3.22-B).



Figure 3.22. Colonisation de *Cakile maritima* (A et B) et *Eryngium campestre* (B) sur les dunes de revers de digue (clichés Tresca 28/07/2010)

2.2.1.4. Dunes de sommet de digue

Ces dunes se situent sur le versant interne de la digue du Braek, et sont donc au départ similaires aux dunes de revers que l'on retrouve plus à l'Ouest, mais elles sont bien plus volumineuses et hautes. On les trouve dans la partie centrale de la digue du Braek, sur une longueur d'environ 1 km (Figure 3.23-A). Elles couvrent donc la pente interne et dépassent le sommet de digue de deux mètres environ, culminant à plus de 11 m NGF (Figure 3.23-B). Tout comme les dunes de revers, elles sont stabilisées par les oyats (Figure 3.23-C1 et C2) et des espèces pionnières y sont visibles en été (*Cakile maritima*) ; elles sont donc peu mobiles et leur forme est similaire à celle d'un cordon bordier.

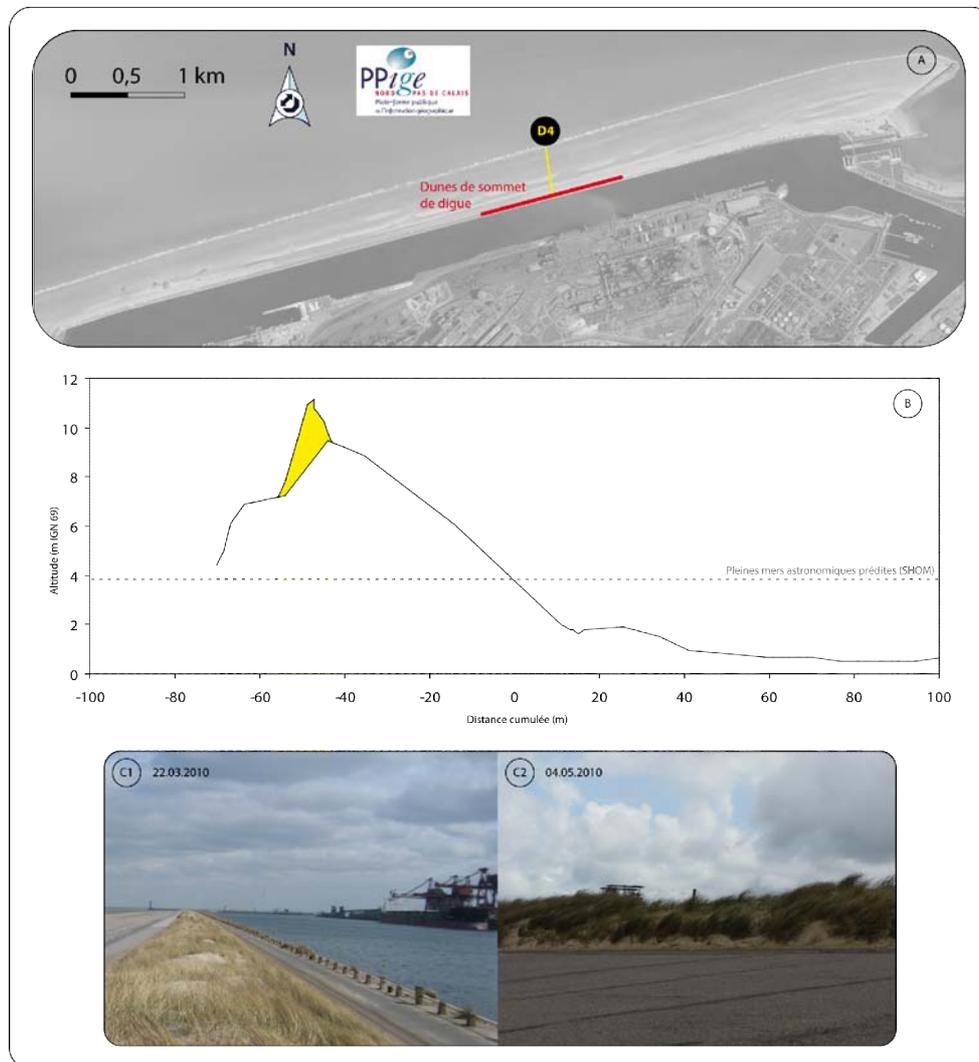


Figure 3.23. Localisation des dunes de sommet de digue (A) en plan ; (B) sur un profil transversal. (C1) : photographie prise de la crête vers le NNE, et (C2) photographie prise depuis le SE (Clichés, Tresca, 2010).

2.2.1.5. Dunes d'obstacles

Des dunes d'obstacles se sont formées à divers endroits de la digue où se trouvaient des blocs ou autres obstacles (filets etc.), qui ont permis de piéger une petite quantité de sable qui a rapidement été fixée par de la végétation. Elles sont de tailles diverses, allant d'une cinquantaine de cm de hauteur (Figure 3.24-A), à des formes de taille plus imposante, qui se sont créées sur des amas de blocs (Figure 3.24-B). Elles peuvent donc à certains endroits faire plus de 2 m de hauteur et plusieurs mètres de long. Ces dunes se forment hors d'atteinte de la marée, ce qui leur permet de persister, même si elles ne se développent que peu. D'autres formes dunaires sont plus éphémères et prennent naissance dans les débris laissés par la laisse de mer (notamment des morceaux de filets de pêche), et sont parfois colonisés par *Cakile maritima* (Figure 3.25).



Figure 3.24. Photographies de dunes d'obstacles sur la digue du Braek. (A) Dune de taille modeste (0,5 m de haut) formée sur un bloc, (B) dune de 2 m de hauteur formée sur un amas de gravats et blocs (Clichés, Tresca, 2010).



Figure 3.25. Colonisation de *Cakile Maritima* sur une dune d'obstacle au niveau de la laisse de mer sur la digue du Braek (cliché Tresca 05/06/2012).

2.2.2. Evolution des superficies dunaires sur la digue du Braek depuis 1988

Trois secteurs distincts ont pu être identifiés suite à la description des formes dunaires sur la digue du Braek (Figure 3.26). Le secteur Braek Ouest tout d'abord est constitué de dunes de revers de digue uniquement, le secteur Braek Est comprend les dunes de sommet de digue et les dunes du bassin maritime. Enfin, le secteur des dunes de pied de digue est situé à l'extrémité Est, et il comprend une partie des dunes du bassin maritime.

La digue du Braek fut achevée en 1963, et en 1988, les dunes occupaient une superficie de 7 905 m², dont près de la moitié était représentée par les dunes de pied de digue (3703 m², soit 47%), qui se trouvent en amont-transit de l'avant-port Est, contre la jetée de St-Pol (Figure 3.26-C). Cette jetée bloque une partie du transit sédimentaire dont le transfert net s'effectue de l'Ouest vers l'Est sur cette côte (Bertier, 2009 ; Cartier et Héquette, 2011). Cela explique au moins en partie l'accumulation sableuse et donc le développement de ces dunes. En 1988, d'autres dunes de pied de digue étaient visibles dans la partie Est du secteur Braek Est (Figure 3.26-1988), qui ont subsisté également en 1991. Puis leur superficie a décliné et on ne les voit plus après 1994. On remarque que les dunes de bassin se développent d'abord à l'Est, près des dunes de pied de digue et s'étendent ensuite vers l'Ouest (Figure 3.26 – 1991 puis 1999). Leur développement coïncide avec celui des dunes de pied de digue. On peut donc émettre l'hypothèse que ces dernières constituent une source pour le sable que l'on retrouve en bordure du bassin.

L'ensemble des dunes occupe aujourd'hui 74 000 m², ce qui représente l'extension maximale sur la période étudiée. Leur évolution est caractérisée tout d'abord par une hausse généralisée de la superficie entre 1988 (8000 m²) et 1991 (17 000 m²) (Figure 3.26-A, B et C), date à laquelle les dunes de revers étaient particulièrement bien étendues. Puis une baisse générale se produit pour atteindre un total de 3 700 m² en 1994, c'est-à-dire une surface deux fois moins importante qu'en 1988. Cette diminution pourrait être due à des opérations d'entretien de la digue, visant à déblayer le sable et la végétation pour prévenir les dégradations qui auraient pu en résulter. Aucun document d'archive n'a été trouvé pour prouver ces interventions, mais des témoignages oraux d'employés au service ANI (Accès Nautiques et Infrastructures – service qui a la charge de l'entretien des ouvrages) lors de cette période, se sont recoupés pour le confirmer. Il en va de même pour les dunes de pied de digue, dans lesquelles des extractions de sable ont pu être effectuées, ce qui pourrait expliquer que

leur développement soit bien moins rapide que sur le reste de la digue entre 1994 et 1999. Entre ces deux dates, l'extension des dunes de pied de digue a été très limitée (de 2500 m² à 2800 m²), alors que sur le reste de la digue, la superficie a été multipliée par 9 (de 1200 m² à 11000 m²).

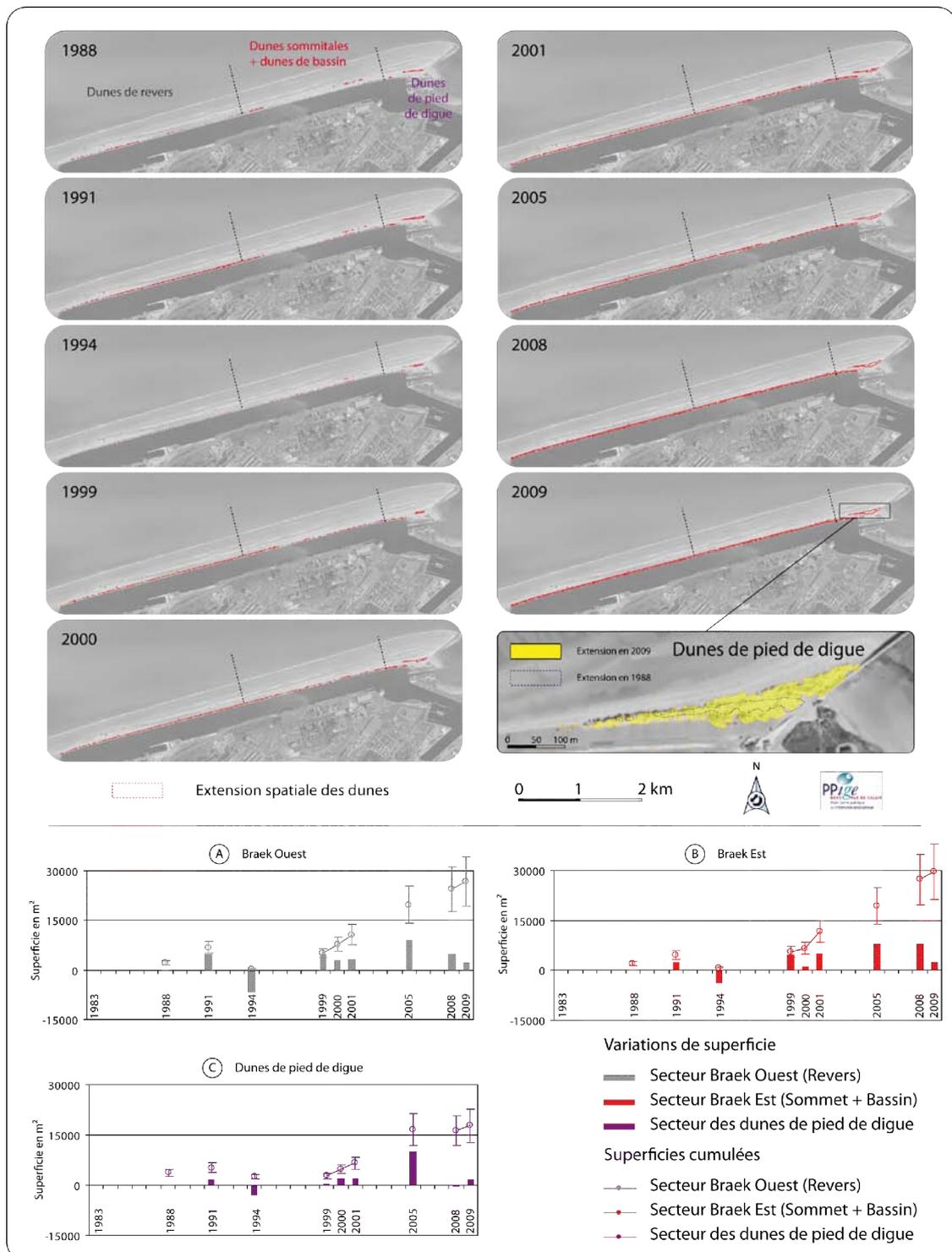


Figure 3.26. Evolution de la superficie occupée par les dunes sur la digue du Braek de 1988 à 2009.

La diminution des superficies dunaires sur la digue du Braek entre 1991 et 1994 correspond également à la période où des tempêtes ont sévi durant les années 1990 et qui ont été à l'origine de plusieurs formes d'érosion et d'incursions marines au niveau des dunes du Clipon. Ces tempêtes pourraient aussi expliquer cette baisse dans la superficie des dunes sur la digue, une hausse des embruns aurait pu contribuer à une baisse du couvert végétal et à une dispersion du sable qui constitue ces dunes. Le régime des vents à la station de Dunkerque ayant été analysé à plusieurs reprises ([Maspataud, 2011](#), [Chaverot, 2006](#)), aucune intensification de la vitesse vents n'est à noter dans le régime général durant la période que nous étudions. On note même une baisse de la fréquence des vents forts (supérieurs à 8 m.s^{-1}), particulièrement depuis la fin des années 1980. En ce qui concerne la fréquence des plus hauts niveaux d'eau, ceux-ci n'ont pas pu être analysés en raison de lacunes importantes (50% à 100%) dans les données de 1987 à 1996 au marégraphe de Dunkerque ([Maspataud, 2011](#)).

Après 1994, la superficie globale des dunes augmente rapidement, surtout entre 1999 et 2005, à un rythme moyen de $7\,000 \text{ m}^2$ par an. Après 2005, le rythme de développement reste soutenu pour le secteur Braek Est (dunes de sommet et de bassin), mais se ralentit nettement pour le secteur Braek Ouest (dunes de revers) et leur superficie se réduit même très légèrement pour les dunes de pied de digue. Ce rythme plus soutenu à l'Est pourrait correspondre au développement des dunes de sommet dans cette partie, tandis qu'à l'Ouest, les dunes de revers n'ont pas atteint le sommet de la digue, ce qui peut expliquer leur faible progression.

Entre 2008 et 2009, la hausse se poursuit. En 1988, les dunes de pied de digue représentaient presque 50% du total des superficies dunaires sur la digue du Braek, mais seulement 25% en 2009.

CONCLUSION DU CHAPITRE 3

Ce chapitre permet d'identifier plusieurs secteurs homogènes, de par leur morphologie actuelle, tout autant que dans leur évolution à moyen terme :

- Sur la plage du Clipon, il est possible de distinguer (Figure 3.16) :

→ Un premier secteur à l'Ouest caractérisé par une orientation du trait de côte incurvée, d'abord orienté NO-SE puis OSO-ENE. Des interventions humaines (cordon dunaire artificiel, rechargement de plage) ont permis aux dunes végétalisées de gagner du terrain ; néanmoins, des brèches et incursions marines se sont produites dans les années 1990. Plusieurs types de dunes ont été observées (dunes bordières stables et dunes embryonnaires hémisphériques à l'extrémité Ouest, un cordon bordier densément végétalisé dans la partie Est). En outre, une flèche littorale abrite ce secteur, et des études ont montré que l'agitation y était plus faible (Hemdane, 2006 ; Bertier, 2009), ce qui engendre une granulométrie plus fine que sur le reste de l'UG4 (Héquette et al., 2011) comme nous le verrons par la suite.

→ Au centre du Clipon, le trait de côte est orienté OSO-ENE. Le couvert végétal a fortement progressé à l'Ouest de ce secteur, d'abord grâce à des interventions anthropiques (bande enherbée, plateforme supratidale), puis naturellement, comme l'a prouvé l'analyse de la morphologie de la dune bordière qui montre la présence d'un double cordon. A l'Est l'évolution est plus nuancée du fait d'un cordon simple.

→ A l'Est du Clipon, le trait de côte garde la même orientation, mais il recule depuis 1994. La plateforme artificielle qui avait été créée lors du creusement du canal des dunes est entaillée en falaise par les vagues. Cette érosion met en péril un terminal gazier installé près de la côte dans ce secteur, si bien que des enrochements ont été posés localement pour empêcher un recul plus important.

- Sur la digue du Braek, trois secteurs également ont été distingués (Figure 3.26) :

→ A l'Ouest, il s'agit des dunes de revers de digue. Elles se trouvent totalement abritées des vents frontaux et sont couvertes par une végétation dense. Ces éléments font que la mobilisation du sable par le vent est aujourd'hui quasiment impossible sur ces dunes.

→ Plus à l'Est on trouve les dunes de sommet de digue ainsi que celles de bordure de bassin. Ces deux types de dunes sont davantage exposés au vent, et leur couvert végétal est moins important, particulièrement pour les dunes du bassin, qui peuvent éventuellement être alimentées par le sable provenant de la plage.

→ A l'extrémité Est, les dunes de pied de digue se sont rapidement développées au contact de la jetée de St-Pol. Ces dunes sont partiellement recouvertes de végétation et de multiples couloirs de déflation permettent une facile mobilisation du sable par le vent. Le sable de ces dunes est exporté en partie vers l'arrière de la digue, comme le prouve le développement parallèle des dunes de bassin à proximité.

Dans le chapitre suivant, nous étudierons l'évolution à court terme des dunes bordières et de la plage à l'aide de profils topographiques transversaux, ce qui nous aidera à comprendre si la dynamique actuelle correspond à celle que nous venons de décrire depuis 1983.

**CHAPITRE 4 - EVOLUTION A COURT TERME DES PROFILS
DE PLAGE ET REPONSE AUX EVENEMENTS
MORPHOGENES**

INTRODUCTION

Quatorze profils topographiques (Figure 4.1) ont été levés 7 fois chacun au cours des 19 mois qu'ont duré les mesures topographiques *in situ*. Les mesures sur le haut de plage et le versant dunaire ont été réalisées à chaque fois, tandis que l'estran a fait l'objet d'un suivi moins fréquent (trois levés au début, milieu et fin de suivi). Le suivi d'un quinzième profil à l'extrémité Ouest du Clipon était prévu en début de thèse (cf. chapitre 3 – profil C1), mais en raison d'un accès restreint à cette partie du site afin de favoriser la pérennité d'une colonie d'oiseaux (sternes naines), la trop faible fréquence des mesures n'a pas permis de présenter un suivi suffisamment précis et régulier.

L'étude de ces profils permettra d'étudier la dynamique du site sur le court terme et les conditions érosives lors de la période d'étude seront analysées. Le site a été divisé en six unités homogènes dont nous étudierons les particularités dans un premier temps, avant de se concentrer sur l'étude de leur évolution.

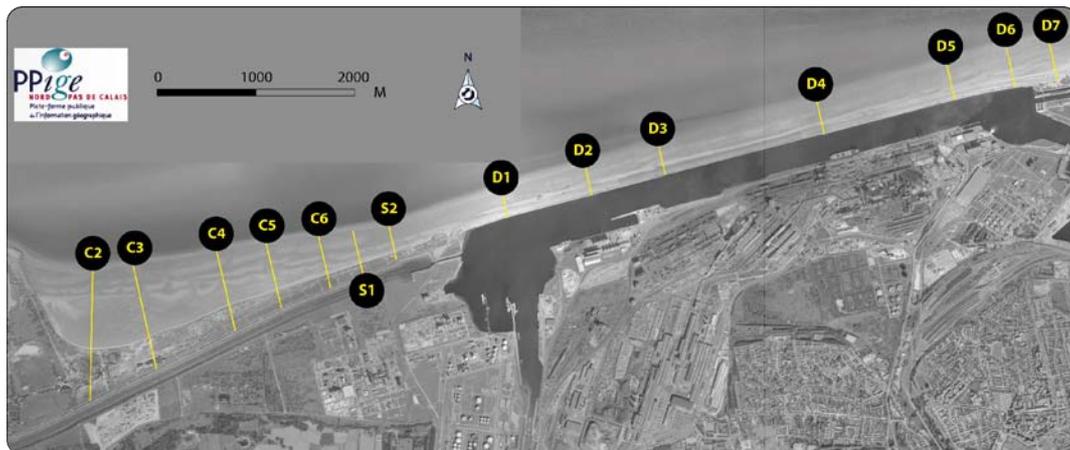


Figure 4.1. Carte de localisation des profils de plage

1. Caractérisation de 6 unités morpho-sédimentologiques sur l'UG4

Quatre critères ont été utilisés afin de différencier six unités homogènes d'un point de vue morphologique et sédimentologique, c'est à dire les pentes de la plage et du versant dunaire, la granulométrie de surface (grain moyen, tri, asymétrie), la morphologie de la plage et du versant externe de la dune bordière, et le type de substrat (sable ou asphalté). Afin de synthétiser la rédaction, chaque unité a été étudiée via un profil représentatif, et l'évolution détaillée des profils restants est disponible en annexe (annexe 3).

1.1. Pentés de plage, morphologie du profil et type de substrat

Les pentés de plage ont été calculées sur les profils les plus longs, qui ont été levés peu avant les marées d'équinoxe du mois d'avril 2010 (Figure 4.1). Pour chaque profil, trois valeurs de pente ont été calculées : le profil dans son ensemble, le haut de plage et le versant dunaire. La limite choisie entre le versant dunaire et le haut de plage est l'altitude 3,787 m NGF. Il s'agit de la hauteur des PHMA au marégraphe du port Est (SHOM, 2011). Les profils étant répartis sur l'ensemble du site d'étude, c'est la station du port Est, qui sert de référence pour le SHOM, qui a été utilisée

Les pentés les plus faibles sont localisées à l'Est et à l'Ouest du site, et elles s'accroissent plus on se rapproche du centre (Figure 4.2). Les profils ont été classés en plusieurs catégories selon leur pente. Les profils C2 et C3, à l'Ouest, ont la pente la plus faible, inférieure à 1 %, et leur morphologie est caractérisée par la présence d'une plateforme intertidale sablo-vaseuse de 450 m de large (pente à 0,08%), comme on en retrouve également à Marck à l'Ouest de Dunkerque (Aubry et al., 2009), suivie d'une plage à barres intertidales (1,26%). Les plus fortes pentés de plage (2,3 à 3,4 %) se situent devant la partie occidentale de la digue (D1 à D4), ainsi que devant le terminal gazier (S2). Sur cette partie de la plage, les barres intertidales sont larges et proches du haut de plage. Deux séries de profils ont une pente intermédiaire, dont la valeur se situe entre 1 et 2 %, il s'agit des profils de la partie orientale du Clipon (C4 à S1) et de l'Est de la digue du Braek (D5 à D7).

Les pentés des versants dunaires présentent également de grandes disparités spatiales. Dans la partie centrale du Clipon (C4 à C6), on trouve les pentés dunaires les moins prononcées avec des valeurs comprises entre 16,1 et 17,7 %, tandis que de part et d'autre de ce secteur les pentés des versants dunaires sont plus prononcées (C2, C3 et S1) comprises entre 27,3 (C3) à 31,9 %. A l'Est du Clipon, la morphologie est caractérisée par une falaise sableuse de 4 m de haut (profil S2).

Sur la moitié Est du site, la digue du Braek « remplace » le versant dunaire et la pente ne varie que très peu, elle est comprise entre 12 et 13%. A l'Est, de la digue (D6), la pente est légèrement plus faible en raison de la présence d'une barre sableuse en pied de digue. Sur la partie la plus orientale de la digue (D7), les dunes de pied de digue recouvrent la partie basale de l'ouvrage, ce qui contribue à affaiblir la pente (valeur de 6,5 % à cet endroit).

Les profils ont tous été recalés sur une origine commune matérialisée par le niveau des Plus Hautes Mers Astronomiques (PHMA), ce qui permet de les comparer entre eux (Figure 4.2 -A et B). Si l'on considère l'ensemble du profil (versant dunaire/digue + estran), on observe une accentuation de la pente et une réduction de la largeur de l'estran d'Ouest en Est au Clipon, puis un affaiblissement de la pente et une augmentation de la largeur de l'estran d'Ouest en Est également au niveau de la digue du Braek. L'estran est bien plus court et abaissé au centre de l'UG4, alors qu'il s'élargit et s'exhausse à l'Ouest et à l'Est du site lorsque l'on se dirige sur les marges (Figure 4.2 - B). De fait, il n'existe pas de haut de plage sec au centre du site (entre D1 et D5), comme cela était déjà le cas entre 2001 et 2006 (Bertier, 2009). La partie basale de la digue se trouve sous l'eau à chaque marée haute.

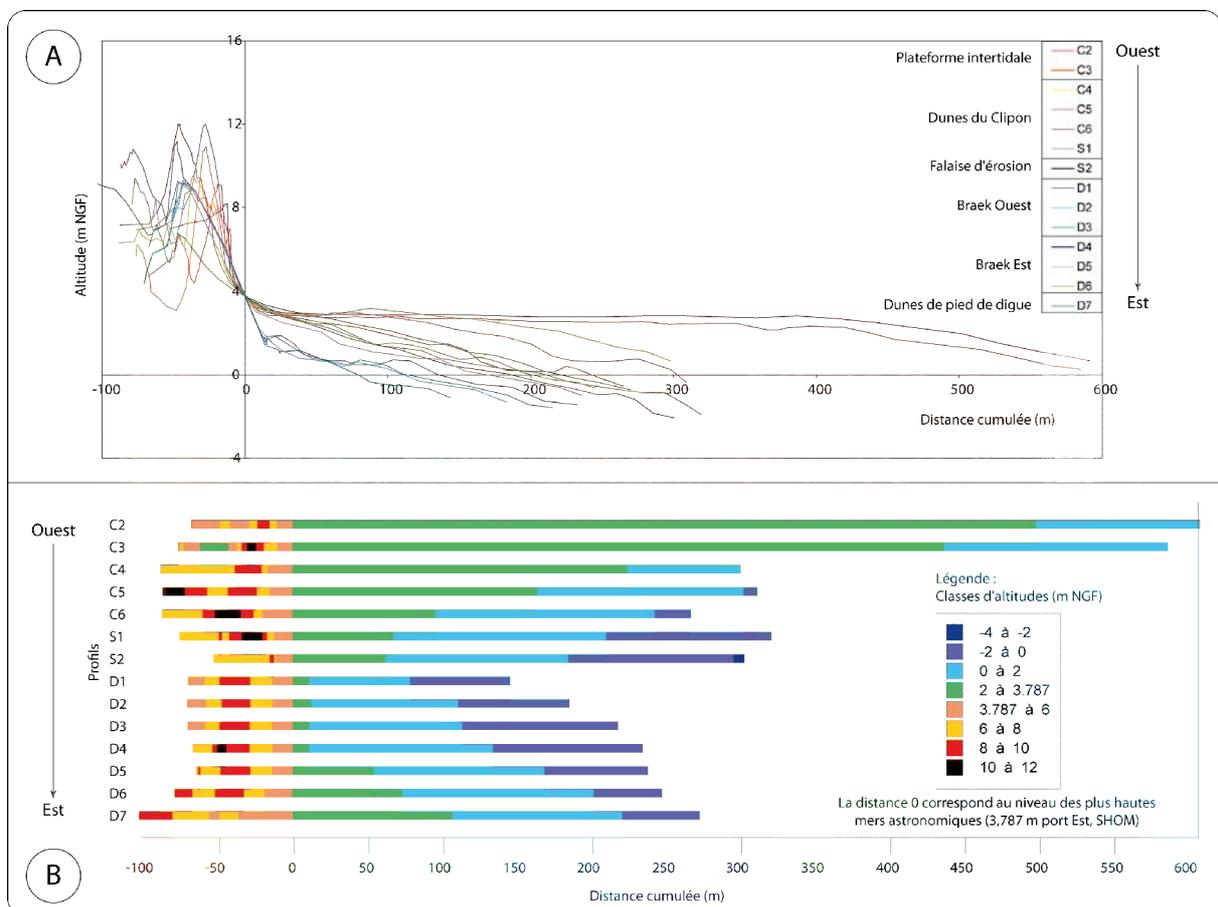
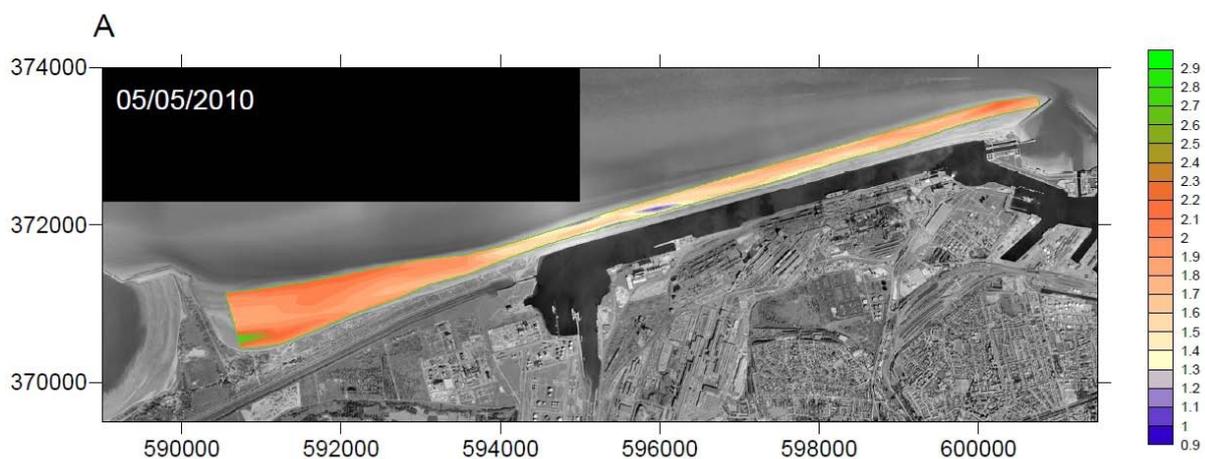


Figure 4.2. Morphologie des profils de l'UG4. (A) Superposition des profils et (B) représentation en plan des profils selon différentes classes d'altitude. La distance 0 correspond au niveau des PHMA. Cette origine commune à tous les profils permet de les comparer entre eux.

1.2. Granulométrie de surface

La granulométrie de surface a été étudiée de manière précise lors du suivi morpho-sédimentaire annuel de l'UG4 (Héquette et al., 2011) (Figure 4.3). Plusieurs échantillons ont

été prélevés entre le haut et le bas de plage le long de 22 profils transversaux répartis régulièrement le long du site. Le grain moyen, le tri et l'asymétrie caractérisent les échantillons prélevés, selon la méthode graphique de [Folk et Ward, \(1957\)](#). Le point principal qui ressort de cette étude est que l'on observe une disparité dans la granulométrie de surface de l'UG4, la partie centrale du site (entre les profils S2 et D4) étant caractérisée par la présence de sables moyens (Figure 4.3). La taille du grain moyen des échantillons prélevés dans cette partie du site est comprise entre 0,27 mm et 0,47 mm. De part et d'autre de cette zone, on trouve des sables plus fins, dont la taille est souvent inférieure à 0,25 mm. L'indice de tri permet également de distinguer la partie centrale. Alors que le classement granulométrique est modéré dans ce secteur, les sédiments sont mieux triés dans les parties Est et Ouest, sauf de façon très localisée au niveau de la flèche littorale à l'Ouest, où les sédiments sont mal classés, ce qui s'explique par la présence de sédiments fins (jusqu'à 19% de sédiments fins < 63 μm , [Héquette et al., 2011](#)). Cette disparité dans la taille moyenne du sable est confirmée également par l'indice d'asymétrie qui est positif dans les secteurs Est et Ouest du site, signifiant une part de sables plus fins dans l'échantillon, tandis que dans la partie centrale, une asymétrie négative est observée, révélatrice de la présence de sables plus grossiers dans la distribution, ce qui est caractéristique des secteurs où l'agitation est suffisante pour exporter les particules les plus fines ([McCave, 1978](#) ; [McLaren & Bowles, 1985](#)). Au contraire, les extrémités Est et Ouest seraient des secteurs propices à la sédimentation.



1.3. Identification de six unités morpho-sédimentologiques sur l'UG4

L'ensemble des caractéristiques présentées dans cette partie ont été résumées dans un tableau (Tableau 4.1). Au vu des critères présentés, six unités ont pu être individualisées (Figure 4.4). Un profil type situé au centre de chaque secteur sera choisi pour la suite de l'étude :

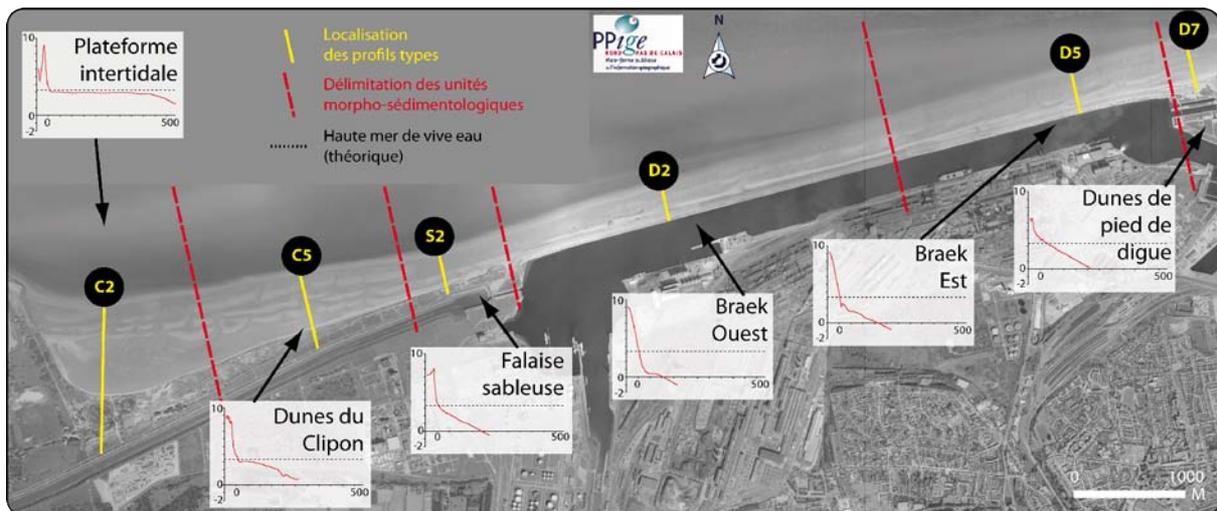


Figure 4.4. Carte de localisation des 6 unités et des profils types.

1.3.1. Profils C2 à C3 : Plateforme intertidale

Cette unité est caractérisée par la présence d'une dune bordière étroite de 5 à 7 m de hauteur, qui culmine à 11 m NGF au niveau du profil C3 (Figure 4.1). La pente des versants dunaires est forte, comprise entre 27,3% en C3 et 31,9% en C2. Les pentes de plage sont faibles, de l'ordre de 0,6% et la morphologie de l'estran est caractérisée par la présence d'une plateforme intertidale sablo-vaseuse d'une largeur de 400 à 500 m. Au-delà de la plateforme intertidale, la pente de plage s'accroît et l'on retrouve une morphologie à barres et à bâches. Le profil type de cette unité est le profil C2 (Figure 4.4).

1.3.2. Profils C4 à S1 : Dunes du Clipon

Cette unité est caractérisée par la présence d'une dune bordière, dont la morphologie varie d'Ouest en Est. Le versant dunaire du profil C4 culmine à 9,5 m NGF pour une pente de 16%, tandis qu'au niveau du profil S1, le sommet de la dune bordière se situe au-dessus de 12 m NGF, et la pente est de l'ordre de 30 %. L'estran, large d'environ 300 m, comporte deux

à trois barres intertidales et la pente est comprise entre 1,1 et 1,8 %. Le profil caractérisant cette unité est le C5 (Figure 4.4).

1.3.3. Profils S2 : Falaise sableuse

Dans ce secteur restreint, la plateforme supratidale artificielle est en érosion (chapitre 3). Une falaise sableuse de 4 m de hauteur caractérise le haut du profil, qui culmine à 8 m NGF. Cette singularité suffit à elle seule à distinguer ce profil des précédents. L'estrans fait 300 m de large, mais contrairement au secteur des dunes du Clipon, la pente de plage est plus accentuée (2%). En ce qui concerne la granulométrie de surface, on se situe à la limite du secteur où la plage est composée des sables les plus grossiers de l'UG4 (diamètre moyen compris entre 0,27 et 0,47 mm). Le profil type est le S2 (Figure 4.4).

1.3.4. Profils D1 à D3 : Braek Ouest

Il s'agit ici du deuxième grand ensemble du site, le haut du profil est constitué par la digue du Braek, dont le sommet se trouve à 9,2 m NGF, et la pente est d'une valeur de 12,5 à 12,6 %. On se trouve dans le secteur de l'UG4 où la granulométrie de surface sur la plage comporte la plus forte proportion de sables moyens (Héquette et al., 2011). Enfin, les pentes de plage sont très accentuées, comprises entre 3,4% en D1 et 2,5 % en D3, et la largeur de l'estrans est restreinte par rapport à ce que l'on observe ailleurs sur l'UG4, de l'ordre de 140 m en D1 à 220 m en D3. Le profil D2 est retenu comme profil type de ce secteur (Figure 4.4).

1.3.5. Profils D4 à D6 : Braek Est

Ici, les pentes sur la digue sont les mêmes que pour le secteur Braek Ouest, comprises entre 11,7 % en D6 et 13,1 % en D4, alors que la pente de plage est relativement plus faible (entre 1,8% et 2,3 %). La largeur de l'estrans est comprise entre 250 m et 300 m. A l'Est (profil D6), la plage se trouve à un niveau supérieur et l'on ne distingue plus la base de l'ouvrage, puisque le niveau des plus hautes mers de vive eau correspond à la limite sable-asphalte, tandis que sur les profils précédents, la mer montait sur l'ouvrage à chaque marée haute. Le profil type choisi pour présenter l'évolution de cette unité est le profil D5 (Figure 4.4).

1.3.6. Profil D7 : Dunes de pied de digue

Dans ce secteur situé à l'Est de l'UG4, la pente du versant dunaire est de 6,5%, bien plus douce donc que celles que l'on retrouve par ailleurs sur l'ensemble du site. Contrairement aux autres profils qui sont adossés à la digue, la présence de ces dunes qui culminent à 7 m NGF en D7 (Figure 4.4) permet le développement d'une végétation pionnière sur le haut de plage en été.

Tableau 4.1. Résumé des caractéristiques de chaque profil topographique selon les critères de type de substrat, de pente, de morphologie et de granulométrie. Les noms de profils en gras correspondent aux profils types

	C2	C3	C4	C5	C6	S1	S2	D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7	
Type de substrat sur le haut du profil	Sable	Sable	Sable	Sable	Sable	Sable	Sable	Asphalte	Asphalte	Asphalte	Asphalte	Asphalte	Asphalte	Sable + Asphalte	
Pente (%)	Plage	0,6	0,6	1,1	1,3	1,6	1,8	2,0	3,4	2,8	2,5	2,3	2,0	1,8	1,7
	Versant dunaire/digue	31,9	27,3	16,1	13,1	17,7	30,2	35,6	12,6	12,6	12,5	13,1	12,8	11,7	6,5
	Profil	1,4	1,8	3,1	2,6	3,9	4,0	3,3	5,5	4,6	4,2	3,9	3,7	3,4	2,3
Morphologie supratidale	Versant dunaire	Falaise duanire fossilisée	Versant dunaire	Versant dunaire	Versant dunaire	Versant dunaire	Falaise sableuse	Digue	Digue	Digue	Digue	Digue	Digue	Versant dunaire + digue	
Morphologie de l'estran	Plateforme	Plateforme	Barres /bâches	Barres /bâches	Barres /bâches	Barres /bâches	Barres /bâches	Barres /bâches	Barres /bâches	Barres /bâches	Barres /bâches	Barres /bâches	Barres /bâches	Barres /bâches	
Granulométrie	Sables fins	Sables fins	Sables fins	Sables fins	Sables fins	Sables fins	Sables moyens	Sables moyens	Sables moyens	Sables moyens	Sables fins	Sables fins	Sables fins	Sables fins	

2. Evolution du versant dunaire et du haut de plage des profils types

Cette thèse portant sur les mesures de captage des sables éoliens, l'étude des variations morphologiques sur les profils types portera essentiellement sur les changements intervenus au niveau du haut de plage et du versant externe de la dune bordière. Il s'agit en effet de la partie du profil dont l'évolution est essentiellement liée à la dynamique éolienne. Le profil le plus court vers l'intérieur des terres est le S2 (falaise d'érosion), puisqu'une route se situe 42 m en arrière des PHMA. Afin d'avoir des volumes comparables pour chaque unité, c'est

cette même distance qui a servi à calculer les volumes dunaires sur tous les profils types (Figure 4.5). C'est également cette distance qui a été retenue afin de caractériser l'évolution volumétrique du haut de plage, soit 42 m.

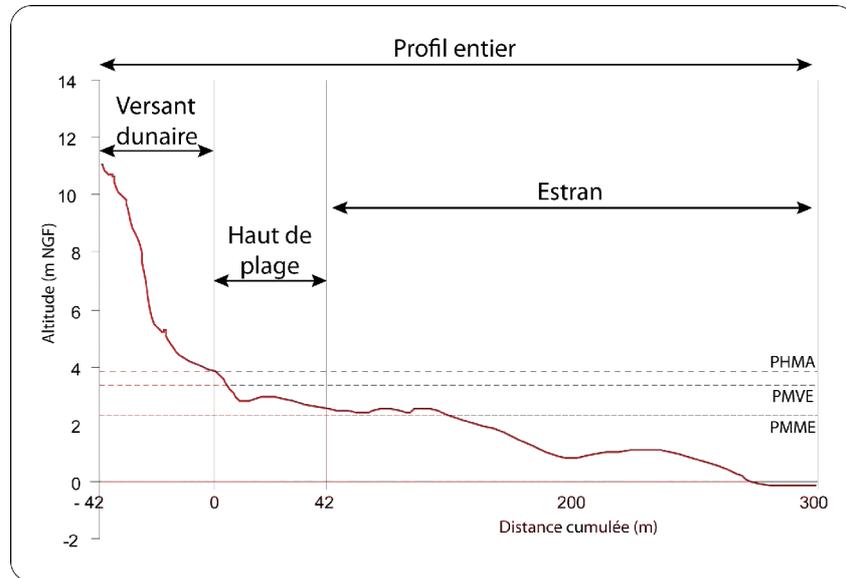


Figure 4.5. Détail des calculs de volumes sur les profils topographiques.

Etant donné les intervalles irréguliers entre les mesures (de 2 à 5 mois), les volumes calculés ont été divisés par le nombre de mois écoulés lors de chaque période, ce qui permet de les comparer. Les variations mensuelles moyennes sont comprises entre $-3,2 \text{ m}^3$ et $+4,5 \text{ m}^3$ sur le versant dunaire, et $-8,2 \text{ m}^3$ et $+12,6 \text{ m}^3$ sur le haut de plage (Tableau 4.2).

Les variations volumétriques mensuelles moyennes du haut de plage et du versant externe de la dune bordière des profils types pour chaque période, ainsi que les roses des vents, sont présentées sur la Figure 4.6. Au niveau de la plateforme intertidale (C2), les variations volumétriques sont très faibles sur toute la durée du suivi, et plus on se dirige vers l'Est du Clipon, plus ces variations sont importantes, que ce soit sur le haut de plage ou sur le versant dunaire. Sur la digue du Braek, les changements principaux interviennent au niveau du haut de plage, surtout dans la partie Est (D5), alors que sur le profil D7 à l'extrémité Est du site, les dunes de pied de digue induisent davantage de variabilité dans la partie située au dessus des PHMA.

Tableau 4.2. Tableau récapitulatif des variations volumétriques mensuelles moyennes sur le versant dunaire et le haut de plage sur l'ensemble des profils suivis. Les profils en gras correspondent aux profils types.

		VOLUMES MENSUELS MOYENS (m ³ /mois)							
		01/04/10 au 01/06/10	01/06/10 au 14/09/10	14/09/10 au 15/02/11	15/02/11 au 13/04/11	13/04/11 au 29/06/11	29/06/11 au 26/10/11	Bilan	
Plateforme intertidale	C2	Versant dunaire	-0,8	0,4	0,3	0,2	0,3	0,1	0,1
		Haut de plage	-1,1	0,6	0,1	-2,0	0,0	-0,1	-0,3
		Versant dunaire + haut de plage	-1,9	1,0	0,3	-1,9	0,3	0,0	-0,1
C3	Versant dunaire	-0,3	0,1	-0,2	-0,8	0,7	0,7	0,1	
	Haut de plage	-1,1	-0,2	0,5	-1,7	0,2	0,4	-0,1	
	Versant dunaire + haut de plage	-1,3	-0,2	0,3	-2,4	0,9	1,1	0,0	
Dunes du Clipon	C4	Versant dunaire	1,9	0,5	0,2	0,1	2,4	1,2	0,9
		Haut de plage	-0,2	-0,2	0,6	-1,2	0,8	-0,7	-0,1
		Versant dunaire + haut de plage	1,8	0,3	0,8	-1,1	3,1	0,6	0,9
	C5	Versant dunaire	-0,5	1,9	0,3	0,3	0,6	0,7	0,5
Haut de plage		-0,1	1,1	1,2	-1,7	0,2	0,5	0,4	
Versant dunaire + haut de plage		-0,5	3,0	1,5	-1,4	0,8	1,2	0,9	
C6	Versant dunaire	-0,4	1,6	0,7	0,6	1,2	0,4	0,7	
	Haut de plage	-1,6	-1,1	2,1	-2,7	0,0	0,7	0,1	
	Versant dunaire + haut de plage	-2,0	0,5	2,8	-2,1	1,2	1,1	0,8	
S1	Versant dunaire	4,5	-3,2	0,4	-0,4	1,3	-0,4	0,2	
	Haut de plage	12,6	-8,2	-1,2	-1,8	1,6	1,1	0,2	
	Versant dunaire + haut de plage	17,1	-11,4	-0,9	-2,2	2,9	0,8	0,4	
Falaise sableuse	S2	Versant dunaire	1,0	1,2	0,3	-2,0	1,4	0,6	0,4
		Haut de plage	-0,4	4,2	-3,4	-1,2	3,9	3,6	0,8
		Versant dunaire + haut de plage	0,6	5,5	-3,1	-3,2	5,3	4,2	1,2
Braek Ouest	D1	Digue	-0,2	0,4	-0,3	0,1	1,1	-0,3	0,0
		Haut de plage	0,8	-1,1	-1,5	4,5	0,2	-1,2	-0,2
		Versant dunaire + haut de plage	0,6	-0,7	-1,8	4,5	1,3	-1,5	-0,2
	D2	Digue	0,2	-0,1	-0,3	0,8	0,4	-0,1	0,0
		Haut de plage	-3,2	1,7	-0,9	0,6	0,5	-0,5	-0,3
		Digue + haut de plage	-3,1	1,6	-1,2	1,3	1,0	-0,5	-0,3
D3	Digue	0,0	0,0	-0,4	1,0	0,4	-0,1	0,0	
	Haut de plage	-3,0	-0,4	-1,0	3,3	-0,3	0,3	-0,3	
Braek Est	D4	Digue	-0,2	0,4	0,0	-1,4	0,8	-0,5	-0,1
		Haut de plage	2,2	-2,3	0,3	2,5	-0,6	-0,4	0,1
		Digue + haut de plage	2,0	-1,9	0,3	1,2	0,2	-0,9	0,0
	D5	Digue	-0,5	0,5	0,0	2,0	-0,7	0,0	0,1
		Haut de plage	-5,3	3,2	-3,2	3,9	1,4	-0,1	-0,4
		Digue + haut de plage	-5,7	3,8	-3,2	5,9	0,7	-0,2	-0,3
D6	Digue	-3,0	1,8	-0,2	0,6	-0,5	-0,3	-0,2	
	Haut de plage	2,6	-0,1	-3,8	3,4	0,6	1,9	0,1	
de pied de digue	D7	Digue + haut de plage	-0,5	1,7	-3,9	4,0	0,2	1,6	-0,1
		Versant dunaire	-1,7	-0,6	2,6	-0,2	-1,8	2,0	0,6
		Haut de plage	0,8	0,0	1,8	-0,2	-3,0	0,1	0,1
		Versant dunaire + haut de plage	-1,0	-0,6	4,4	-0,4	-4,9	2,0	0,7

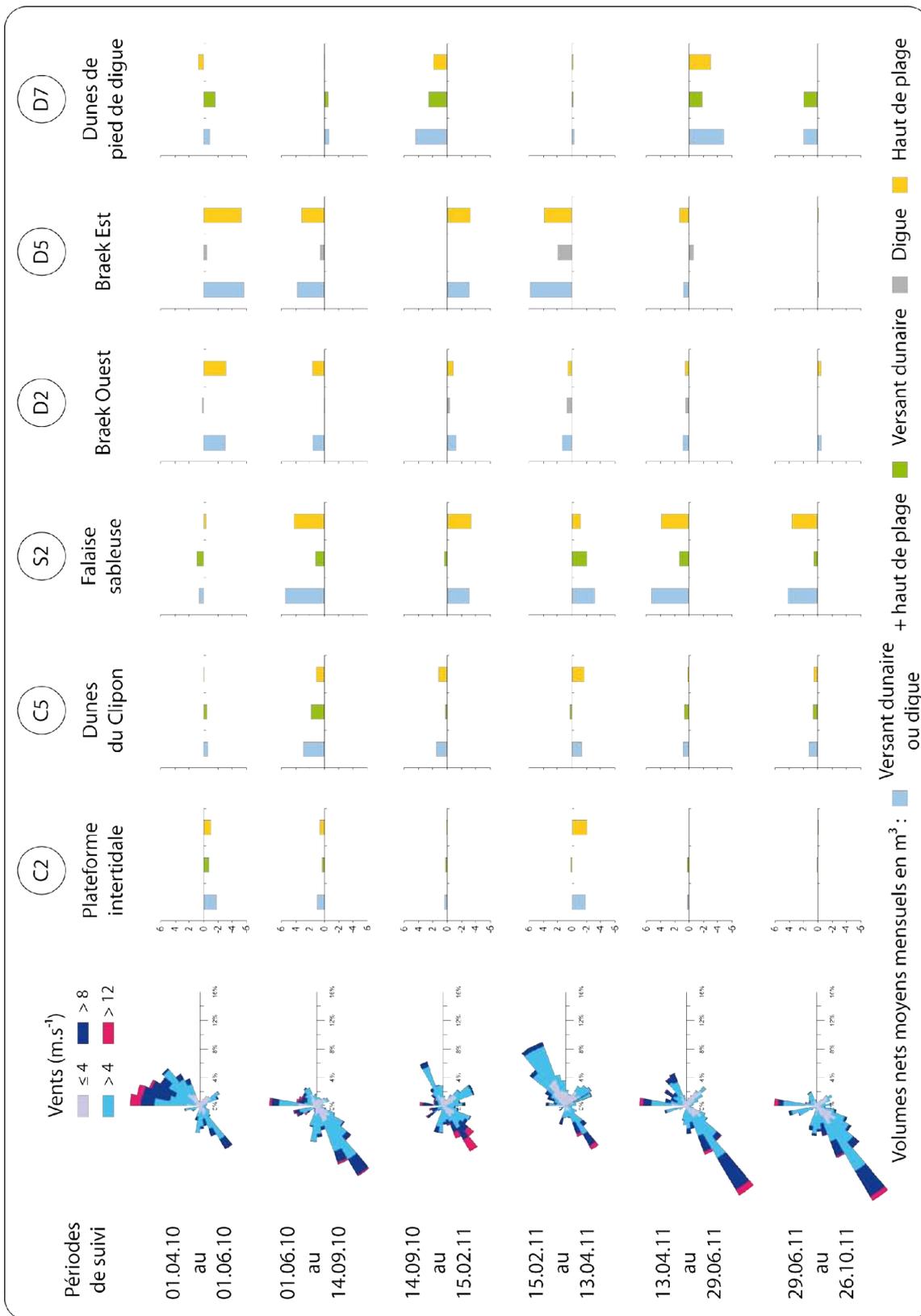


Figure 4.6. Variations volumétriques mensuelles moyennes sur le versant dunaire et le haut de plage des profils types pour chaque période, et roses des vents.

2.1. Période du 01.04.10 au 01.06.10

La période 1 allant du 01.04.10 au 01.06.10 est caractérisée par une forte proportion de vents en provenance du NNE (31,6% de vents frontaux, Figure 4.8), la quasi-totalité des vents supérieurs à 12 m.s^{-1} provenant également de cette direction. Ces vents frontaux sont potentiellement capables de rabattre le sable du haut de plage vers la dune, mais ce n'est pas ce que l'on observe ici (Figure 4.6). En effet, les variations volumétriques au niveau du versant dunaire sur les profils types sont faibles, comprises entre $-1,7 \text{ m}^3$ à l'Est (D7) et $+1 \text{ m}^3$ au centre (S2) (Tableau 4.2). Les coups de vent de nord se sont produits en début et milieu de période. Malgré la faible quantité moyenne de précipitations ($0,7 \text{ mm/jour}$), des précipitations abondantes ($41,7 \text{ mm}$) ont accompagné ces coups de vent, surtout entre le 01.05.10 et le 11.05.10, ce qui a pu contribuer à restreindre les envols de sable, et donc restreindre l'alimentation des dunes par le sable en provenance du haut de plage (Figure 4.7). Le haut de plage est stable, voire en légère accumulation (C2, S2) au Clipon ainsi que devant les dunes de pied de digue (D2), du fait probablement de la faible occurrence de hauts niveaux d'eau ($1,5/\text{mois}$) pendant cette période. En revanche il est en nette érosion au droit de la digue où il n'y a pas de plage sèche à marée haute (D2 et D5) (Figure 4.6) en raison de la migration d'une barre vers le bas de plage.

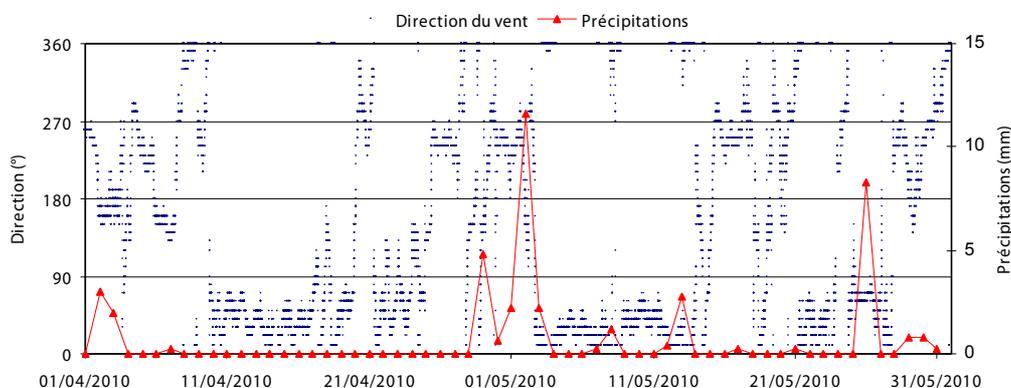


Figure 4.7. Séries temporelles de la direction du vent et des précipitations du 01.04.10 au 01.06.10

2.2. Période du 01.06.10 au 14.09.10

La deuxième période, du 01.06.10 au 14.09.10, ce qui correspond à la période estivale, est caractérisée par une forte proportion de vents dominants longitudinaux en provenance du secteur SO (47,7%, Figure 4.8). Lors de cette période, l'ensemble des profils enregistre une accumulation (Figure 4.6). Les deux extrémités Est (D7) et Ouest (C2) du site sont cependant quasiment stables. Sur la plage du Clipon, le versant dunaire (C5) est en accumulation, tout

comme le haut de plage et la base de la falaise dunaire (S2). Devant la digue (D2 et D5), le haut de plage est en accumulation, et ce bien que les niveaux d'eau aient été plus nombreux (5,1/mois en moyenne) lors de cette période. Les apports de sable sur le haut de plage au niveau des parties centrale (C5 : +1,1 m³) et Est du Clipon (S2 : +4,2 m³) peuvent être expliqués par la forte proportion de vents longitudinaux qui engendrent un fetch potentiel maximum pour cette partie du site, donc une source de sable potentiellement plus importante (Bauer et Davidson-Arnott, 2002 ; Van der Wal, 1998). Ces sables s'accumulent ensuite au niveau du profil S2, car leur transfert vers l'Est est interrompu par des enrochements. Les apports de sable sont insignifiants dans le secteur de la plateforme intertidale, qui se trouve, par vent dominant du sud ouest, à l'abri de l'avant port Ouest. L'accumulation constatée en haut de plage au droit de la digue peut être attribué à une barre intertidale qui est remontée vers le pied de digue, comme c'est classiquement le cas lors des périodes estivales où les conditions d'agitation sont généralement plus calmes (Reichmüth et Anthony, 2002 ; Maspataud, 2011). L'aplanissement de l'estran en hiver et le développement des barres intertidales en été avait également été observé sur la plage du Clipon par Bertier (2009) entre 2001 et 2006. A l'extrémité Est du site (D7), lors de conditions de vents du SO, le fetch est limité du fait de l'absence de haut de plage sec devant la digue à l'ouest. Ceci peut expliquer la stabilité du haut de plage et la faible accumulation enregistrée dans les dunes de pied de digue.

2.3. Période du 14.09.10 au 15.02.11

La période allant du 14.09.2010 au 15.02.11 est la plus longue de l'étude, elle s'étend sur 5 mois. Bien que les vents longitudinaux d'Ouest dominant, la répartition des directions de vent est plus variée. On constate une plus faible proportion des vents longitudinaux du SO, et une part importante des vents de terre (27,5 %) et des vents longitudinaux d'ENE (Figure 4.8). Cette période est caractérisée par une forte fréquence de vents les plus forts, principalement en provenance du SO : 23,4% des vents sont supérieurs à 8 m.s⁻¹, dont 6,1 % au-delà de 12 m.s⁻¹, ce qui est bien supérieur à la moyenne du reste du suivi. A l'Est du site, on note une accumulation au niveau des dunes de pied de digue (D7 : +4,4 m³) (Figure 4.6). La part particulièrement importante de vents de terre a pu provoquer un transfert de sable des dunes de revers de digue peu végétalisées vers les dunes de pied de digue au niveau du profil D7. Au centre de la plage du Clipon, le haut de plage est en légère accumulation (C5 :

+1,5 m³). Cependant, sur une large partie centrale de l'UG4 (S2, D2 et D5), l'érosion est prédominante. Cette érosion est associée à des conditions hivernales de plus forte énergie. La plus grande fréquence de vents forts, combinée à de hauts niveaux d'eau ont pu engendrer une érosion dans la partie centrale du site où le niveau du haut de plage est bas. En outre, les barres intertidales ont tendance à migrer vers le bas de plage en hiver (Bertier, 2009), ce qui peut également contribuer à une baisse des volumes sur le haut de plage, que ce soit à l'Est du Clipon, ou devant la digue du Braek. Les précipitations ont été abondantes, avec 316 mm, et réparties sur l'ensemble de la période, ce qui a pu limiter les envols de sable malgré des vents potentiellement efficaces.

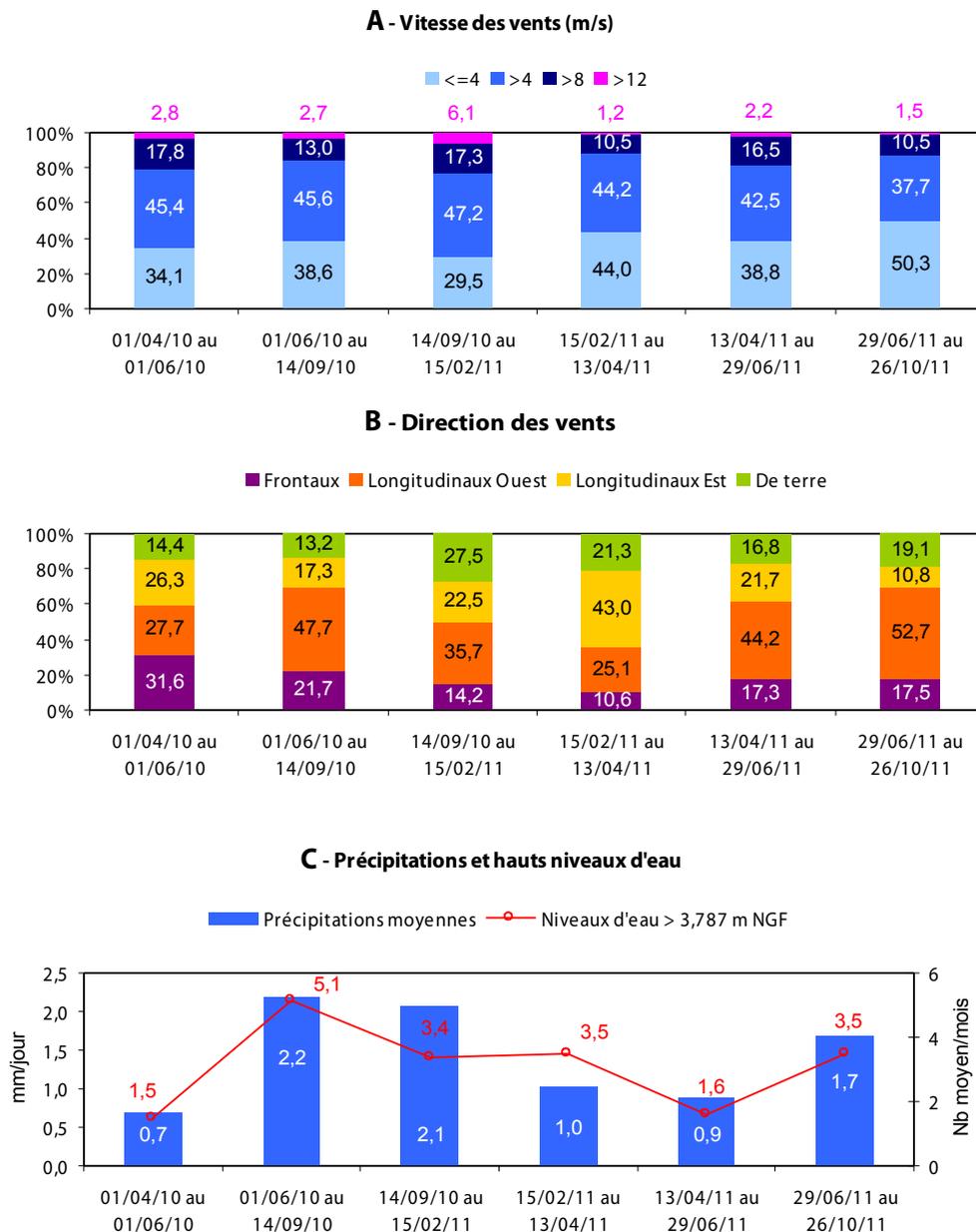


Figure 4.8. Conditions météo-marines lors des périodes de suivi des profils topographiques transversaux : vitesse (A) et direction (B) des vents, précipitations et niveaux d'eau (C).

2.4. Période du 15.02.11 au 13.04.11

Entre le 15.02.11 et le 13.04.11, les vents dominants étaient parallèles à la côte et en provenance du secteur ENE (43%, Figure 4.8). En revanche, les vents les plus forts provenaient du SO (rose des vents Figure 4.6). La fréquence des vents frontaux était faible (10,6%), donc l'alimentation potentielle des dunes avec des sables en provenance du haut de plage était réduite également. Le seul secteur en accumulation se trouve à l'Est de la digue du Braek (D5) avec $+5,9 \text{ m}^3$ ($+3,9 \text{ m}^3$ sur le haut de plage, et $+2 \text{ m}^3$ sur la digue). Plus à l'Est (profil D7) (Figure 4.6), les apports sont nuls en raison de la situation d'abri engendrée par la présence de la jetée de St-Pol lors de vents d'Est. La prédominance des vents longitudinaux de secteur Est a pu prendre en charge le sable dans les dunes de pied de digue, et le transférer vers l'Ouest, ce qui peut expliquer l'accumulation, en haut de plage ainsi que sur le versant externe de la digue au niveau du profil D5 (Figure 4.9). Ce phénomène est confirmé également par les apports observés au niveau du profil D6 (annexe 3.25), situé à proximité (Tableau 4.2). Sur la plage du Clipon, l'érosion prédomine mais reste cependant plus forte dans la partie Est (S2). A ce niveau, par conditions de vent dominant du Nord-Est, les apports de sable, via la dérive littorale ou le transport éolien, sont très limités du fait de l'obstacle que représentent les enrochements situés immédiatement à l'Est du profil S2. Il s'agit d'un secteur en érosion chronique (Bertier, 2009). En revanche, lors de telles conditions de vent, ce secteur peut constituer une source de sable pour l'Ouest du Clipon.

2.5. Période du 13.04.11 au 29.06.11

Lors de la période qui s'étend du 13.04.11 au 29.06.11, la rose des vents est similaire aux conditions modales (Figure 4.6), avec 44,2% de vents parallèles d'OSO (Figure 4.8). Les précipitations sont faibles (0,9 mm/jour en moyenne), et les hauts niveaux d'eau peu fréquents (1,6/mois en moyenne) (Figure 4.8). Ces conditions sont favorables à un transfert de sable de la partie Ouest de la plage du Clipon (C2 et C5) vers la partie Est (C5 et S2). C'est en effet ce que l'on observe (Tableau 4.2) : au niveau de la plateforme intertidale les volumes sont stables, alors qu'ils sont légèrement excédentaires dans la partie centrale de la plage (C5 : $+0,8 \text{ m}^3$), et l'accumulation est plus prononcée à l'Est, surtout en haut de plage (S2 : $+5,3 \text{ m}^3$). Devant la digue, les volumes sont stables, en revanche, à l'Est de la digue (D7), on constate une érosion dans la partie dunaire (-3 m^3) et sur le haut de plage ($-4,9 \text{ m}^3$). Cette érosion a pu être provoquée par des coups de vent de Nord (17,3% de vents frontaux) (Figure

4.8) qui exportent le sable de la plage et des dunes de pied de digue vers l'arrière de la digue, qui se sont produits en début et milieu de période. Ces mêmes vents ont pu alimenter le cordon dunaire avec les sables du haut de plage au niveau du Clipon (C5 : +0,6 m³) (Tableau 4.2).



Figure 4.9. Photographie au niveau du profil D5, illustrant la digue recouverte de sable en provenance des dunes de pied de digue (Cliché Tresca, 27.03.2011)

2.6. Période du 29.06.11 au 26.10.11

La dernière période de suivi est plus longue (4 mois : du 29.06.11 au 26.10.11) mais les conditions de vent sont proches de celles qui prévalaient lors de la précédente période (Figure 4.10). Les vents soufflaient majoritairement de l'OSO (52,7% - Figure 4.8), cependant la proportion de vents faibles était plus importante, plus de 50% des vents soufflant à moins de 4m.s⁻¹. On note une accumulation au centre (D5 : +1,2 m³) et à l'Est du Clipon (S2 : +4,2 m³). Au droit de la digue et au niveau de la plateforme intertidale, les volumes sont stables (Figure 4.6). En revanche, le profil D7 à l'extrême Est réagit différemment, le versant dunaire étant en accrétion (+2 m³), tandis que l'érosion avait dominé entre avril et juin 2011. Ceci peut être expliqué par une fréquence des vents d'Est bien moins importante (10,8% au lieu de 21,7% précédemment).

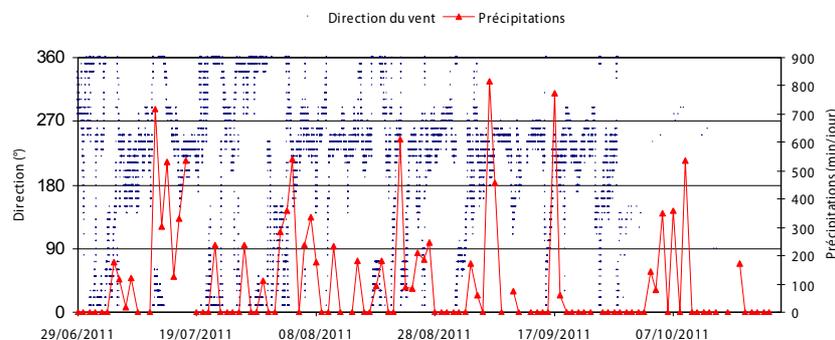


Figure 4.10. Séries temporelles de la direction du vent et des précipitations du 29.06.11 au 26.10.11.

2.7. Observations générales

L'ensemble des variations volumétriques est assez faible pendant la période de suivi. Le haut de plage et le versant dunaire le long de l'UG4 sont relativement stables. Notons également la capacité de récupération du système. Quelque soit le secteur, les périodes d'érosion sont presque toujours suivies par une période d'accrétion (Figure 4.6). En revanche, l'amplitude des variations volumétriques diffère selon les secteurs.

L'étude de ces variations volumétriques (Figure 4.6) montre que la variabilité du haut de plage est bien plus importante au centre du site (profil S2) que sur les marges. Lors de conditions dominantes avec des vents en provenance d'OSO, la présence de l'avant-port entraîne une diffraction des vagues, puis une réfraction bathymétrique sur la plateforme intertidale entraînant une dissipation de l'énergie de la houle, comme cela a été montré sur la plateforme intertidale des Hemmes de Marck (Aubry et al., 2009), ainsi que sur l'UG4 (Hemdane, 2006 ; Bertier, 2009). Ce phénomène se produit certainement également à l'Est lors de conditions énergétiques de NE. Au contraire, dans la partie centrale de l'UG4, le haut de plage est bien plus exposé aux hauts niveaux d'eau, comme lors de la période du 14.09.10 au 15.02.11, où le plus haut niveau d'eau marégraphique avait été enregistré (4,107 m NGF). Cette hypothèse est confirmée par l'étude de la granulométrie de surface (Héquette et al., 2011), où l'asymétrie négative dans cette partie du site montre qu'il s'agit du secteur soumis aux agents hydrodynamiques les plus efficaces (McCave, 1978 ; McLaren & Bowles, 1985). Cette différence est renforcée par la topographie préexistante de la plage (Figure 4.2) qui se trouve à une altitude inférieure au centre du site par rapport aux parties Est et Ouest.

Cette variabilité plus importante au centre du site est expliquée également par l'alimentation en sables éoliens qui est potentiellement plus importante à l'Est du Clipon par vents dominants d'OSO. C'est ce qui a été observé lors de trois périodes différentes sur le profil S2 (01.06.10 au 14.09.10 ; 13.04.11 au 29.06.11 ; 29.06.11 au 26.10.11), périodes lors desquelles le haut de plage s'est fortement engraisé (Figure 4.6).

3. Bilan de l'évolution du versant dunaire et du haut de plage sur les profils types

Le bilan de l'évolution volumétrique et topographique du haut de plage et du versant dunaire des profils types montre des disparités spatiales (Figure 4.11). Les volumes nets sont exprimés en valeur absolue et ne sont plus pondérés par le nombre de mois, puisqu'au moment du bilan, une seule période globale est étudiée.

Lors de cette étude du haut de plage et du versant dunaire, les vents ont été majoritairement longitudinaux (62,2 %), en provenance d'Ouest (40,4 %). Les vents frontaux à obliques représentaient 18,2 % du total, et les vents de terre 19,6 %. La part des vents supérieurs à 8 m.s^{-1} a été de 17,4 %, dont 3,1 % pour ceux supérieurs à 12 m.s^{-1} . Ces vents les plus forts provenaient d'OSO (dominants parallèles à la côte) et d'ENE (frontaux à obliques).

Trois profils types présentent un bilan positif. Deux d'entre eux sont situés dans la partie Ouest de l'UG4, il s'agit des dunes du Clipon (C5 : $+18 \text{ m}^3$) et du secteur de la falaise sableuse (S2 : $+22,9 \text{ m}^3$). Le troisième se trouve à l'Est de la digue du Braek, il s'agit du secteur des dunes de pied de digue (D7 : $+13,9 \text{ m}^3$). Au niveau des dunes du Clipon, l'accumulation s'est faite uniformément sur le haut de plage et sur le versant dunaire, jusqu'au sommet du cordon bordier qui s'est exhaussé (Figure 4.11 – C5). Au niveau de la falaise sableuse, on note une accumulation en pied de falaise situé au dessus des PHMA. L'ensemble du haut de plage s'est exhaussé d'une hauteur comprise entre 0,5 m et 1 m, tandis que la pente de la falaise s'est légèrement adoucie (Figure 4.11 - S2). Les changements intervenus en sommet de falaise sont minimes, car la source principale de sable se trouve sur le haut de plage, et le sédiment ne peut pas franchir l'abrupt de plus de 3 m de hauteur que représente la falaise sableuse. Au niveau des dunes de pied de digue, la plupart de l'accumulation s'est faite dans la partie dunaire ($11,1 \text{ m}^3$ sur $13,9 \text{ m}^3$ au total). Les transferts sableux éoliens y sont réduits par vent longitudinal du SO étant donné l'absence de plage sèche plus à l'Ouest, cependant lorsqu'une barre sableuse recouvre le pied de digue, le transport éolien est possible. Le changement volumétrique sur le haut de plage est inférieur à la marge d'erreur dans ce secteur. Les échanges entre le haut de plage et les dunes peuvent être importants lors de vents frontaux ou de vents de terre du fait du faible couvert végétal.

Les trois autres profils types ont été stables lors du suivi. A l'Ouest de l'UG4, les variations volumétriques de la plateforme intertidale sont inférieures à la marge d'erreur. On

observe néanmoins une légère érosion du haut de plage (- 4,8 m³), et une faible accrétion sur le versant de la dune bordière (+ 2,2 m³). Au droit de la digue du Braek (D2 et D5), le bilan global est négatif, mais la valeur est inférieure à la marge d'erreur. Notons que l'érosion se produit sur le haut de plage, c'est-à-dire en pied de digue. Ces valeurs, représentatives du bilan global, sont inférieures à celles observées lors de certaines périodes de suivi (période du 01.04.10 au 01.06.10, ou période du 14.09.10 au 15.02.11) (Tableau 4.2). Dans ce secteur, ce bilan négatif ne reflète pas forcément une érosion au contact plage/digue, mais une forte variabilité due à la migration de barres intertidales qui ont tendance à se déplacer vers le haut de plage en été, et vers le bas de plage en hiver.

L'analyse du bilan sur l'ensemble des 14 profils topographiques confirme que les profils types choisis sont bien représentatifs des unités définies sur la période étudiée (annexe 3) :

- Les deux profils de la plateforme intertidale (C2 et C3) sont stables.
- Les 4 profils levés dans l'unité des dunes du Clipon (C4, C5, C6, S1) sont en accrétion, surtout sur le versant dunaire, et dans une moindre mesure sur le haut de plage.
- Le profil S2 est seul représentatif de l'unité de la falaise sableuse.
- Les profils D1 à D6, tous situés au droit de la digue, ont quasiment la même évolution, avec une érosion au niveau du pied de digue, en dehors du profil D4, au centre (+ 1,9 m³ sur le haut de plage).
- Le profil D7, représentatif de l'unité des dunes de pied de digue est en accumulation.

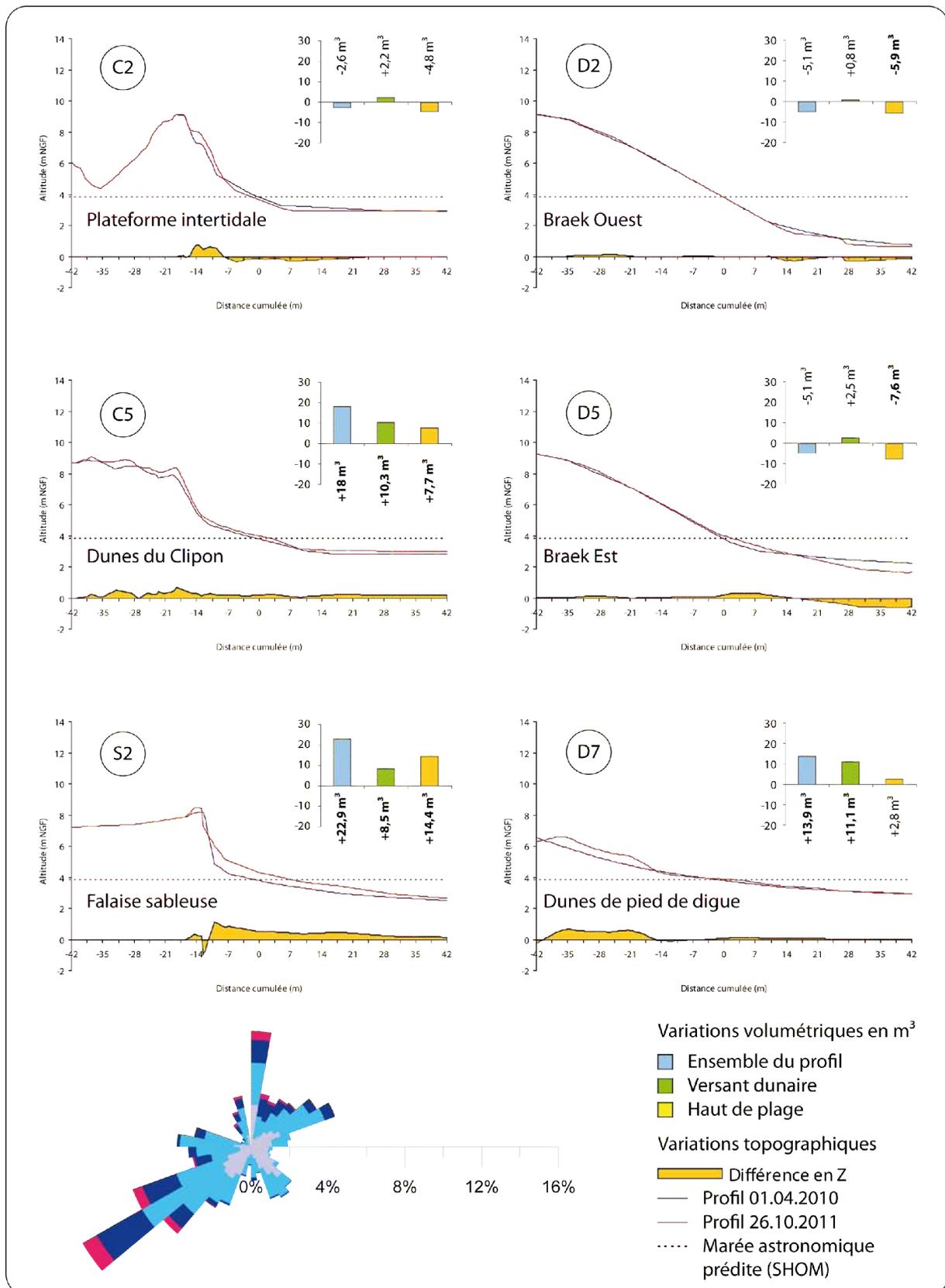


Figure 4.11. Bilan topographique et volumétrique du versant dunaire et du haut de plage des six profils types (les valeurs supérieures à la marge d'erreur sont notées en gras), et rose des vents générale de la période d'étude

4. Evolution des profils types et échanges estran / haut de plage - dune

Cette analyse complémentaire se distingue de celle portant sur le haut de plage et les dunes car elle comprend également l'évolution de l'estran, ce qui nous permettra d'étudier si l'estran contribue à alimenter le haut de plage en sable. Plusieurs types de volumes ont été calculés (Tableau 4.3) : volumes nets, volumes pondérés par la longueur des profils, et volumes pondérés par la durée des périodes de suivi topographique.

4.1. Période du 01.04.10 au 15.02.11

Lors de cette première période allant 01.04.10 au 15.02.11, 59,9% des vents étaient longitudinaux, dont 38,3% provenant du secteur Ouest et 20,2% des vents étaient frontaux (Figure 4.13). L'intensité de ces vents était forte (20,3 % supérieurs à 8 m.s^{-1} , dont 4,3 % supérieurs à 12 m.s^{-1}), les plus fortes vitesses étant réparties entre les deux secteurs dominants : 41% des vents supérieurs à 12 m.s^{-1} provenaient du secteur OSO, et 54% du secteur NNO à NNE (frontaux).

A l'Ouest, au niveau de la plateforme intertidale, l'estran est en légère accrétion, avec une valeur globale de 50 m^3 ($0,100 \text{ m}^3.\text{m}$ sur C2 à $0,113 \text{ m}^3.\text{m}$ sur C3) (Tableau 4.3), ce qui correspond à un rehaussement quasiment uniforme de 10 cm (Figure 4.12 – C2). Le volume global reste néanmoins stable, car il est inférieur à la marge d'erreur des systèmes de mesure utilisés.

Plus à l'Est, au niveau des dunes du Clipon, à l'image du profil type C5 ($+0,103 \text{ m}^3.\text{m}^2$), la plage et le cordon bordier sont en accrétion générale sur toute leur longueur, excepté le haut de plage à l'Est de cette unité ($-0,033 \text{ m}^3.\text{m}$ sur S1) (Tableau 4.3). Les deux profils situés à l'Est (C6 et S1) ont un haut de plage stable ou en légère érosion et le volume de sable sur l'estran tend à s'accroître, tandis que sur les deux profils situés à l'Ouest (C4 et C5) l'estran est relativement stable. On observe la migration d'une barre vers le haut de plage en bas de profil (Figure 4.12 – C5). En ce qui concerne le versant dunaire, il tend à gagner en volume sur tout le secteur (entre $0,129 \text{ m}^3.\text{m}$ pour C5 et $0,160 \text{ m}^3.\text{m}$ pour C6), mais là encore, de manière plus nuancée à l'Est (S1 : $+0,064 \text{ m}^3.\text{m}$) (Tableau 4.3).

Au niveau de la falaise sableuse, à l'Est du Clipon, l'érosion du haut de plage est marquée ($-0,171 \text{ m}^3.\text{m}$), mais le volume de l'ensemble du profil est resté stable. La

morphologie du profil montre qu'une partie du sable du haut de plage se retrouve en bas de plage le 15.02.11 (Figure 4.12 – S2).

Tableau 4.3. Tableau récapitulatif des variations volumétriques sur le versant duunaire, le haut de plage et l'estran sur l'ensemble des profils suivis. Les profils en gras correspondent aux profils types.

		VOLUMES NETS			VOLUMES DIVISES PAR LA LONGUEUR			VOLUMES MENSUELS			
		01/04/2010 au 15/02/2011	15/02/2011 au 26/10/2011	Bilan	01/04/2010 au 15/02/2011	15/02/2011 au 26/10/2011	Bilan	01/04/2010 au 15/02/2011	15/02/2011 au 26/10/2011	Bilan	
intertidale/plateforme	C2	Versant duunaire	0,8	1,4	2,2	0,019	0,033	0,052	0,1	0,2	0,1
		Haut de plage	-0,3	-4,5	-4,8	-0,007	-0,107	-0,114	0,0	-0,5	-0,3
		Estran	49,4	-44,1	5,3	0,100	-0,089	0,011	4,7	-5,2	0,3
		Profil entier	49,9	-47,2	2,7	0,086	-0,082	0,005	4,8	-5,6	0,1
	C3	Versant duunaire	-1,2	3,2	2,0	-0,029	0,076	0,048	-0,1	0,4	0,1
		Haut de plage	-0,3	-1,3	-1,6	-0,007	-0,031	-0,038	0,0	-0,2	-0,1
Estran		51,4	-3,9	47,5	0,113	-0,009	0,105	4,9	-0,5	2,5	
Profil entier		49,8	-1,8	48,0	0,093	-0,003	0,089	4,7	-0,2	2,5	
Dunes du Clipon	C4	Versant duunaire	6,2	11,0	17,2	0,148	0,262	0,410	0,6	1,3	0,9
		Haut de plage	2,1	-3,2	-1,1	0,050	-0,076	-0,026	0,2	-0,4	-0,1
		Estran	17,9	-25,8	-7,9	0,082	-0,119	-0,036	1,7	-3,0	-0,4
		Profil entier	26,2	-18,0	8,2	0,087	-0,060	0,027	2,5	-2,1	0,4
	C5	Versant duunaire	5,4	4,9	10,3	0,129	0,117	0,245	0,5	0,6	0,5
		Haut de plage	8,4	-0,7	7,7	0,200	-0,017	0,183	0,8	-0,1	0,4
		Estran	17,4	0,0	17,4	0,079	0,000	0,079	1,7	0,0	0,9
		Profil entier	31,2	4,2	35,4	0,103	0,014	0,116	3,0	0,5	1,9
	C6	Versant duunaire	6,7	5,8	12,5	0,160	0,138	0,298	0,6	0,7	0,7
		Haut de plage	4,8	-2,5	2,3	0,114	-0,060	0,055	0,5	-0,3	0,1
		Estran	33,7	11,8	45,5	0,195	0,068	0,263	3,2	1,4	2,4
		Profil entier	45,1	15,1	60,2	0,175	0,059	0,234	4,3	1,8	3,2
S1	Versant duunaire	2,7	1,0	3,7	0,064	0,024	0,088	0,3	0,1	0,2	
	Haut de plage	-1,4	4,9	3,5	-0,033	0,117	0,083	-0,1	0,6	0,2	
	Estran	22,3	-4,4	17,9	0,132	-0,026	0,106	2,1	-0,5	0,9	
	Profil entier	23,6	1,6	25,2	0,093	0,006	0,100	2,2	0,2	1,3	
Falaise sableuse	S2	Versant duunaire	6,7	18,0	8,5	0,160	0,429	0,202	0,6	2,1	0,4
		Haut de plage	-7,2	21,7	14,4	-0,171	0,517	0,343	-0,7	2,6	0,8
		Estran	10,7	19,4	30,0	0,060	0,110	0,169	1,0	2,3	1,6
		Profil entier	10,1	42,8	52,9	0,039	0,164	0,203	1,0	5,0	2,8
Braek Ouest	D1	Digue	-0,8	1,5	0,7	-0,019	0,036	0,017	-0,1	0,2	0,0
		Haut de plage	-9,1	4,7	-4,4	-0,217	0,112	-0,105	-0,9	0,6	-0,2
		Estran	-18,0	12,4	-5,6	-0,180	0,124	-0,056	-1,7	1,5	-0,3
		Profil entier	-27,9	18,6	-9,3	-0,152	0,101	-0,051	-2,7	2,2	-0,5
	D2	Digue	-1,6	2,4	0,8	-0,038	0,057	0,019	-0,2	0,3	0,0
		Haut de plage	-6,5	0,6	-5,9	-0,155	0,014	###	-0,6	0,1	-0,3
		Estran	-15,6	14,5	-1,0	-0,127	0,118	###	-1,5	1,7	-0,1
		Profil entier	-23,6	17,5	-6,1	-0,114	0,085	###	-2,2	2,1	-0,3
	D3	Digue	-2,0	2,7	0,7	-0,048	0,064	0,017	-0,2	0,3	0,0
Haut de plage		-11,9	6,8	-5,1	-0,283	0,162	-0,121	-1,1	0,8	-0,3	
Estran		-11,6	14,7	3,1	-0,091	0,115	0,024	-1,1	1,7	0,2	
Profil entier		-25,6	24,2	-1,4	-0,121	0,114	-0,007	-2,4	2,8	-0,1	
Braek Est	D4	Digue	2,6	-4,7	-2,1	0,062	-0,112	-0,050	0,2	-0,6	-0,1
		Haut de plage	0,2	1,8	2,0	0,005	0,043	0,048	0,0	0,2	0,1
		Estran	3,2	16,4	19,6	0,025	0,129	0,154	0,3	1,9	1,0
		Profil entier	6,1	13,3	19,4	0,029	0,063	0,092	0,6	1,6	1,0
	D5	Digue	0,5	2,0	2,5	0,012	0,048	0,060	0,0	0,2	0,1
		Haut de plage	-18,4	10,8	-7,6	-0,438	0,257	-0,181	-1,8	1,3	-0,4
		Estran	-32,5	32,9	0,4	-0,184	0,186	0,002	-3,1	3,9	0,0
		Profil entier	-50,5	45,8	-4,7	-0,193	0,175	###	-4,8	5,4	-0,2
	D6	Digue	-2,4	-1,3	-3,7	-0,057	-0,031	-0,088	-0,2	-0,2	-0,2
Haut de plage		-13,9	15,9	2,0	-0,331	0,379	0,048	-1,3	1,9	0,1	
Estran		-46,6	53,7	7,1	-0,245	0,283	0,037	-4,4	6,3	0,4	
Profil entier		-62,9	68,3	5,4	-0,230	0,249	0,020	-6,0	8,0	0,3	
Dunes de pied de digue	D7	Versant duunaire	8,1	2,9	11,1	0,193	0,069	0,264	0,8	0,3	0,6
		Haut de plage	10,6	-7,8	2,8	0,252	-0,186	0,067	1,0	-0,9	0,1
		Estran	-9,8	8,1	-1,7	-0,058	0,048	###	-0,9	1,0	-0,1
		Profil entier	9,0	3,1	12,1	0,036	0,012	0,048	0,9	0,4	0,6

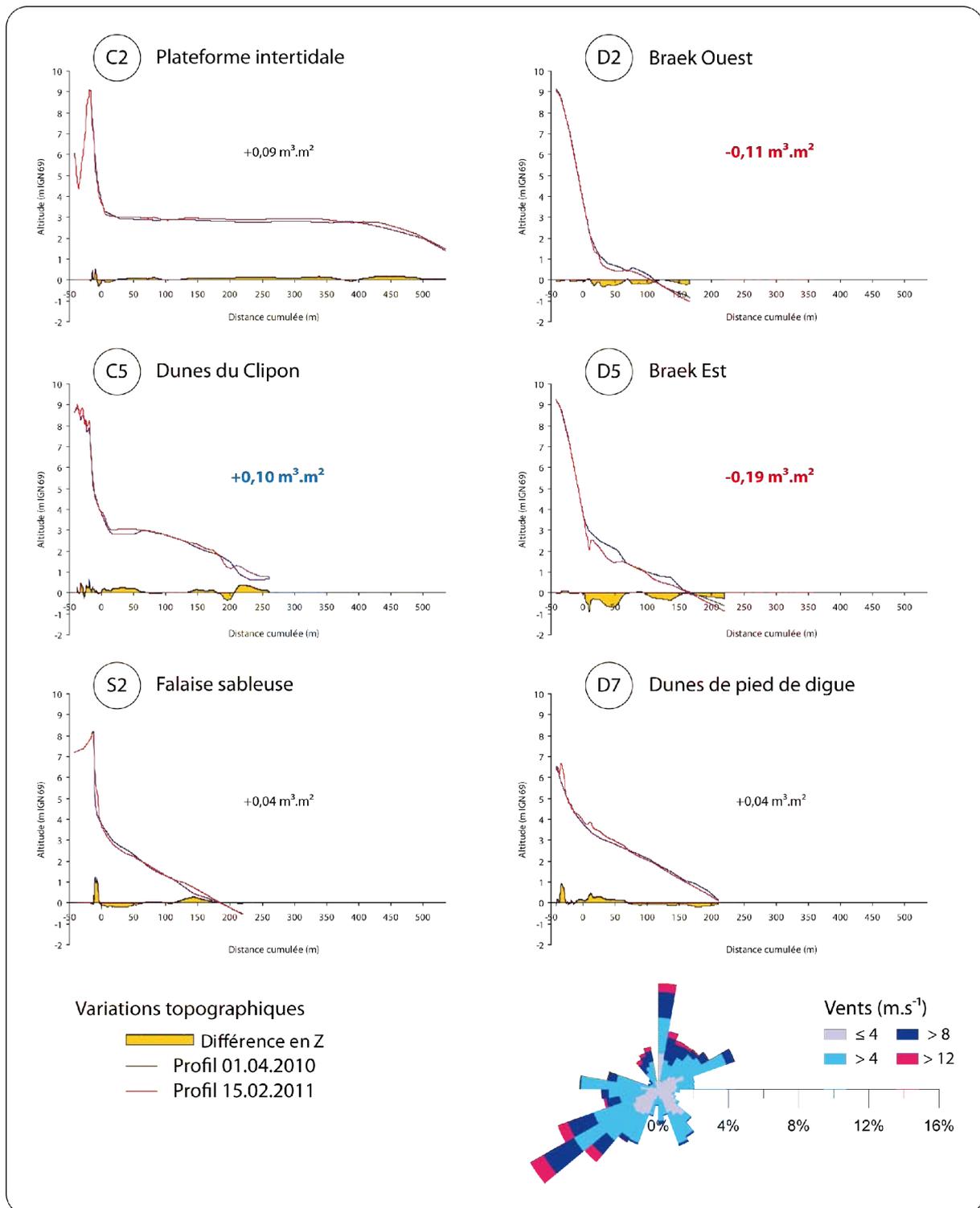


Figure 4.12. Evolution de l'estran sur les profils types des six unités morphologiques de l'UG4 et rose des vents pour la période du 01/04/2010 au 15/02/2011. Les valeurs en gras sont celles qui sont supérieures à la marge d'erreur, en bleu les valeurs positives et en rouge les valeurs négatives. Les volumes sont exprimés en $\text{m}^3.\text{m}^2$ car les profils n'ont pas tous la même longueur.

Devant la digue, l'érosion est marquée sur les secteurs Braek Ouest et Braek Est (valeurs comprises entre $-0,114 \text{ m}^3.\text{m}$ pour D2 et $-0,230 \text{ m}^3.\text{m}$ pour D6), sauf au niveau du profil D4, au centre de la digue, où le volume est légèrement positif ($+0,029 \text{ m}^3.\text{m}$). Dans tous

les cas, l'érosion est plus forte au niveau du pied de digue, et l'on remarque que cette évolution peut être attribuée aux barres qui migrent vers le bas de plage (Figure 4.12 - D2 et D5).

Enfin le profil D7, qui se trouve à l'Est de la digue, montre qu'une érosion se produit sur l'estran (-0,058 m³.m, Tableau 4.3), en revanche du sable se dépose sur le haut de plage (+0,252 m³.m) et dans les dunes (+0,193 m³.m), ce qui est nettement visible sur le profil (Figure 4.12 – D7). La moyenne sur l'ensemble du profil est stable, voire en légère augmentation (+0,036 m³.m).

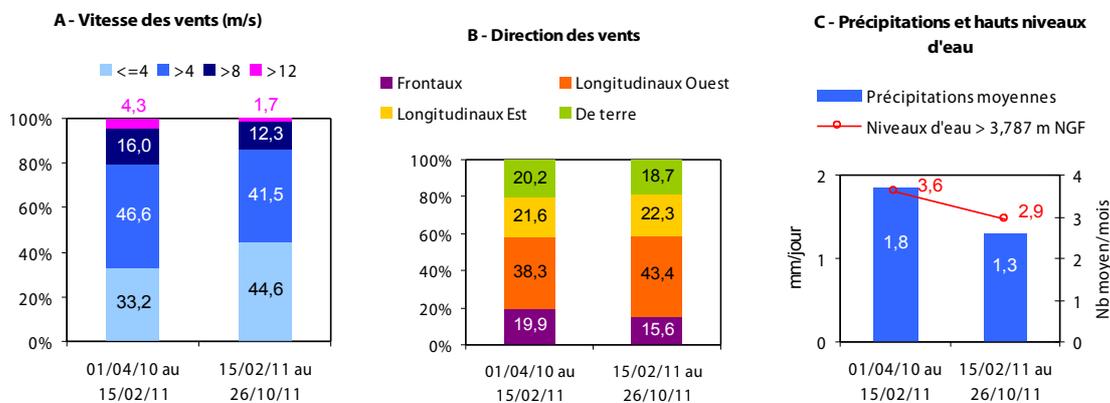


Figure 4.13. Conditions météo-marines lors des périodes de suivi des profils topographiques transversaux : vitesse (A) et direction (B) des vents, précipitations et niveaux d'eau (C).

4.2. Période du 15/02/2011 au 26/10/2011

Cette deuxième période est légèrement moins longue que la précédente (8 mois contre 10 mois). Les conditions météorologiques sont caractérisées par une fréquence de vents forts bien moins importante (14% en tout, contre 20,3%), surtout concernant les vents supérieurs à 12 m.s⁻¹ (1,7% contre 4,3%), dont 71% sont longitudinaux et proviennent du SO et du NE. Par contre, la part des vents faibles inférieurs à 5 m.s⁻¹ est en forte augmentation et représente presque la moitié du total (44,6%) (Figure 4.13 - A). En outre, les vents longitudinaux d'Ouest sont plus importants (43,4%) au détriment des vents frontaux (15,6%) (Figure 4.13 - B). Les précipitations ont été moins abondantes (1,3 mm/jour en moyenne), et les hauts niveaux d'eau moins fréquents (2,9/jour en moyenne) (Figure 4.13 - C). Il faut noter également que de fortes vagues au large ont été enregistrées dans la première quinzaine du

mois de septembre. La hauteur significative a dépassé 3,5 m le 06.09.11, et dépassé les 3 m le 12.09.11.

Aucune érosion importante ne s'est produite pendant cette période. Les variations volumétriques sont comprises entre $-0,08 \text{ m}^3.\text{m}$ à l'Ouest (C2), et $+0,249 \text{ m}^3.\text{m}$ à l'Est (D6). La plateforme intertidale est en légère érosion au niveau du profil C2 ($-0,089 \text{ m}^3.\text{m}$ sur l'estran), ce qui correspond à une baisse d'altitude uniforme de 10 cm en moyenne (Figure 4.14 – C2). Cette érosion est très localisée, comme le prouve la stabilité quasiment parfaite du profil C3 ($+0,009 \text{ m}^3.\text{m}$) (Tableau 4.3). En revanche, l'estran sur le profil C4, qui se trouve à la limite des dunes du Clipon, est lui aussi en érosion ($-0,119 \text{ m}^3.\text{m}$), alors que la partie dunaire gagne du volume ($+0,262 \text{ m}^3.\text{m}$) (Tableau 4.3).

Le cordon bordier est en accrétion pour l'ensemble de l'unité des dunes du Clipon, pour des valeurs comprises entre $0,024 \text{ m}^3.\text{m}$ à l'Est (S1) et $0,262 \text{ m}^3.\text{m}$ à l'Ouest (C4) (Tableau 4.3), tandis que l'estran est stable en dehors de l'extrémité Ouest de ce secteur.

A l'Est du Clipon, le secteur de falaise sableuse est en accrétion importante, avec un gain de $0,164 \text{ m}^3.\text{m}$ (Figure 4.14 – S2). Le haut de plage est le principal bénéficiaire de cette accumulation ($+0,517 \text{ m}^3.\text{m}$), ce qui est probablement lié à la prédominance des vents d'Ouest qui ont pu transférer le sable du haut de plage vers l'Est. Le volume global de l'estran est également en augmentation ($+0,110 \text{ m}^3.\text{m}$) (Tableau 4.3). Alors que la morphologie de la plage était plate le 15.02.11, on remarque la formation d'une barre de milieu de plage le 26.10.11, ce qui est caractéristique des périodes calmes (Reichmüth et Anthony, 2008).

Devant la digue du Braek, l'estran est en accrétion. Les valeurs sont comprises entre $+0,115 \text{ m}^3.\text{m}$ (D3) et $0,283 \text{ m}^3.\text{m}$ (D6). La morphologie de ces profils D2 et D5 est représentative de ces observations. A l'Ouest, sur le profil D2, une barre de haut de plage s'est formée (Figure 4.14 – D2), ce qui se traduit par un volume légèrement positif ($+0,118 \text{ m}^3.\text{m}$, Tableau 4.3). A l'Est, cette même barre vient recouvrir le pied de digue (Figure 4.14 – D5) et le volume de l'estran est en plus forte augmentation ($+0,186 \text{ m}^3.\text{m}$).

Enfin, dans le secteur des dunes de pied de digue, l'estran est stable (Tableau 4.3 – profil D7 : $+0,048 \text{ m}^3.\text{m}$). Le haut de plage s'érode ($-0,186 \text{ m}^3.\text{m}$) mais n'est compensé que partiellement par les apports dans la partie dunaire ($+0,069 \text{ m}^3.\text{m}$) (Tableau 4.3). Le faible

couvert végétal des dunes de pied de digue n'a pas permis de retenir le sable en provenance du haut de plage par vent de nord, et ce sable a pu être exporté en arrière de la digue.

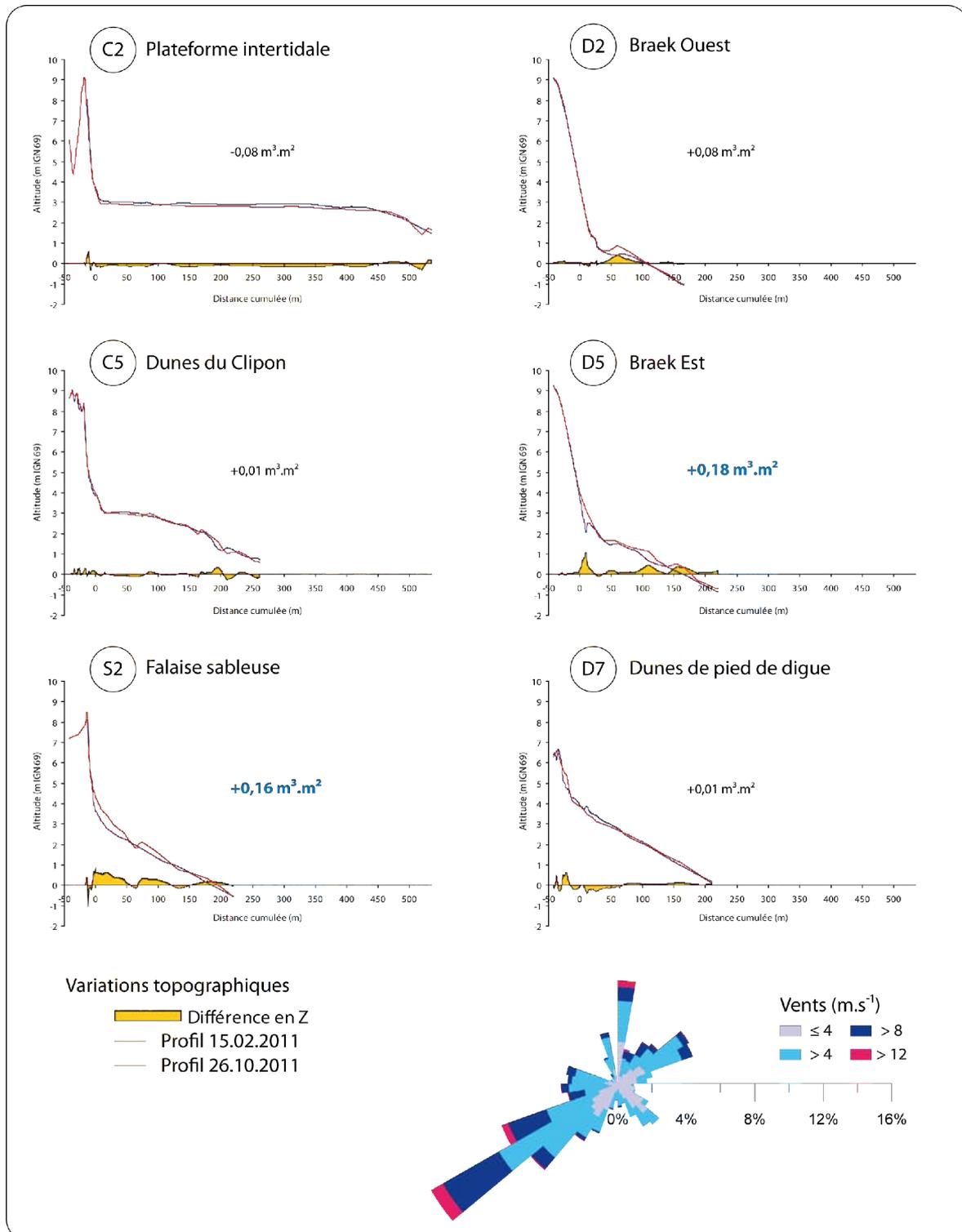


Figure 4.14. Evolution de l'estran sur les profils types des six unités morphologiques de l'UG4 et rose des vents pour la période du 15/02/2011 au 26/10/2011. Les valeurs en gras sont celles qui sont supérieures à la marge d'erreur, en bleu les valeurs positives et en rouge les valeurs négatives. Les volumes sont exprimés en $m^3 \cdot m^2$ car les profils n'ont pas tous la même longueur.

5. Bilan volumétrique et morphologique

5.1. Bilan de l'évolution de l'estran sur les six profils types

Le suivi de l'estran a été divisé en deux périodes. La première période (01.04.10 au 15.02.11) a été caractérisée par des conditions météo-marines plus agitées que la deuxième : vents plus forts, précipitations plus abondantes, et davantage de hauts niveaux d'eau (Figure 4.13 - A et C). Durant la deuxième période (15.02.11 au 26.10.11), les vents frontaux ont été moins fréquents, mais les vents longitudinaux beaucoup plus nombreux (Figure 4.13 – B).

Le bilan montre que seuls deux profils types sont en accrétion (Figure 4.15) : aux dunes du Clipon (C5 : $+0,12 \text{ m}^3.\text{m}$), où des apports de sable importants se sont produits lors des deux périodes sur le versant dunaire ; au niveau de la falaise sableuse (S2 : $+0,2 \text{ m}^3.\text{m}$), où l'on a d'abord observé une érosion du haut de plage ($-0,171 \text{ m}^3.\text{m}$), puis une forte accrétion ($+0,517 \text{ m}^3.\text{m}$) (Tableau 4.3).

Les autres profils types ont un bilan stable. A l'Ouest, la plateforme intertidale reste exactement au même niveau altitudinal. En haut de profil on observe une érosion du haut de plage ($-0,114 \text{ m}^3.\text{m}$) et un apport sur le versant dunaire ($+0,052 \text{ m}^3.\text{m}$) (Figure 4.15). En bas de plage, au-delà de la plateforme, une barre intertidale s'est formée.

Devant la digue, les profils D2 et D5 ont le même bilan légèrement négatif (respectivement $-0,03 \text{ m}^3.\text{m}$ et $-0,02 \text{ m}^3.\text{m}$) (Figure 4.15), mais les changements sur l'estran sont nombreux en raison du déplacement des barres intertidales, qui ont tendance à grossir et migrer vers le haut de plage en été, et s'aplanir en hiver.

Enfin, le profil type qui représente les dunes de pied de digue est en légère accrétion de $0,05 \text{ m}^3.\text{m}$ (Figure 4.15 – D7). Cet apport de sable s'est produit essentiellement dans la partie dunaire ($+0,264 \text{ m}^3.\text{m}$), tandis que l'estran est resté stable (compris entre $-0,058 \text{ m}^3.\text{m}$ et $+0,048 \text{ m}^3.\text{m}$) (Tableau 4.3).

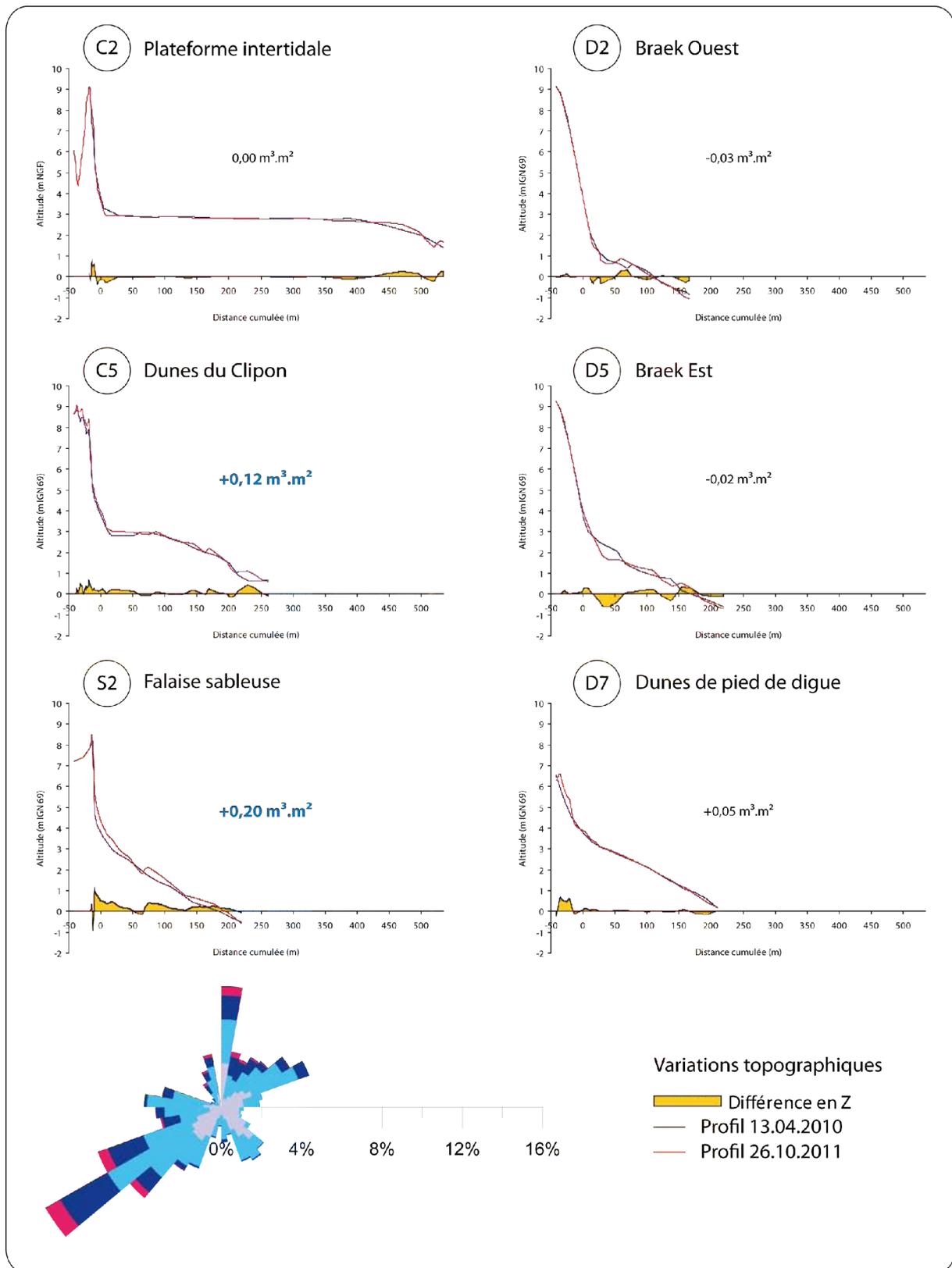


Figure 4.15. Bilan de l'évolution de l'estran sur les six profils types de unités morphologiques de l'UG4 du 01/04/2010 au 26/10/2011. Les valeurs en gras sont celles qui sont supérieures à la marge d'erreur, en bleu les valeurs positives et en rouge les valeurs négatives. Les volumes sont exprimés en m³.m² car les profils n'ont pas tous la même longueur.

5.2. Bilan global des quatorze profils topographiques

Les bilans volumétriques ont été calculés au niveau des 14 profils afin de déterminer si les profils types étaient représentatifs des unités morpho-sédimentologiques définies au début de ce chapitre (Figure 4.16).

→ Plateforme intertidale

Les profils C2 et C3 ont peu évolué. La tendance est la même sur le haut de plage (érosion) et sur le versant dunaire (accrétion). Sur l'estran, le bilan est positif dans la partie Est (C3 : +0,105 m³.m), alors qu'il est stable à l'Ouest (C2 : +0,011 m³.m).

→ Dunes du Clipon

Quatre profils ont été suivis le long de cette unité (de l'Ouest vers l'Est : C4, C5, C6 et S1). Le bilan volumétrique est positif dans tous les cas sur le versant dunaire (pour rappel : la partie située au dessus du niveau des PHMA). A l'Ouest, cette accrétion est plus prononcée (C4 : +0,410 m³.m) et diminue vers l'Est (S1 : +0,088 m³.m). Sur le haut de plage, on observe une différence là encore entre la partie Ouest, en légère érosion (C4 : -0,026 m³.m), tandis que les 3 profils les plus à l'Est sont en accrétion (entre +0,055 m³.m pour C6 et + 0,245 m³.m pour C5). On retrouve cette même disparité également sur l'estran. Au final, le bilan au niveau de ces quatre profils est excédentaire sur la période étudiée, et le profil C5 semble bel et bien être représentatif de ce secteur. Néanmoins, si le profil C4 a un bilan positif sur le versant dunaire comme sur les autres profils de cette unité, la faible évolution au niveau de l'estran le distingue des 3 autres. Ce profil se trouve dans un secteur de transition entre la plateforme intertidale à l'Ouest, et un haut de plage relié directement à un estran à barres et à bâches à l'Est.

→ Falaise sableuse

Un seul profil topographique a été suivi au sein de cette unité. Sur le profil S2, le bilan est nettement excédentaire dans tous les compartiments : en pied de falaise sableuse (*i.e.* partie située au dessus des PHMA : +0,202 m³.m), sur le haut de plage (+0,343 m³.m), ainsi que sur l'estran (+0,169 m³.m).

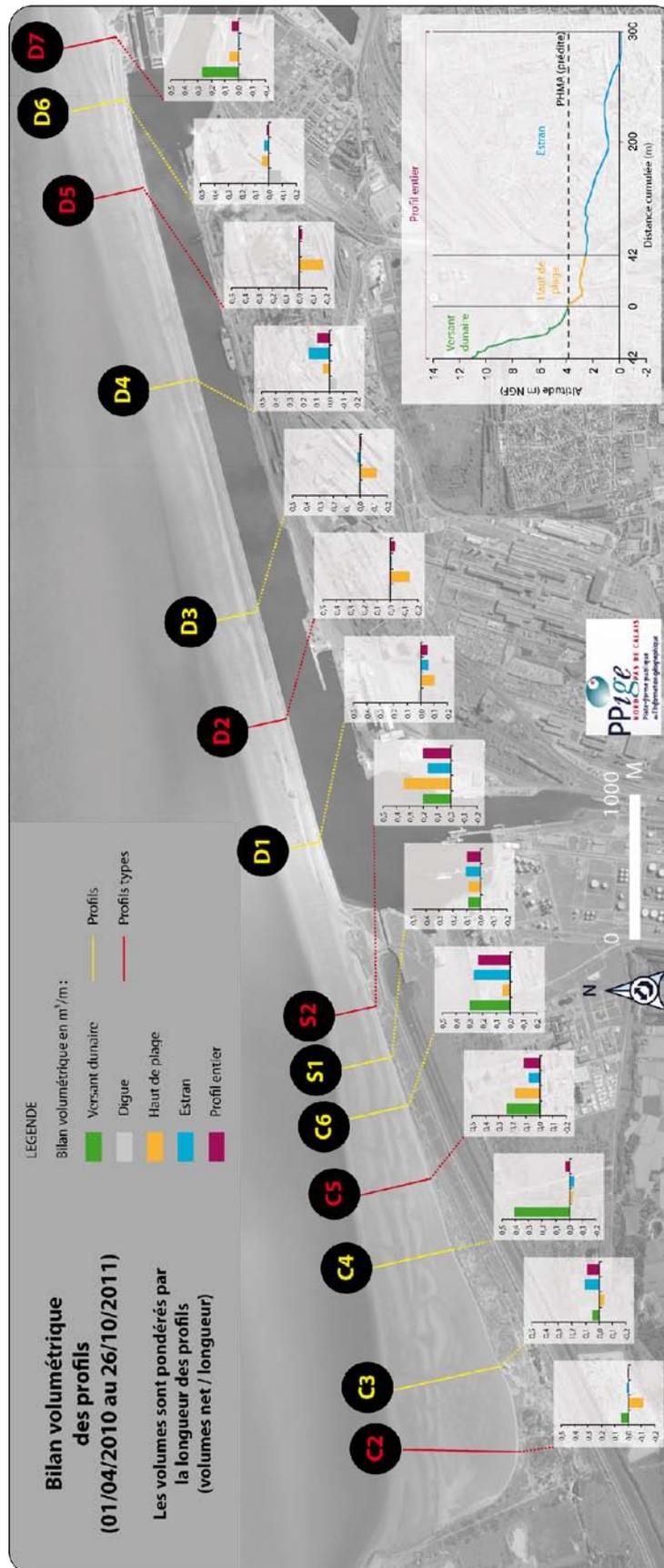


Figure 4.16. Bilan volumétrique au niveau des différents profils de plage. Les profils numérotés en rouges sont les profils types. Les volumes sont exprimés en m³.m² car les profils n'ont pas tous la même longueur.

→ Braek Ouest

Trois profils (D1, D2 et D3) permettent de caractériser cette unité. Le bilan est très différent de ce que l'on a observé plus à l'Ouest, dans l'unité précédente (profil S2). Les unités décrites jusqu'à présent étaient composées d'un versant dunaire et d'un haut de plage sec. Le long du secteur Braek Est il n'existe pas de haut de plage sec, ni de dunes, mais une digue en asphalte. Le bilan volumétrique du haut de plage est négatif (entre $-0,105 \text{ m}^3.\text{m}$ pour D1 et $-0,140 \text{ m}^3.\text{m}$ pour D2). Sur la digue, le bilan est équilibré, et sur l'estran, les variations sont réduites : légèrement négatif à l'Ouest ($-0,056 \text{ m}^3.\text{m}$ pour D1) à légèrement positif à l'Est ($+0,024 \text{ m}^3.\text{m}$). Les bilans globaux des profils reflètent ceux de l'estran étant donné l'absence de dunes et de haut de plage sec.

→ Braek Est

Les trois profils de cette unité sont D4, D5 et D6 et ils sont situés le long de la moitié Est de la digue du Braek. Les bilans sont plus contrastés que le long de la partie Ouest de la digue. Le profil D4 a un bilan positif ($+0,092 \text{ m}^3.\text{m}$), celui de D5, au centre, est légèrement négatif ($-0,018 \text{ m}^3.\text{m}$) à cause d'une érosion plus accentuée sur le haut de plage, et enfin, le profil D6 est en légère accrétion ($+0,020 \text{ m}^3.\text{m}$).

→ Dunes de pied de digue

L'évolution au niveau de l'estran est faible ($-0,010 \text{ m}^3.\text{m}$), à l'image de ce qui se produit par ailleurs devant la digue du Braek. En revanche, le bilan global du profil est positif ($+0,048 \text{ m}^3.\text{m}$), ce qui est dû en grande partie aux apports dans la partie dunaire ($+0,264 \text{ m}^3.\text{m}$) et dans une moindre mesure sur le haut de plage.

L'évolution des profils topographiques a été étudiée jusqu'ici en analysant les conditions météo-marines globales entre deux périodes de levés. Au cours des nombreuses campagnes de terrain effectuées, nous n'avons observé que deux épisodes érosifs marqués. Nous analyserons donc dans la partie suivante les conditions météo-marines lors de ces deux épisodes afin de mieux cerner quelles sont les conditions érosives du haut de plage sur l'UG4.

6. Etude de deux cas d'érosion du haut de plage en septembre 2010 et août 2011

6.1. Remarques générales sur la représentativité des conditions météo-marines

Les conditions météo-marines pendant lesquelles ont été collectées ces données ne sont pas forcément représentatives des conditions prévalant habituellement le long de ce littoral. Les données collectées dans cette étude l'ont été lors de conditions générales de faible agitation, et des événements de tempête pourraient avoir un tout autre impact sur la morphologie du site. Cela a pu être observé en mars 2010, soit 1 mois avant le début des mesures topographiques, où un coup de vent avait provoqué forte baisse du niveau de plage et formation d'une falaise dunaire de 2 m de haut au niveau du secteur des dunes du Clipon par les vagues de tempête (Figure 4.17). Au moment du début des mesures topographiques (avril 2010), on se trouvait donc en situation de récupération après érosion, et des plaquages éoliens importants avaient déjà masqué en grande partie l'érosion marine et enseveli la falaise dunaire. Néanmoins, la revégétalisation était encore faible et témoignait de cette situation post-tempête (correspond au stade D du modèle de [Hesp, 2002](#)).



Figure 4.17. Photographies prises au niveau du profil C4 après la tempête de fin février 2010 (A) le 03.03.2010 et (B) le 27.04.2010 (Tresca, 2010)

6.2. Période du 24 au 26 septembre 2010

La première période caractérisée ici s'étend du 24.09.10 au 26.09.10. Bien que le coefficient de marée ait été faible, compris entre 85 le 24/09 et 86 le 26/09, la conjonction de vents forts et de vents d'afflux a permis d'observer une érosion du haut de plage, laissant apparaître une micro-falaise d'érosion d'une hauteur de 30 cm environ (Figure 4.18). Cette forme d'érosion était visible sur la quasi-totalité de la plage du Clipon, sauf au niveau de la

plateforme intertidale, à l'Ouest (au niveau des profils C2 et C3). Aucune marque d'érosion n'était visible non plus devant les dunes de pied de digue (profil D7, à l'Est), ces deux secteurs étant caractérisés par un large estran d'une altitude supérieure (Figure 4.2).

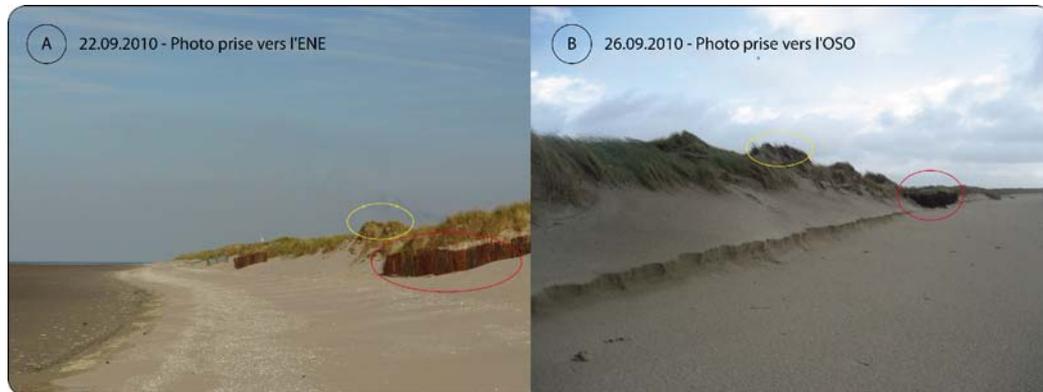


Figure 4.18. Photographies prises (A) avant et (B) après l'épisode d'érosion du haut de plage du 25-26/09/2010 (Clichés, Tresca, 2010)

Du 24.09.10 à 19h au 26.09.10 à 19h, le vent a soufflé au maximum à $16,6 \text{ m.s}^{-1}$, avec néanmoins un creux à $6,9 \text{ m.s}^{-1}$ dans la soirée du 25/09. La vitesse est restée supérieure à 12 m.s^{-1} pendant 13 heures consécutives en début d'épisode dans la nuit du 24.09 au 25.09. La provenance du vent pendant 48 h était comprise entre 300 et 30° (Figure 4.19), donc frontale par rapport au trait de côte. Les hauteurs d'eau observées par le marégraphe ont été supérieures aux prédictions pendant 4 marées hautes consécutives. Les surcotes maximales enregistrées ont été de $0,59 \text{ m}$ au port Ouest, et $0,8 \text{ m}$ au port Est, engendrant des niveaux d'eau de $3,846 \text{ m NGF}$ à l'Ouest et $3,757 \text{ m}$ à l'Est. Ces hauteurs d'eau semblent relativement faibles, eu égard aux valeurs prédites par le [SHOM \(2011\)](#) lors des plus hautes marées astronomiques, et qui ont été choisies pour délimiter les versants dunaires du haut de plage sur les profils types ($4,036 \text{ m NGF}$ à l'Ouest, et $3,787 \text{ m NGF}$ à l'Est). En revanche, comme cela a pu être démontré dans de nombreuses études ([Ruggiero et al., 2001](#) ; [Suanez et al., 2006](#) ; [Ruz et al., 2009](#), [Suanez et Cariolet, 2010](#) ; [Maspataud et al., 2011](#), [Maspataud, 2011](#)), l'agitation du plan d'eau ainsi que les vents frontaux ont permis au déferlement d'atteindre une cote plus élevée que ce qui a été enregistré par les marégraphes.

Des mesures terrain au DGPS de précision centimétrique le 28/09/2011 ont permis de mesurer l'altitude au pied de la micro-falaise dunaire qui s'est créée ce jour là. Cette mesure (à la marge d'erreur de $\pm 10 \text{ cm}$) atteint $4,18 \text{ m NGF}$ pour la plage du Clipon au niveau du profil C3, soit $0,33 \text{ m}$ de plus que la mesure maximale au marégraphe du port Ouest.

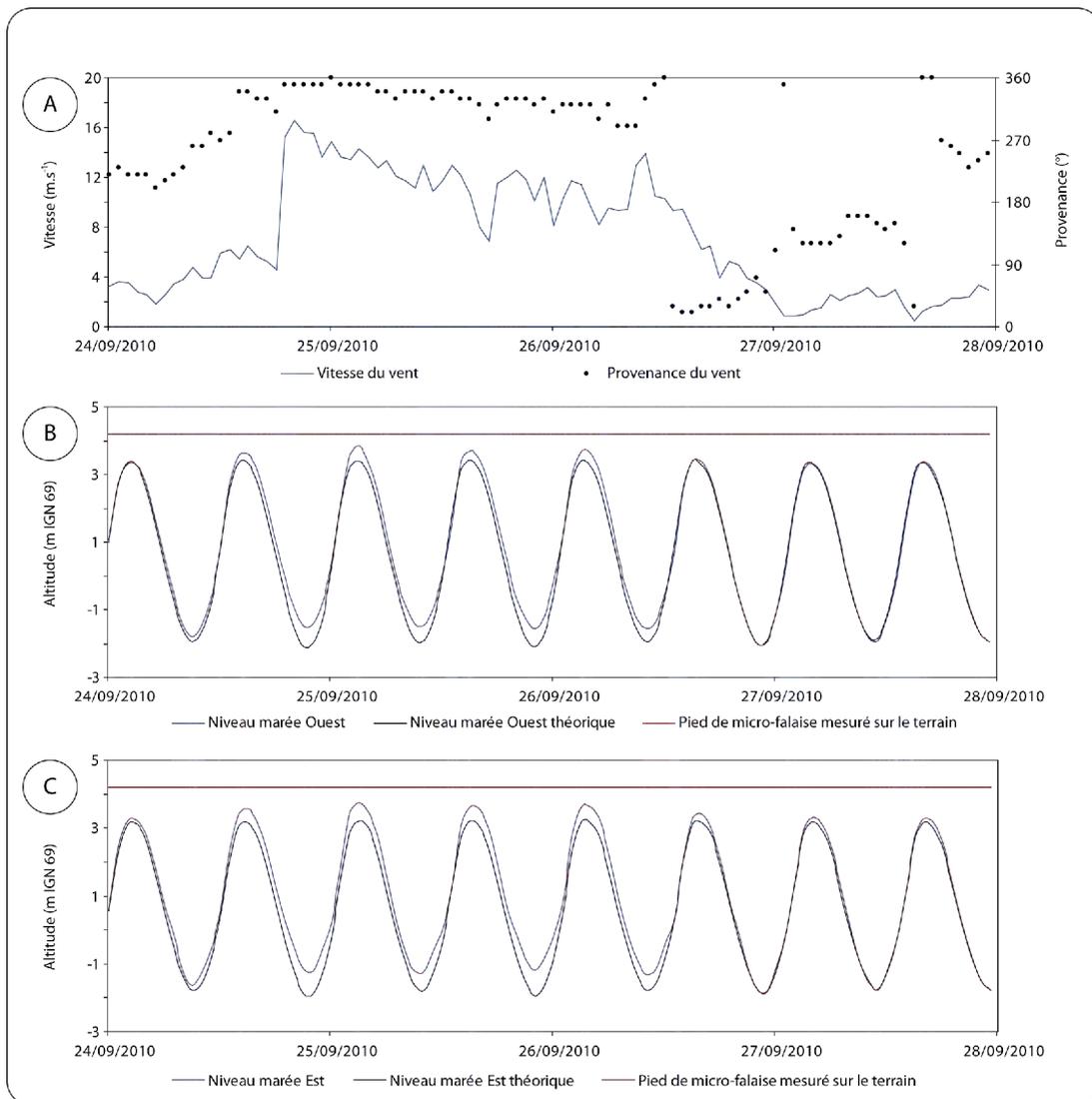


Figure 4.19. Conditions météo-marines lors d'un épisode d'érosion du haut de plage entre le 24/09/2010 et le 28/09/2010 : (A) vitesse et direction du vent, (B) niveaux d'eau prédits et observés au marégraphe du port Ouest et (C) du port Est.

6.3. Période du 29 août au 3 septembre 2011

Un deuxième épisode d'érosion du haut de plage s'est produit au Clipon entre le 29.08.11 et le 31.08.11 lors d'un fort coefficient de marée (112). Une micro-falaise dunaire de plusieurs dizaines de centimètres de hauteur a pu être observée à cette occasion sur la plage du Clipon (Figure 4.20 - A et B1), plus haute que celle qui s'est formée en septembre 2010.



Figure 4.20. Photographies prises sur la plage du Clipon (A) avant et (B1) après l'épisode d'érosion du haut de plage du 30/08/2011, ainsi que sur la plage au niveau du profil D7 à l'Est de l'UG4 vers l'Est (B2) et vers l'Ouest (B3) après l'érosion au Clipon (Tresca, 2011)

L'observation des données météo-marines montre que les conditions d'agitation sont restées faibles, la vitesse du vent est restée inférieure à 8 m.s^{-1} ($4,5 \text{ m.s}^{-1}$ en moyenne du 29 au 31.08.11), et le vent provenait du secteur Ouest (provenance comprise entre 210° et 300°), soit une direction longitudinale à oblique (Figure 4.21 - A). Cependant, au large des vagues d'une hauteur significative de plus de 2 m ont été enregistrées le 28.08.11, et il est possible que des houles à la côte aient pu provoquer une érosion du haut de plage. Le niveau d'eau maximal observé au marégraphe du port Ouest a été de 3,946 m NGF, et 3,777 m NGF à l'Est le 31/08/2011, soit des surcotes maximales de respectivement 0,33 m et 0,47 m (Figure 4.21). Les mesures faites au DGPS à cette même date ont permis d'établir l'altitude du pied de la micro-falaise à 4,09 m NGF (sur le profil C3), soit 0,144 m de plus qu'au marégraphe Ouest.

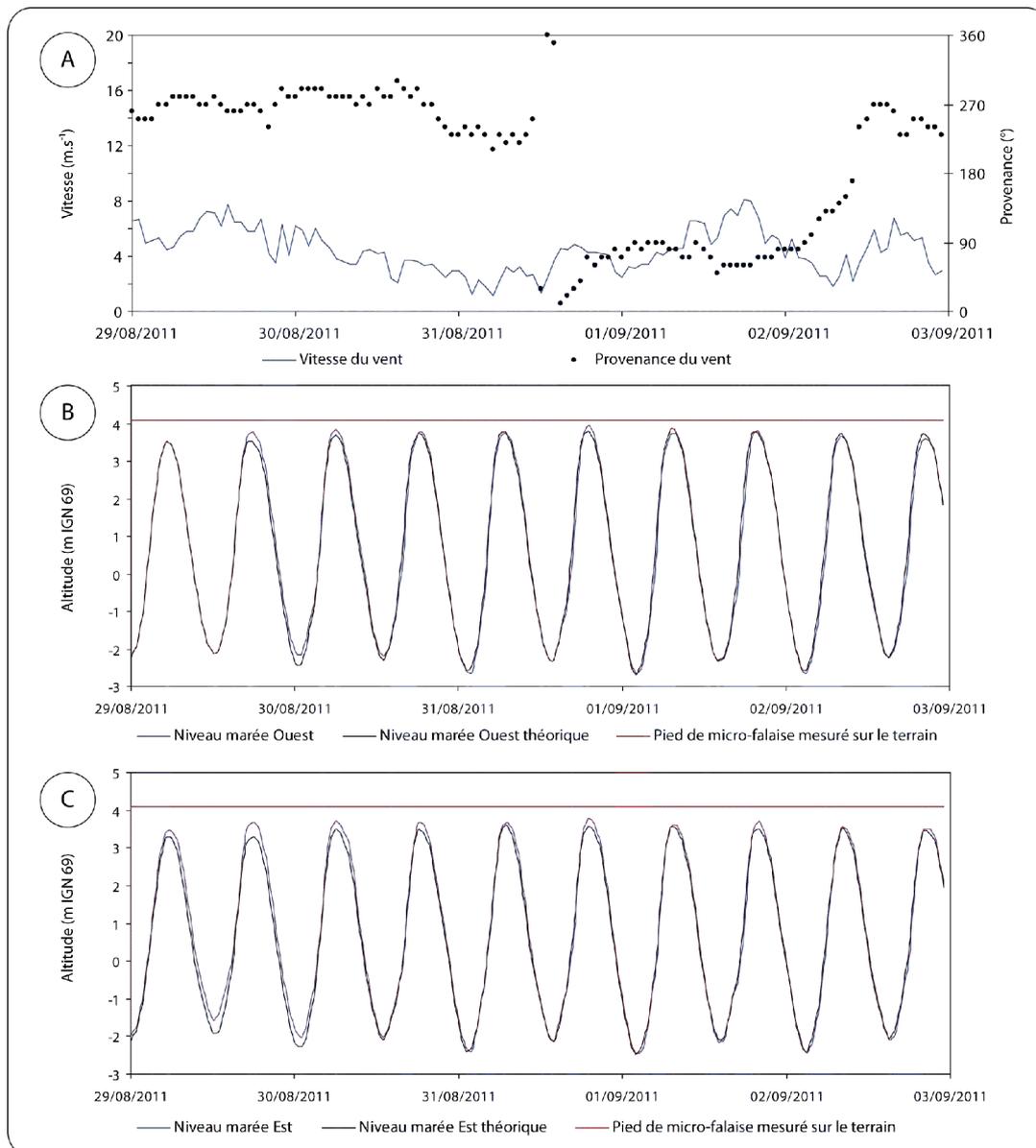


Figure 4.21. Conditions météo-marines lors d'un épisode d'érosion du haut de plage entre le 29/08/2011 et le 03/09/2011 : (A) vitesse et direction du vent, (B) niveaux d'eau prédits et observés au marégraphe du port Ouest et (C) du port Est.

En revanche, sur la plage située au niveau du profil D7 (extrémité Est du site), aucune marque d'érosion n'est apparue (Figure 4.20 - B2 et B3). Bien que les caractéristiques des agents météo-marins aient été très proches pour ces deux plages situées environ 6 km l'une de l'autre, leur réponse morphologique diffère fortement. Cette différence ne peut être attribuée à la situation d'abri provoquée par la présence de la jetée de St Pol, étant donné la direction du vent en provenance de l'Ouest. L'explication tient à la topographie du haut de plage avant le coup de vent, qui était différente au Clipon (C5) et au niveau des dunes de pied de digue (D7) (Figure 4.22). La transition entre le haut de plage et le versant dunaire est plus abrupte sur le

profil C5, et l'érosion au niveau du pied de dune serait donc facilitée par rapport au profil D7, à l'Est, où la pente est plus douce au niveau du pied de dune.

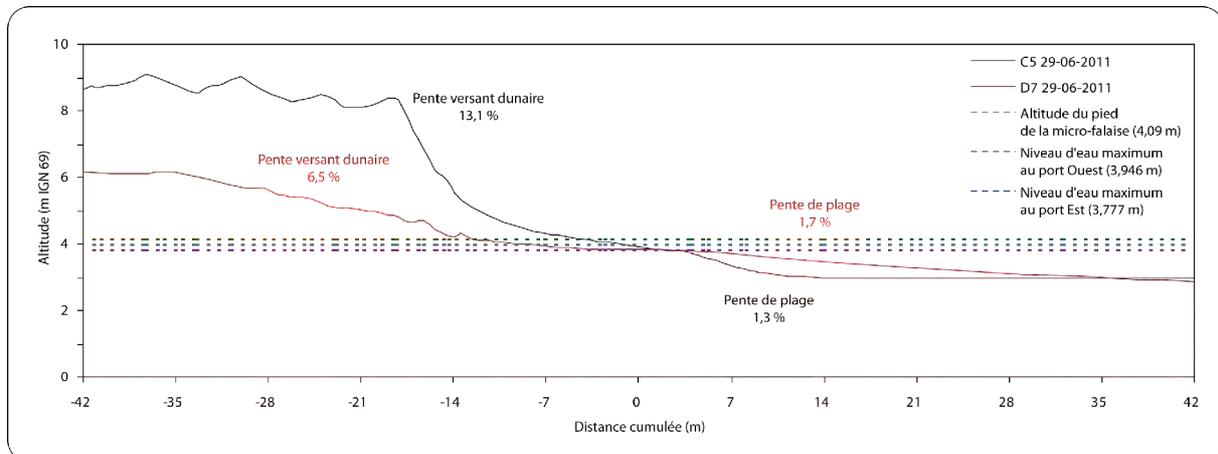


Figure 4.22. Topographie du versant dunaire et du haut de plage des profils C5 (centre des dunes du Clipon) en bleu, et D7 (dunes de pied de digue, à l'Est de l'UG4) en rouge.

Sur la plage du Clipon, malgré des conditions d'agitation très modérées, une érosion du haut de plage s'est produite uniquement grâce à un coefficient de marée élevé aux endroits où une accumulation sableuse avait été permise localement par l'installation de fascines pendant la période estivale. Cette observation revêt un caractère primordial dans l'optique d'un aménagement pour la gestion du transport éolien de la plage du Clipon.

→ *Lors de conditions de forte agitation*

De manière générale, même si l'évolution est faible, on observe sur l'ensemble de l'UG4 une réponse importante de la plage aux conditions météorologiques. Les épisodes érosifs sont quasiment toujours suivis d'une période d'accrétion. Cependant, certaines corrélations entre les volumes et les conditions météo-marines mériteraient d'être approfondies avec des données d'agitation à l'aide de courantomètres, et/ou des données de vagues au large, spécialement lors de tempêtes.

J. Bertier (2009) avait eu l'opportunité d'étudier la réponse morphologique en conditions de forte agitation. Il avait pu démontrer que l'énergie des houles d'OSO se dissipait à l'Ouest du site (plateforme intertidale), tandis que le sable au centre de l'UG4 pouvait être transporté vers l'Est du fait d'un courant de flot plus intense que le courant de jusant le long des plages de la plaine maritime Flamande, comme l'ont démontré de

nombreuses études (Sipka, 1998 ; Sipka et Anthony, 1999 ; Reichmüth, 2003 ; Aernouts, 2005 ; Hemdane, 2006 ; Sedrati, 2006 ; Héquette *et al.*, 2008a, 2008b ; Oblinger, 2008 ; Cartier et Héquette, 2011 ; Cartier 2011). Nos données confirment ces observations en ce qui concerne la plateforme intertidale à l'Ouest, où le haut de plage n'a pas été érodé contrairement au reste de la plage du Clipon (Figure 4.21).

Par conditions de forte agitation de secteur N à NNE, toujours selon Bertier (2009), le centre du site peut également être érodé par un courant d'*undertow*, tandis que l'Est et l'Ouest du site restent relativement protégés : l'Est par la jetée de St-Pol, et l'Ouest par la dissipation de l'énergie sur la plateforme intertidale. Les observations que nous avons faites semblent également aller dans ce sens, mais les conditions météo-marines n'ont pas été assez énergétiques pour pouvoir effectuer une comparaison.

CONCLUSION DU CHAPITRE 4

Ce chapitre a permis de mettre en évidence l'évolution de l'UG4 à court terme à l'aide de 14 profils topographiques transversaux. Afin de faciliter la lecture, le site a été divisé en six unités morpho-sédimentologiques, dont la dynamique a été résumée à chaque fois à l'aide d'un profil type. Il ressort de cette analyse une variabilité spatiale importante de la morphologie de la plage, mais une relative stabilité en termes de volumes.

A l'Ouest, le signe caractéristique de la plage est la présence d'une plateforme intertidale de 500 m de large. Il s'agit d'un lieu de sédimentation fine en raison de la situation d'abri engendrée par la présence de l'avant port Ouest. Lors de conditions dominantes d'OSO, les vagues sont refractées (Hemdane, 2006 ; Bertier, 2009). Sur le court terme, l'analyse des profils a montré que ce secteur était stable. Du fait de cette situation d'abri lors de vents dominants d'Ouest, ainsi que de la granulométrie comportant une fraction fine, les apports éoliens sont faibles.

L'unité « Dunes du Clipon » est caractérisée par une plage à barres et à bâches. Ce secteur est globalement stable, mais des apports faibles et réguliers continuent d'alimenter la dune bordière en sables éoliens. Le haut de plage peut facilement être érodé à marée haute lors de forts coefficients de marée, même en l'absence de conditions de forte agitation.

Le long de l'unité de la falaise sableuse, bien que l'érosion domine sur le moyen terme, l'accrétion est dominante en 2010-2011. Cette tendance sur le court terme peut être attribuée à l'absence de conditions de forte agitation de secteur nord, qui ont tendance éroder la plage (Bertier, 2009). De plus, la présence d'enrochements à la jonction plage-digue permet l'interruption d'une partie des transferts sableux (éoliens notamment) lors de vents d'Ouest, et une accumulation sur le haut de plage.

Le long de la digue du Braek, la partie Ouest semble être en érosion au niveau du haut de plage. Cette tendance est plus nuancée à l'Est, où le pied de digue peut facilement être recouvert de sable par une barre intertidale, ou lors de vents d'Est par du sable en provenance des dunes de pied de digue.

Enfin, dans le secteur des dunes de pied de digue, bien que les transferts éoliens longitudinaux soient possibles lorsqu'une barre recouvre le pied de digue, ils sont la plupart du temps limités du fait de l'absence de haut de plage sec devant la digue plus à l'Ouest. En revanche, les échanges entre le haut de plage et les dunes peuvent être conséquents. Lors de vents de Nord, le sable des dunes et du haut de plage peut être exporté vers la digue en arrière, du fait de la faible couverture végétale des dunes qui ne permet pas de retenir le sable.

Il serait nécessaire de pouvoir faire des mesures complémentaires lors de tempêtes afin d'observer la réponse morphologique de manière plus fine lors de telles conditions.

CHAPITRE 5 - TRANSPORT EOLIEN : RESULTATS DES EXPERIMENTATIONS *IN SITU*

INTRODUCTION

Nous présenterons tout d'abord dans ce chapitre les mesures du transport éolien *in situ* effectuées sur la plage du Clipon pendant le printemps 2010, à l'aide de pièges verticaux de type Leatherman modifiés (Goldsmith *et al.*, 1988). Les expérimentations ont été concentrées sur le haut de plage et le versant dunaire, pour tenter de déterminer quelles sont les conditions optimales pour l'alimentation en sable de la dune bordière. La moitié des sorties de terrain ont été effectuées par vent longitudinal, et l'autre moitié lors de conditions de vent frontal oblique. Dans une deuxième partie, nous présenterons les piégeages effectués sur la digue du Braek pendant le printemps 2011 à l'aide de pièges verticaux triangulaires et des mâts instrumentés. Les instruments ont été déployés du haut de plage jusqu'à l'arrière de la digue du Braek le long de profils transversaux. Des pièges à coupelles (Arens and Van der Lee, 1995) ont également été testés sur la digue, afin de comparer le transport sur l'asphalte et sur le sable.

1. Caractérisation du transport éolien sur le haut de plage et le versant externe de la dune bordière de la plage du Clipon

Lors de cette première série d'expérimentations *in situ* du printemps 2010, les mesures ont été concentrées au niveau de la plage du Clipon. Les piégeages ont été effectués à proximité des profils transversaux qui ont été analysés au chapitre précédent (Figure 5.1). La description des expérimentations a été organisée en fonction de l'angle d'incidence des vents (longitudinaux puis frontaux à obliques).

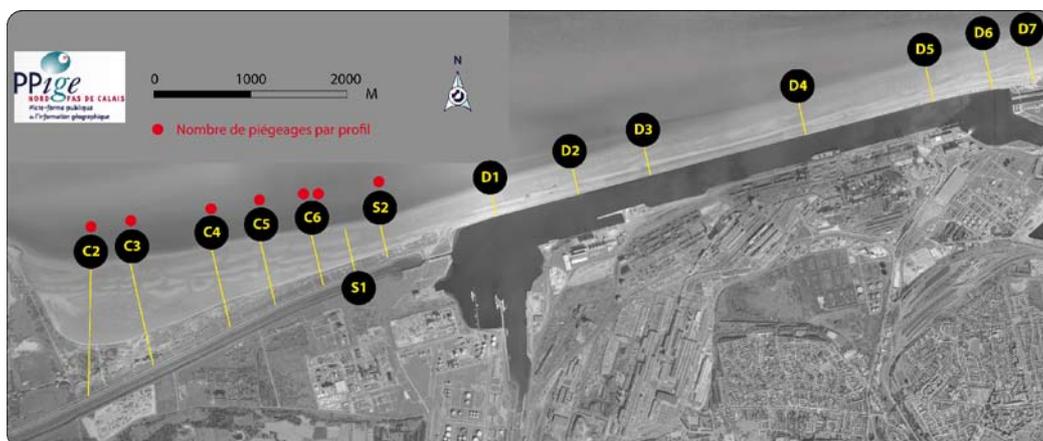


Figure 5.1. Carte de localisation des piégeages *in situ* sur la plage du Clipon

1.1. Par vent longitudinal

1.1.1. Conditions de vent dominant en provenance d'Ouest Sud-Ouest

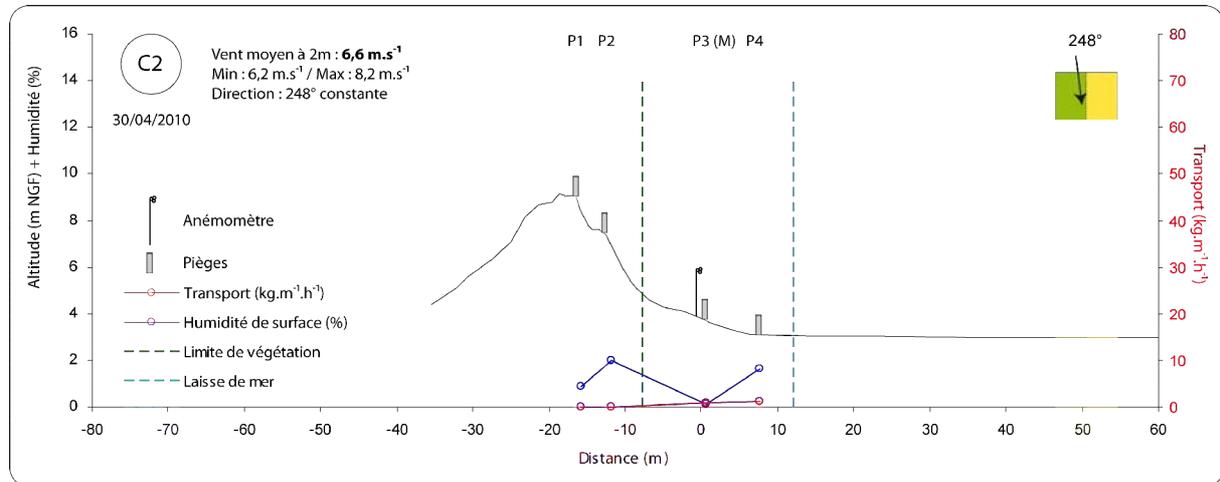


Figure 5.2. Piégeage éolien sur le profil C2 à l'Ouest de la plage du Clipon le 30.04.2010 par vent d'OSO

Le 30/04/2010, quatre pièges ont été déployés perpendiculairement au vent dominant à l'Ouest du site (au niveau du profil C2, Figure 5.1). A cet endroit, le versant dunaire culmine à 9 m NGF pour une pente de 31%. Les pièges P1 et P2 étaient situés au sein de la végétation sur le versant dunaire, tandis que P3 et P4 étaient sur le haut de plage sec (Figure 5.2), large d'une vingtaine de mètres pour un coefficient de marée de 96. Le vent moyen à 2 m (au niveau de P3, Figure 5.2) lors des 10 minutes de piégeages était de $6,6 \text{ m.s}^{-1}$ ($u_{2m} : 6 \text{ m.s}^{-1}$), avec des pointes allant jusqu'à $8,2 \text{ m.s}^{-1}$. Le vent provenait du secteur SO à OSO, la majorité des enregistrements de la direction indiquant 248° . Il soufflait donc longitudinalement par rapport à l'orientation générale du trait de côte (Figure 5.3). Enfin, l'humidité de surface atteignait jusqu'à 2% au niveau de P2 et P4, tandis qu'elle était nulle au niveau du piège P3 en pied de dune.

Le transport au sein de la végétation (P1 et P2) était nul lors de cette expérimentation, et a atteint au maximum $1,3 \text{ kg.m}^{-1}.\text{h}^{-1}$ sur le haut de plage (P4) (Figure 5.2). Dans ce secteur, par vent dominant du SO, la dune et le haut de plage sont sous le vent (en position d'abri) et le fetch est de ce fait très réduit (Figure 5.3), ce qui explique en partie les faibles quantités de sable piégées. De plus, lors de cette expérimentation la vitesse moyenne du vent était faible. Le transport éolien est donc très limité, que ce soit au sein de la végétation (P1 et P2 qui n'ont rien collecté) ou sur le haut de plage, où les quantités piégées sont très. La vitesse limite u_{2m} semble donc sous estimée pour cette expérimentation.



Figure 5.3. Localisation des pièges et direction du vent (Source photo. aérienne : Ortholittorale 2000)

1.1.2. Vent en provenance du Nord-Est

Deux piégeages ont été effectués sur la plage du Clipon pour des conditions de vent longitudinal oblique provenant du secteur NE. Le premier piégeage a été effectué le 15.06.2010 dans la partie ouest du Clipon (au niveau du profil C3) et le deuxième piégeage a été réalisé le 16.06.2010 dans la partie centrale du site au niveau du profil C5 (Figure 5.1).

1.1.2.1. Piégeage du 15.06.2010

Six pièges ont été déployés à l'Ouest du site (au niveau du profil C3) sur une distance de 33 m entre l'estran (pièges P5 et P6) et le sommet d'une dune embryonnaire entaillée en micro-falaise, dont le sommet est situé à 6,8 m NGF, marquant le début de la végétation sur le versant dunaire (piège P1) (Figure 5.4 et Figure 5.5-B). Le piège P2 était situé à la base de la micro-falaise en forte pente (48,9 %), et les pièges P3 et P4 sur le haut de plage, large de 20 m. Le vent enregistré à 2 m au niveau du piège P4 soufflait à une vitesse moyenne de $8,2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ lors des 10 minutes de piégeage, par ailleurs effectué à basse mer pour un coefficient de marée de 89. La vitesse limite d'envol (u_{2m}) a été estimée à $6,4 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. Pour cette direction de vent et ces conditions marégraphiques, la distance de fetch est maximale sur cette plage, puisque le vent souffle parallèlement à la côte, et la surface potentielle de déflation s'étend sur plusieurs centaines de mètres (Figure 5.5-A). A la faveur d'un fort ensoleillement, d'une vitesse de vent importante et d'un estran découvert depuis plusieurs heures, les valeurs d'humidité calculées au-delà de la laisse de mer et sur le haut de plage sont faibles (0,33% pour P6 contre 0,19% pour P4), puis elles augmentent vers le pied de dune pour atteindre un maximum de 1,58 % devant le piège P1 (Figure 5.4), ou le substrat était encore humide probablement en raison de la présence de végétation (le piégeage a été réalisé en fin de matinée).

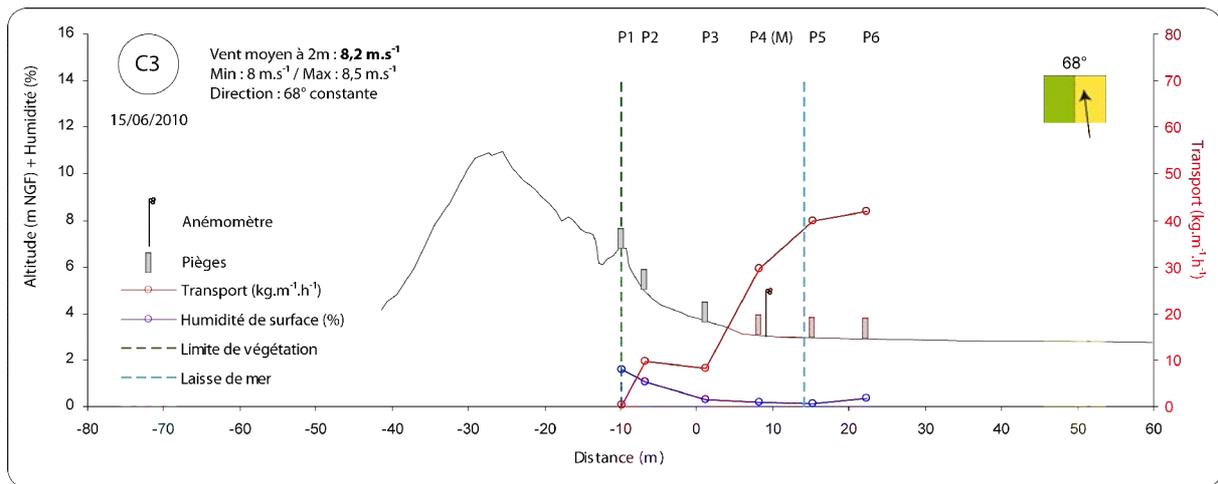


Figure 5.4. Piégeage éolien sur le profil C3 à l’Ouest de la plage du Clipon le 15.06.2010 par vent de NE

Le transport maximal se produit sur l’estran (40 kg.m⁻¹.h⁻¹ pour P5 à 41,9 kg.m⁻¹.h⁻¹ pour P6), mais après la laisse de mer, les valeurs chutent (29,5 kg.m⁻¹.h⁻¹ pour P4) et décroissent jusqu’au pied de dune (P2 : 9,6 kg.m⁻¹.h⁻¹) (Figure 5.4). La diminution du transport entre l’estran et le haut de plage est due en partie à la rugosité de la laisse de mer. Le vent est freiné par les obstacles (algues, coquillages) et le transport baisse après la laisse de mer (P4). Sur la partie supérieure du haut de plage, l’augmentation de la pente et du taux d’humidité sur le haut de plage restreignent le transport au niveau des pièges P3 et P2. Enfin, le dernier piège P1 n’a capté qu’une faible quantité de sable (0,4 kg.m⁻¹.h⁻¹) car il se trouve plus haut sur le versant. Il ne peut donc capter le sable du haut de plage qui transite parallèlement à la dune. De plus, il se trouve sur la partie supérieure de la micro-falaise dunaire de plusieurs dizaines de cm de haut, ce qui indique de nouveau la réduction du transport en raison d’une forte pente.

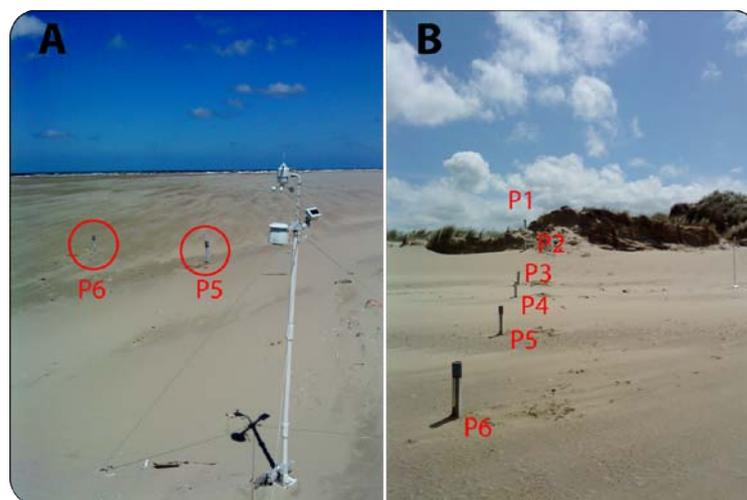


Figure 5.5. Photographies de terrain du 15.06.2010 sur le profil C3 à l’ouest de la plage du Clipon. (A) Déflation sur l’estran devant les pièges P5 et P6 ; (B) Emplacement des pièges (Clichés Tresca, 2010)

1.1.2.2. Piégeage du 16/06/2010

Le 16/06/2010, 7 pièges ont été déployés au centre de la plage du Clipon (au niveau du profil C5, Figure 5.1), sur 35 m environ entre l'estran (piège P7) et le sommet du versant dunaire couvert de végétation (piège P1) à 8,3 m NGF. La pente du versant dunaire était de 30,15% (Figure 5.6). Sur le haut de plage, le vent moyen à 2 m pendant les 10 minutes de piégeage était de $9,6 \text{ m.s}^{-1}$ (P5, Figure 5.6), avec néanmoins des variations (minimum de $8,2 \text{ m.s}^{-1}$ et maximum de $9,8 \text{ m.s}^{-1}$). La vitesse limite d'envol u_{l2m} a été estimée à $5,6 \text{ m.s}^{-1}$. L'orientation du vent était parallèle au rivage, et le fetch potentiel était long. Le coefficient de marée était de 88, et l'expérimentation a eu lieu en milieu de matinée, à marée descendante peu après la pleine mer. Le faible ensoleillement ainsi que la mer qui venait de se retirer n'ont pas permis à la surface de l'estran de s'assécher malgré une forte vitesse de vent, ce qui explique une humidité très importante au niveau du piège P7 (13,5 %) Une bâche humide, proche du haut de plage, illustre la forte humidité du substrat à ce niveau (Figure 5.7). Le transport éolien est donc réduit au haut de plage uniquement. L'humidité baisse ensuite rapidement vers la dune pour atteindre une valeur quasiment nulle entre P4 et P1 (valeurs comprises entre 0,09 % et 0,26 %) (Figure 5.6).

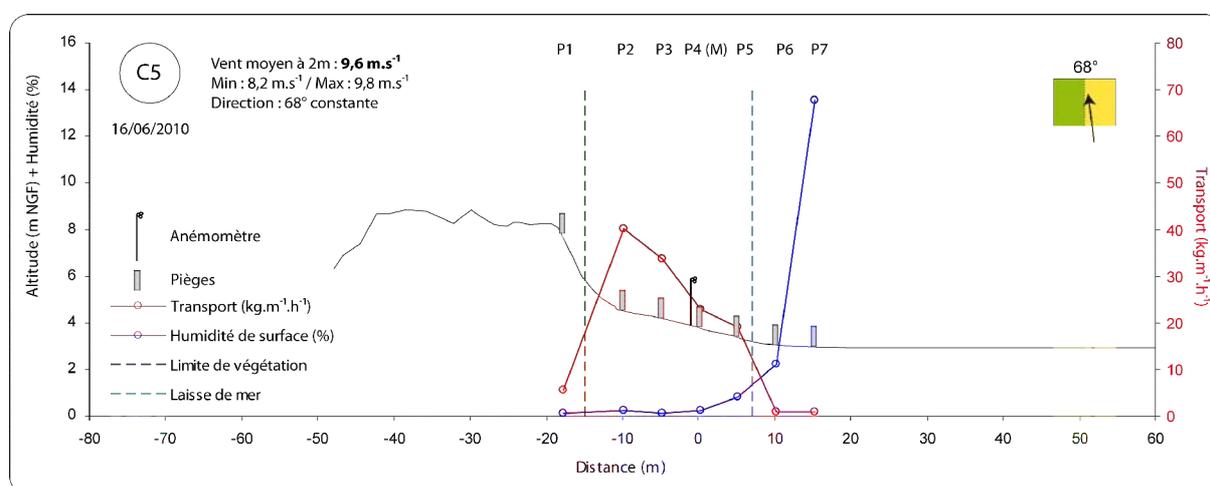


Figure 5.6. Piégeage éolien sur le profil C5 dans la partie centrale de la plage du Clipon le 16.06.2010 par vent de NE

Les valeurs de transport sont très faibles sur l'estran ($1 \text{ kg.m}^{-1}.\text{h}^{-1}$ pour P6 et pour P7 : $0,8 \text{ kg.m}^{-1}.\text{h}^{-1}$) (Figure 5.6) en raison principalement de l'humidité du substrat qui favorise la cohésion du sédiment et l'empêche d'être mobilisé par le vent. Sur le haut de plage en revanche, la quantité de sable piégé augmente de la laisse de mer (P5 : $19 \text{ kg.m}^{-1}.\text{h}^{-1}$) vers le

pied de dune où il est maximal (P2 : $40,2 \text{ kg.m}^{-1}.\text{h}^{-1}$) (Figure 5.6), et baisse fortement au niveau du piège situé au sommet du versant dunaire (P1 : $5,6 \text{ kg.m}^{-1}.\text{h}^{-1}$). Lors de ces conditions de vent parallèle à la côte, le fetch effectif est long sur le haut de plage sec, cependant la dune n'est pas alimentée. La forte pente et le couvert végétal limitent également le transport éolien à ce niveau. Le transport éolien est plus important que lors de l'expérimentation du 15.06 qui avait eu lieu plus à l'Ouest (Figure 5.4) ce qui s'explique par une vitesse de vent plus élevée ($9,6 \text{ m.s}^{-1}$ contre $8,5 \text{ m.s}^{-1}$), et une humidité plus faible en pied de dune (0,3 % pour le piège P2 contre 1 % au niveau du piège P2 le 15.06).

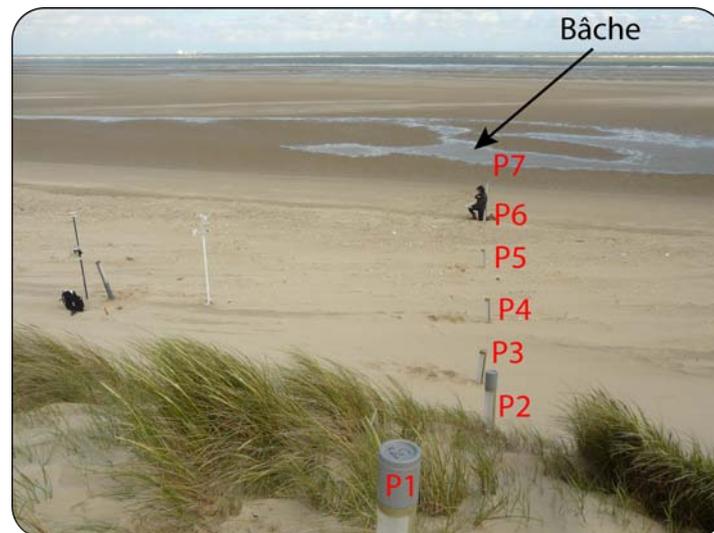


Figure 5.7. Photographie de terrain lors du piégeage du 16.06.2010 sur le profil C5, au centre de la plage du Clipon (cliché Tresca, 2010)

1.2. Par vent frontal oblique de Nord Nord-Est

L'étude du transport éolien par vent oblique à frontal est primordiale, car il s'agit de ces conditions qui sont potentiellement les plus propices à l'alimentation de la dune bordière, en rabattant le sable du haut de plage vers le versant dunaire.

1.2.1. Piégeage du 16.06.2010

Lors de cette expérimentation, effectuée au centre de la plage du Clipon (profil C4, Figure 5.1), le vent provenait du NNE et soufflait de façon oblique vers la côte. Huit pièges ont été disposés entre l'estran (P8) et le sommet du versant dunaire à 8,3 m NGF (P1) sur une longueur totale de 40 m (Figure 5.8). Le piégeage a été effectué à basse mer lors d'un

coefficient de marée de 88. La pente du versant dunaire était de 33,2% entre le pied et le sommet. Le vent a soufflé en moyenne à $11,1 \text{ m.s}^{-1}$ à 2 m au niveau du piège P7 lors des 10 minutes de piégeage, soit quasiment deux fois la vitesse d'envol indicative calculée ($u_{2m} = 5,6 \text{ m.s}^{-1}$). L'humidité de surface étaient quasiment nulle sur le versant dunaire et le haut de plage (0,08 % à 0,17 %), mais elle était plus importante sur l'estran juste en avant de la laisse de mer avec 15,8 % (P8) (Figure 5.8).

Malgré la forte humidité de l'estran, le transport y était intermittent mais intense (« streamers », Baas, 2008), dépassant les 11 m.s^{-1} de moyenne (Figure 5.9), ce qui explique la quantité importante de sable piégée en haut d'estran (P8 : $77 \text{ kg.m}^{-1}.\text{h}^{-1}$) (Figure 5.8). A la limite entre l'estran et le haut de plage, l'humidité de surface baisse mais le transport diminue au niveau de la laisse de mer qui augmente la rugosité et freine la vitesse du vent, ce qui peut entraîner un dépôt partiel. Sur le haut de plage, les valeurs obtenues varient de $22,9 \text{ kg.m}^{-1}.\text{h}^{-1}$ (P5) à $47,5 \text{ kg.m}^{-1}.\text{h}^{-1}$ (P6). Au niveau du pied de dune, la quantité de sable collecté est importante, similaire à celle obtenue sur l'estran, avec $78,5 \text{ kg.m}^{-1}.\text{h}^{-1}$ (P3). La variabilité du transport éolien sur le haut de plage est due à un substrat irrégulier en raison de la présence d'une quantité importante de coquillages sur cette partie du haut de plage (Figure 5.9 - A). En se rapprochant du pied de dune (P4 puis P3), on se trouve sur une surface sableuse sèche plus lisse et sans obstacles de ce type, et le transport augmente rapidement en raison d'une remobilisation du sable sur le haut de plage sec.

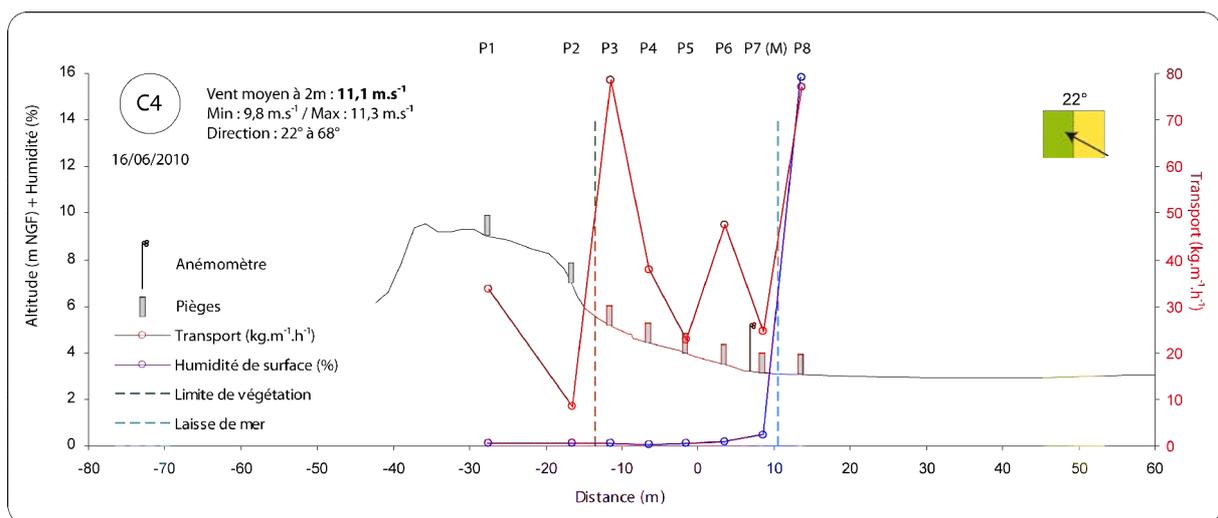


Figure 5.8. Piégeage éolien sur le profil C4 dans la partie centrale de la plage du Clipon le 16.06.2010 par vent de NNE

Le transport maximal se produit au niveau de la rupture de pente, à la base du versant dunaire ($78,5 \text{ kg.m}^{-1}.\text{h}^{-1} \rightarrow \text{P3}$), comme cela a été observé dans d'autres études (White and

Tsoar, 1998 ; Walker and Nickling, 2002). Le transport baisse ensuite fortement sur le versant dunaire, le vent étant freiné par la végétation ($8,4 \text{ kg.m}^{-1}.\text{h}^{-1} \rightarrow \text{P2}$). En revanche, on observe une reprise du transport éolien en sommet de versant ($\text{P1} \rightarrow 33,8 \text{ kg.m}^{-1}.\text{h}^{-1}$). Le sable collecté provient de la partie sommitale du versant dunaire où l'on observe des dépôts éoliens récents qui sont remobilisés et captés par le piège P1 (Figure 5.9 - B).

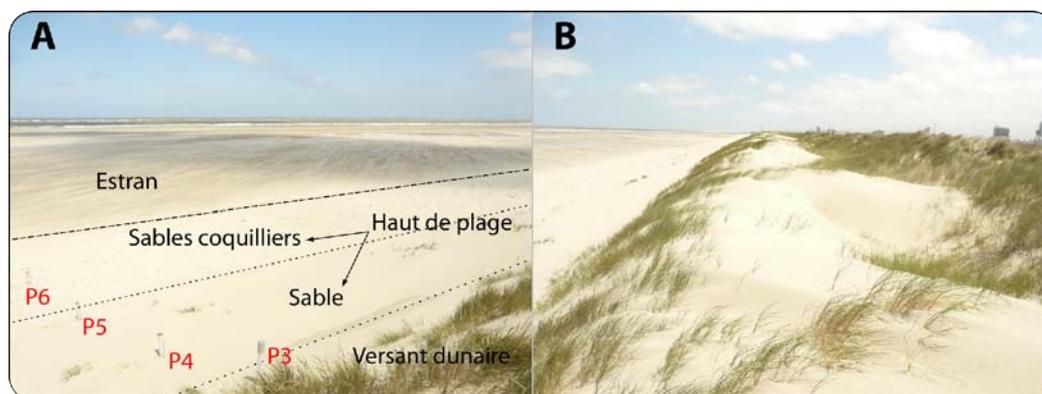


Figure 5.9. Photographies de terrain lors du piégeage du 16/06/2010 sur le profil C4 (cliché Tresca, 2010)

1.2.2. Piégeage du 06.05.2010

Le 06.05.2010, 8 pièges ont été installés entre la laisse de mer et le sommet de la dune bordière (12 m NGF) sur une distance de 100 m (Figure 5.10 et Figure 5.11) au niveau du profil C6, situé plus à l'est (Figure 5.1). Le haut de plage s'étendait sur une largeur de 80 m environ. La pente du versant dunaire était plus douce que plus à l'Ouest (22,5%), mais le sommet de la dune bordière était plus haut (12 m NGF). Le piégeage a été réalisé à marée descendante, une heure avant la marée basse lors d'un coefficient 36. Le vent à 2 m de hauteur au niveau du P7 soufflait à $8,9 \text{ m.s}^{-1}$ en moyenne sur les 10 minutes de piégeage ($u_{12m} = 6,7 \text{ m.s}^{-1}$), pour un vent de NNE constant. La direction du vent était proche de celle du 16.06.11, mais la vitesse moyenne du vent était plus faible que lors du précédent piégeage ($8,9 \text{ m.s}^{-1}$ contre $11,1 \text{ m.s}^{-1}$).

Deux pièges étaient disposés au sein de la végétation, sur le sommet (P1) et sur le versant externe de la dune (P2), cinq autres étaient répartis sur le haut de plage, le dernier (P8) étant positionné sur la laisse de mer (Figure 5.10). L'humidité était faible sur le haut de plage et la dune (0,37 % maximum au niveau de P4), tandis qu'elle était plus élevée sur la laisse de mer (1,92 % au niveau de P8), pouvant expliquer le faible transport éolien à cet endroit (P8 : $0,7 \text{ kg.m}^{-1}.\text{h}^{-1}$). Sur le haut de plage, le transport augmente légèrement en direction du pied de

dune (P3), même si les valeurs restent comprises dans un faible intervalle dont le minimum se situe en P6 (3,8 kg.m⁻¹.h⁻¹), et le maximum en P3 (14,2 kg.m⁻¹.h⁻¹) (Figure 5.10). Ces valeurs sont faibles en comparaison de ce qui a pu être obtenu sur le haut de plage lors de l'expérimentation du 16.06 (fig. 7.8), ce qui est dû à un vent moins fort. De plus, le 16.06 la déflation se produisait sur l'estran, ce qui n'était pas le cas ici, réduisant ainsi la source de sable.

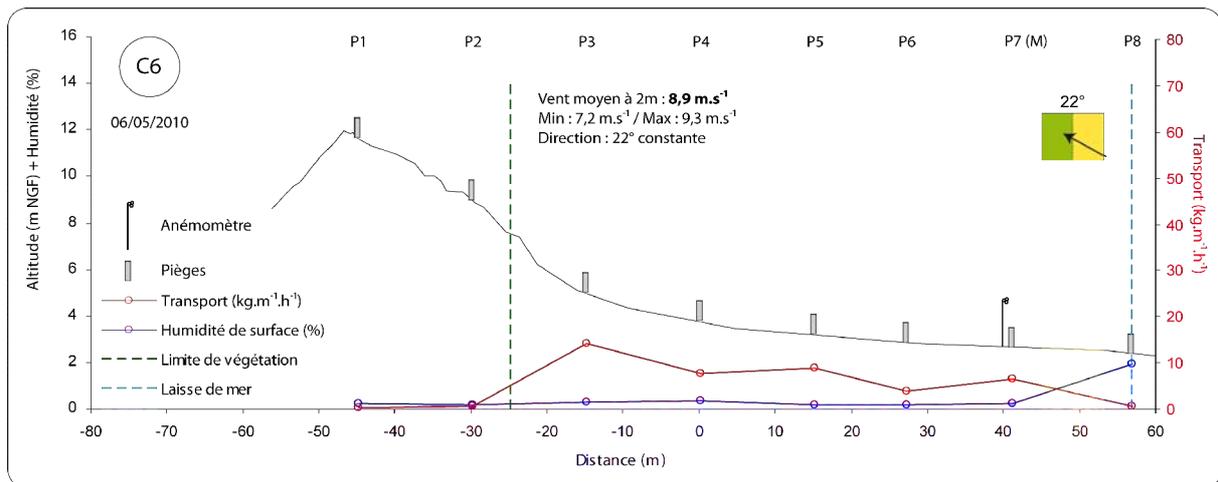


Figure 5.10. Piégeage éolien sur le profil C6 dans la partie centrale de la plage du Clipon le 06/05/2010 par vent de NNE

Comme lors du 16.06, les quantités piégées se réduisent fortement entre le pied de dune matérialisé par une rupture de pente (P3 : 14,2 kg.m⁻¹.h⁻¹), et le versant dunaire (P2 : 0,5 kg.m⁻¹.h⁻¹) où le piège était dans la végétation (Figure 5.10). Cette différence pourrait correspondre à un dépôt de sable au niveau de la rupture de pente, comme cela a pu être constaté lors de l'expérimentation (Figure 5.11). Sur le versant dunaire, le transport est faible que ce soit au sommet (P1 : 0,2 kg.m⁻¹.h⁻¹) ou à mi-pente (P2 : 0,5 kg.m⁻¹.h⁻¹).



Figure 5.11. Photographie de terrain lors du piégeage du 06.05.2010 sur le profil C6 (cliché Tresca, 2010)

1.2.3. Piégeage du 14.06.2010

Sept pièges ont été de nouveau déployés sur une centaine de mètres, entre la laisse de mer et le sommet de dune (Figure 5.12 et Figure 5.13 - A) (à proximité du profil C6 (Figure 5.1) le 14 juin 2010. Le haut de plage s'étendait sur une largeur de 80 m, et le piégeage a été réalisé à marée montante, 2 h avant la marée haute (coefficient 90). Les mesures anémométriques ont été effectuées au niveau de P6, et la vitesse moyenne du vent enregistrée à 2 m pendant les 10 minutes de piégeage était de $10,5 \text{ m.s}^{-1}$ (bien au dessus de la vitesse limite d'envol estimée à $u_{2m} = 5,8 \text{ m.s}^{-1}$), pour des conditions de vent oblique originaire du NNE (30° à 40°).

L'expérimentation a été menée dans des conditions proches de celles qui prévalaient le 6 mai, et les résultats sont assez comparables. L'humidité est plus forte au niveau de la laisse de mer (1,41%) où le transport est très faible (P7 : $0,1 \text{ kg.m}^{-1}.\text{h}^{-1}$). Puis, sur le haut de plage, l'humidité est réduite (maximum 0,28 % au niveau de P6), et le transport éolien augmente progressivement de la laisse de mer au pied de dune (entre $5,9 \text{ kg.m}^{-1}.\text{h}^{-1}$ au niveau de P6 et $7,5 \text{ kg.m}^{-1}.\text{h}^{-1}$ au niveau de P4). Ces valeurs sont cependant un peu plus faibles que celles obtenues lors du piégeage précédent, malgré une vitesse de vent supérieure, du fait probablement d'un fetch plus réduit. Ce qui distingue cette expérimentation de la précédente est la quantité de sable intercepté dans le premier piège situé sur le versant dunaire végétalisé. Ici, la valeur obtenue est de $6,3 \text{ kg.m}^{-1}.\text{h}^{-1}$ (P3, Figure 5.12), alors que le 06.05, le transport était très faible à ce niveau ($0,5 \text{ kg.m}^{-1}.\text{h}^{-1}$). Cette différence est attribuée à un vent plus fort le 14.06, c'est-à-dire $10,5 \text{ m.s}^{-1}$ en moyenne, avec un minimum à $9,8 \text{ m.s}^{-1}$, et des pointes allant jusqu'à $11,7 \text{ m.s}^{-1}$. Le 6 mai, nous avons constaté un dépôt de sable au niveau du pied de dune sur ce même profil. Cette accumulation en pied de dune a rapidement été colonisée par de la végétation pionnière (Figure 5.13). On peut supposer que la pente du versant dunaire a été adoucie par des apports sableux entre les deux périodes de piégeage, ce qui a également contribué à un transport plus important plus haut sur le versant dunaire, au niveau du piège P3 (Figure 5.12).

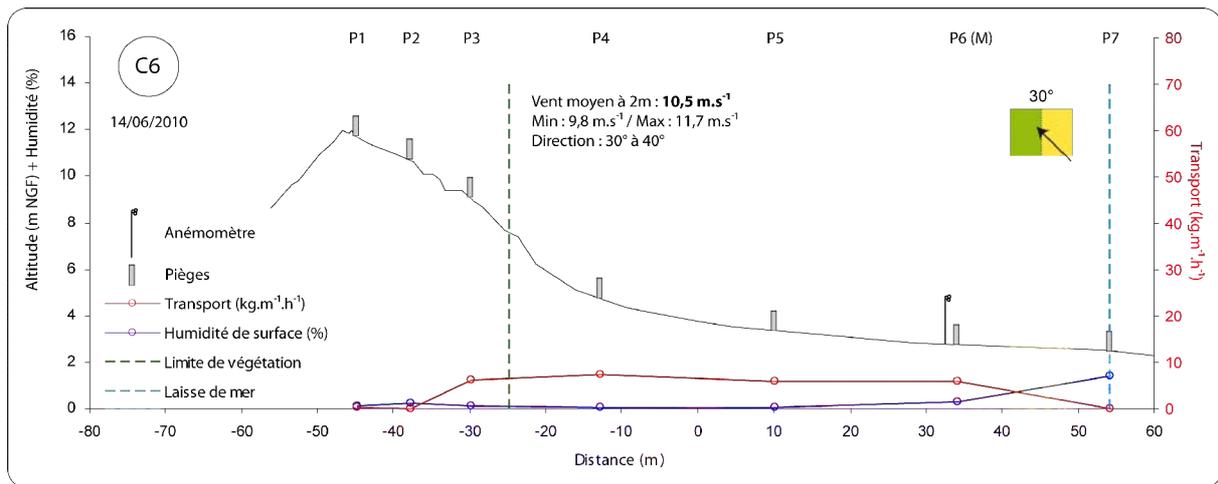


Figure 5.12. Piégeage éolien sur le profil C6 dans la partie centrale de la plage du Clipon le 14/06/2010 par vent de NNE

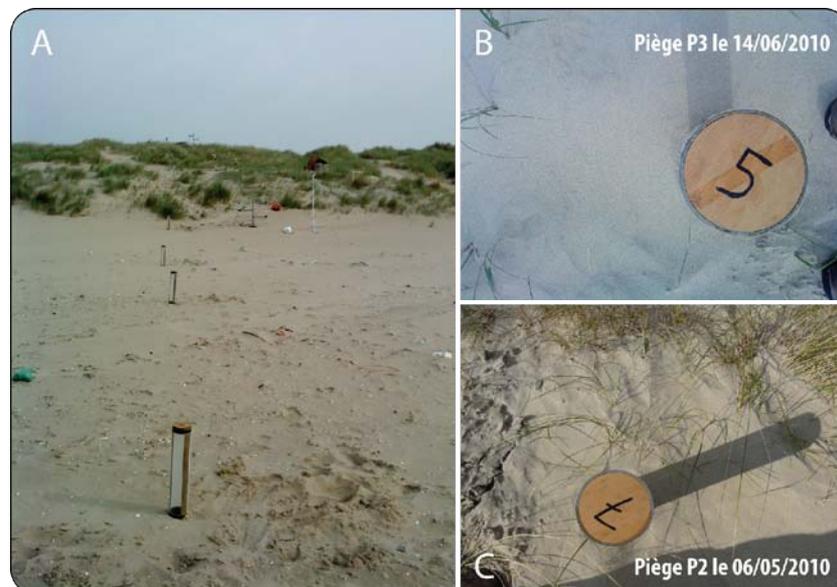


Figure 5.13. Photographies de terrain lors des piégeage du 14/06/2010 (A et B) et du 06/05/2010 (C) sur le profil C6 (clichés Tresca, 2010)

1.2.4. Piégeage du 17.06.2010

Les instruments ont été déployés dans la partie Est de la plage du Clipon, près d'embrochements entreposés à l'avant de la falaise sableuse afin de freiner le recul du trait de côte (profil S2, Figure 5.1). Du fait de la faible largeur du haut de plage (15 m), seuls 4 pièges ont été déployés sur une distance totale de 20 m entre l'estran et le sommet de la falaise à une altitude de 8,1 m NGF (Figure 5.14). La pente entre le pied de falaise et le sommet était de 77,8 %. Le vent moyen pendant les 10 minutes de piégeage était de $9,1 \text{ m.s}^{-1}$ à 2 m de hauteur sur le haut de plage (P3, Figure 5.14) (vitesse limite d'envol $u_{l2m} = 5,7 \text{ m.s}^{-1}$), et l'on se trouvait à mi-marée montante (coefficient 79). Le taux d'humidité était important sur l'estran

(P5 : 7,1 % Figure 5.14), ainsi que sur la laisse de mer (1,6 %), mais très faible sur le haut de plage et le rebord de la falaise sableuse (maximum 0,14 % au niveau de P3, Figure 5.14).

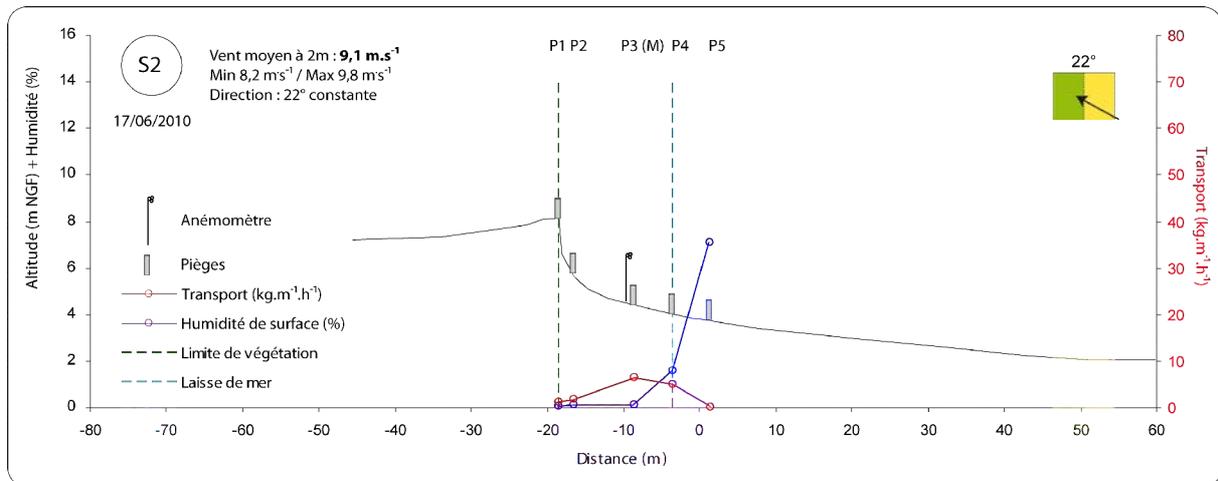


Figure 5.14. Piégeage éolien sur le profil S2 à l'Est de la plage du Clipon le 17/06/2010 par vent de NNE

La quantité de sable capté dans le piège qui se trouve sur l'estran est très faible (P5 - 0,2 kg.m⁻¹.h⁻¹, Figure 5.14) en raison non seulement de la forte humidité du substrat, mais également de l'interruption du fetch par une bâche au fond de laquelle se trouvaient de nombreux blocs (Figure 5.15). Le transport augmente ensuite vers la laisse de mer et jusqu'au milieu du haut de plage où la quantité de sable piégé atteint son maximum (P3 : 6,5 kg.m⁻¹.h⁻¹, Figure 5.14). A la base et en sommet de falaise, le transport est très faible (P2 : 1,8 kg.m⁻¹.h⁻¹, P1 : 1,2 kg.m⁻¹.h⁻¹, Figure 5.14). A cet endroit et pour cette direction de vent, on se trouve en situation d'abri, en arrière des enrochements, ce qui limite fortement la source de sable par rapport aux autres pièges. De plus, la falaise sableuse est un obstacle au transport éolien. Le peu de sable capté en sommet de falaise correspond à du sable déjà présent en haut de la plateforme qui a été remobilisé.

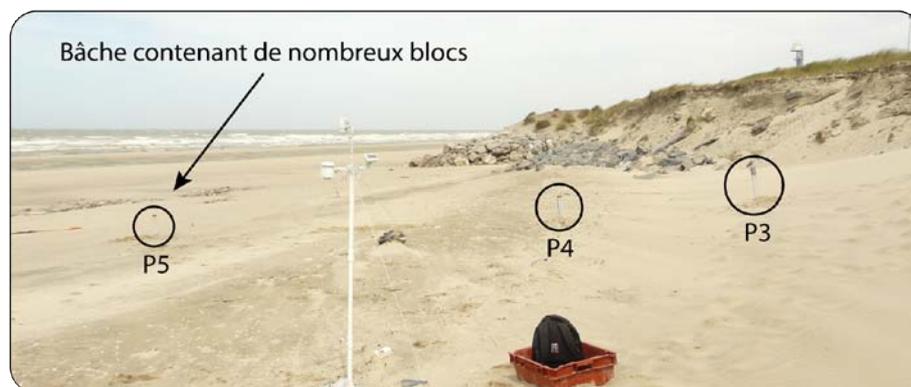


Figure 5.15. Photographie de terrain lors du piégeage du 17/06/2010 sur le profil S2 (cliché Tresca, 2010)

1.3. Bilan des mesures de transport éolien in situ sur la plage du Clipon

L'ensemble des caractéristiques de chaque piégeage est présenté dans le Tableau 5.1. Sept expérimentations de quantification du transport éolien sur le haut de plage et le versant dunaire ont été menées d'avril à juin 2010, pour des vitesses moyennes de vent comprises entre $6,6 \text{ m.s}^{-1}$ et $11,1 \text{ m.s}^{-1}$. Trois piégeages ont été effectués par vent longitudinal. Le premier s'est déroulé lors de conditions dominantes d'OSO, mais en situation d'abri et pour une vitesse de vent faible ($6,6 \text{ m.s}^{-1}$), les deux autres lors de vent d'ENE. Quatre autres expérimentations ont été menées lors de vents obliques de NNE. Ces piégeages ont permis de préciser l'influence de la force et de la direction du vent, de l'humidité de surface, et de la pente du versant externe de la dune bordière sur le transport de sable.

1.3.1. Vitesse du vent

La vitesse du vent constitue la variable la plus importante. Lorsqu'elle est faible, elle ne donne lieu qu'à très peu de transport (C2, le 30.04, Tableau 5.1). Lors de l'expérimentation du 16.06 au centre du Clipon, le vent soufflait à plus de 11 m.s^{-1} en moyenne, ce qui correspond au transport maximal de l'ensemble des piégeages, avec une valeur de $78,5 \text{ kg.m}^{-1}.\text{h}^{-1}$. Ce jour là, les pièges ont capté du sable quelque soit leur emplacement : sur le versant dunaire au sein de la végétation, sur le haut de plage, mais également sur l'estran, malgré une forte humidité (Tableau 5.1 et Figure 5.16). On remarque également que le transport atteint des valeurs largement supérieures à ce qui est capté lors de conditions même légèrement moins venteuses, comme le 14.06 où le vent moyen était de $10,5 \text{ m.s}^{-1}$. Deux seuils semblent apparaître (Figure 5.16) : le premier se situe aux alentours de $6,5 \text{ m.s}^{-1}$, il s'agit de la vitesse à partir de laquelle on observe de la déflation ; le deuxième se situe à 11 m.s^{-1} , vitesse à partir de laquelle le transport se produit même au sein de la végétation, et en cas de forte humidité du substrat.

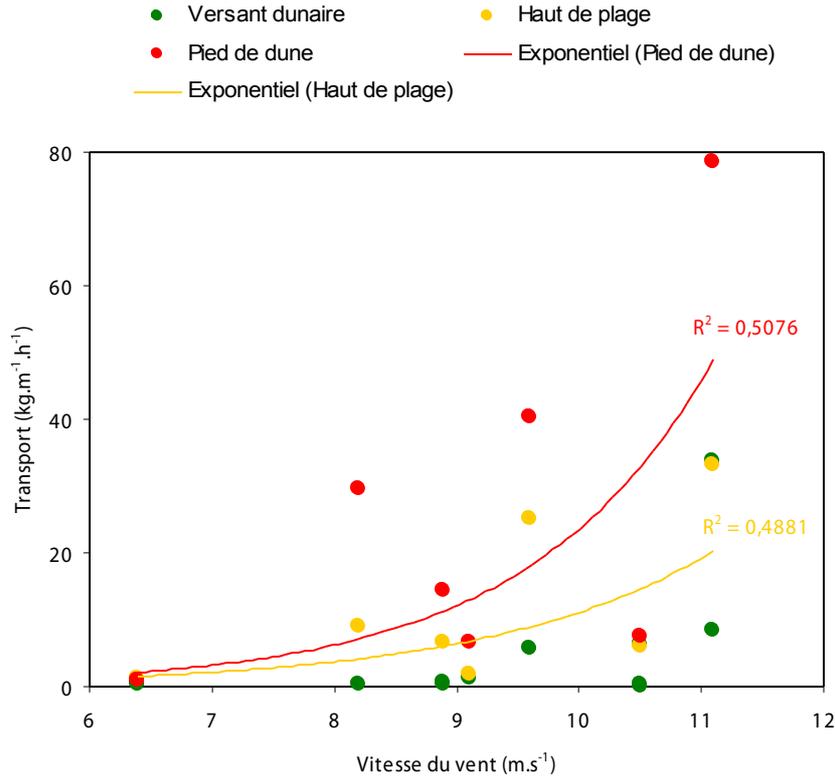


Figure 5.16. Transport éolien comparé à la vitesse des vents. Les données sont triées selon l'emplacement du piège (haut de plage, pied de dune, versant dunaire, estran)

1.3.2. Le fetch et la direction du vent

Pour une vitesse de vent similaire, lorsque le vent est parallèle à la côte, le transport sera potentiellement plus important que par vent frontal ou oblique en raison d'un fetch plus important. Cela est particulièrement vrai sur le haut de plage, qui est moins soumis à des contraintes d'humidité dues à la marée. Le 15.06, une expérimentation a été menée par vent longitudinal d'ENE, avec une vitesse moyenne de 8,2 m.s⁻¹. Le transport a atteint au maximum 29,5 kg.m⁻¹.h⁻¹ sur le haut de plage, et 41,9 kg.m⁻¹.h⁻¹ sur l'estran (Tableau 5.1). Une vitesse de vent proche bien que légèrement supérieure de 8,9 m.s⁻¹ a été enregistrée le 06.05, alors que la direction était oblique (NNE). Bien que la marée ait été basse, le transport était faible sur l'estran (0,7 kg.m⁻¹.h⁻¹) en raison d'une humidité importante, réduisant le fetch. Sur le haut de plage, le transport maximal a atteint 14,2 kg.m⁻¹.h⁻¹, soit deux fois moins que pour un vent longitudinal. Lors d'un vent parallèle au trait de côte, le transport sur le haut de plage sec sera potentiellement plus important que lors d'un vent oblique pour lequel le fetch pourra être interrompu par la présence de bâches (C5 le 16.06 et S2 le 17.06, Tableau 5.1), mais également en raison d'un haut de plage sec étroit.

A l'Ouest du Clipon, le faible transport éolien par vent dominant d'OSO peut en partie être expliqué par un fetch limité du à un changement d'orientation du trait de côte (C2 le 30.04, Tableau 5.1), mais également en raison de sédiments fins et de salicornes dans l'anse du Clipon. Des apports éoliens dans cette partie du site pourront se faire par vent longitudinal d'ENE (C3 le 15.06, Tableau 5.1).

Enfin, à l'Est de la plage du Clipon (au niveau du profil S2), la présence d'enrochements interrompt le fetch éolien lors de vents obliques de NNE. Le pied de falaise ne peut donc être alimenté que par le haut de plage par ces conditions de vent. En revanche, lors d'un vent longitudinal en provenance du SO, il est probable que les apports éoliens dans ce secteur seront potentiellement plus importants du fait d'un fetch plus long, comme c'est le cas à l'Ouest du site lors des vents parallèle à la côte d'ENE.

1.3.3. L'humidité du substrat

L'humidité du sable est dans la plupart des cas un obstacle au transport éolien. En effet, les valeurs de transport les plus importantes ont été observées lorsque les valeurs d'humidité étaient les plus faibles, sauf dans un cas le 16.06 au centre du Clipon (Figure 5.17). Ce jour là sur l'estran, la quantité de sable capté est de $77 \text{ kg.m}^{-1}.\text{h}^{-1}$ malgré une humidité de 15,8%. La mobilité du sable a été permise par une vitesse de vent particulièrement forte de 11 m.s^{-1} . Il a en effet été observé dans plusieurs cas sur des plages sableuses qu'une surface humide n'était pas toujours un obstacle au transport éolien lorsque la vitesse du vent était importante (Davidson-Arnott et al, 2005 ; McKenna Neumann et Maljaars Scott, 1998). Lors des autres expérimentations, le transport éolien était très réduit lorsque les valeurs d'humidité étaient importantes, principalement sur l'estran (13,5% le 16.06 et 7,1% le 17.06) (figurés bleus Figure 5.17).

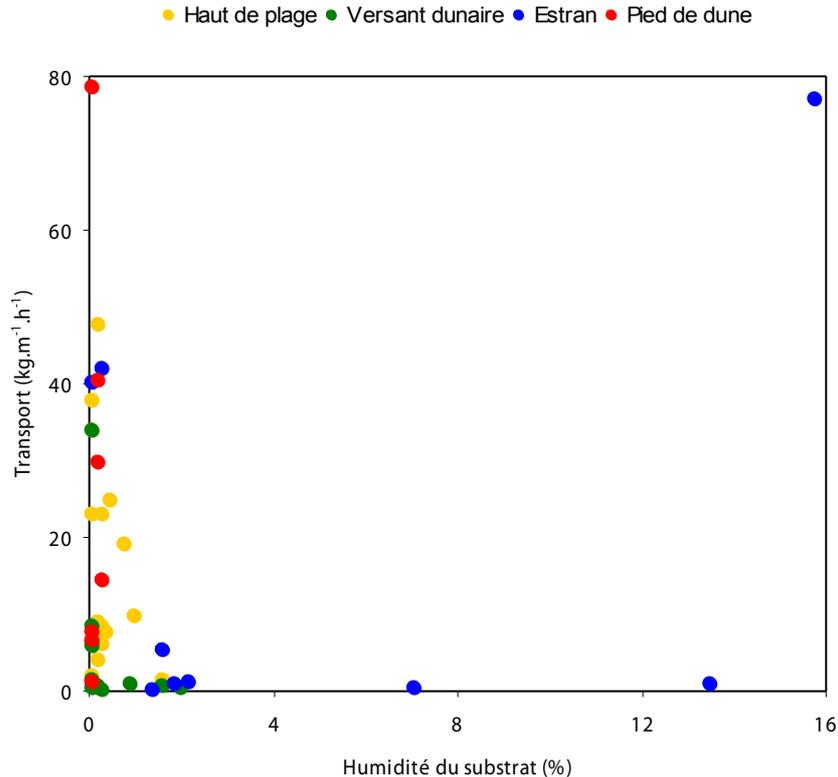


Figure 5.17. Transport éolien comparé au taux d'humidité du substrat. Les données sont triées selon l'emplacement du piège (haut de plage, pied de dune, versant dunaire, estran). On observe notamment dans le coin supérieur droit du graphique une valeur de transport élevée liée à un taux d'humidité important.

1.3.4. La topographie

La pente du versant externe de la dune bordière semble conditionner le transport éolien et surtout l'endroit où le sable se dépose. En effet, il a été observé à plusieurs reprises que la présence d'une rupture de pente en pied de dune pouvait freiner le vent et induire de faibles flux éoliens sur le versant et le sommet de la dune (C4 le 16.06 ; C6 le 06.05 ; S2 le 17.06). Cette rupture de pente provoque un dépôt de sable lors de vents longitudinaux et obliques, probablement en raison d'une réduction de la vitesse du vent, comme lors de l'expérimentation du 15.06 (C3, Tableau 5.1). Ce sable déposé au niveau du pied de dune pourra ensuite être de nouveau mobilisé lors de vents frontaux afin d'alimenter la dune bordière. Il aura également tendance à faire disparaître la rupture de pente au niveau du pied de dune et ainsi adoucir le versant de la dune bordière.

Lors de vents obliques, lorsque la pente de la dune est moins prononcée et plus régulière (rupture de pente moins marquée), le transport peut se faire plus loin vers le sommet du versant dunaire, et le sable peut se déposer sur le versant, comme cela a pu être observé sur

le profil C6 le 14.06 (Figure 5.12). La présence d'une falaise ou d'une micro-falaise dunaire constitue un obstacle pour le transport éolien.

1.3.5. Remarques générales

Le constat général que l'on peut faire de l'ensemble des ces piégeages *in situ* est la grande variabilité spatiale et temporelle des résultats. Même lorsque les pièges sont placés à quelques mètres de distance, et pour de mêmes conditions d'humidité, de vitesse et de direction du vent, les quantités captées peuvent varier du simple au double. Cette forte variabilité est bien illustrée par le piégeage effectué le 16.06 au centre de la plage du Clipon (Figure 5.8). Ce jour là, les valeurs de transport obtenues sur le haut de plage varient de 22,9 kg.m⁻¹.h⁻¹ à 78,5 kg.m⁻¹.h⁻¹, principalement en raison de disparités dans la rugosité de surface due à la présence de coquillages. Le transport est fortement influencé par les micro-conditions environnementales (Kroon and Hoekstra, 1990). La forte variabilité qui en résulte a en outre déjà été mise en évidence dans plusieurs études sur les plages (Arens, 1996 ; Bauer et al., 1996), et elle est encore accentuée sur les plages à barres et à bâches en raison de la segmentation du fetch sur l'estran (Meur-Férec et Ruz, 2002 ; Anthony et al., 2009 ; Vanhée, 2002).

La variabilité temporelle est essentiellement conditionnée par les agents météorologiques : vitesse et direction du vent, humidité et fetch, lui-même dépendant de la largeur de la plage et donc de la marée. Le long de la plage du Clipon, la variabilité spatiale dépendra de la pente du versant dunaire, mais également de la morphologie de l'estran. En effet, à l'Est les barres et bâches sont proches de la dune bordière, et le fetch éolien est potentiellement plus court car il est segmenté. En revanche à l'Ouest, la présence d'une plateforme intertidale confère à l'estran une forme aplanie dépourvue de bâches à l'avant du cordon bordier. Lors d'un temps sec à marée basse, le fetch éolien sera potentiellement plus long dans cette partie du site par vent oblique, mais l'estran sablo-vaseux à salicornes limitera vraisemblablement le transport éolien.

Tableau 5.1. Synthèse de mesures *in situ* de transport éolien sur la plage du Clipon, et principales variables environnementales associées.

Orientation du vent		N° profil	Date	Précipitations durant les 7 jours précédents (mm)	Vent moyen pendant 10 min. à 2m (m.s ⁻¹)	Marée	Fetch potentiel (estimation)	Pente versant dunaire (%)	Altitude versant dunaire (m)	Versant dunaire végétalisé		Pied de dune		Haut de plage		Laisse de mer et estran		Principales observations
										Transport kg.m ⁻¹ .h	Humidité (%)	Transport kg.m ⁻¹ .h	Humidité (%)	Transport kg.m ⁻¹ .h	Humidité (%)	Transport kg.m ⁻¹ .h	Humidité (%)	
Longitudinal	OSO	C2	30/04/2010	5,4	6,6 (6,2 à 8,2)	H-3 coef.93	Limité	43,94	9,092	0,7 0,2	0,9 2,0	1,0 0,1	1,3 1,6					Vent de terre; Transport quasiment nul
	ENE	C3	15/06/2010	49,5	8,2 (8 à 8,5)	Basse coef. 89	Max.	48,98	6,778	0,4	1,6	29,5	0,2	9,6 8,3	1,0 0,3	40,0 41,9	0,1 0,3	Pente forte (micro-falaise); fetch important (estran); Humidité en pied de dune
		C5	16/06/2010	49,5	9,6 (8,2 à 9,8)	H+1 coef.88	Court	30,15	8,286	5,6	0,1	40,2	0,2	33,8 22,8 19,0	0,1 0,3 0,8	1,0 0,8	2,2 13,5	Transport max. sur le haut de plage; Fetch interrompu (bâches); Humidité forte sur l'estran; Rupture de pente base versant
Frontal à oblique	NNE	C4	16/06/2010	49,5	11,1 (9,8 à 11,3)	Basse coef. 88	Max.	33,17	8,25	33,8 8,4	0,1 0,1	78,5	0,1	37,7 22,9 47,5 24,7	0,1 0,1 0,2 0,5	77,0	15,8	Rugosité haut de plage (coquillages) ; Vent fort; Transport estran malgré humidité; Conditions optimales pour transport
		C6	06/05/2010	21,4	8,9 (7,2 à 9,3)	H+5 coef.36	Max.	22,45	12,02	0,2 0,5	0,2 0,2	14,2	0,3	7,5 8,8 3,8 6,6	0,4 0,2 0,2 0,2	0,7	1,9	Faible rupture de pente et altitude dune élevée; Apports de sable en pied de dune et sur le versant ;
			14/06/2010	49,5	10,5 (9,8 à 11,7)	H-2 coef.90	Court			0,3 0,0 6,3	0,1 0,3 0,1	7,5	0,1	6,0 5,9	0,1 0,3			
		S2	17/06/2010	22,7	9,1 (8,2 à 9,8)	H+5 coef.79	Court	77,84	8,129	1,2	0,1	6,5	0,1	1,8	0,1	5,1 0,2	1,6 7,1	Falaise dunaire: forte rupture de pente; fetch interrompu (enrochements)

2. Caractérisation du transport éolien sur la digue du Braek : expérimentations in situ du printemps 2011

Les mesures de transport éolien ont été entreprises sur la digue du Braek dans le but de mieux connaître les mouvements de sable en fonction de la direction générale des vents. Il s'agit d'une série d'expérimentations menées à titre indicatif qui nous permettront de se faire une idée des quantités de sable qui transitent sur la digue. Elles permettront également de préciser quelles sont les principales sources de sable et donc les conditions entraînant les transferts de la plage vers l'arrière de la digue. Bien que plusieurs expérimentations aient été menées pour chaque direction de vent, une seule d'entre elles sera présentée à chaque fois étant donné les résultats fortement similaires lorsque plusieurs mesures ont été effectuées à peu d'intervalle de temps. Les figures détaillant les autres mesures *in situ* non décrites dans cette partie sont disponibles en annexes (annexe 4 et annexe 5).

2.1. Sur le versant externe de la digue

2.1.1. Vent longitudinal parallèle à la digue

2.1.1.1. Provenance du NE

Lors de l'expérimentation du 03/03/2011, les vents en provenance du NE soufflaient longitudinalement à obliquement en direction de la côte. Trois mâts équipés d'anémomètres et trois pièges ont été déployés sur le versant externe de la digue : le premier sur le haut de plage, le deuxième au contact plage/digue, et le troisième sur la partie supérieure de la digue (Figure 5.18). La vitesse moyenne du vent à 2 m sur la digue était de $9,8 \text{ m.s}^{-1}$, pour un maximum de $11,3 \text{ m.s}^{-1}$. La vitesse limite d'envol indicative (u_{t2m}) a été estimée à $4,7 \text{ m.s}^{-1}$.

Les profils verticaux de vitesse du vent ont une forme logarithmique classique au niveau des trois mâts (Nickling et Davidson-Arnott, 1990). On constate une accélération de la vitesse du vent du haut de plage vers le sommet de digue (Figure 5.18 - II et Figure 5.20). La vitesse moyenne pendant les 10 minutes de piégeage à 1 m de hauteur passe de $8,3 \text{ m.s}^{-1}$ à $9,3 \text{ m.s}^{-1}$ entre M1 à M3, soit une augmentation d' 1 m.s^{-1} . De même, au niveau de M2 les vitesses mesurées à 0,25 m et 1 m sont respectivement supérieures de $0,4 \text{ m.s}^{-1}$ et $0,5 \text{ m.s}^{-1}$ par rapport aux mêmes hauteurs sur M1 situé en haut de plage. Les profils de vitesse ont une

penne plus faible à 0,25 m (Figure 5.18 - III), ce qui indique une augmentation de la contrainte de cisaillement près de la surface topographique. Cet effet est davantage prononcé sur M3 situé en sommet de digue, ce qui pourrait être interprété comme une compression des filets d'air près de la surface à ce niveau.

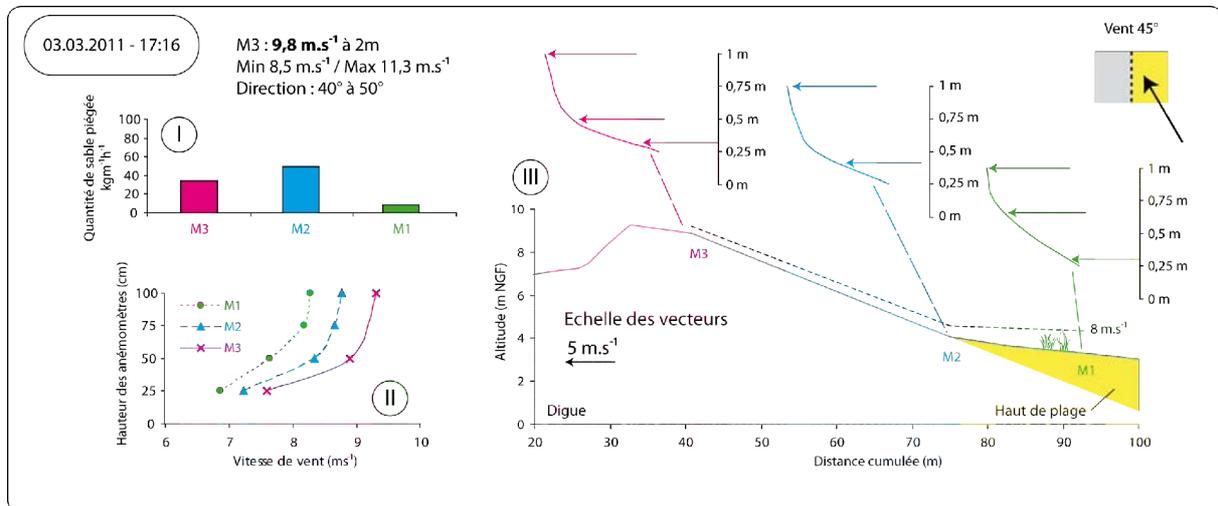


Figure 5.18. Profils verticaux de vitesse moyennée pendant les 10 minutes de piégeage et quantités de sable capté en front de digue et en haut de plage lors d'une expérimentation du 03 mars 2011 par conditions de vent longitudinal de NE.

La quantité maximale de sable capté a été obtenue au niveau de la rupture de pente au contact plage/digue (M2 : $50 \text{ kg.m}^{-1} \text{ h}^{-1}$, Figure 5.18). De plus, la quantité de sable piégé sur la digue est 4 à 6 fois supérieure à celle qui a été captée sur le haut de plage (M3 : $34 \text{ kg.m}^{-1} \text{ h}^{-1}$, M1 : $8 \text{ kg.m}^{-1} \text{ h}^{-1}$, Figure 5.18). Par ces conditions de vent longitudinal de NE, et pour cette disposition des instruments de mesure, c'est l'estran et une partie du haut de plage qui alimentent le piège M1, tandis que le sable piégé dans M2 et M3 provient des dunes qui se sont formées en pied de digue (Figure 5.19). Sur l'estran, l'humidité et les laisses de mer constituent autant de freins pour le transport éolien (Bauer et al., 2009), à plus forte raison sur les plages macrotidales où il est segmenté voire interrompu par la présence de bâches humides (Anthony et al., 2009). Cette rugosité de surface se traduit par une plus forte variabilité temporelle de la vitesse du vent sur le haut de plage (M1, Figure 5.20- A et B), tandis qu'au niveau des mâts placés sur la digue, l'amplitude maximale des vitesses de vent est plus restreinte (M2 et M3, Figure 5.20). En outre, les dunes de pied de digue sont peu végétalisées et sont traversées par de multiples couloirs de déflation. Ces dunes constituent un stock facilement mobilisable par le vent, ce qui peut expliquer les quantités plus importantes captées sur la digue que sur le haut de plage pour cette direction de vent.



Figure 5.19. Localisation des pièges et des dunes de pied de digue lors de l'expérience du 03.03.11 à 17:16. La photographie aérienne (© Google Earth) date de 2007. Les trainées de sable en arrière des dunes de pied de digue illustrent parfaitement le transfert de sable vers la route et le bassin, où un camion exporte le sable.

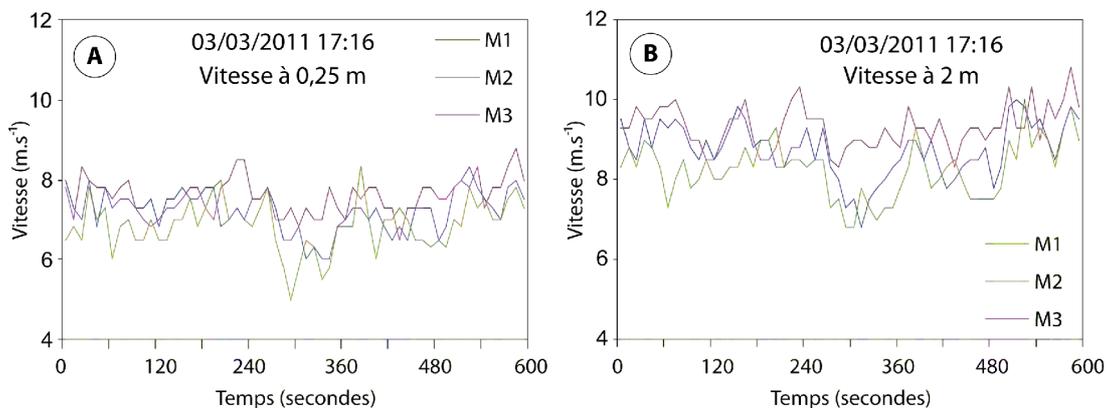


Figure 5.20. Série temporelle des vitesses de vent à 0,25 m au niveau des mâts M1 (haut de plage), M2 (contact plage/digue) et M3 (digue) lors de l'expérience du 03.03.11 à 17 :16

2.1.1.2. Provenance d'OSO : vents dominants

→ Piégeage du 04/02/2011

La séance de piégeage de 10 minutes présentée ici a été menée avec 3 points de mesures répartis sur le versant externe de la digue : partie inférieure, milieu et partie supérieure (Figure 5.21). Le vent provenait du secteur OSO. Un câble défaillant reliant l'anémomètre à 2 m en haut du mât M3 au data logger a empêché tout enregistrement des

données. Aussi, pour analyser les conditions de vent *in situ*, nous ne disposons que de l'anémomètre situé à 1 m de hauteur sur le mât 2 où les enregistrements indiquent que le vent a soufflé à $9,9 \text{ m.s}^{-1}$ en moyenne, pour un minimum de 6 m.s^{-1} et un maximum de $16,5 \text{ m.s}^{-1}$.

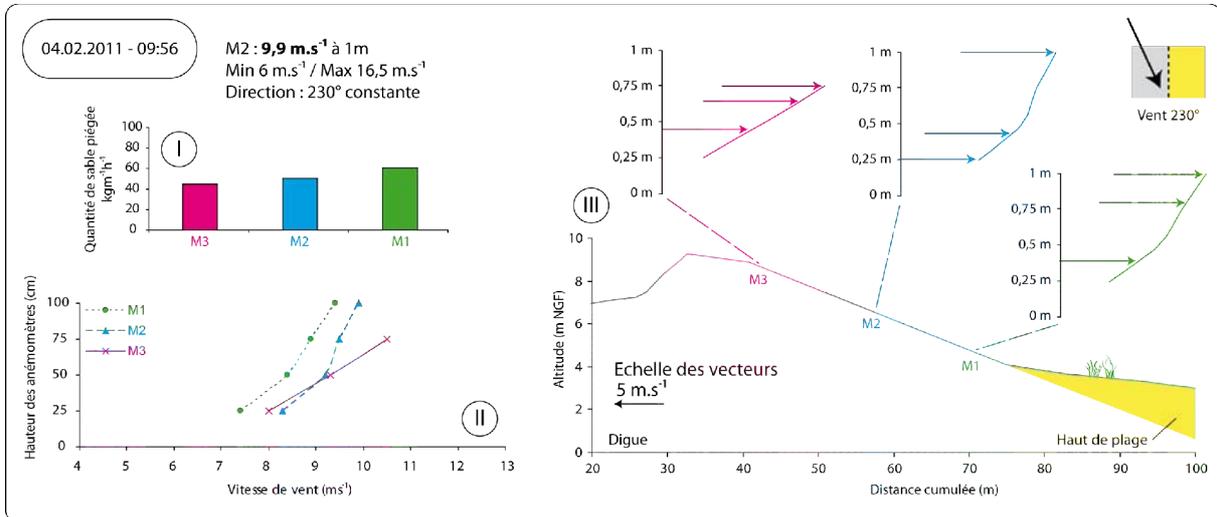


Figure 5.21. Profils verticaux de vitesse moyennée pendant les 10 minutes de piégeage et quantités de sable capté en front de digue lors d'une expérimentation du 04 février 2011 par conditions de vent longitudinal de SO.

Les profils verticaux de vitesse du vent ont une forme non-logarithmique, et montrent une décélération entre le milieu (M2) et le bas de la digue (M1) (Figure 5.21 - II et III). A 0,25 m et 0,50 m, la vitesse du vent est plus faible en bas de la digue (M1) qu'au milieu et en haut (M2 et M3) où le vent souffle à une vitesse similaire (Figure 5.22 - A et B). En revanche à 0,75 m (Figure 5.22 - C), la vitesse en haut de la digue (M3) est bien supérieure et les rafales bien plus fortes (max. 18 m.s^{-1}) qu'au niveau des enregistrements faits au milieu du versant (M2). Bien que le vent soit sub-parallèle à la digue, il est légèrement orienté vers le large, et le versant externe où sont placés les instruments de mesure se trouve sous le vent. Le mât M1 qui se trouve en bas de digue est donc en position plus abritée que M2 et surtout M3 qui est en haut de la digue, et exposé aux vents les plus forts.

Les quantités de sable capté sont proches pour les 3 pièges (Figure 5.21 - I et annexe 5.2), bien que supérieures en bas de la digue. Elles sont comprises entre $44,8 \text{ kg.m}^{-1}.\text{h}^{-1}$ à l'emplacement M3 et $60,8 \text{ kg.m}^{-1}.\text{h}^{-1}$ au niveau de l'emplacement de M1. Le sable que l'on retrouve dans les différents pièges proviendrait de deux sources différentes. Lors de ces conditions de vent d'OSO, le sable des dunes du bassin maritime, ainsi que le sable libre accumulé sur la route et le revers de la digue passent par-dessus le sommet de digue et sont

rabattus vers le versant externe en direction de la plage (Figure 5.23). C'est ce sable qui est capté à l'intérieur des pièges situés sur la partie supérieure du versant externe de la digue. Néanmoins, et malgré la décélération entre les mâts M2 et M1, la quantité de sable obtenue dans le piège M1 est légèrement supérieure en raison de sa proximité avec le haut de plage sec où la quantité de sable mobilisable est plus importante et vient alimenter ce piège.

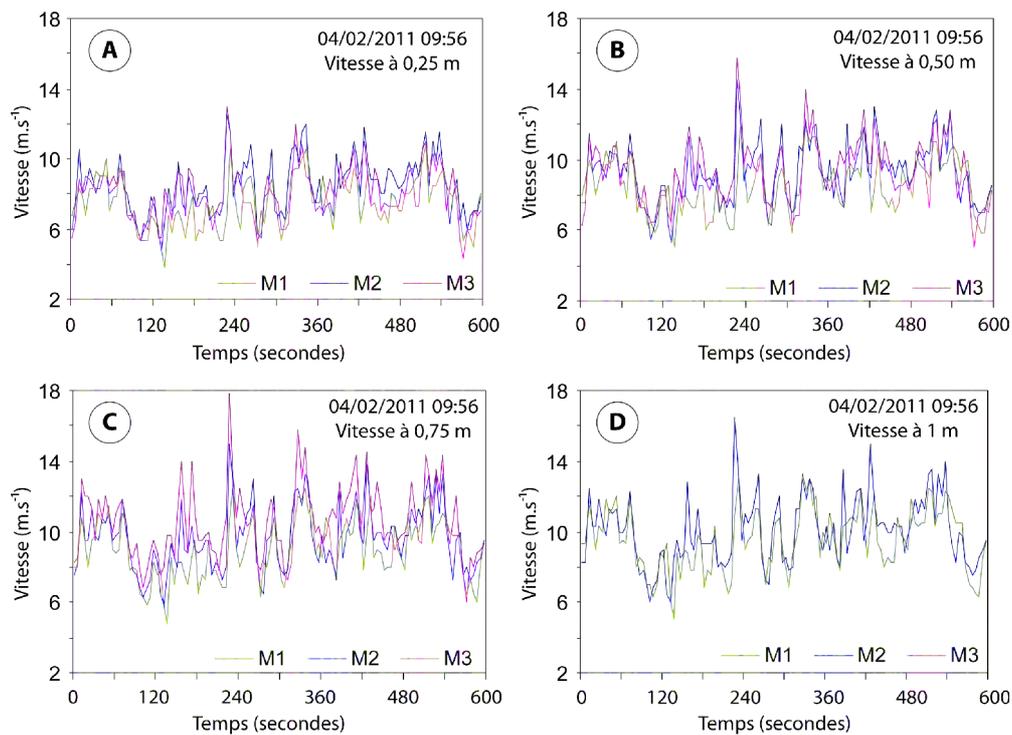


Figure 5.22. Séries temporelles à 0,25 m (A), 0,5 (B), 0,75 (C) et 1 m (D) au niveau des mâts M1 (bas), M2 (milieu) et M3 (haut) lors de l'expérimentation du 04.02.11 à 09:56



Figure 5.23. Photographie de terrain du 04.02.2011 montrant le transfert du sable de l'arrière de la digue vers le versant externe et le haut de plage (cliché Tresca, 2011)

→ Piégeage du 26/05/2011

Lors de cette journée, le vent provenait du secteur OSO et soufflait sub-parallèlement à la côte (240°) (Figure 5.24). Les instruments étaient répartis du haut de plage jusqu'au milieu du versant externe de la digue : le premier mât M3 était situé à mi-hauteur sur la digue, le deuxième, M2 au contact sable/digue, et le troisième, M1, était sur le haut de plage à 20 m en avant de la digue (Figure 5.24). La vitesse moyenne du vent enregistrée à 2 m au niveau du mât M3 était de $11,3 \text{ m.s}^{-1}$, et la vitesse limite d'envol (u_{t2m}) estimée à $4,6 \text{ m.s}^{-1}$.

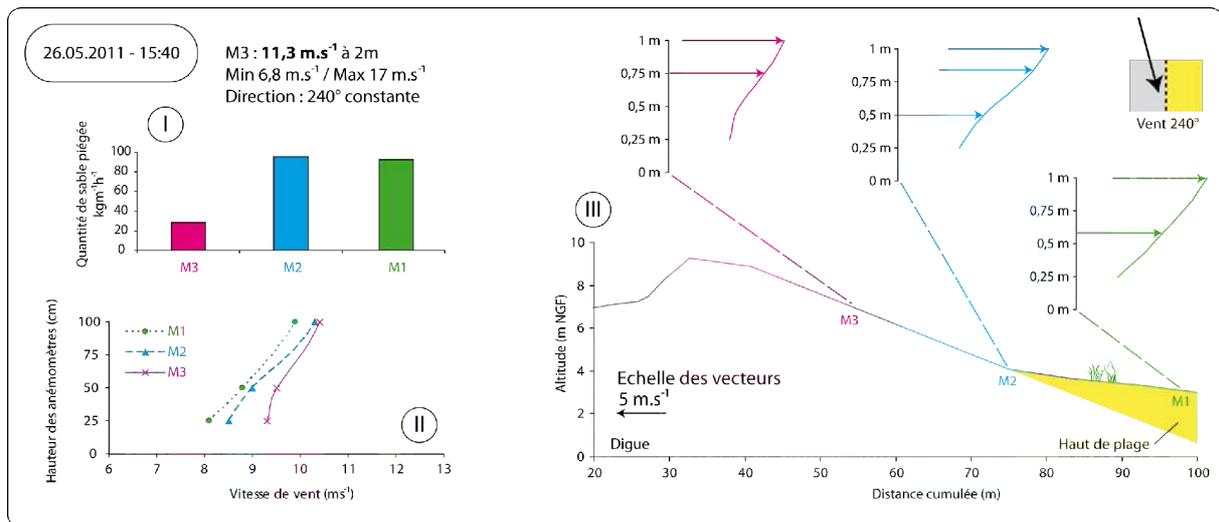


Figure 5.24. Profils verticaux de vitesse moyennée pendant les 10 minutes de piégeage et quantités de sable capté en front de digue et haut de plage lors d'une expérimentation du 26 mai 2011 par conditions de vent longitudinal d'OSO.

L'observation des profils verticaux de vitesse du vent (Figure 5.24 - II et III) nous montre une décélération de plus d' 1 m.s^{-1} à $0,25 \text{ m}$ de hauteur entre la digue (M3) et le haut de plage (M1). Le mât M3 se trouve sur la digue et à une altitude supérieure à celle du mât M1 sur le haut de plage, il paraît donc logique que les vents soient plus forts en M3. Les profils verticaux de vitesse ont une forme non-logarithmique sur la digue où l'on observe des perturbations dans la partie inférieure, à savoir une inflexion à $0,50 \text{ m}$.

Les quantités de sable captées au niveau de M1 ($92 \text{ kg.m}^{-1}.\text{h}^{-1}$) et M2 ($95 \text{ kg.m}^{-1}.\text{h}^{-1}$), tous deux en contact avec le haut de plage, sont plus de fois supérieures à celles captées par le piège M3 ($28 \text{ kg.m}^{-1}.\text{h}^{-1}$) qui était situé sur la digue (Figure 5.24 - I), et où la vitesse du vent est pourtant plus importante. Par ces conditions de vent fort parallèle, le sable est essentiellement mobilisé sur le haut de plage, et il est capté par les pièges M1 et M2 (Figure 5.24). Le piège M3 est plus éloigné de la source principale de sable, et capte donc moins, ce

qui conforte les observations faites le 04.02 (Figure 5.21). La localisation au contact de la source principale de sable (le haut de plage) semble déterminante pour le captage par conditions de vent dominant parallèle à la digue.



Figure 5.25. Photographie de terrain du 26.05.2011 (cliché Tresca 2011)

Néanmoins, les quantités de sable captées dans les pièges en contact avec le haut de plage sont plus importantes lors du piégeage du 26.05, car la vitesse du vent était plus importante ce jour là. Le piège M1 le 04.02 était situé au même emplacement que le piège M2 le 26.05. La quantité de sable capté à cette localisation le 26.05 était égale à $95 \text{ kg.m}^{-1}.\text{h}^{-1}$, pour un vent moyen de 8 m.s^{-1} à 0,25 m, et le 04.02 la quantité de sable était de $60 \text{ kg.m}^{-1}.\text{h}^{-1}$ et la vitesse à 0,25 m de $7,2 \text{ m.s}^{-1}$.

2.1.2. Vent frontal oblique

2.1.2.1. Provenances du NNE

→ Piégeage du 27/04/2011

Lors de cette journée, les instruments ont été déployés en trois points (Figure 5.26) : sur le haut de plage (M1), au contact plage/digue (M2) et à mi-pente sur le versant externe de la digue (M3). Pour ces conditions de vent oblique de NNE, ce versant est exposé au vent. La vitesse moyenne du vent à 2 m sur le mât M3 était de $10,4 \text{ m.s}^{-1}$ (avec $u_{0,25\text{m}} = 4,9 \text{ m.s}^{-1}$).

L'observation des profils verticaux de vitesse du vent montre une nette accélération de la vitesse entre le haut de plage et la digue (Figure 5.26 - II). Au niveau des mâts M1 et M2, la vitesse moyenne du vent à 0,25 m pendant les 10 minutes de piégeage est de $6,5 \text{ m.s}^{-1}$, tandis

qu'elle est de $9,5 \text{ m.s}^{-1}$ à la même hauteur au niveau du mât M3, soit 46% de plus, ce qui est nettement visible également sur les séries temporelles de vitesse du vent (Figure 5.27 - A). Ce type d'accélération a été observé sur les dunes côtières où une compression des filets d'air se produit sur la pente du versant exposé au vent, donnant lieu à une augmentation de la vitesse du vent (Hesp et al., 2005 ; Walker et al., 2009). On observe également que, plus on s'éloigne de la surface topographique, moins cette accélération est prononcée, puisqu'à 2 m, l'écart est bien moins prononcé qu'à 0,25 m (Figure 5.27 - B).

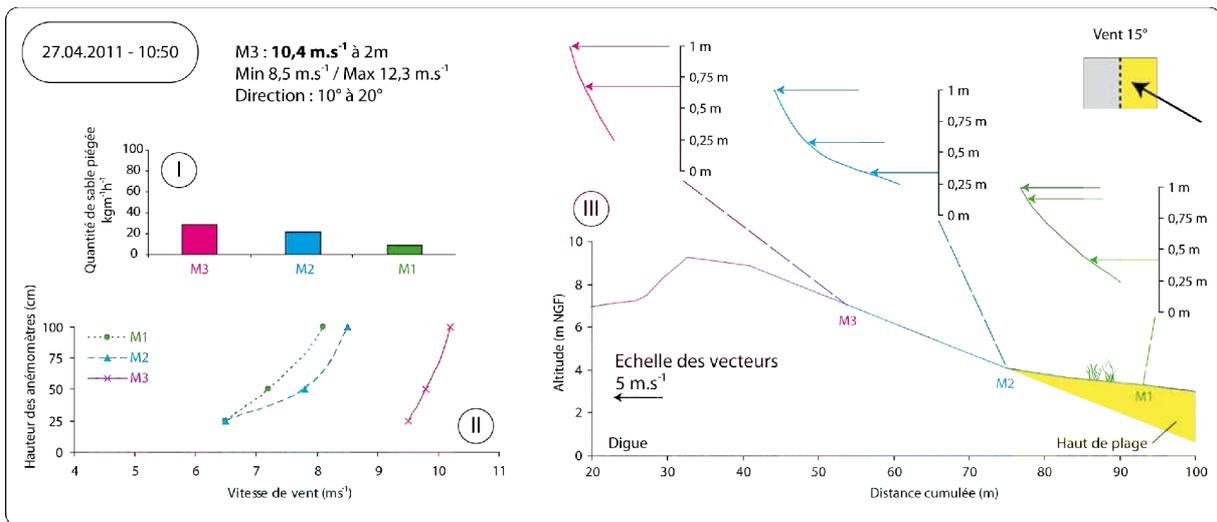


Figure 5.26. Profils verticaux de vitesse moyennée pendant les 10 minutes de piégeage et quantités de sable capté en front de digue et haut de plage lors d'une expérimentation du 27 avril 2011 par conditions de vent frontal de NNE.

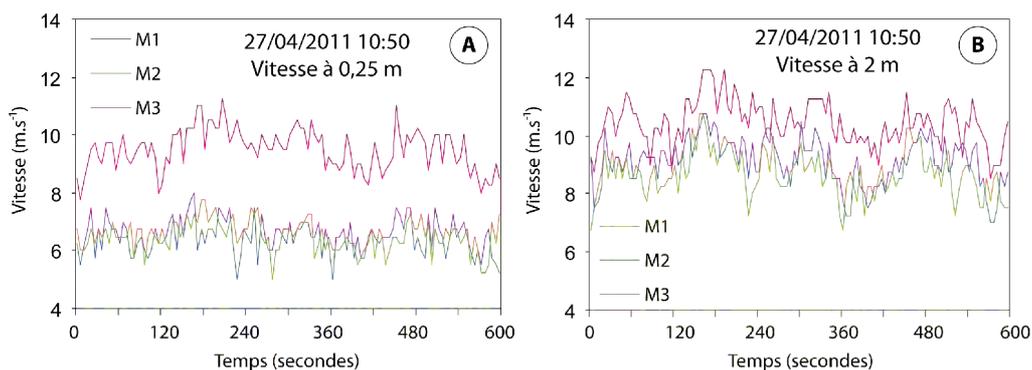


Figure 5.27. Séries temporelles de vitesse du vent à 0,25 m (A) et 2 m (B) lors du piégeage du 27/04/2011 par vent oblique de NNE.

Les quantités de sable piégées sont faibles en comparaison de ce qui a été capté lors d'autres expérimentations sur la digue. Par vent oblique de NNE, le fetch est moins long que par vent longitudinal de NE, la source de sable potentielle est donc moins grande, ce qui explique les quantités de sable moins importantes ici (Figure 5.26 - I) que lors de la journée

du 03.03 (Figure 5.18 - I), alors que la vitesse moyenne du vent est supérieure ($10,4 \text{ m.s}^{-1}$, et $9,8 \text{ m.s}^{-1}$ le 03.03). Les pièges situés sur la digue (M3 : $28,7 \text{ kg.m}^{-1}.\text{h}^{-1}$) et en pied de digue (M2 : $21,9 \text{ kg.m}^{-1}.\text{h}^{-1}$) ont capté davantage de sable que celui qui se trouvait sur le haut de plage (M1 : $8,7 \text{ kg.m}^{-1}.\text{h}^{-1}$) (Figure 5.26 - I). Pour cette disposition des instruments de mesure et cette direction de vent, le piège situé en haut de plage (M1) capte le sable provenant de l'estran uniquement, où l'humidité est plus forte ($0,99 \%$ à l'avant du piège à 10:35), ce qui restreint le transport éolien. Le piège M2, au niveau du contact plage/digue, peut intercepter le sable en provenance du haut de plage, qui est plus sec (humidité de $0,17 \%$ à l'avant du piège M2) (Figure 5.28). Enfin, le piège positionné plus haut sur la digue (M3) pouvait intercepter le sable provenant du haut de plage, mais également celui provenant des dunes de pied de digue. Il s'agit du même fonctionnement que lors de l'expérimentation par vent de NE du 03.03 (Figure 5.18).

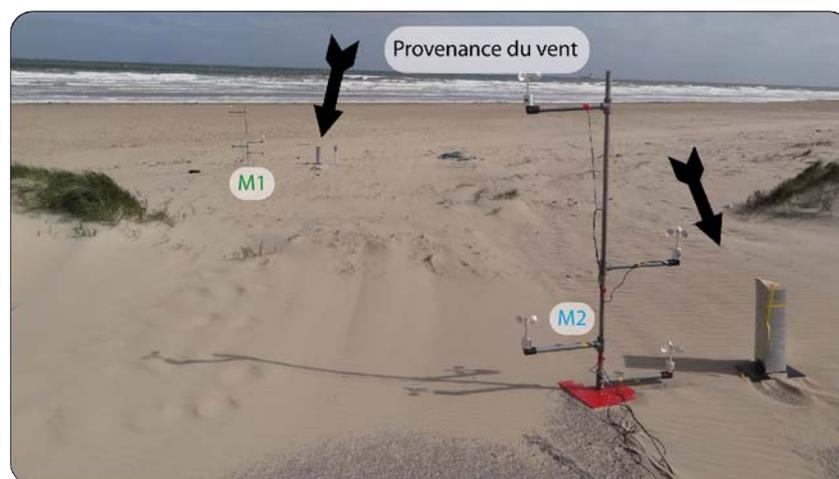


Figure 5.28. Photographie de terrain montrant la position des mâts M1 et M2 par rapport à la direction du vent dominant de NNE (cliché Tresca 2011)

2.1.2.2. *Provenance du NNO*

→ ***Piégeage du 12/04/2011***

Le 12/04/2011, le vent provenait du NNO, il était donc frontal. Les instruments de mesure se situaient toujours à l'Ouest des dunes de pied de digue, et la rugosité de surface sur le haut de plage était importante (Figure 5.29). Ce jour là, un haut de plage sec de plusieurs mètres de large non atteint lors des marées précédentes, avec à certains endroits des oyats clairsemés, bordait le pied de digue (Figure 5.29). Le premier mât (M1) était positionné sur le

haut de plage, le deuxième (M2) au contact plage/digue, et le troisième (M3) était sur la partie supérieure du versant externe de la digue. Le vent enregistré à 2 m sur le mât M3 soufflait à $10,6 \text{ m.s}^{-1}$ en moyenne pendant le piégeage de 10 minutes ($u_{2m} = 5 \text{ m.s}^{-1}$). Les observations faites tant au niveau des quantités de sable capté que pour les profils verticaux de vitesse (Figure 5.30) sont proches de ce qui a été décrit pour la journée du 27/04/2011 par vent oblique de NNE (Figure 5.26).

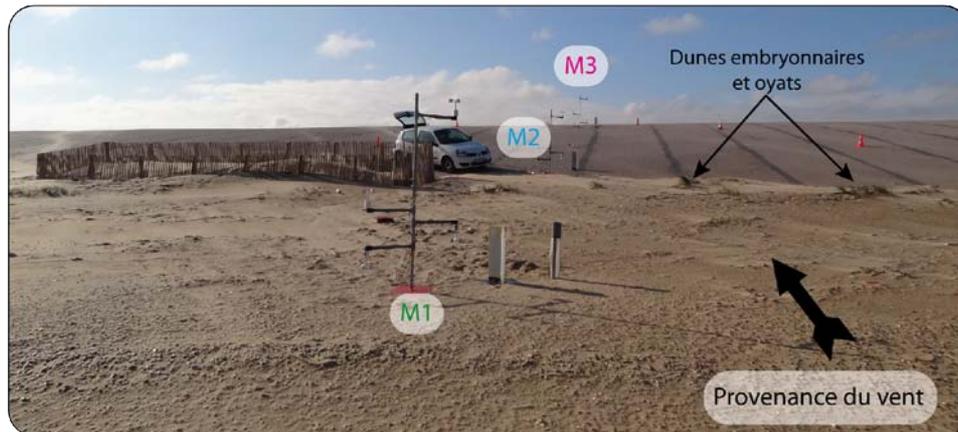


Figure 5.29. Photographie de terrain montrant la localisation des 3 mâts de mesure et les pièges lors de la sortie du 12/04/2011 par vent frontal de NNO (cliché Tresca 2011)

On retrouve ici, tout comme pour le piégeage par vent de NNE décrit précédemment, un écart important entre les vitesses enregistrées sur M3 et les deux autres mâts qui sont au contact du haut de plage (Figure 5.30 - II). Une accélération de la vitesse du vent de $2,5 \text{ m.s}^{-1}$ se produit à 0,25 m entre M2 ($6,4 \text{ m.s}^{-1}$) et M3 ($8,9 \text{ m.s}^{-1}$).

Les valeurs de transport éolien obtenues montrent que la quantité de sable capté augmente de la plage vers la digue (Figure 5.30 - I) : sur le haut de plage (M1), la quantité obtenue est de $11,7 \text{ kg.m}^{-1}.\text{h}^{-1}$, elle est de $20,6 \text{ kg.m}^{-1}.\text{h}^{-1}$ au niveau de la transition sable/asphalte (M2), et enfin $39,4 \text{ kg.m}^{-1}.\text{h}^{-1}$ sur la digue (M3). La différence entre ce qui est capté sur la plage et la digue peut être expliquée par la source de sable qui est différente : M1 capte le sable en provenance de l'estran où le transport est réduit à cause de l'humidité. Les pièges M2 et M3 captent tous deux le sable en provenance du haut de plage sec.

De plus, l'asphalte de la digue serait plus lisse et présenterait moins de contraintes de cisaillement, tandis que le haut de plage est constitué de davantage d'obstacles (laises de mer, coquillages, végétation) et serait donc plus rugueux, entraînant une contrainte de

cisaillement plus importante et une décélération plus rapide de la vitesse du vent à l'approche du sol.

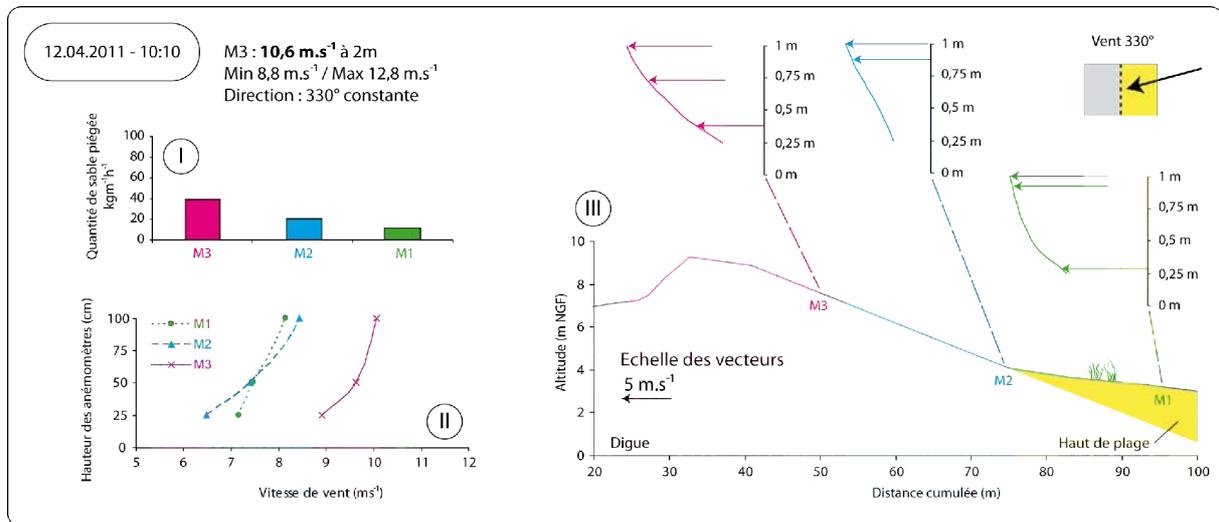


Figure 5.30. Profils verticaux de vitesse moyenne pendant les 10 minutes de piégeage et quantités de sable capté en front de digue et haut de plage lors d'une expérimentation du 12 avril 2011 par conditions de vent frontal de NNO

2.2. Versant interne de la digue

Il n'a pas été possible d'effectuer de piégeage et de mesures de la vitesse du vent sur un profil entier comprenant le versant externe et le revers, en raison de la circulation sur la digue ainsi que sur la route située en arrière. Deux sorties terrain complémentaires ont donc été menées pour effectuer des piégeages sur le versant interne (le revers) de la digue. La première sortie s'est faite pour des vents originaires du NE, le revers se trouvait donc en situation d'abri, et la deuxième pour un vent provenant du SO, et le revers se trouvait cette fois-là exposé directement au vent. Dans tous les cas, la position des instruments était la même, avec un mât sur le sommet de la digue (M2) et un mât à la base du revers (M1), au niveau de la jonction avec la route qui se situe en arrière de la digue.

2.2.1. Vent longitudinal de NE

Le 03.05.2011, le vent provenait du secteur NE et longeait la digue (Figure 5.31). La vitesse moyenne enregistrée à 2 m sur le mât M2 était de 10,7 m.s⁻¹, et la vitesse limite d'envol (u_{t2m}) estimée à 4,5 m.s⁻¹.

Les profils verticaux de vitesse du vent (Figure 5.32 - II) montrent que la vitesse moyenne du vent à 0,25 m en sommet de digue (M2) est de $9,3 \text{ m.s}^{-1}$, et elle est de seulement $4,8 \text{ m.s}^{-1}$ en bas du versant. Une nette décélération de $4,5 \text{ m.s}^{-1}$ se produit. La différence de vitesse du vent entre M2 et M1 est nettement plus importante à 0,25 m (Figure 5.33-A) qu'à 2 m de hauteur (Figure 5.33 - B). Ce phénomène, comme l'a noté Hesp et al. (2005) est propice au dépôt du sable sur le versant situé à l'abri du vent, et il est possible que le mode de transport par saltation ne soit plus dominant dans ce secteur où le dépôt par « *grainfall* » peut se produire (Nickling et al., 2002). Ces observations tendent à expliquer l'importante quantité de sable que l'on retrouve en bas du revers de digue (Figure 5.31).

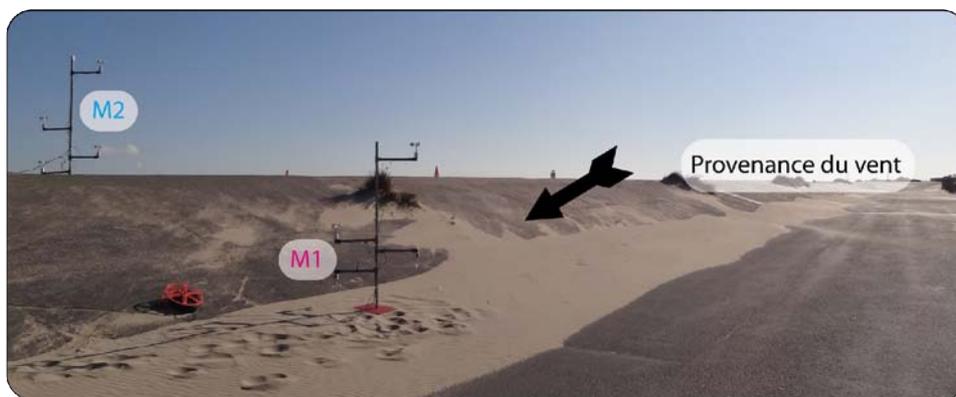


Figure 5.31. Photographie de terrain montrant la position des mâts de mesure par rapport aux vents de NE lors de la sortie du 03/05/2011 (cliché Tresca 2011)

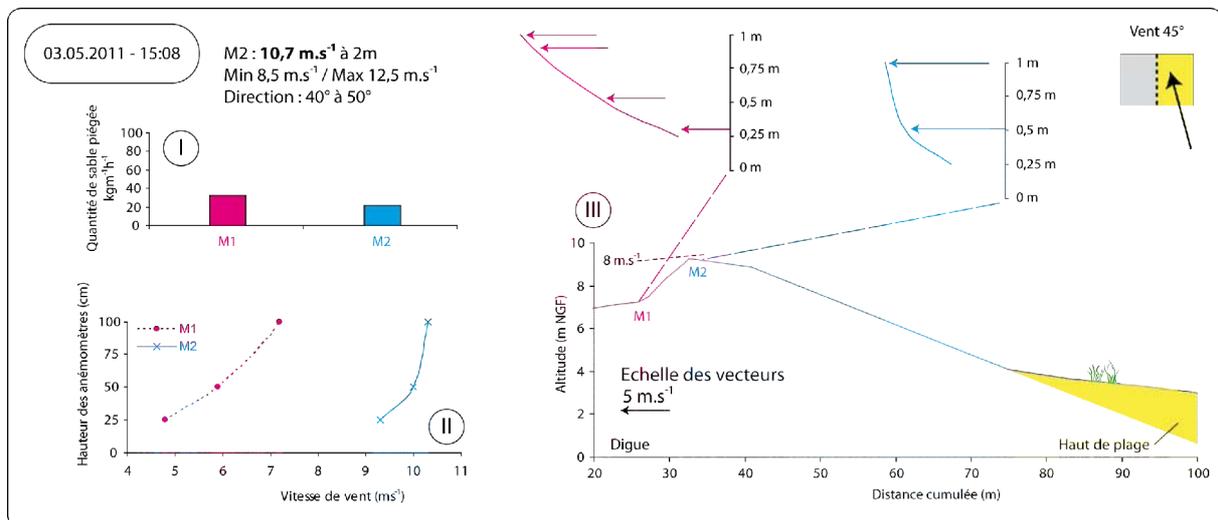


Figure 5.32. Profils verticaux de vitesse moyenne pendant les 10 minutes de piégeage et quantités de sable capté sur le revers et le sommet de digue lors d'une expérimentation du 03 mai 2011 par conditions de vent longitudinal de NE.

Lors de ce piégeage, la quantité de sable captée dans le piège M1 situé en bas de la pente ($32 \text{ kg.m}^{-1}\text{.h}^{-1}$) était supérieure à celle qui a été interceptée par le piège au niveau de M2 situé en sommet de digue ($22 \text{ kg.m}^{-1}\text{.h}^{-1}$) (Figure 5.32-I). Le sable capté provient des dunes de

pied de digue situées à l'Est. Au niveau du piège situé en contrebas du revers, le sable provient également des dépôts dépourvus de végétation (sur lesquels repose le mât 1) lorsque la vitesse du vent y permet la mise en mouvement du sable lors de rafales (Figure 5.31). Les transferts de sable pourraient donc suivre le schéma suivant lors de ces conditions de vent : la mise en mouvement se produit au niveau des dunes de pied de digue et le sable est exporté vers l'arrière. Le sable franchit donc le sommet de l'ouvrage et se dépose à la base du versant interne, en situation d'abri, du fait de la forte baisse de la vitesse moyenne du vent. Néanmoins, le sable qui se dépose à cet endroit peut être à nouveau mobilisé lors de rafales, et être intercepté par le piège M1, ce qui expliquerait que la quantité de sable de ce piège soit plus importante.

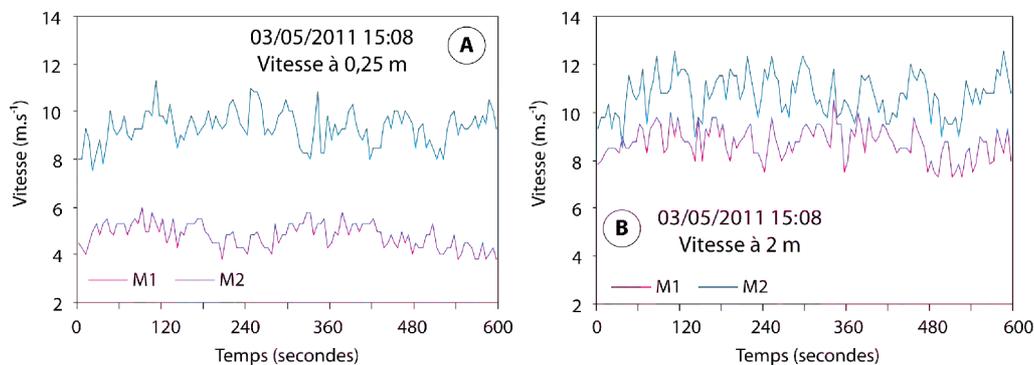


Figure 5.33. Séries temporelles de vitesse du vent à 0,25 m (A) et 2 m (B) lors du piégeage du 03/05/2011 par vent longitudinal de NE

2.2.2. Vent longitudinal de SO

Le 05/02/2011, le piégeage *in situ* a été mené par conditions de vent fort (vitesse moyenne de $13,1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, tandis que la vitesse limite d'envol u_{l2m} a été estimée à $4,6 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$) (Figure 5.34). Les instruments de mesure étaient positionnés à la base du versant interne (M1) et sur le sommet de la digue (M2).

L'observation des profils verticaux de vitesse du vent met en évidence une accélération importante de la vitesse du vent entre le bas du versant interne (M1 : $7 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ à 0,25 m) et le sommet (M2 : $10,7 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ à 0,25 m) (Figure 5.34 - II). La vitesse moyennée sur 10 minutes montre une nette accélération de $3,7 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ entre ces deux points, néanmoins l'observation des séries temporelles nous montre qu'à 0,25 m, les courbes de vitesse du vent de M1 et M2 sont dissociées (Figure 5.35 - A), tandis qu'à 1 m les rafales et accalmies semblent coïncider (Figure 5.35 - B), ce qui pourrait être révélateur d'une modification de la direction du vent à 0,25 m (Hesp et Walker, 2012). L'allure non-logarithmique des profils

verticaux de vitesse (Figure 5.34 - II et III) révèle également une forte influence de la topographie et une accélération du vent près de la surface, comme cela a été observé sur les versants dunaires particulièrement raides (Walker & Hesp, 2012).

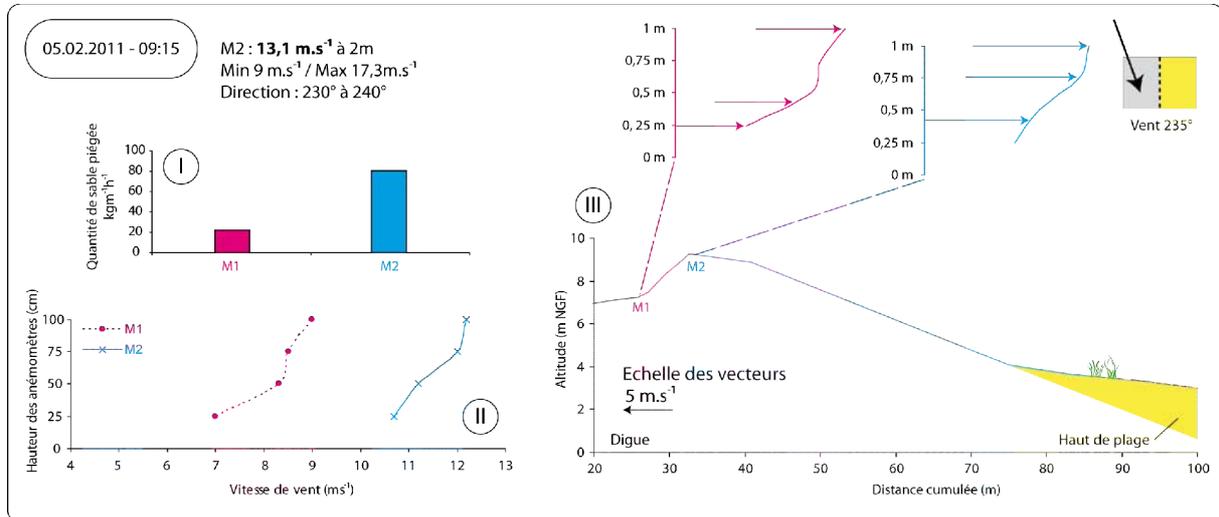


Figure 5.34. Profils verticaux de vitesse moyennée pendant les 10 minutes de piégeage et quantités de sable capté sur le revers et le sommet de digue lors d'une expérimentation du 05 février 2011 par conditions de vent longitudinal de SO

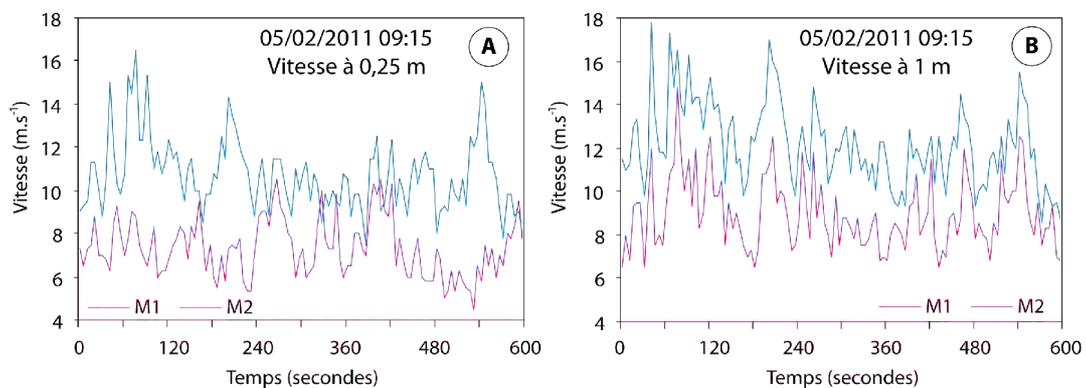


Figure 5.35. Séries temporelles de vitesse du vent au niveau des mâts M1 et M2 lors du piégeage du 05/02/2011 à 0,25 m (A) et 1 m (B)

Les piégeages montrent une grande différence entre ce qui est capté au sommet de la digue ($80 \text{ kg.m}^{-1}.\text{h}^{-1}$ pour M2) et en bas de la digue ($22 \text{ kg.m}^{-1}.\text{h}^{-1}$ pour M1) (Figure 5.34 - I), qui serait fortement liée à la vitesse du vent. De la déflation se produit dans les dunes du bassin maritime, et ce sable est piégé au niveau de M1 (Figure 5.36). En sommet de digue, une vitesse de vent bien plus forte prend en charge le sable en provenance d'accumulations importantes sur le revers de la digue. Cette plus faible quantité captée en bas du revers pourrait également être expliquée par une modification de la direction du vent à 0,25 m

comme cela a été suggéré plus tôt. Les pièges étant unidirectionnels, ils ne peuvent pas capter le sable dans le cas d'une modification locale de la direction du vent.



Figure 5.36. Photographie prise vers l'Ouest sur la route située en contrebas du versant interne de la digue (côté bassin) lors de l'expérimentation du 05 février 2011 menée lors de vent de SO. Le sable en bordure de bassin est rabattu sur la route puis sur le versant interne de la digue et franchit le sommet de l'ouvrage (Tresca, 2011)

2.3. Bilan des mesures du transport éolien sur la digue du Braek

Le récapitulatif de l'ensemble des données de piégeage est présenté dans le Tableau 5.2. Tout comme pour les observations faites sur la plage du Clipon, on remarque que le transport maximal se produit lors des vents les plus forts. Des vents moyens supérieurs à 11 m.s^{-1} ont été enregistrés lors de deux piégeages différents, le 26.05 et le 05.02. Lors de la journée du 26.05, l'expérimentation avait lieu sur le versant externe de la digue, et le transport a atteint $92,8 \text{ kg.m}^{-1}.\text{h}^{-1}$ sur le haut de plage, et $95,5 \text{ kg.m}^{-1}.\text{h}^{-1}$ au contact plage/digue (Tableau 5.2). Le 05.02, le piégeage a été effectué sur le revers, et le transport en sommet de digue était de $88 \text{ kg.m}^{-1}.\text{h}^{-1}$ (Tableau 5.2).

Lorsque la vitesse du vent est intermédiaire, les piégeages *in situ* montrent que les vents longitudinaux donnent lieu à un transport généralement plus important que les vents obliques ou frontaux, du fait d'un fetch plus long. Le premier piégeage du 26.05 (Tableau 5.2) a été effectué lors de vents longitudinaux pour une vitesse moyenne de $10,6 \text{ m.s}^{-1}$. Le transport sur le haut de plage et au contact plage/digue était de $67,9 \text{ kg.m}^{-1}.\text{h}^{-1}$ et $68,6 \text{ kg.m}^{-1}.\text{h}^{-1}$. La vitesse de vent était la même lors du premier piégeage du 12.04 (Tableau 5.2), mais le vent était frontal ce jour là. La quantité de sable piégé aux mêmes endroits que le 26.05 était de respectivement $11,7 \text{ kg.m}^{-1}.\text{h}^{-1}$ et $20,5 \text{ kg.m}^{-1}.\text{h}^{-1}$. En l'absence de précipitations, le fetch est segmenté et potentiellement plus limité par vents frontaux du fait de l'humidité du sable sur

l'estran, que lors de vents parallèles à la côte, qui entraînent un fetch plus long sur le haut de plage sec.

En revanche, lors de ces deux mêmes expérimentations, la quantité de sable capté sur la partie haute du versant externe de la digue est plus importante par vents frontaux (12.04 : 39,4 kg.m⁻¹.h⁻¹) que par vents parallèles à la digue (26.05 : 25,3 kg.m⁻¹.h⁻¹) (Tableau 5.2), signifiant que les transferts de sable vers l'arrière se produisent davantage lors de ces conditions de vent. Cette hypothèse est confirmée par les autres piégeages effectués dans les mêmes conditions, sur le versant externe ainsi que sur le revers de la digue.

Il conviendrait de pouvoir approfondir et diversifier les mesures afin de mieux connaître encore les processus qui agissent sur la digue, afin de les comparer à ceux mis en évidence sur les versants dunaire. Par exemple, des pièges à coupelles (Arens & Van der Lee, 1995) ont été testés sur la digue et la plage à titre expérimental, et il apparaît que la saltation se fait à une hauteur supérieure sur l'asphalte que sur le sable (Figure 5.37). Les coupelles situées sur la digue ont capté du sable jusqu'à 0,4 m de hauteur, tandis que sur le sable, aucune coupelle n'a intercepté de sédiment au dessus de 0,2 m. Cette saltation peut être due à l'asphalte, dont la surface est plus dure ce qui pourrait favoriser le rebond des grains de sable, ou à l'accélération observée sur la digue qui pourrait modifier la hauteur à laquelle les grains sont transportés.

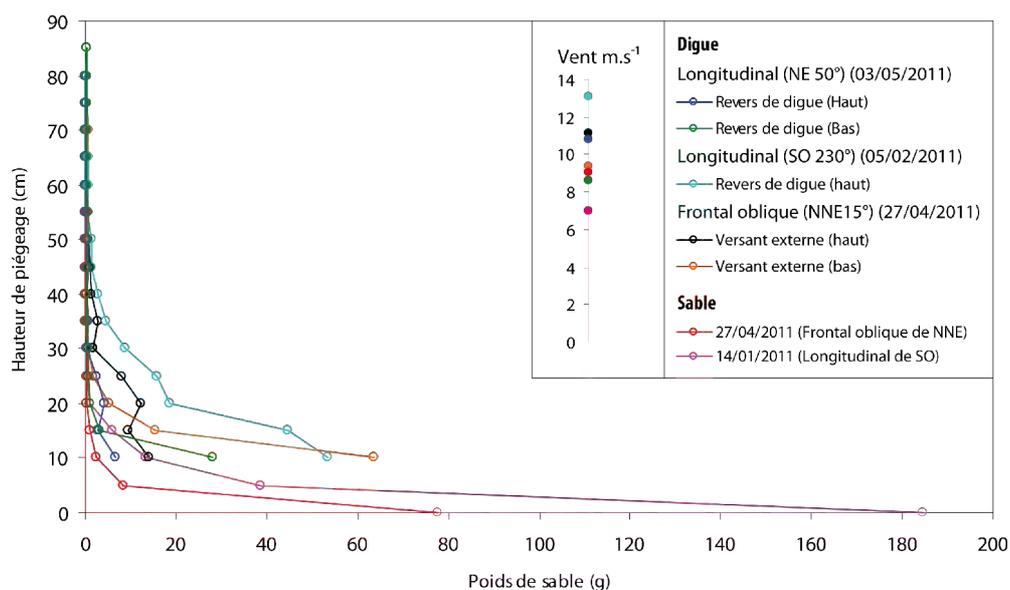


Figure 5.37. Résultats de piégeages sur l'asphalte et sur le sable lors de vent de NNE, de NE et de SO à l'aide de coupelles Arens.

Les mesures *in situ* du transport éolien et de la vitesse du vent sur la digue du Braek ont permis de faire la lumière sur différents points. Le bilan présenté sera divisé en deux parties qui permettront de récapituler les principales informations. Ces points porteront tout d'abord sur les quantités de sable transporté, et la deuxième partie discutera des variations de la vitesse du vent.

Tableau 5.2. Synthèse de mesures *in situ* de transport éolien sur la digue du Braek, et principales variables environnementales associées

Orientation du vent	Date	Base du revers de digue		Sommet/front de digue		Contact plage/digue		Haut de plage		Vent moyen pendant 10 min. à 2m (m.s ⁻¹)	Précipitations		Marée	Fetch maximum (estimation)	Principales observations
		Transport kg.m ⁻¹ .h	Humidité (%)		Durée (min)	Quantité (mm)									
Longitudinal	OSO	04/02/2011		32,2	0,17	32,5	0,19			9 (5,3 à 13,3)	2228	3,8	H+3 coef. 87	Très faible (Digue)	Les trois pièges sont sur la digue et le sable provient de la plage
				29,9	0,22	60,8	0,14			9,9 (6 à 16,5)					
				50,7	0,14					9 (5,3 à 13,3)					
				44,8	0,15					9,9 (6 à 16,5)					
	26/05/2011		25,3	0,04	68,6	0,04	67,9	0,04	10,6 (6,8 à 15,8)	436	4	H+2 coef. 41	< 50m pour le pièges en contact avec le haut de plage; Limité pour le reste (Digue)	Deux pièges en contact avec la principale source de sable (haut de plage), le piège en haut de digue capte du sable provenant des dunes du bassin	
			28,3	0,03	95,5	0,04	92,8	0,05	11,3 (6,8 à 17)						
SO	05/02/2011		36,2	0,17	88,0	0,20			12,6 (8,3 à 18,5)	1870	3,2	H+2 coef. 87	Très faible (Digue)	Vent le plus fort; Dunes de bassin peu fixées par la végétation	
			22,4	0,20	80,4	0,22			13,1 (9 à 17,3)						
NE	03/03/2011		31,0	0,02	37,9	0,01	6,1	0,05	9,7 (8,5 à 10,8)	2629	21,8	H-1 coef. 80	Long (>200m) pour le haut de plage; Digue pour le reste	Sable humide sur l'estran, mais sec sur le haut de plage et dans les couloirs de déflation des dunes de pied de digue	
			34,0	0,40	50,0	0,40	8,1	0,40	9,8 (8,5 à 11,3)						
	03/05/2011		14,7	0,12	33,0	0,14			9,1 (7 à 11,5)	763	2,8	Basse c. 80	Limité (Digue)	Source de sable proche du piège pour la base du revers	
32,3			0,09	21,8	0,09	10,7 (8,5 à 12,5)									
28,1			0,20	17,0	0,11	10,7 (8,5 à 12,8)									
Frontal à oblique	NNE	27/04/2011		28,7	0,13	21,9	0,11	8,8	0,17	10,4 (8,5 à 12,3)	168	0	H-3 coef. 40	100 à 200 m pour les pièges en contact avec le haut de plage; limité pour le piège sur la digue	Sable humide sur l'estran, mais sec sur le haut de plage et dans les couloirs de déflation des dunes de pied de digue
				22,6	0,12	22,2	0,12	11,7	0,15	10,3 (8,3 à 11,8)					
				26,3	0,10	16,6	0,13	13,8	0,15	10,8 (8,3 à 12,8)					
	NNO	12/04/2011		39,4	0,13	20,5	0,07	11,7	0,05	10,6 (8,8 à 12,8)	651	8,9	H-2 coef. 40	Long (> 300 m)	Important quantité de sable sec en pied de digue, et quelques dunes embryonnaires
				46,0	0,07	23,2	0,01	10,9	0,01	10,5 (8,5 à 12,3)					

3. Conditions optimales et transport éolien potentiel

Les mesures *in situ* présentées jusqu'à présent ont été effectuées lors de vent fort afin de déterminer les conditions les plus propices au transport. Ces conditions de vent fort se sont présentées dans la plupart des cas pour une orientation oblique ou longitudinale en provenance du secteur Est. Les autres résultats ne sont pas représentatifs des vents dominants mais reflètent les conditions potentielles d'alimentation de la dune bordière lors de cette étude. Bien entendu ces volumes représentent un transport potentiel, qui sera réalisé lors des conditions les plus propices, c'est-à-dire en l'absence de précipitations abondantes et de hauts niveaux d'eau.

Le transport éolien potentiel annuel lors des conditions optimales a été calculé à partir des données de vent horaires, issues de la station météorologique du port Ouest de Dunkerque pour l'année 2010. L'acquisition de ces données se fait à un pas de temps de 5 minutes, et une précision de $0,1 \text{ m.s}^{-1}$ pour la vitesse, et 10° pour la direction. Afin de calculer le nombre d'heures que représentaient les conditions de piégeage dans une année, il a été nécessaire de créer des classes de vitesse et de direction similaires, dans le but de pouvoir comparer chaque piégeage. Des classes de direction de 20° et des classes de vitesse d' 1 m.s^{-1} ont été utilisées. Par exemple, pour un vent moyen de 10 m.s^{-1} , les vents de $9,5 \text{ m.s}^{-1}$ à $10,5 \text{ m.s}^{-1}$ ont été comptabilisés, et pour une direction moyenne de 240° , une fenêtre de 230° à 250° a été considérée. Pour chaque piégeage, le transport en $\text{kg.m}^{-1}.\text{h}^{-1}$ a été multiplié par le nombre d'heures dans une année ($\text{kg.m}^{-1}.\text{an}^{-1}$), puis cette valeur a été convertie en volume en la divisant par la masse volumique classique du sable de 2650 kg.m^{-3} .

3.1. Conditions optimales et transport éolien potentiel sur la plage du Clipon

3.1.1. Vents obliques supérieurs à 11 m.s^{-1}

Les mesures *in situ* ont permis de montrer que le transport se faisait essentiellement lors de vents forts supérieurs à 11 m.s^{-1} . Ce type de vent a soufflé le 16.06 et provenait du secteur NNE (10° à 30°). Ces conditions ont été réunies pendant 68h en 2010, ce qui représente 0,86% de temps (Tableau 5.3). Le transport potentiel au niveau du pied de dune équivaut à $2,01 \text{ m}^3.\text{m}^{-1}.\text{an}^{-1}$, alors que sur le versant dunaire, seulement $0,21 \text{ m}^3.\text{m}^{-1}.\text{an}^{-1}$ ont été

obtenus. Il en résulte un dépôt potentiel d'1,8 m³.m⁻¹.an⁻¹ dans la partie inférieure du versant dunaire, au sein de la végétation.

3.1.2. Vents longitudinaux

La direction du vent joue également un rôle important, et par vent parallèle à la côte, un long fetch engendre un transport important sur le haut de plage. Ces conditions ont été réunies lors de vents longitudinaux en provenance du NE le 16.06, au centre de la plage du Clipon également, et pour une vitesse de vent moyenne de 9,6 m.s⁻¹. Ces critères ont été réunis pendant 33 h dans l'année 2010, c'est-à-dire seulement 0,42% du temps. Les valeurs de transport sont donc bien moins importantes dans ce cas, et le transport potentiel annuel au niveau du pied de dune représente 0,5 m³.m⁻¹.an⁻¹ (Tableau 5.3). Sur le haut de plage, la valeur maximum atteint 0,42 m³.m⁻¹.an⁻¹, et seulement 0,07 m³.m⁻¹.an⁻¹ sur le versant dunaire.

Le 15.06, le vent provenait du même secteur (NE), mais le fetch était plus important car on se situait à l'Ouest du site, et l'on se trouvait en outre à marée basse. Quant au vent, il soufflait moins fort (8,2 m.s⁻¹) mais cette vitesse est bien plus fréquente dans l'année. Bien que le transport mesuré *in situ* ait été moins important, il résulte de la fréquence de ces vents (1,28% du temps en 2010, soit 101h) un transport potentiel d'1,12 m³.m⁻¹.an⁻¹ au niveau du pied de dune (Tableau 5.3).

Tableau 5.3. Transport potentiel annuel sur la plage du Clipon lors des conditions de piégeage, pour un sable à la masse volumique de 2650 kg.m³. Les valeurs en gras représentent le transport potentiel en m³.m⁻¹.an⁻¹ ; En rouge les conditions de transport éolien maximal ; En bleu, les conditions de transport éolien lors de vent longitudinal.

Orientation du vent	Numéro de profil	Date	Vent (m.s ⁻¹)	Vent (°)	Nombre an d'heures par	% du temps	Versant dunaire végétalisé			Pied de dune			Haut de plage			Laisse de mer et estran			
							Transport kg.m ⁻¹ .h ⁻¹	Transport kg.m ⁻¹ .an ⁻¹	Transport m ³ .m ⁻¹ .an ⁻¹	Transport kg.m ⁻¹ .h ⁻¹	Transport kg.m ⁻¹ .an ⁻¹	Transport m ³ .m ⁻¹ .an ⁻¹	Transport kg.m ⁻¹ .h ⁻¹	Transport kg.m ⁻¹ .an ⁻¹	Transport m ³ .m ⁻¹ .an ⁻¹	Transport kg.m ⁻¹ .h ⁻¹	Transport kg.m ⁻¹ .an ⁻¹	Transport m ³ .m ⁻¹ .an ⁻¹	
Longitudinal	OSO	Plateforme intertidale - C2	30/04/2010	6,1 à 7,1	240 à 260	143	1,82%	0,0	0,0	0,00	1,0	143,0	0,05	1,3	185,9	0,07			
	ENE	Dunes du Clipon - C3	15/06/2010	7,7 à 8,7	60 à 80	101	1,28%	0,4	40,3	0,02	29,5	2979,5	1,12	9,6	972,6	0,37	40,0	4035,4	1,52
		Dunes du Clipon - C5	16/06/2010	9,1 à 10,1	60 à 80	33	0,42%	5,6	185,8	0,07	40,2	1326,6	0,50	33,8	1114,7	0,42	1,0	33,1	0,01
Frontal à oblique	NNE	Dunes du Clipon - C4	16/06/2010	10,6 à 11,6	10 à 30	68	0,86%	33,8	2300,2	0,87	78,5	5338,0	2,01	37,7	2561,3	0,97	77,0	5236,1	1,98
		Dunes du Clipon - C6	06/05/2010	8,4 à 9,4	10 à 30	54	0,69%	8,4	568,3	0,21				22,9	1555,2	0,59			
	Falaise sableuse - S2	17/06/2010	8,6 à 9,6	10 à 30	63	0,80%	0,2	9,9	0,00	14,2	766,8	0,29	7,5	407,3	0,15	0,7	39,2	0,01	
							0,5	29,4	0,01				8,8	475,8	0,18				
	Dunes du Clipon - C6	14/06/2010	10 à 11	20 à 40	64	0,81%	0,3	19,2	0,01	7,5	480,0	0,18	6,0	384,0	0,14	0,1	6,4	0,00	
							0,0	0,0	0,00				3,8	205,4	0,08				
	Dunes du Clipon - C6	14/06/2010	10 à 11	20 à 40	64	0,81%	6,3	403,2	0,15				6,6	356,2	0,13				
	Falaise sableuse - S2	17/06/2010	8,6 à 9,6	10 à 30	63	0,80%	1,2	73,4	0,03	6,5	409,5	0,15	1,8	111,2	0,04	5,1	322,0	0,12	

3.2. *Transport potentiel sur la digue du Braek*

Le transport potentiel annuel a été estimé à l'aide de la même méthode que pour la plage du Clipon, avec des classes de vitesse d'1 m.s⁻¹, et de classes de direction de 20°. Le nombre d'heures par an a été évalué à partir des données de vent issues de la station anémométrique du port de Dunkerque Ouest pour l'année 2011, et les données sont exprimées en m³.m⁻¹.an⁻¹ (Tableau 5.4).

3.2.1. *Vents forts longitudinaux (supérieur à 11 m.s⁻¹)*

Le transport optimal a été observé lors d'un vent moyen fort supérieur à 11 m.s⁻¹ sur le haut de plage. Ces conditions ont été observées lors d'un piégeage en particulier le 26.05 : le vent moyen a soufflé à 11,1 m.s⁻¹ pour une direction moyenne de 240°. Ces conditions de vent ont été réunies pendant 107 h en 2011, ce qui représente 1,38 % du temps. Le transport potentiel, en l'absence de précipitations et de hauts niveaux d'eau, a été estimé à 3,85 m³.m⁻¹.an⁻¹ au niveau du contact plage/digue, et 3,75 m³.m⁻¹.an⁻¹ sur le haut de plage.

3.2.2. *Vents intermédiaires longitudinaux (SO à OSO)*

Les expérimentations ont démontré que de manière générale, le transport était plus important par conditions de vent dominant en provenance du secteur OS à OSO, au contact du haut de plage qui constitue la source principale de sable lors de ces conditions. Ces conditions viennent d'être décrites dans un premier temps pour des vents forts (> 11m.s⁻¹).

Le 04.02, le vent provenant du secteur OSO et 2 piégeages ont été effectués à cette localisation. Le premier piégeage a révélé un transport de 32,5 kg.m⁻¹.h⁻¹ pour un vent moyen de 9 m.s⁻¹, et ces conditions de vent se sont présentées durant 135 h en 2011 (1,74 % du temps), équivalent à un transport potentiel d'1,66 m³.m⁻¹.an⁻¹. Lors du deuxième piégeage, pour un vent moyen de 9,9 m.s⁻¹, 60,8 kg.m⁻¹.h⁻¹ ont été captés ce qui représente 2,41 m³.m⁻¹.an⁻¹ pour une durée de 105h, soit 1,35 % du temps.

3.2.3. *Transferts vers l'arrière de la digue par vent oblique à frontal (NNO à NNE)*

Deux expérimentations ont été menées pour ce type de vent. La première s'est déroulée lors de vents obliques en provenance de NNE. Trois piégeages ont été effectués pour des vitesses de vent moyennes comprises entre $10,3 \text{ m.s}^{-1}$ et $10,8 \text{ m.s}^{-1}$. Le transport potentiel sur la partie supérieure de la digue est estimé entre $0,30 \text{ m}^3.\text{m}^{-1}.\text{an}^{-1}$ et $0,38 \text{ m}^3.\text{m}^{-1}.\text{an}^{-1}$. En effet, cette forte vitesse de vent conjuguée à cette direction ne s'est produite que pendant 30 à 38h en 2011.

Pour des vents frontaux de NNO, les transferts de la plage (des dunes de pied de digue) vers l'arrière de la digue sont plus importants, mais la fréquence de ces vents est encore moins importante que celle des vents obliques : pour une vitesse moyenne de $10,5 \text{ m.s}^{-1}$, ce vent représente 0,09 % des conditions (7h en tout dans l'année), et il en résulte un transport de $0,12 \text{ m}^3.\text{m}^{-1}.\text{an}^{-1}$.

3.3. Répartition saisonnière de la vitesse et de la direction des vents pendant l'étude

L'étude de la distribution saisonnière des vents nous aidera à déterminer quelles sont les périodes potentiellement les plus propices aux vents les plus forts, qui sont à priori les périodes les plus propices au transport éolien. Nous porterons également une attention particulière à la part que représentent les vents longitudinaux, puisque ce sont ceux qui favorisent le transport sur le haut de plage lors de vents de vitesses intermédiaires.

3.3.1. Représentativité des conditions de vent pour la période d'étude

L'étude de la vitesse et de la provenance des vents en fonction des saisons sera réalisée à partir des données horaires 2010-2011 issues de la station météorologique du port Ouest de Dunkerque. Afin de connaître la représentativité de ces données, il convient tout d'abord de les comparer à des séries plus longues. Nous disposons pour cela de deux types de données différentes issues de la station Météo France à Dunkerque : les vents horaires de 1996 à 2010, et les vents trihoraires de 1991 à 2007. Pour chacune de ces séries complètes, les données de vitesse et direction ont été divisées en quatre classes, et la part de chaque classe par rapport au total a été calculée.

En ce qui concerne la vitesse (Figure 5.38 - A), les trois séries statistiques sont très proches. Les vents dont la vitesse est comprise entre 4 et 8 m.s⁻¹ sont les plus fréquents avec 44,6% du total en 2010-2011, et cette part est comprise entre 43,3% et 45,2% pour les deux séries de données longues. Les vents les plus forts (supérieurs à 12 m.s⁻¹) ne représentent que 3,2% du total en 2010-2011, alors qu'ils représentaient 3,6% de 1991 à 2007, et seulement 2,8% de 1996 à 2010.

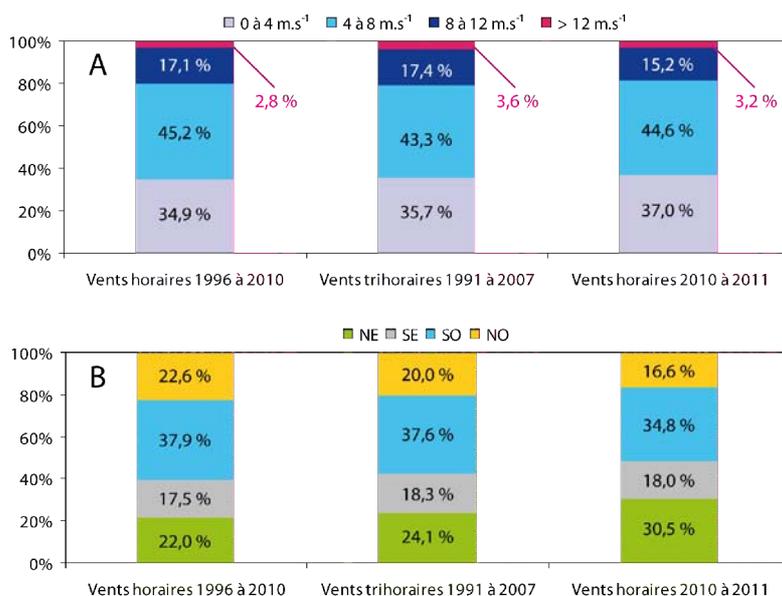


Figure 5.38. Répartition de la vitesse (A) et de la direction (B) des vents sur 3 séries temporelles différentes

L'analyse des provenances (Figure 5.38 - B) montre une légère sur-représentativité des vents du quart NE en 2010-2011 (30,5% contre 22% à 24% pour les deux autres séries) par rapport aux périodes plus longues, ce qui se fait au détriment des vents de NO (16,6%) et de SO (34,8%) dont les parts sont inférieures aux normales. Les vents du quart SE représentent 18% du total.

3.3.2. Répartition saisonnière des vents

→ *Printemps 2010 & 2011*

Au printemps, les vents parallèles à la côte sont majoritaires (59,6% du total), et proviennent à la fois de l'Est (27%) et de l'Ouest (32,6%). Cependant, cette période est caractérisée par une forte proportion de vents frontaux à obliques en provenance de N à NE (24,3%) (Tableau 5.5).

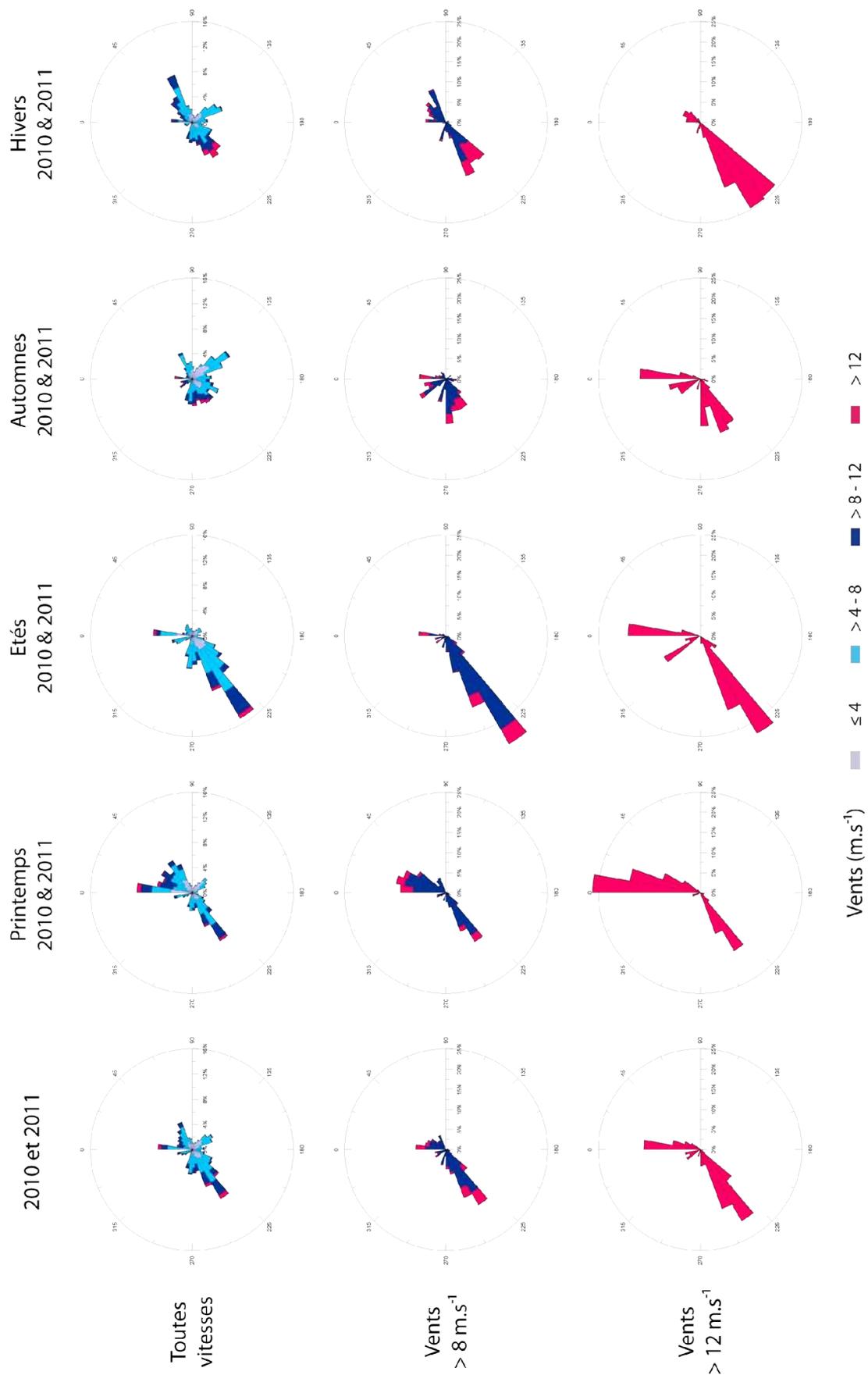


Figure 5.39. Répartition saisonnière des vents selon la vitesse (tous les vents, vents supérieurs à 8 m.s⁻¹ et vents supérieurs à 12 m.s⁻¹)

Les vents supérieurs à 8 m.s^{-1} représentent 19,2% du total des vents, mais seulement 3,2% sont supérieurs à 12 m.s^{-1} (Tableau 5.6). La rose des vents supérieurs à 8 m.s^{-1} montre que les vents propices au transport éolien proviennent essentiellement d'OSO avec 38,1% (ils sont parallèles à la côte) et de NNE avec 38,6% (vents obliques) (Figure 5.39). Les vents les plus forts ($> 12 \text{ m.s}^{-1}$) sont en grande majorité des vents obliques du NNE (58,8%), suivis par les vents longitudinaux d'OSO (32,4% du total) (Figure 5.39).

→ *Étés 2010 & 2011*

La saison estivale comporte une très forte part de vents longitudinaux (67,5%), et ceux-ci proviennent en très grande majorité du secteur OSO (56,1%) (Tableau 5.5 et Figure 5.39). Il s'agit également de la période la plus calme, puisque la part des vents supérieurs à 8 m.s^{-1} est de 14,8% seulement, et les vents supérieurs à 12 m.s^{-1} ne représentent que 2,3% du total (Tableau 5.6).

Les vents de plus de 8 m.s^{-1} proviennent à 81,6% d'OSO et sont parallèles à la côte, mais la distribution des vents supérieurs à 12 m.s^{-1} est plus contrastée : 59,8% proviennent d'OSO et 40,2% sont des vents frontaux et obliques, qui proviennent en majorité de Nord et du secteur NO (Figure 5.39).

→ *Automnes 2010 & 2011*

La période automnale est caractérisée par la forte proportion de vents de terre en provenance du secteur SE (36,2%) (Tableau 5.5), mais ces vents ne sont que très peu propices à la déflation éolienne comme en atteste la part des vents de plus de 12 m.s^{-1} qui est de 3,9% seulement (Figure 5.39).

Les vents intermédiaires dont la vitesse est comprise entre 8 et 12 m.s^{-1} proviennent d'Ouest et d'OSO à 50,5% (Tableau 5.6), et les vents frontaux représentent 29,4% du total. Les vents forts supérieurs à 12 m.s^{-1} proviennent des mêmes secteurs : 41,6% sont frontaux, et 53,9% sont parallèles et viennent d'Ouest à OSO (Figure 5.39).

→ *Hivers 2010 & 2011*

La principale caractéristique de la période hivernale est la très forte prépondérance des vents de plus de 12 m.s⁻¹ parallèles à la côte en provenance du secteur SO à OSO : leur part est de 75,9% du total de ces vents (Tableau 5.5). En revanche, les vents forts frontaux à obliques ne représentent que 13,8% du total, alors que leur part est de 40,2% minimum lors des autres saisons. Les vents intermédiaires (8 à 12 m.s⁻¹) sont aussi majoritairement parallèles à la côte, mais ils proviennent à la fois de l'Ouest (48,3%) et de l'Est (30,2%) (Figure 5.39).

Tableau 5.5. Pourcentages de vents en fonction de la saison et de la direction

	Toutes les vitesses				Vitesses > 8 m.s-1 et ≤ 12 m.s-1				Vitesses > 12 m.s-1			
	Printemps	Été	Automne	Hiver	Printemps	Été	Automne	Hiver	Printemps	Été	Automne	Hiver
Longitudinaux Ouest (>210° à ≤300°)	32,6%	56,1%	32,5%	35,0%	38,1%	81,6%	50,5%	48,3%	32,4%	59,8%	53,9%	75,9%
Longitudinaux Est (>30° à ≤120°)	27,0%	11,4%	19,3%	28,2%	20,1%	1,7%	8,3%	30,2%	6,9%	0,0%	0,6%	10,3%
Longitudinaux (total)	59,6%	67,5%	51,8%	63,2%	58,1%	83,3%	58,8%	78,5%	39,2%	59,8%	54,5%	86,2%
Frontaux (>300° à ≤360° et >0° à ≤30°)	24,3%	16,6%	12,0%	10,6%	38,6%	13,4%	29,4%	15,8%	58,8%	40,2%	41,6%	13,8%
De terre (>120° et ≤210°)	16,1%	16,0%	36,2%	26,2%	3,3%	3,3%	11,8%	5,7%	2,0%	0,0%	3,9%	0,0%

Tableau 5.6. Pourcentages des vents de plus de 8 m.s⁻¹ et de plus de 12 m.s⁻¹ selon les saisons

	2010-2011	Printemps	Été	Automne	Hiver
Vitesses > 8 m.s ⁻¹ et ≤ 12 m.s ⁻¹	15,2%	16,9%	12,5%	14,8%	16,8%
Vitesses > 12 m.s ⁻¹	3,2%	2,3%	2,3%	3,9%	4,6%

CONCLUSION DU CHAPITRE 5

Ce chapitre a permis de mettre en évidence les conditions optimales du transport éolien sur la façade maritime du GPMD. Sur la plage du Clipon, le transport maximal se produit lorsque le vent est supérieur à 11 m.s^{-1} . Cette observation a été réalisée par conditions de vent oblique, avec un fetch réduit. Lors de vents moins forts le transport était plus faible, même lors de conditions de fetch maximal (vent parallèle à la côte).

Pour des vitesses de vent moins élevées (9 à 11 m.s^{-1}), le transport éolien est plus important par vent longitudinal, et le transport maximal se produit en pied de dune dans ce cas. Le transfert de sable de la plage vers la dune se fait préférentiellement lors de vents forts obliques à la côte (NNE). Ceci est valable pour la partie centrale des dunes du Clipon ainsi que pour le secteur de la plateforme intertidale à l'Ouest. En revanche à l'Est (profil S2), la falaise sableuse ne bénéficie pas de ces apports en raison de sa localisation en aval d'encrochements.

Sur la digue du Braek, le transport maximal s'est également produit lors des vents les plus forts, supérieurs à 11 m.s^{-1} , ce qui confirme les résultats obtenus au niveau de la plage du Clipon. Ces observations laissent penser que lorsque la vitesse du vent est suffisante et la source de sable abondante, le transport est potentiellement maximal quelque soit la direction du vent.

Les transferts de sable de la plage vers la digue sont liés aux dunes de pied de digue. Ce sont ces dunes qui semblent être la principale source de sable des accumulations que l'on retrouve sur la route qui se situe en arrière de la digue, ainsi que dans le bassin maritime. La mobilisation du sable est permise par le faible couvert végétal de ces dunes, ainsi qu'au fait qu'il s'agit d'un stock de sable toujours sec en l'absence de précipitations, contrairement à l'estran qui est soumis à l'influence de la marée.

Les transferts sont donc fortement liés à la direction du vent et se produiront lors de conditions frontales de NNO, obliques de NNE et longitudinales de NE à ENE. Le transport éolien des dunes vers la digue est facilité par une accélération de la vitesse du vent due à la forme du versant externe (speed-up), et le dépôt qui se produit en arrière est dû à une forte

décélération (speed-down), puisque le revers se trouve en situation d'abri par ces conditions de vent.

Dans le chapitre suivant, nous comparerons des procédés de captage favorisant le dépôt du sable, afin de trouver le meilleur procédé pour renforcer le cordon dunaire de la plage du Clipon, et pour limiter les transferts de sable de la plage vers la digue.

CHAPITRE 6 - QUANTIFICATION DE L'ACCUMULATION EOLIENNE A L'AIDE DE STRUCTURES BRISE-VENT

INTRODUCTION

Ce chapitre sera divisé en deux parties :

→ En premier lieu, les résultats obtenus dans les structures de captage installées sur la plage du Clipon seront présentés. L'implantation de ces structures répondait à trois objectifs différents :

- Le comblement d'une brèche dunaire (C3c)
- L'évaluation de l'efficacité de deux structures identiques (C1 et C2) placées en pied de dune à deux endroits différents le long de la plage.
- L'évaluation de 4 procédés de renforcement du pied de dune (C3a, C3b, C3d, C3e) situés à une distance proche les uns des autres, pour qu'ils soient soumis aux mêmes conditions, afin de pouvoir les comparer.

→ Les résultats obtenus dans les structures tests installées sur la digue du Braek seront ensuite analysés. La quantité de sable captée par chacune d'entre-elles sera comparée selon leur localisation le long de la digue (à l'Est, au centre ou à l'Ouest), ainsi qu'en fonction de leur position transversale sur la digue (versant interne ou externe, au contact du sable, etc.).

1. Structures de captage du sable sur la plage du Clipon

L'analyse des quantités de sable captées a été mise en relation essentiellement avec les conditions de vents de chaque période (vitesse et direction). En plus des conditions de vent, les précipitations cumulées ont été calculées, et les niveaux d'eau marégraphiques supérieurs aux PMVE (3,357 m NGF au port Est et 3,556 au port Ouest) et aux PHMA (3,787 m NGF au port Est et 4,036 m NGF au port Ouest)) ont été recensés. Le détail de l'ensemble de ces données est disponible en annexe (annexe 6). En ce qui concerne les niveaux d'eau, une attention particulière a été portée aux événements potentiellement érosifs qui ont été définis par les hauteurs d'eau supérieures aux PMVE associées à un vent fort supérieur ou égal à 12 m.s^{-1} . Sept événements correspondant à cette description ont été relevés, ils seront mentionnés lors des périodes où ils sont intervenus. Afin de replacer visuellement les structures par rapport aux niveaux d'eau, les PHMA ont été représentées par une ligne rouge sur les différentiels topographiques qui seront présentés. En plus de l'ensemble de ces informations, les données de vagues au niveau de la bouée Vergoyer seront utilisées

lorsqu'elles sont disponibles, étant donné le nombre important de lacunes à ce niveau (chapitre 2).

Afin de faciliter la lecture en ce qui concerne l'emplacement des quadrats, le lecteur pourra se référer à la carte de localisation (Figure 6.1).

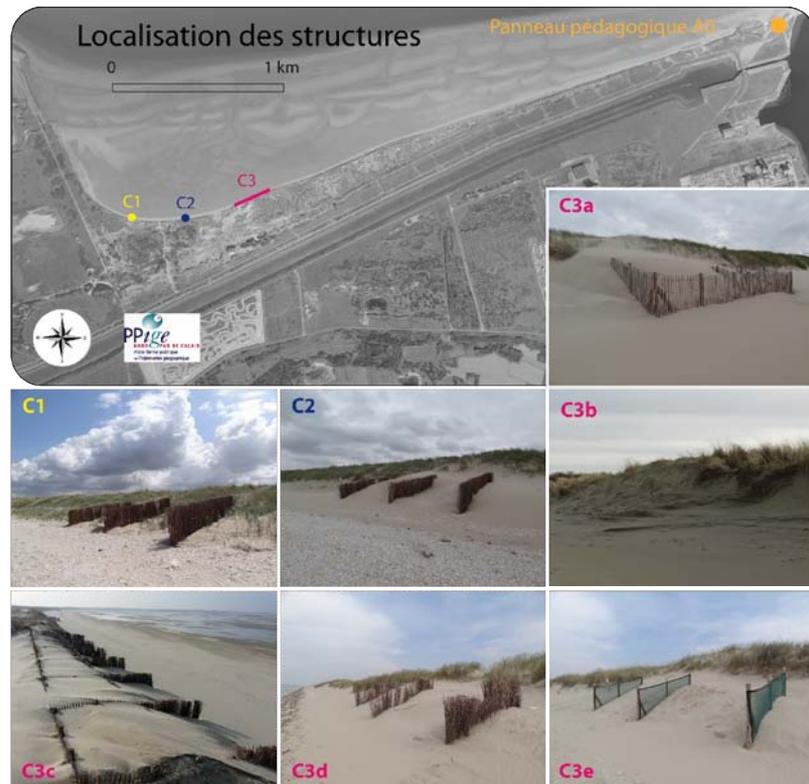


Figure 6.1 Carte de localisation des structures de captage du sable sur la plage du Clipon (clichés Tresca 2011 et photographie aérienne © PPIGE, 2005)

1.1. Analyse de l'évolution des structures à l'aide de la cartographie différentielle des Modèles Numériques de Terrain

1.1.1. Période du 30.07.2010 au 30.08.2010

Lors de cette première période d'été 2010, les vents d'Ouest dominaient fortement (68,5 %), tandis que les vents d'Est étaient quasiment absents (3,6 %). Les vents supérieurs à 12 m.s^{-1} représentaient 6 % du total, et provenaient d'OSO (longitudinaux) et de Nord à NNO (obliques à frontaux) (Figure 6.2). La quantité de précipitations a atteint 105 mm. Le nombre de niveaux d'eau supérieurs aux PMVE a été de 24 au port Est et 13 au port Ouest. Trois événements potentiellement morphogènes ont été recensés vers le milieu de la période (Figure 6.3). Les deux premiers se sont produits à une heure d'intervalle le 15.08.2011 (15h et 16h).

Les hauteurs d'eau enregistrées ont été de 3,469 m NGF et 3,431 m NGF, et ils se sont produits lors de vents forts d'afflux (respectivement $15 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ pour une provenance 10° et $14,9 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ pour une provenance 360°). Le troisième a eu lieu le lendemain (16.08.2011 à 04h) et a atteint 3,411 m, pour une direction frontale de nouveau (330°) et une vitesse de $12,9 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$.

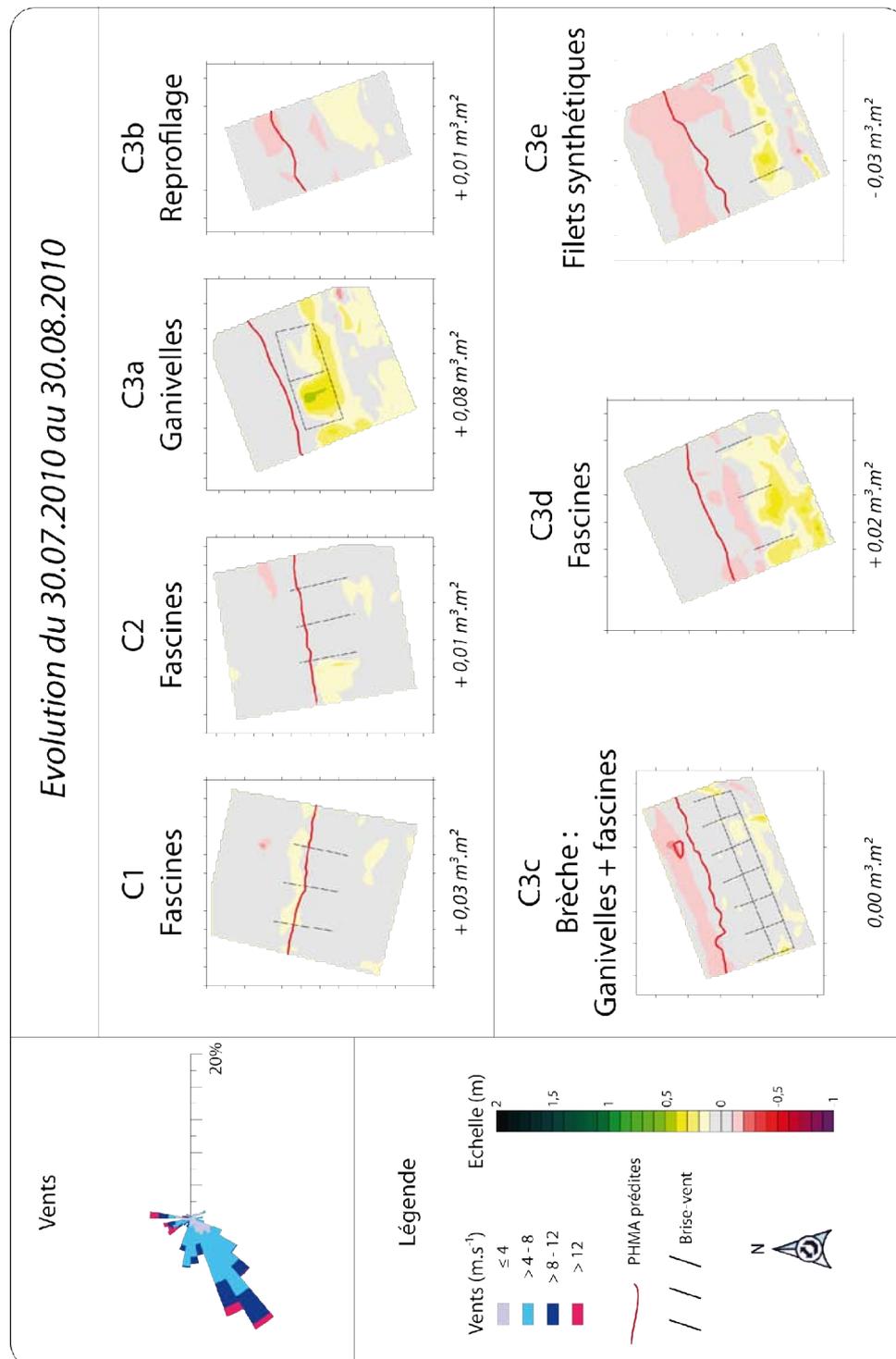


Figure 6.2 Rose des vents et cartographie différentielle des quadrats contenant des dispositifs de renforcement de la dune bordière entre le 30.07.2010 et le 30.08.2010

L'accumulation dans les quadrats est modérée, comprise entre $-0,03 \text{ m}^3.\text{m}^2$ pour les filets synthétiques à l'Est, et $+0,08 \text{ m}^3.\text{m}^2$ au niveau des casiers de ganivelles (Figure 6.2). On remarque que de l'érosion s'est produite sur le haut de plage, surtout dans les quadrats situés les plus à l'Est (C3b à C3e), ce qui peut être attribué aux niveaux d'eau potentiellement morphogènes évoqués précédemment.

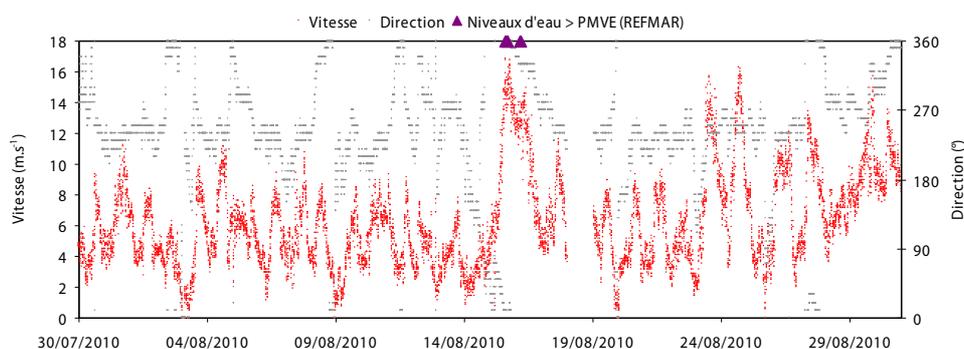


Figure 6.3 Conditions de vent à la station de l'avant –port Ouest entre le 30.07.2010 et le 30.08.2010

La répartition du sable au sein des quadrats s'est faite préférentiellement en arrière des structures. Bien que les vents dominants proviennent du secteur OSO et soient parallèles à la côte, un coup de vent de N à NNO à la fin de la période (29 et 30.08.2010), caractérisé par des vents supérieurs à 12 m.s^{-1} a probablement exporté le sable vers l'arrière des brise-vent (Figure 6.2). Ce phénomène est particulièrement prononcé au niveau des structures composées de rangées parallèles aux vents de NNO (C3d, C3e), qui peuvent avoir pour effet de canaliser ces vents ce qui faciliterait le transfert vers la dune (Anthony et al., 2007b). En revanche, les casiers (C3a) ont permis de retenir davantage de sable à l'intérieur de la structure (fig. 6.2). Il s'agit en effet d'une structure de ganivelles fermée, ce qui a pu limiter cet effet de canalisation vers l'arrière, et provoqué le dépôt du sable à l'intérieur.

1.1.2. Période du 30.08.2010 au 13.09.2010

Lors de cette deuxième période de suivi de la fin de l'été, la distribution des vents était très différente de la précédente. Les vents de terre (ESE à SSO) étaient largement dominants (61,6 %), et la quantité de vents supérieurs à 12 m.s^{-1} était très réduite (0,6 %) (Figure 6.4). Les précipitations ont été peu abondantes (28,9 mm), et les hauts niveaux d'eau (au dessus des PMVE) légèrement moins nombreux qu'au mois d'août (20 au port Est, 17 au port Ouest).

L'accumulation de sable dans les quadrats a été très limitée au niveau de la brèche et des filets synthétiques (+0,02 m³.m²) (Figure 6.4). Deux quadrats ont eu un volume stable (fascines C2 et casiers de ganivelles C3a), et les trois dernières structures ont perdu du sable (fascines C1, fascines C3d et reprofilage C3b) (Figure 6.4).

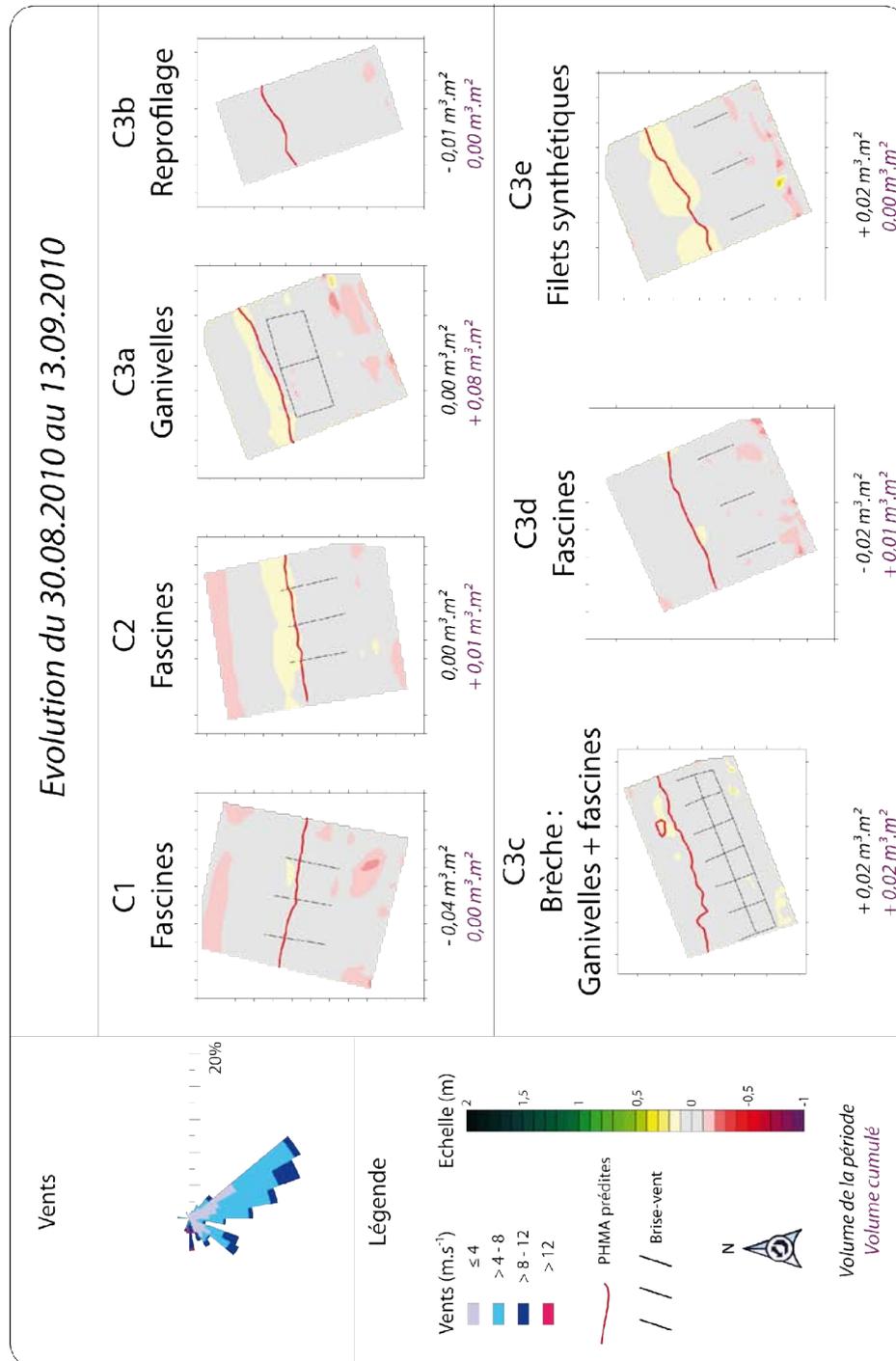


Figure 6.4 Rose des vents et cartographie différentielle des quadrats contenant des dispositifs de renforcement de la dune bordière entre le 30.08.2010 et le 13.09.2010

Cette faible efficacité des structures peut être expliquée par la très faible quantité de vents propices à la déflation éolienne durant cette période. En effet, 79 % des vents ont été inférieurs ou égaux à 8 m.s^{-1} . Or, il a été constaté lors des piégeages *in situ* (chapitre 5) que le transport éolien se produisait essentiellement lors des vents les plus forts. Ce faible transport pourrait expliquer cette faible accumulation, malgré une quantité de précipitations réduite et un nombre de hauts niveaux d'eau plus faible.

Les vents supérieurs à 8 m.s^{-1} proviennent essentiellement du secteur SSE lors de cette période, et ont contribué à rabattre du sable du versant dunaire vers l'avant des structures, sur le haut de plage. Ce transfert de l'arrière vers l'avant se traduit par une légère érosion sur le versant dunaire et une accumulation sur le haut de plage, au niveau de la ligne des PHMA (Figure 6.4). Ce phénomène est particulièrement bien visible au niveau des fascines (C2), des casiers de ganivelles (C3a), et des filets synthétiques (C3e), quelque soit donc le type de matériau.

1.1.3. Période du 13.09.2010 au 28.09.2010

Cette troisième période se situe à la fin de l'été et au début de l'automne. Les vents d'OSO ont fortement dominé (61,9 %), suivis des vents de secteur NNO à N (19,8 %) (Figure 6.5). La part des vents forts est la plus importante parmi toutes les périodes de suivi, avec 31,2 % de vitesses supérieures à 8 m.s^{-1} , et surtout 9,2 % supérieures à 12 m.s^{-1} . Les vents de terre représentaient 14,7 %, mais il s'agissait essentiellement de vents faibles. Le nombre de niveaux d'eau supérieur aux PMVE était bas (9 au port Est et 6 au port Ouest), et la quantité de précipitations faible (36,5 mm).

L'érosion est généralisée sur l'ensemble des quadrats, et elle s'est produite essentiellement sur le haut de plage (Figure 6.5). Les vents forts d'Ouest ont pu potentiellement créer un transport important en raison d'un long fetch sur le haut de plage sec, mais un coup de vent de Nord à la fin de période a érodé les volumes de sable accumulés dans les structures. Il s'agit de l'épisode érosif décrit lors de l'analyse des profils de plage (chapitre 4) qui s'est produit le 26.09.2010, soit deux jours avant le levé topographique dans les quadrats (Figure 6.6). Pour rappel, lors de cette journée le niveau d'eau a atteint 3,846 m NGF (port Ouest), il s'agit d'une hauteur inférieure aux PHMA, dont l'altitude est matérialisée par une ligne rouge sur les MNT (Figure 6.5).

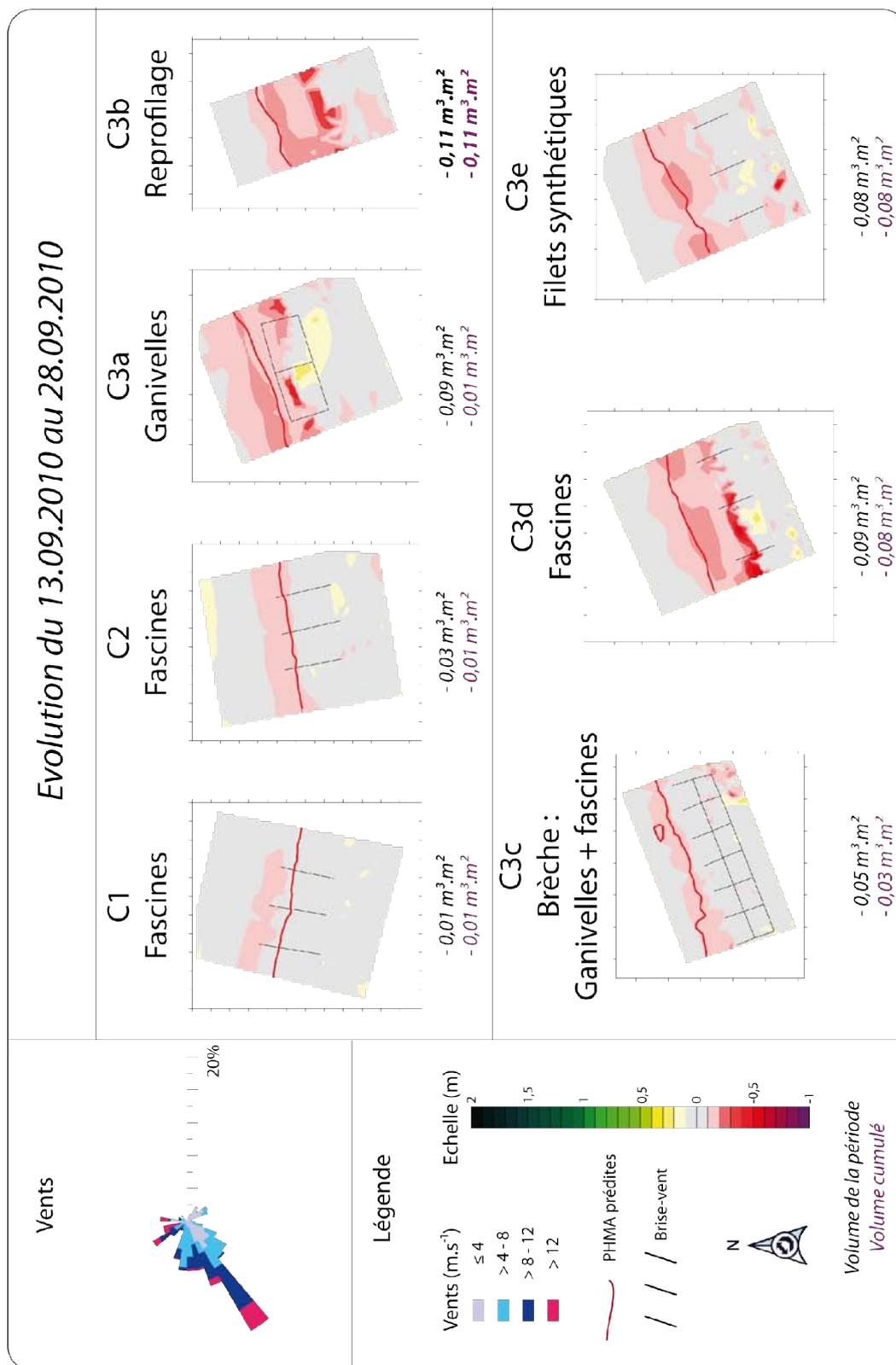


Figure 6.5 Rose des vents et cartographie différentielle des quadrats contenant des dispositifs de renforcement de la dune bordière entre le 13.09.2010 et le 28.09.2010

L'agitation du plan d'eau ainsi que les vents d'afflux de NNO ayant soufflé jusqu'à 17 m.s^{-1} ont provoqué de l'érosion par les vagues à l'intérieur des structures, et une microfalaise d'érosion s'est créée dans trois quadrats (Figure 6.7) : dans les casiers de ganivelles (C3a) ($-0,09 \text{ m}^3.\text{m}^2$), en pied de dune au niveau du reprofilage dunaire (C3b : $-0,11 \text{ m}^3.\text{m}^2$) et dans les rangées de fascines de 3 m (C3d) ($-0,09 \text{ m}^3.\text{m}^2$), ce qui est matérialisé sur les MNT par une couleur rouge foncée (Figure 6.5). La base des structures des quadrats C3a (ganivelles) et C3d (fascines de 3 m) étaient situées à une altitude de respectivement 4,139 m NGF et 4,275 m NGF. L'altitude plus élevée à laquelle ont été installés les filets synthétiques (4,391 m NGF) et la structure de comblement de brèche (4,483 m NGF) explique qu'elles n'aient pas été atteintes par les vagues et donc l'absence de falaise dunaire. L'érosion est moins marquée dans ces secteurs (C3c : $-0,05 \text{ m}^3.\text{m}^2$ et C3e $-0,08 \text{ m}^3.\text{m}^2$) (Figure 6.5).

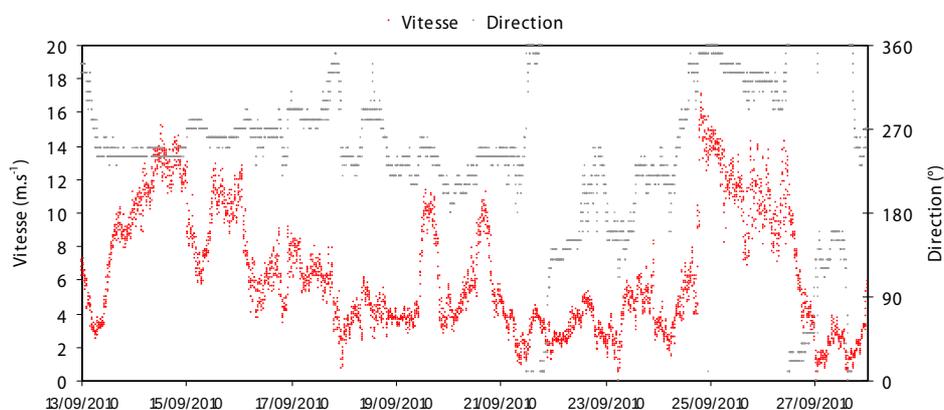


Figure 6.6 Conditions de vent à la station de l'avant-port Ouest entre le 13.09.2010 et le 28.09.2010



Figure 6.7 Photographies des structures C3a, C3b et C3d le 28.09.2010 (cliché Tresca)

Plus à l'Ouest, au niveau de la plateforme intertidale, le sable accumulé entre les rangées de fascines de 6 m de long (C1 et C2) a été moins érodé que dans les autres quadrats ($-0,01 \text{ m}^3.\text{m}^2$ et $-0,03 \text{ m}^3.\text{m}^2$ – Figure 6.5), malgré une localisation plus basse, en deçà des

PHMA. Le pied de la structure C1 est situé à une altitude de 3,866 m NGF et C2 à 3,931 m NGF. Le plan d'eau s'en trouverait moins agité du fait de la dissipation de l'énergie sur la plateforme intertidale, et donc l'érosion par les vagues serait moins prononcée, ce qui confirme les observations faites au niveau des profils topographiques (chapitre 4).

1.1.4. Période du 28.09.2010 au 20.10.2010

Lors de cette période du début d'automne 2010, la part des vents supérieurs à 12 m.s⁻¹ était réduite à 0,7 %, et les vents compris entre 8 et 12 m.s⁻¹ représentaient 10,5 % du total. Les vents les moins propices au transport éolien étaient donc largement majoritaires avec 88,2 %. Sur l'ensemble des vents, 61 % étaient longitudinaux, dont 37,2 % en provenance d'ENE. Les vents de terre représentaient 27 %, et les vents frontaux seulement 12,1 %, mais ils comprennent les 0,7 % des vitesses les plus fortes (Figure 6.8). Les précipitations cumulées ont été de 44,7 mm et le nombre de niveaux d'eau au-delà des PMVE était de 21 à l'Est et 17 à l'Ouest.

La plupart des quadrats sont caractérisés par une érosion du haut de plage, probablement due au nombre élevé de hauts niveaux d'eau qui ont pu exporter du sable du haut vers le bas de plage (Figure 6.8). Néanmoins, dans les structures et en arrière, sur le versant dunaire, on observe de l'accumulation. Celle-ci est moins importante que l'érosion du haut de plage, et la variation volumétrique nette des quadrats qui en résulte est négative ou stable, comprise entre -0,05 m³.m² pour les fascines de 6 m à l'Ouest (C1) et un volume stable pour les ganivelles (C3a) au centre (Figure 6.8).

Comme lors de la première période (30.07.2010 au 30.08.2010) (Figure 6.2), l'exportation du sable vers l'arrière des structures a été permise par les vents les plus forts (supérieurs à 12 m.s⁻¹) qui ont été frontaux. Malgré leur faible fréquence, ils semblent avoir eu un rôle primordial dans la répartition du sable. En effet, les vents d'Est parallèles à la côte ont été nombreux, et pour cette direction de vent, le fetch sur le haut de plage est maximal pour l'ensemble des structures. Mais la vitesse des vents n'a certainement pas été suffisante pour créer assez de transport éolien, malgré une faible quantité de précipitations. Cette observation se révèle particulièrement vraie pour les fascines de 6 m de long les plus à l'Ouest du site (C1), où aucune accumulation ne s'est produite (Figure 6.8).

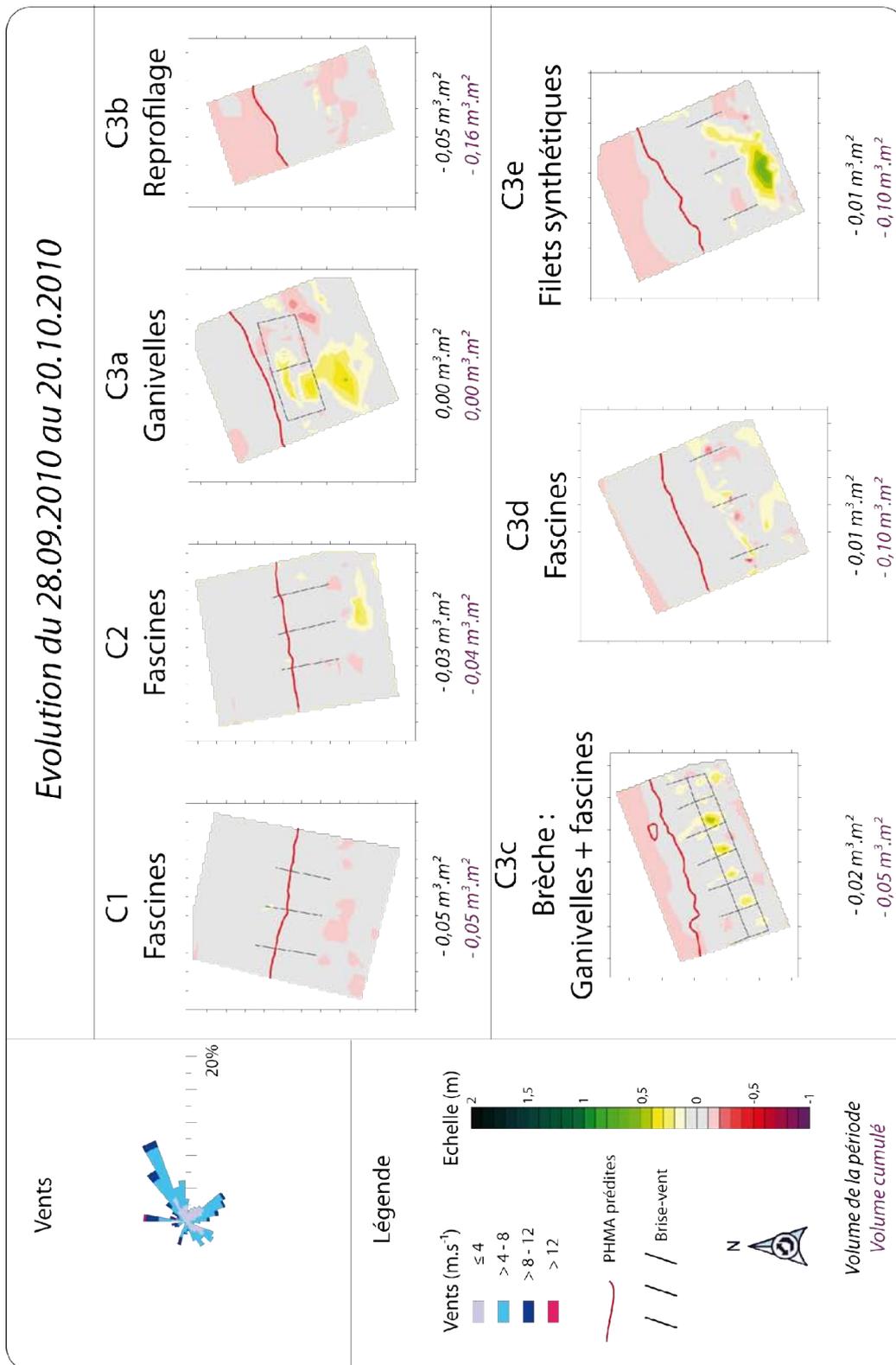


Figure 6.8 Rose des vents et cartographie différentielle des quadrats contenant des dispositifs de renforcement de la dune bordière entre le 28.09.2010 et le 20.10.2010

1.1.5. Période du 20.10.2010 au 21.12.2010

Cette période automnale a été particulièrement propice à l'accumulation du sable dans les structures (Figure 6.9). La rose des vents (Figure 6.10) montre qu'il n'existe pas de direction fortement dominante, contrairement aux autres périodes analysées jusqu'à maintenant : les vents les plus fréquents provenaient d'Ouest et étaient longitudinaux (39 %), devant les vents de terre (24,7 %), les vents d'Est (22 %) et les frontaux (14,1 %). Les vents les plus forts (supérieurs à 8 m.s^{-1}) sont également bien présents avec 22,3 %, dont 4,8 % supérieurs à 12 m.s^{-1} . Les données marégraphiques ont recensé un niveau d'eau potentiellement érosif au milieu de la période. La hauteur d'eau enregistrée le 10.11.2010 à 10h était de 3,384 m NGF, lors d'un vent d'afflux (30°) de $12,3 \text{ m.s}^{-1}$. Quant aux précipitations, elles ont été abondantes également, avec un total cumulé de 162,3 mm.



Figure 6.9 Photographies des structures C3a, C3c et C3e le 08.12.2010 (Clichés Tresca, 08.12.2010)

L'accumulation la plus importante se produit au niveau des ganivelles de 6 m de long implantées dans le secteur C2 avec $+0,16 \text{ m}^3.\text{m}^2$, et la moins forte au niveau du reprofilage de versant dunaire (C3b) avec $+0,04 \text{ m}^3.\text{m}^2$ (Figure 6.10). L'ensemble des quadrats où des brise-vent ont été installés ont capté plus de $0,1 \text{ m}^3.\text{m}^2$ (Figure 6.10). Dans tous les cas, l'accumulation s'est faite à l'intérieur des structures (Figure 6.9). La forte proportion de vents supérieurs à 12 m.s^{-1} en provenance d'OSO a sans doute favorisé la déflation sur le haut de plage et en pied de dune (cf. expérimentations *in situ* chapitre 5) où les structures ont intercepté le sable. Lors de vents forts, les précipitations ne sont pas toujours un obstacle au transport éolien, ce qui peut expliquer cette forte accumulation lors de cette période pluvieuse.

Ces vents forts d'OSO ont en outre probablement permis de « gommer » les effets du haut niveau d'eau avec vents d'afflux qui a pu éroder le haut de plage. Aucun signe d'érosion n'apparaît sur les différentiels, ce qui laisse penser que la récupération après une érosion du haut de plage peut être rapide.

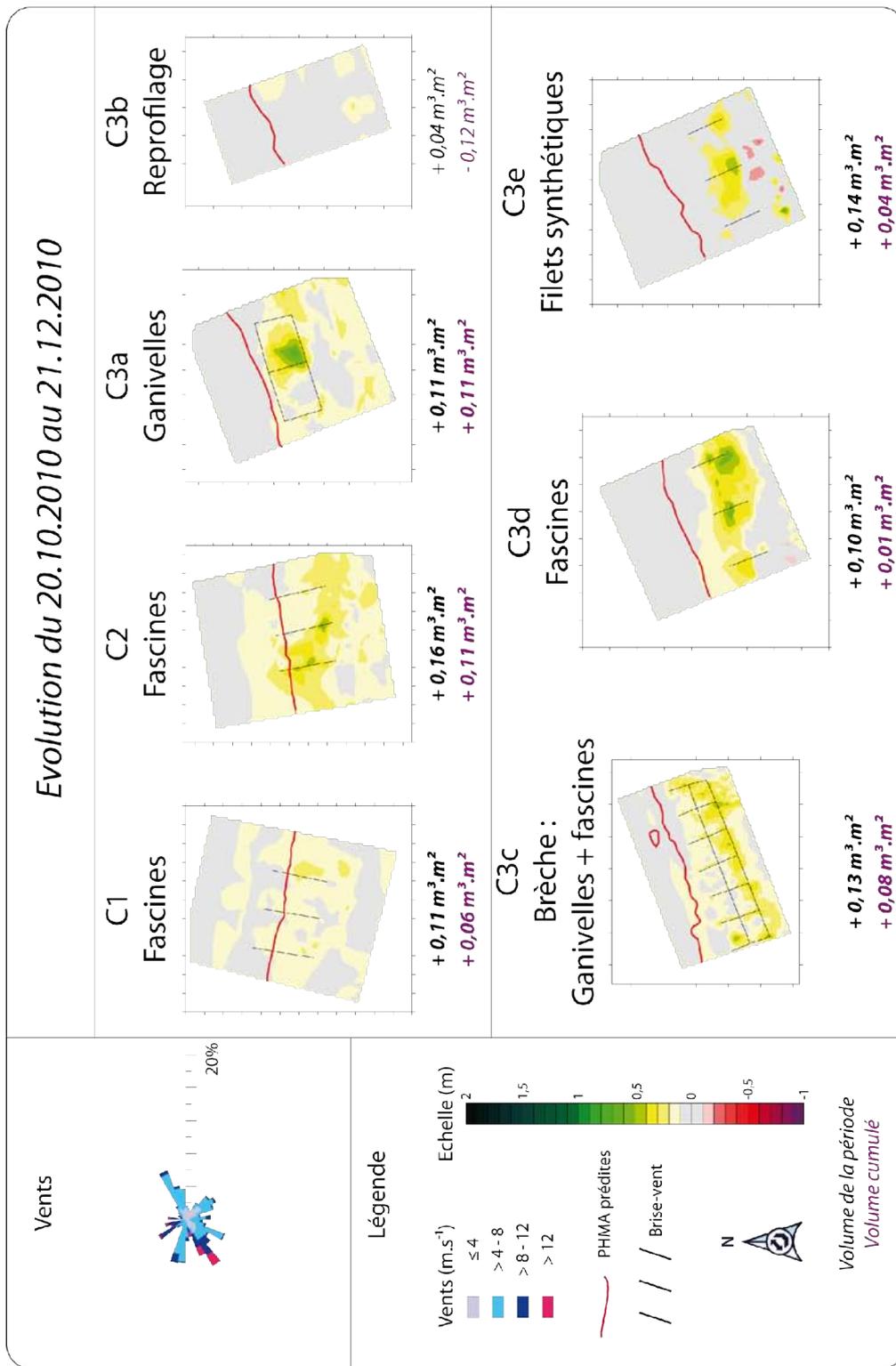


Figure 6.10 Rose des vents et cartographie différentielle des quadrats contenant des dispositifs de renforcement de la dune bordière entre le 20.10.2010 et le 21.12.2010

1.1.6. Période du 21.12.2010 au 28.01.2011

Cette période de la fin de l'automne a également été propice à l'accumulation dans les structures de captage du sable. La rose des vents est similaire à celle de la période précédente, aucune direction ne domine nettement. Les vents longitudinaux étaient cependant légèrement moins fréquents que précédemment (56 % contre 61 %), et les vents les plus forts plus présents. En effet, les vitesses supérieures à 8 m.s⁻¹ représentent 27,7 % du total, et celles supérieures à 12 m.s⁻¹ 5,6 % (Figure 6.11). Les précipitations ont été relativement peu abondantes (66,1 mm). Un niveau d'eau potentiellement érosif a été recensé en tout début de période (24.12.2010 à 16h) pour une hauteur de 3,499 m NGF, lors d'un vent oblique (40°) estimé à 13,5 m.s⁻¹ (Figure 6.12). Le nombre total de hauteurs d'eau supérieures aux PMVE est quant à lui peu élevé (14 à l'Est et 3 à l'Ouest).

Les trois structures situées les plus à l'Est ont capté davantage de sable : +0,17 m³.m² au niveau de la brèche dunaire (C3c), +0,11 m³.m² pour les fascines de 3 m (C3d) et +0,12 m³.m² pour les filets synthétiques (C3e) (Figure 6.11). Le volume du quadrat situé au niveau du reprofilage dunaire a été stable (C3b). A l'extrémité Ouest du site (fascines de 6 m - C1), l'accumulation est très faible (+0,02 m³.m²), puis elle augmente en direction de l'Est pour la deuxième structure en fascines (C2 : +0,04 m³.m²) et les casiers de ganivelles (C3a : +0,06 m³.m²) (Figure 6.11).

Dans l'ensemble des quadrats, le sable s'est déposé au sein des structures ainsi qu'en arrière (Figure 6.11). Le sable qui se trouve à l'intérieur s'est probablement déposé lors des vents forts longitudinaux où ils ont été captés sur le haut de plage sec. Cependant, en ce qui concerne le sable qui se trouve en arrière, sur le versant dunaire, il semble que les vents forts frontaux et obliques aient eu une forte influence. Cela est particulièrement visible sur les casiers de ganivelles (C3a) (Figure 6.11). Le sable se trouve à l'Ouest et en arrière de la structure, ce qui laisse penser que des vents forts frontaux à obliques se sont produits à la fin de la période, ce que l'on observe effectivement sur les séries temporelles (Figure 6.12).

On remarque également l'influence du fetch éolien sur les trois structures situées les plus à l'Ouest (C1, C2 et C3a). Les vents d'Ouest ont été les plus nombreux, et ils comprenaient une grande partie des vents les plus forts. Pour cette direction du vent, le fetch augmente d'Ouest en Est tout comme les volumes de sable capté (Figure 6.11). Cela est

confirmé par le fait que les structures installées à l'Est (C3c, C3d et C3e) ont intercepté davantage de sable que celles qui se trouvent à l'Ouest (Figure 6.11).

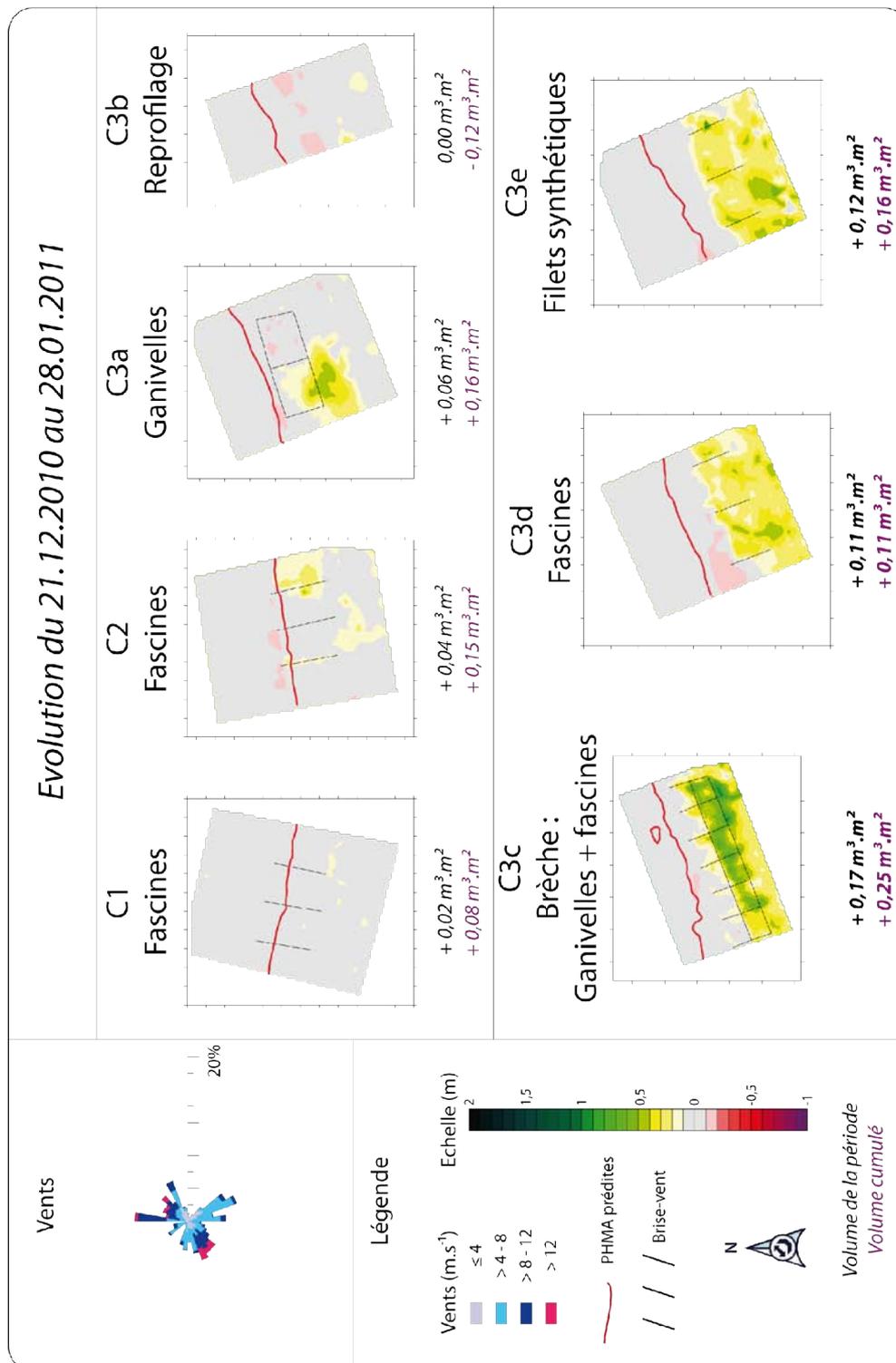


Figure 6.11 Rose des vents et cartographie différentielle des quadrats contenant des dispositifs de renforcement de la dune bordière entre le 21.12.2010 et le 28.01.2011

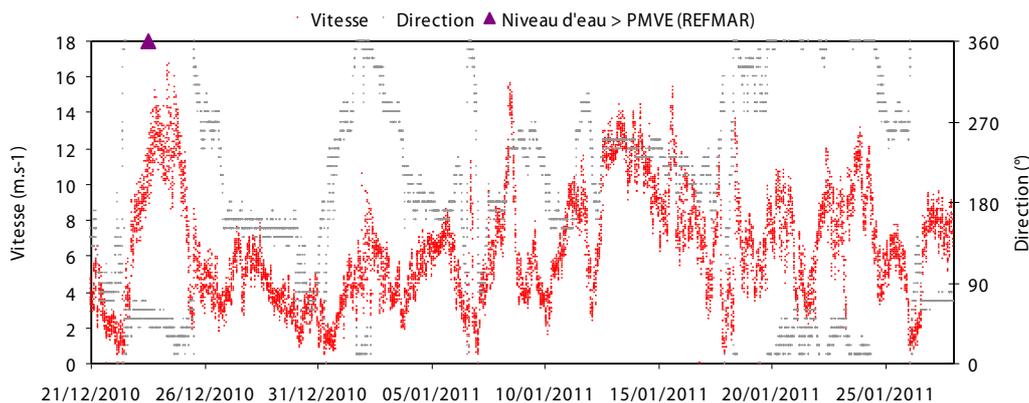


Figure 6.12 Conditions de vent à la station de l'avant-port Ouest entre le 21.12.2010 et le 28.01.2010

1.1.7. Période du 28.01.2011 au 11.04.2011

La période analysée ici se situe en hiver et au début du printemps 2011. Les vents longitudinaux représentent 72 % du total, dont 39,6 % en provenance du secteur Ouest, et 32,4 % du secteur Est (Figure 6.13). Les vents de terre représentent quant à eux 21,6 %. La part des vents compris entre 8 et 12 m.s⁻¹ a diminué de moitié par rapport à la période précédente avec 11,1 %, tandis que la part des vents supérieurs à 12 m.s⁻¹ est restée stable (5 %). La quantité totale de précipitations est similaire (61,4 mm), mais le nombre de niveaux d'eau supérieurs aux PMVE a augmenté (19 à l'Est et 16 à l'Ouest).

Bien que la part des vents longitudinaux d'Est et d'Ouest soit proche, les vents supérieurs à 12 m.s⁻¹ sont originaires à 100 % d'OSO. Parallèlement à ceci, les MNT différentiels montrent que dans les structures qui ont capté du sable, l'accumulation s'est produite à l'Est (ganivelles C3a et comblement de brèche C3c – Figure 6.13). Ceci tend à démontrer que ce sont les vents forts qui ont une influence prépondérante sur le transport du sable et donc sur son piégeage par les structures. La direction du vent serait donc un paramètre de deuxième ordre lorsque ces vents forts soufflent.

Trois structures ont gagné du sable : il s'agit des fascines de 6 m du secteur C2 (+0,07 m³.m²), des casiers de ganivelles (C3a : +0,08 m³.m²) et de la structure de comblement de brèche (C3c : +0,01 m³.m²) (Figure 6.13). Les quatre autres ont été en érosion pendant cette période. Les fascines de 6 m situées à l'extrême Ouest (C1 – Figure 6.13) n'ont pas pu être alimentées en sable en raison du fetch nul par vent d'OSO. Pour le quadrat C3b (Figure 6.13), aucune structure n'a été installée, ce qui n'a pas permis de provoquer le dépôt du sable lorsque celui transitait parallèlement à la côte sur le haut de plage.

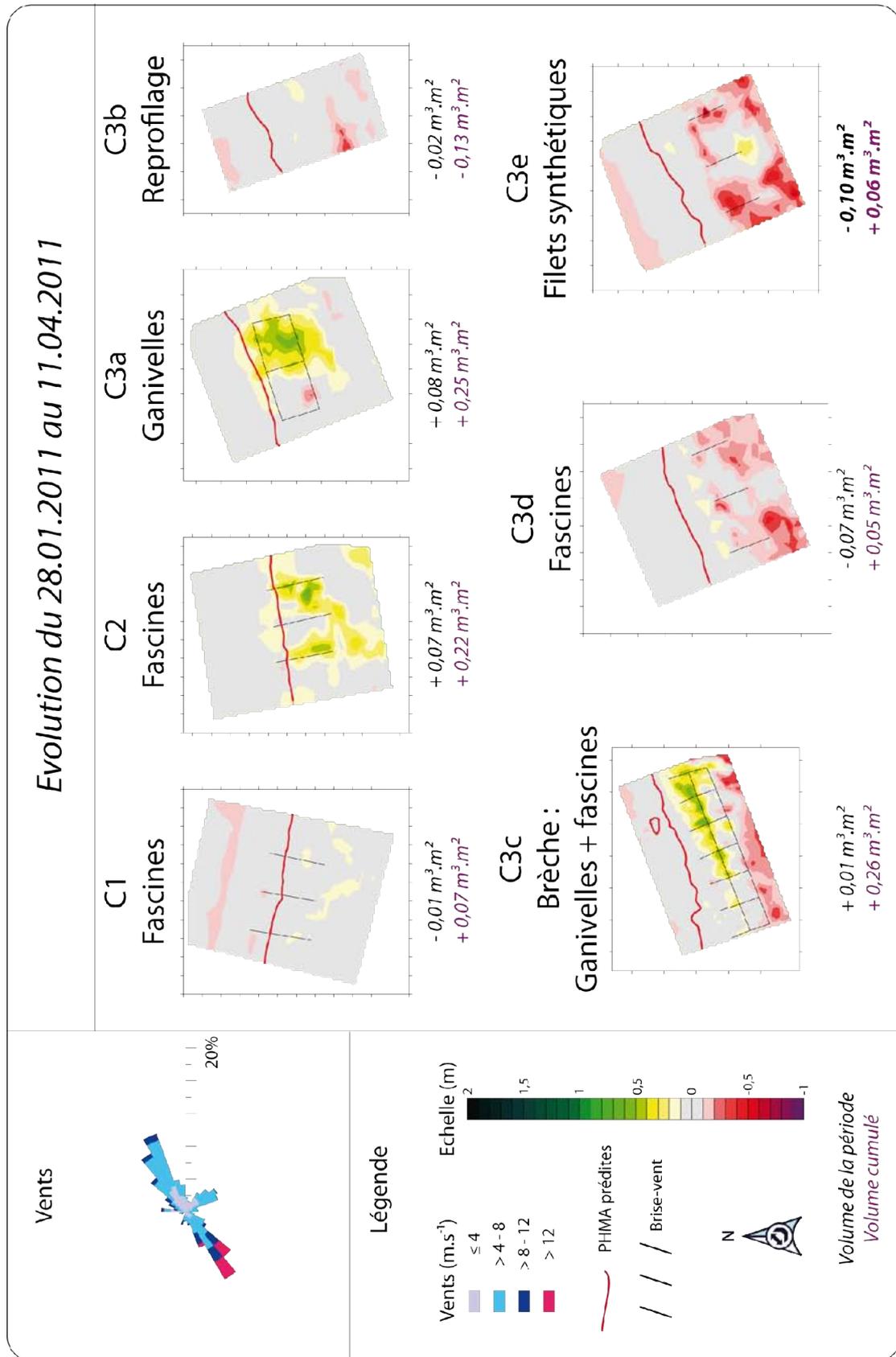


Figure 6.13 Rose des vents et cartographie différentielle des quadrats contenant des dispositifs de renforcement de la dune bordière entre le 28.01.2011 et le 11.04.2011

Les deux structures situées à l'Est (fascines C3d et filets synthétiques C3e – Figure 6.13) ont subi une forte érosion ($-0,07 \text{ m}^3.\text{m}^2$ et $-0,10 \text{ m}^3.\text{m}^2$), bien que le fetch lors de vents forts d'OSO ait été bien plus long pour celles-ci que pour les autres. En réalité, ces structures étaient déjà presque remplies de sable, ce qui a provoqué de la déflation au niveau de leur sommet, ainsi qu'un creusement en arrière dans certains cas (Figure 6.14 - C). On observe cela également pour la structure de comblement de brèche où les casiers de ganivelles étaient remplis, ce qui a permis au sable de les franchir pour se déposer à l'avant, entre les rangées de fascines (C3c – Figure 6.14 - A et B).



Figure 6.14 Photographies de la structure de comblement de brèche (C3c) (A & B) et des filets synthétiques (C) illustrant la déflation au dessus des structures (clichés Tresca, 11.04.2011)

1.1.8. Période du 11.04.2011 au 17.05.2011

Cette période se situe au milieu du printemps. Elle est caractérisée par une proportion importante de vents obliques en provenance du NNE (22,7 %) (Figure 6.15). Les vents supérieurs à 12 m.s^{-1} (1,5 %), en faible proportion, provenaient de ce secteur uniquement. En proportion, les vents longitudinaux restent malgré tout dominants (60,7 %), dont 32,3 % en provenance d'Est, contre 28,5 d'Ouest. En tout, 83,7 % des vitesses ont été inférieures ou égales à 8 m.s^{-1} . Les précipitations ont été très faibles (9,7 mm en cumulé) et 14 niveaux d'eau au dessus des PMVE ont été recensés au marégraphe du port Est, contre 6 au port Ouest.

Les volumes nets calculés à partir des MNT montrent que 6 quadrats sur 7 sont en accumulation, dont les valeurs sont comprises entre $+0,1 \text{ m}^3.\text{m}^2$ au niveau des fascines de 6 m à l'extrémité Ouest du site (C1) et $+0,06 \text{ m}^3.\text{m}^2$ pour la structure identique C2 située 400 m plus à l'Est (fig. 6.15). Une seule structure a un bilan négatif, il s'agit des filets synthétiques à l'Est (C3e), avec $-0,02 \text{ m}^3.\text{m}^2$ (Figure 6.15).

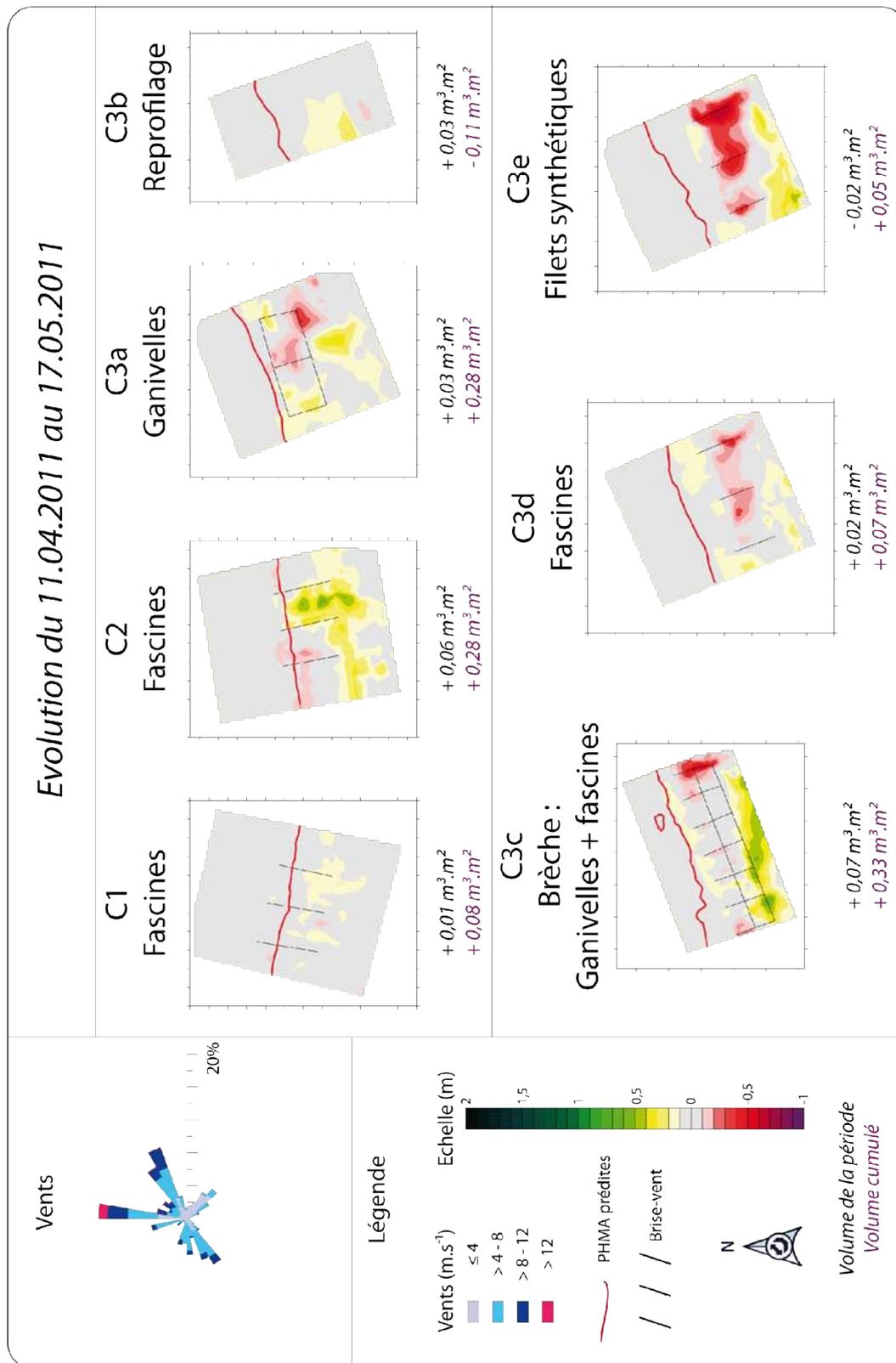


Figure 6.15 Rose des vents et cartographie différentielle des quadrats contenant des dispositifs de renforcement de la dune bordière entre le 11.04.2011 et le 17.05.2011

Bien que l'accumulation semble prédominer, l'observation des MNT révèle une situation contrastée. En effet, de l'érosion se produit dans presque toutes les structures, où les vents forts de Nord ont pris en charge le sable pour le déposer en arrière sur le versant dunaire, ou dans le couloir de déflation dans le cas de la structure de comblement de brèche. Les vents intermédiaires (entre 8 et 12 m.s⁻¹) en provenance d'Est ont été plus nombreux que ceux qui provenaient de l'Ouest, ce qui semble avoir favorisé le déplacement du sable vers l'Ouest des structures (Figure 6.15).

1.1.9. Période du 17.05.2011 au 30.06.2011

La rose des vents lors de cette période est caractérisée par une très forte proportion de vents d'OSO parallèles à la côte qui représentent 64 % du total (Figure 6.16). Les vents supérieurs à 8 m.s⁻¹ représentent presque un quart du total (23,4 %), dont 3 % sont supérieurs à 12 m.s⁻¹. La quantité cumulée de précipitations a été de 61,7 mm, et les hauts niveaux d'eau ont été peu nombreux (8 à l'Est et 3 à l'Ouest).

L'accumulation la plus forte s'est produite au niveau des rangées de fascines situées à l'avant de la structure de comblement de brèche (C3c, +0,13 m³.m²), ainsi qu'au niveau des casiers de ganivelles (C3a, +0,13 m³.m²) (Figure 6.16). L'accumulation a été plus modérée dans les autres quadrats (+0,07 m³.m² pour les fascines de 6 m - C2, les fascines de 3 m - C3d et les filets synthétiques - C3e). Au niveau de ces trois dernières structures, on observe une érosion en arrière, à l'Ouest, et une accumulation à l'Est. Par ces conditions de vent et lorsque les brise-vent ont déjà capté une importante quantité de sable, on observe de la déflation au sommet des structures, ainsi qu'en arrière (Figure 6.16), comme cela a déjà été évoqué (Figure 6.14). Plus l'accumulation est importante, plus elle constitue un obstacle important pour le vent qui vient s'y heurter. Il en résulte un creusement en amont de la butte de sable, et une accumulation en aval. C'est ce qui se produit ici, de manière plus prononcée au niveau des ganivelles (C3a) et des filets synthétiques (C3e) (Figure 6.16). On n'observe pas ce phénomène en revanche en arrière de la structure de comblement de brèche, puisque celle-ci se trouve dans la continuité du cordon dunaire.

Le versant dunaire reprofilé a gagné 0,09 m³.m² (Figure 6.16 - C3b). Cette accumulation doit cependant être remise dans son contexte, puisque ce versant dunaire jouxte la structure de comblement de brèche qui se trouve directement à l'Est. Le quadrat du reprofilage a donc bénéficié des apports de sable en provenance de la structure située à l'Est.

Enfin, les apports sont toujours aussi faibles à l'Ouest (C1) en raison d'un fetch très réduit par ces conditions de vent.

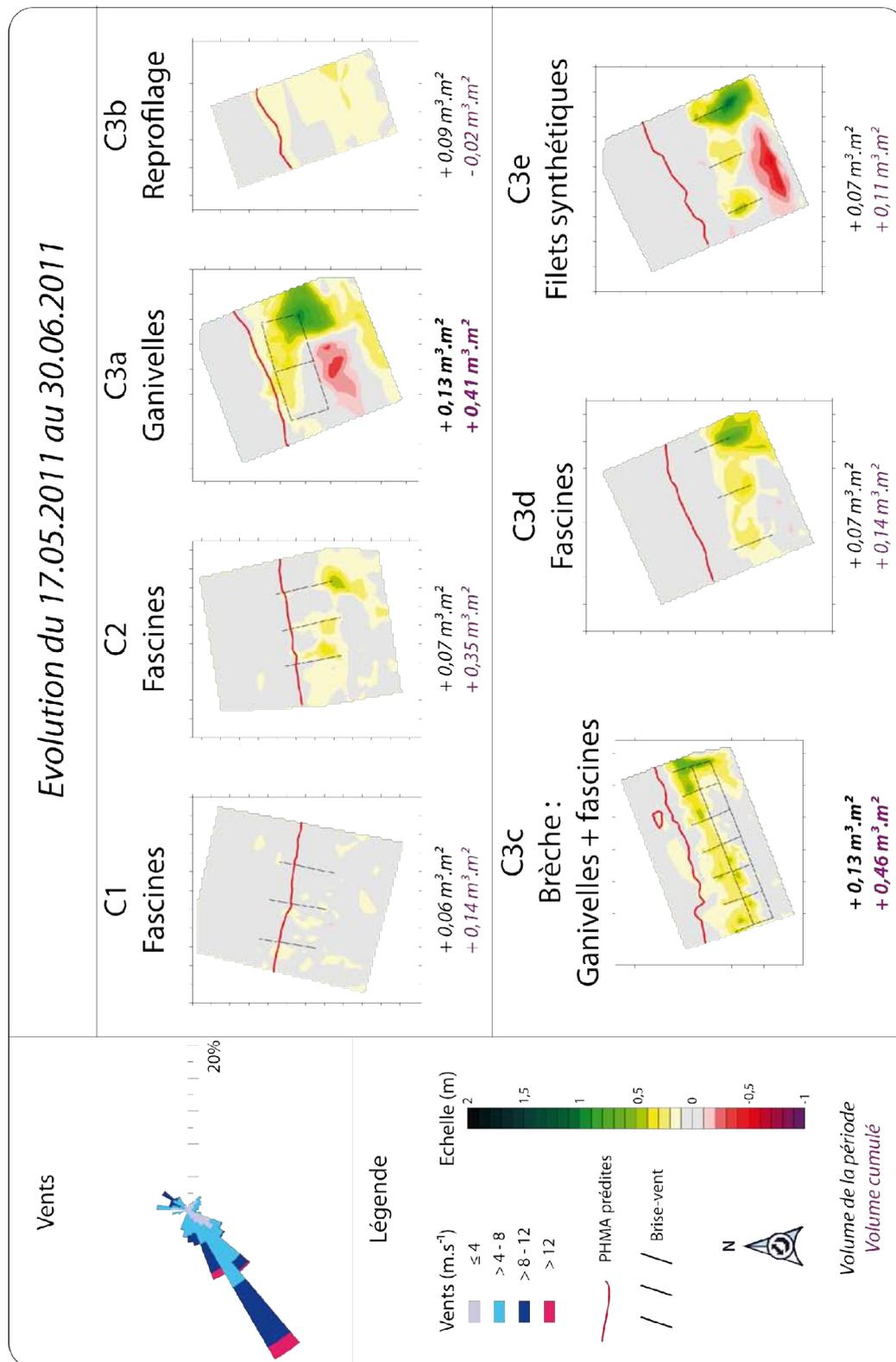


Figure 6.16 Rose des vents et cartographie différentielle des quadrats contenant des dispositifs de renforcement de la dune bordière entre le 17.05.2011 et le 30.06.2011

1.1.10. Période du 30.06.2011 au 26.10.2011

Cette dernière période de suivi est caractérisée par un nombre particulièrement important de niveaux d'eau supérieurs aux PMVE. Il en a été recensé 56 au marégraphe du port Est, et 29 pour le marégraphe du port Ouest pour une période de 3,5 mois. Parmi ces enregistrements, 2 hauteurs d'eau consécutives se sont produites conjointement à des vents forts (13 à 13,4 m.s⁻¹) en provenance d'OSO le 05.09.2011 (à 05h et 06h), soit en milieu de période.

La rose des vents est très proche de celle de la période précédente : les vents dominants d'OSO dominant largement (56,3 %), mais la part des vents de Nord est plus importante ici (17 %). Les vents supérieurs à 12 m.s⁻¹ sont moins nombreux en revanche, avec 2,1 %, et 16,2 % pour les vents supérieurs à 8 m.s⁻¹ (Figure 6.18).

Notons qu'au cours de cette période, un épisode d'érosion du haut de plage avec formation d'une microfalaise est intervenu le 31.08.2011 ; celui-ci a été détaillé dans le chapitre 4. Pour rappel, les niveaux d'eau maximaux mesurés ont été de 3,946 m NGF au port Ouest, et 3,777 m NGF au port Est. Les surcotes correspondantes ont été estimées à 0,33 m et 0,47 m. Une mesure au DGPS a pu également estimer l'altitude du pied de micro-falaise à l'aide d'un DGPS au niveau du profil C3 (à l'Est de la brèche C3c) à 4,109 m NGF. Cet épisode érosif a provoqué également de l'érosion à l'intérieur des structures, notamment au niveau des casiers de ganivelles où un micro-falaise de plus d'1 m de hauteur s'était formée (Figure 6.17).



Figure 6.17 Photographies de la structure en casiers de ganivelles (C3a) : au début du suivi (août 2010), avant (août 2011) et après (septembre 2011) l'épisode d'érosion du haut de plage du 31 août 2011 (clichés Tresca)

Cette érosion s'est produite 1,5 mois avant le levé topographique des quadrats, néanmoins les marques sont restées visibles dans certaines structures, en particulier dans les casiers de ganivelles (-0,06 m³.m²) (Figure 6.18). Bien que la micro-falaise ait disparu au

moment des mesures le 26.10.2011, sa présence a provoqué un effondrement des stocks de sable situés plus haut et en arrière de la structure. Il en résulte un niveau de sable globalement moins haut, ce qui explique cette érosion.

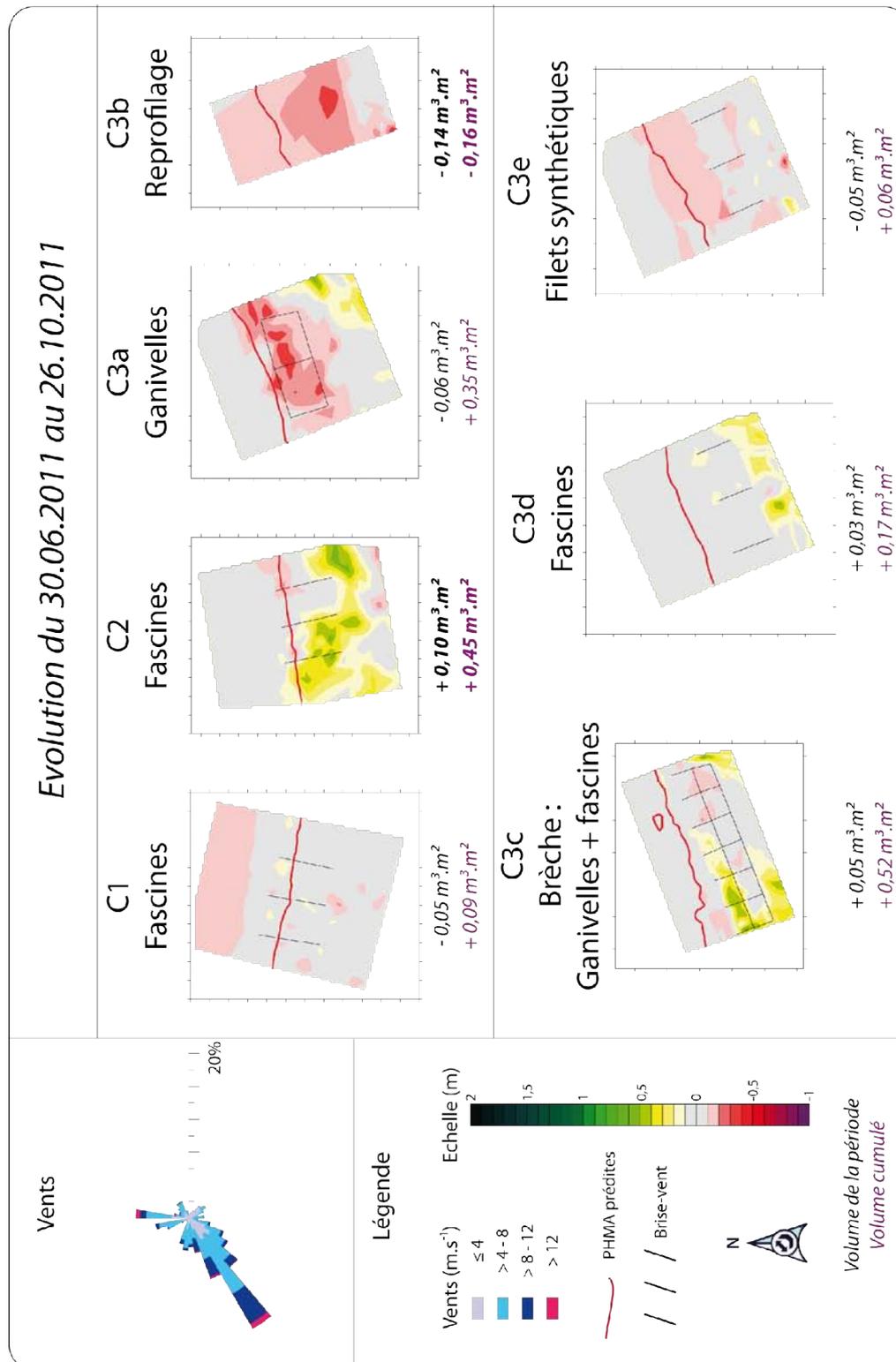


Figure 6.18 Rose des vents et cartographie différentielle des quadrats contenant des dispositifs de renforcement de la dune bordière entre le 17.05.2011 et le 30.06.2011

Au niveau du versant dunaire reprofilé, le pied de dune a été érodé, et les marques de cette érosion sont toujours visibles le 26.10.2011 ($-0,14 \text{ m}^3.\text{m}^2$) (Figure 6.18). La structure de comblement de brèche quant à elle n'avait pas été atteinte du fait de son positionnement à une altitude supérieure (4,483 m NGF). Parmi les structures situées à l'Est, les fascines de 3 m (C3d) ont mieux récupéré ($+0,03 \text{ m}^3.\text{m}^2$) que les filets (C3e) ($-0,05 \text{ m}^3.\text{m}^2$) (fig. 6.18), bien que l'érosion y ait été plus importante (Figure 6.19 - C & D).

Les fascines situées à l'extrémité Ouest du site (C1) n'ont pas été touchées par l'érosion, bien que l'on puisse observer la laisse de mer à l'intérieur de la structure, et malgré leur positionnement (base de la structure à 3,866 m NGF) (Figure 6.19 - A). Cela confirme que cette partie du site se trouve en situation d'abri.



Figure 6.19 Photographies des structures C1 – fascines de 6 m (A), C2 – fascines de 6 m (B), C3d – fascines de 3 m (C) et C3e – filets synthétiques (D) le 31.08.2011 (clichés Tresca)

A la suite de cette érosion, les mois de septembre et octobre sont restés agités de manière générale. L'enregistrement des données de vagues au niveau de la bouée Vergoyer au large de Boulogne-sur-Mer montre en outre que la hauteur maximale des vagues au large lors de l'épisode d'érosion a atteint 4,5 m (annexe 11). Par la suite, la hauteur maximale des vagues a pu atteindre 7,5 m le 06.09.2011, plus de 6 m le 12.09.2011 (annexe 11), ou encore 6 m les 06 et 10.10.2011 (annexe 11), ce qui témoigne de l'agitation lors de cette période.

1.2. Bilan de l'efficacité des différentes structures de renforcement de la dune bordière

Sur l'ensemble de la période de suivi des structures du Clipon, la majorité des vents étaient longitudinaux (66,3 %), dont une forte part provenait du secteur Ouest (45 %), et les vents frontaux obliques représentaient 14,1 % des observations (Figure 6.20). Les vents de terre provenant du secteur Sud à SSE ont quant à eux soufflé 19,6 % du temps. En ce qui concerne la vitesse des vents, 31,6 % étaient inférieurs ou égaux à 4 m.s^{-1} , c'est-à-dire des vents inefficaces pour le transport éolien compte tenu de la granulométrie des sables de plage et du haut de plage de l'UG4. Les vents compris entre 4 et 8 m.s^{-1} représentaient 49,2 % du total. Pour les vents les plus forts, 15,6 % soufflaient à une vitesse comprise entre 8 et 12 m.s^{-1} , et ceux supérieurs à 12 m.s^{-1} n'ont représenté que 3,6 % du total.

A l'Ouest de la plage du Clipon, les structures en fascines de 6 m de long (C1 et C2) sont identiques. La structure C1, la plus à l'Ouest, a capté $0,09 \text{ m}^3.\text{m}^2$, tandis que C2, située à 400 m à l'Est, a capté une quantité de sable 5 fois plus importante, avec $0,45 \text{ m}^3.\text{m}^2$ (Tableau 6.1). Cette différence est attribuée en grande partie à la localisation vis-à-vis des vents dominants d'OSO. Le quadrat C1 se trouve en situation de fetch très réduit en raison de la provenance des vents dominants qui sont des vents de terre pour ce secteur, tandis que le fetch est bien plus long au niveau de C2 pour les mêmes vents. Cependant, par vent longitudinal d'Est, le fetch est plus long pour C1, qui capte tout de même moins de sable (Figure 6.8). La granulométrie, plus fine à l'Ouest (chapitre 3), ainsi que la végétation, plus développée en pied de dune dans le secteur du quadrat C1 (Figure 6.19 - A), ont certainement contribué à changer les modalités du transport éolien et à le réduire en provoquant le dépôt en amont de la structure.

En revanche, cette même structures C2 composée de fascines a provoqué une accumulation plus importante que pour les casiers de ganivelles plus à l'Est (C3a) ($0,35 \text{ m}^3.\text{m}^2$) (Figure 6.20 et Figure 6.21), alors que le fetch était moins long. De plus, les fascines étaient installées à une altitude inférieure à celle des ganivelles, elles étaient donc a priori plus exposées à l'érosion par les vagues (Ruz et Meur-Férec, 2004 ; Ruz et Anthony, 2008). En réalité, l'Ouest du site est moins exposé aux hauts niveaux d'eau du fait de sa situation d'abri en arrière de l'avant-port Ouest lors de conditions dominantes d'OSO. Le plan d'eau y est moins agité lors de coups de vent, alors que plus à l'Est, les structures étaient plus

exposées. L'érosion marine serait donc responsable de la moins bonne efficacité des structures situées à l'Est qu'à l'Ouest.

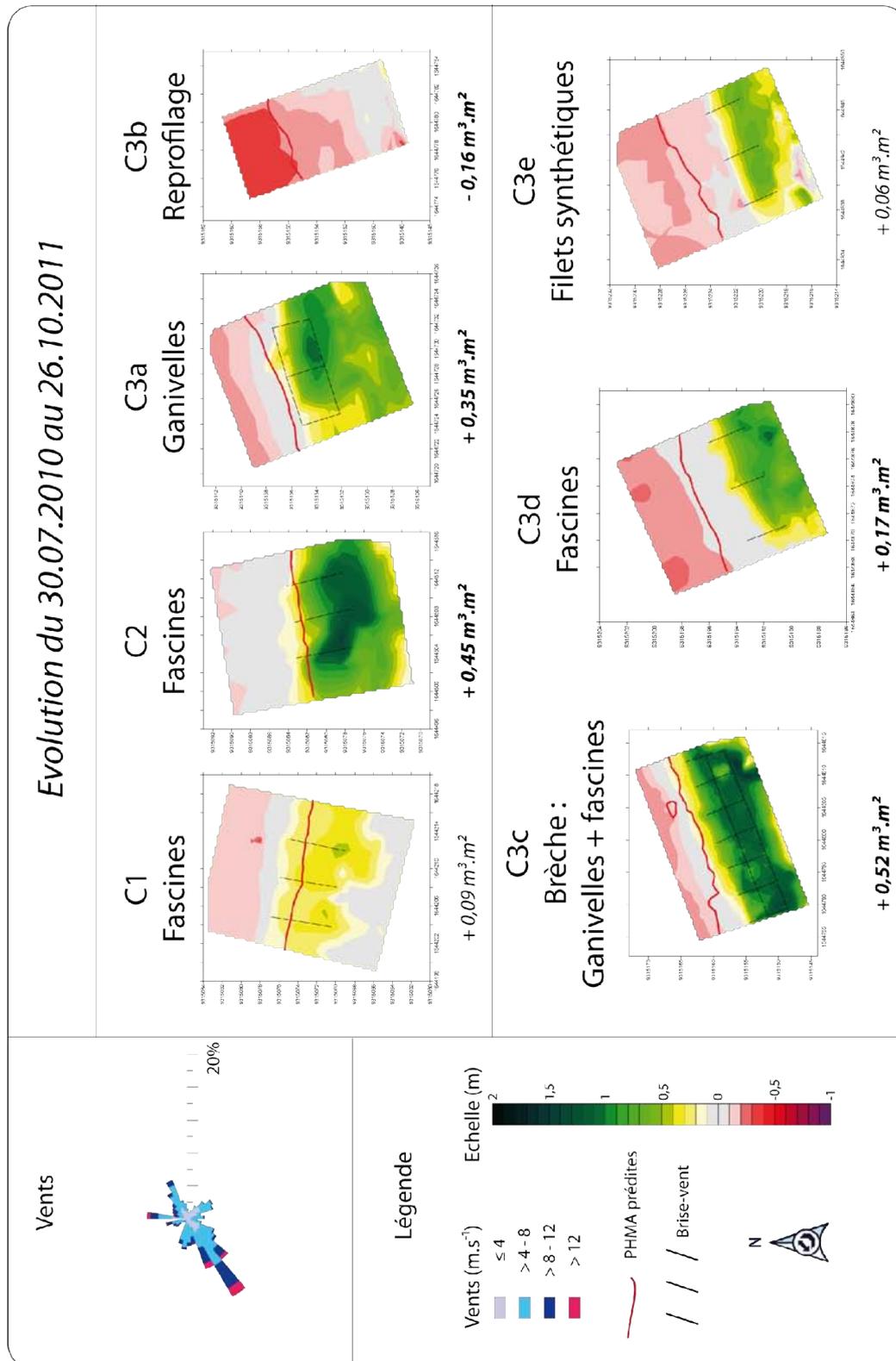


Figure 6.20 Comparaison du bilan par MNT pour tous les quadrats entre le 30.07.2010 et le 26.10.2011

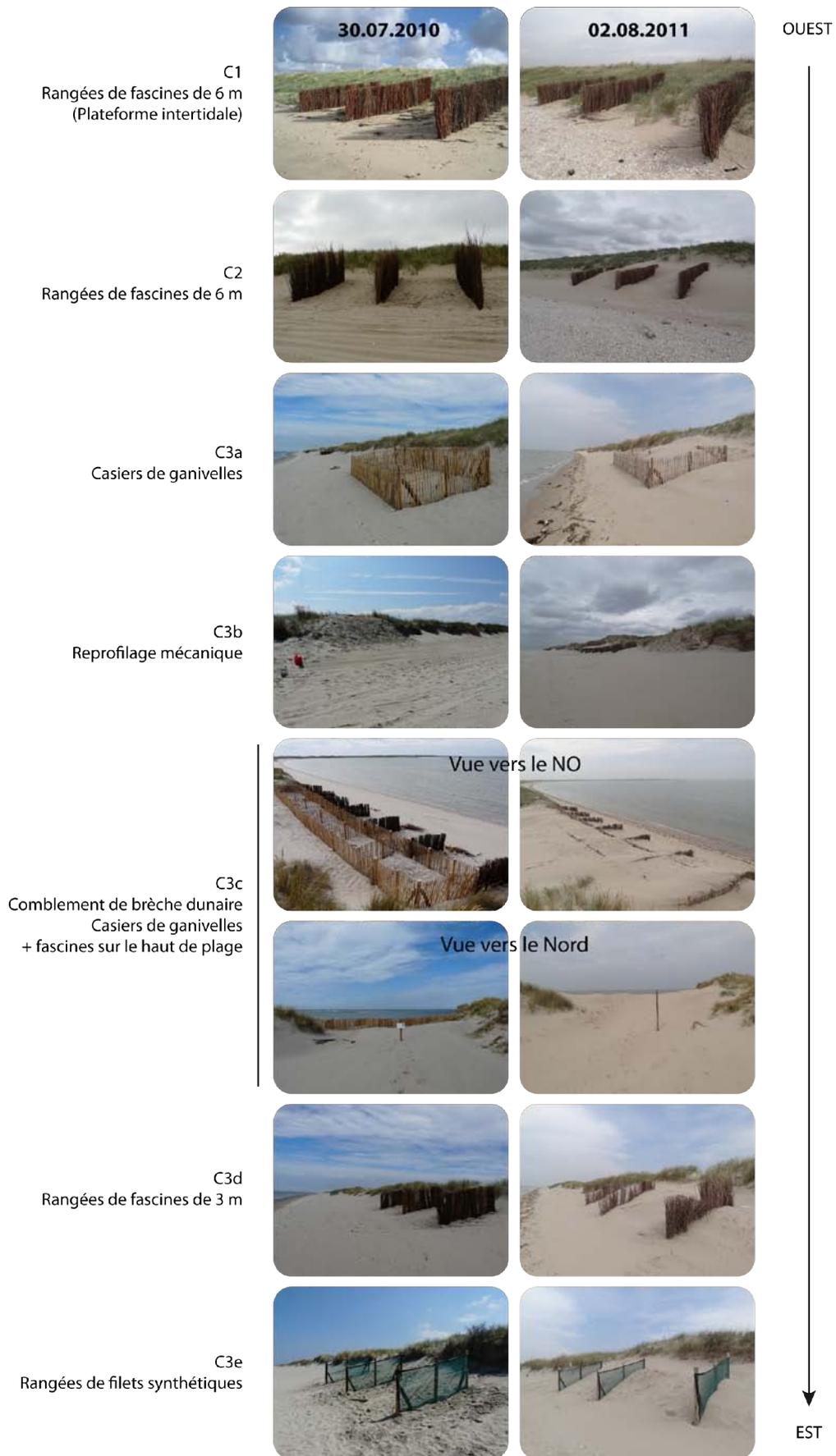


Figure 6.21 Photographies des structures de captage du sable sur la plage du Clipon le 30.07.2010 et le 02.08.2011

Le quadrat où aucune structure n'a été installée (C3b - seul un reprofilage mécanique du versant dunaire avait été effectué) est le seul à être en érosion, ce qui témoigne de l'efficacité des autres brise-vent pour provoquer le dépôt du sable (Figure 6.21).

Tableau 6.1. Bilan volumétrique du 30/07/2010 au 26/10/2011 pour le quadrat entier et la structure

	Variation volumétrique (m ³ .m ²)	
	Structure	Quadrat
C1	0,31	0,09
C2	0,88	0,45
C3a	0,66	0,35
C3b		-0,16
C3c	1,04	0,52
C3d	0,53	0,17
C3e	0,41	0,06

La structure de comblement de brèche a été la plus efficace (0,52 m³.m²), en raison de sa localisation à une altitude plus élevée, ce qui l'a protégée de l'érosion par les vagues (Figure 6.20 et Figure 6.21). De plus, cette structure se situait en avant d'un couloir de déflation où la végétation était absente. De ce fait, du transport éolien pouvait se produire lors de vents de terre et se déposer à l'intérieur des casiers, ce qui n'était pas le cas au niveau des autres structures en arrière desquelles la dune bordière était couverte d'une végétation dense. En outre, il s'agissait d'une structure composée d'un double dispositif (fascines sur le haut de plage et ganivelles dans la brèche). Malgré le remplissage des casiers, la végétation n'a pas colonisé le sable, ce qui est certainement dû aux importants mouvements de sable, et il serait nécessaire de procéder à des plantations (Ruz et al., 2005).

Les structures C3a (casiers de ganivelles), C3d (fascines) et C3e (filets synthétiques) ont permis de capter du sable, et également favorisé le développement de la dune bordière en arrière grâce à l'effet de rampe créé par l'accumulation sableuse (Ruz et Anthony, 2008). Ce transfert de sable du haut de plage vers la dune se fait préférentiellement par vent de Nord, et entraîne une érosion du haut de plage, tandis que du sable s'accumule sur le versant dunaire et à l'intérieur de la structure (Figure 6.22). Cette érosion généralisée du haut de plage à l'avant de toutes les structures est probablement due également à l'érosion marine sur le haut de plage.

Les casiers de ganivelles ont été les plus efficaces (C3a : +0,35 m³.m²), et les filets synthétiques sont ceux qui ont enregistré la plus faible accumulation (C3e : +0,06 m³.m²)

(Figure 6.20 et Figure 6.21). Les fascines ont eu une efficacité intermédiaire (C3d : +0,17 m³.m²), tandis qu'au niveau du quadrat sans structure (C3b), de l'érosion s'est produite (- 0,16 m³.m²) (Figure 6.20), ce qui tend à prouver que la présence de brise-vent favorise le dépôt du sable dans tous les cas. Cela est confirmé par les volumes accumulés à l'intérieur des structures, qui sont bien plus importants que les volumes gagnés sur l'ensemble des quadrats (Tableau 6.1 et Figure 6.22).

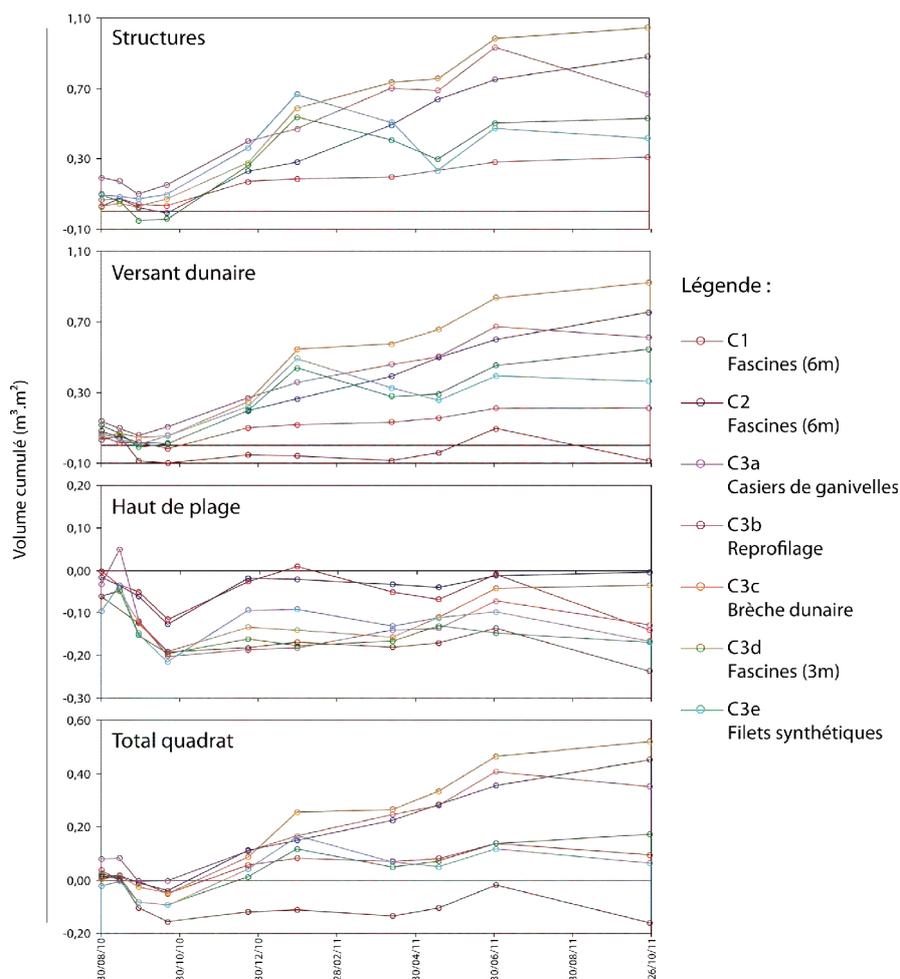


Figure 6.22 Volumes cumulés par unité de surface (m³). Chaque graphique compare tous les secteurs sur chacun des compartiments (Structures, Versant dunaire, Haut de plage) et pour le total

2. Structures de captage sur la digue du Braek

Les structures de captage sur la digue du Braek ont été installées en grande majorité au début du mois de février 2011 (localisation Figure 6.23). L'ensemble des données volumétriques et des données de conditions météo-marines qui vont être détaillées dans cette partie sont résumées dans un tableau en annexe 7. Le niveau des PHMA n'a pas été représenté sur les différentiels topographiques, car les structures étaient positionnées à une altitude bien supérieure à celles du Clipon, c'est pourquoi l'influence des hauts niveaux d'eau ne sera pas détaillée dans cette partie. La plus basse structure (ganivelles au contact plage/digue) a été placée à une altitude de 4,66 m NGF, soit 0,873 m au dessus des PHMA (port Est) (les autres sont à plus de 6 m NGF).

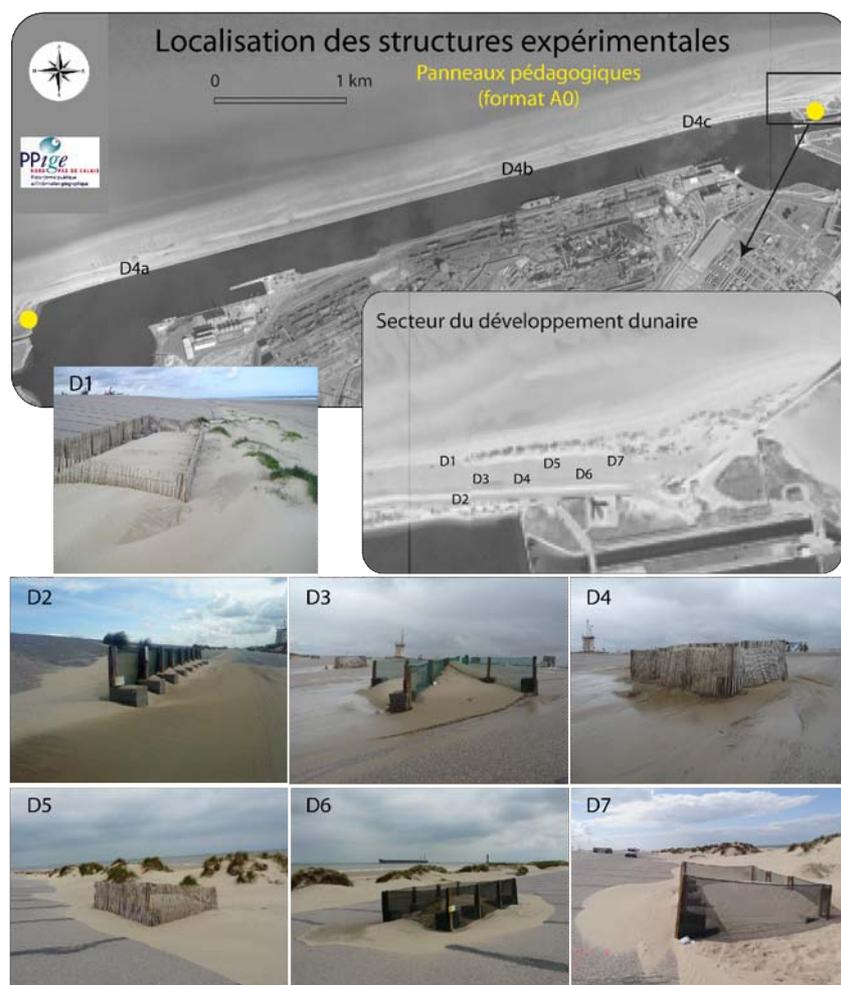


Figure 6.23 Localisation des structures de captage du sable sur la digue du Braek (clichés Tresca 2011 et photographie aérienne © PPIGE, 2005)

Le suivi a débuté le 14.02.2011 pour 6 structures, les 4 dernières ayant été terminées avec retard, en avril (les trois structures en ganivelles situées au centre et à l'Ouest D4a, D4b et D4c, ainsi que le casier de filets synthétiques D7 à l'arrière d'un couloir de déflation au niveau des dunes de pied de digue). Les structures situées au centre et à l'Ouest de la digue ont subi de multiples dégradations (Figure 6.24).



Figure 6.24 Photographies illustrant les détériorations au niveau des structures installées au centre (A & B) et à l'Ouest (C) de la digue du Braek (clichés Tresca, 12.05.2011)

Malgré des réparations au début, les mesures ont du être stoppées prématurément sur ces quadrats, et on ne dispose donc que de deux campagnes de mesures par la structure D4a (11.04.2011 au 10.05.2011), trois pour D4c (11.05.2011 au 14.06.2011) et quatre pour D4b (11.04.2011 au 28.07.2011). La structure en ganivelles D5 a également été détériorée en automne 2011, et le dernier levé y a été effectué le 15.09.2011.

2.1. Analyse de l'évolution des structures à l'aide d'une cartographie différentielle des Modèles Numériques de Terrain

2.1.1. Période du 14.02.2011 au 04.03.2011

Cette première période est caractérisée par une très faible proportion de vents supérieurs à 12 m.s^{-1} (0,5 %) et des vents majoritairement longitudinaux (62,1 %) en provenance du secteur Est pour la plupart (40,8 % du total). La grande majorité des vents étaient faibles (87,9 % inférieurs à 8 m.s^{-1}). Les précipitations cumulées ont atteint 35,7 mm. Les vents les plus forts de la période (8 à 12 m.s^{-1} , 11,7 % du total) proviennent pour une grande majorité du NE (Figure 6.25).

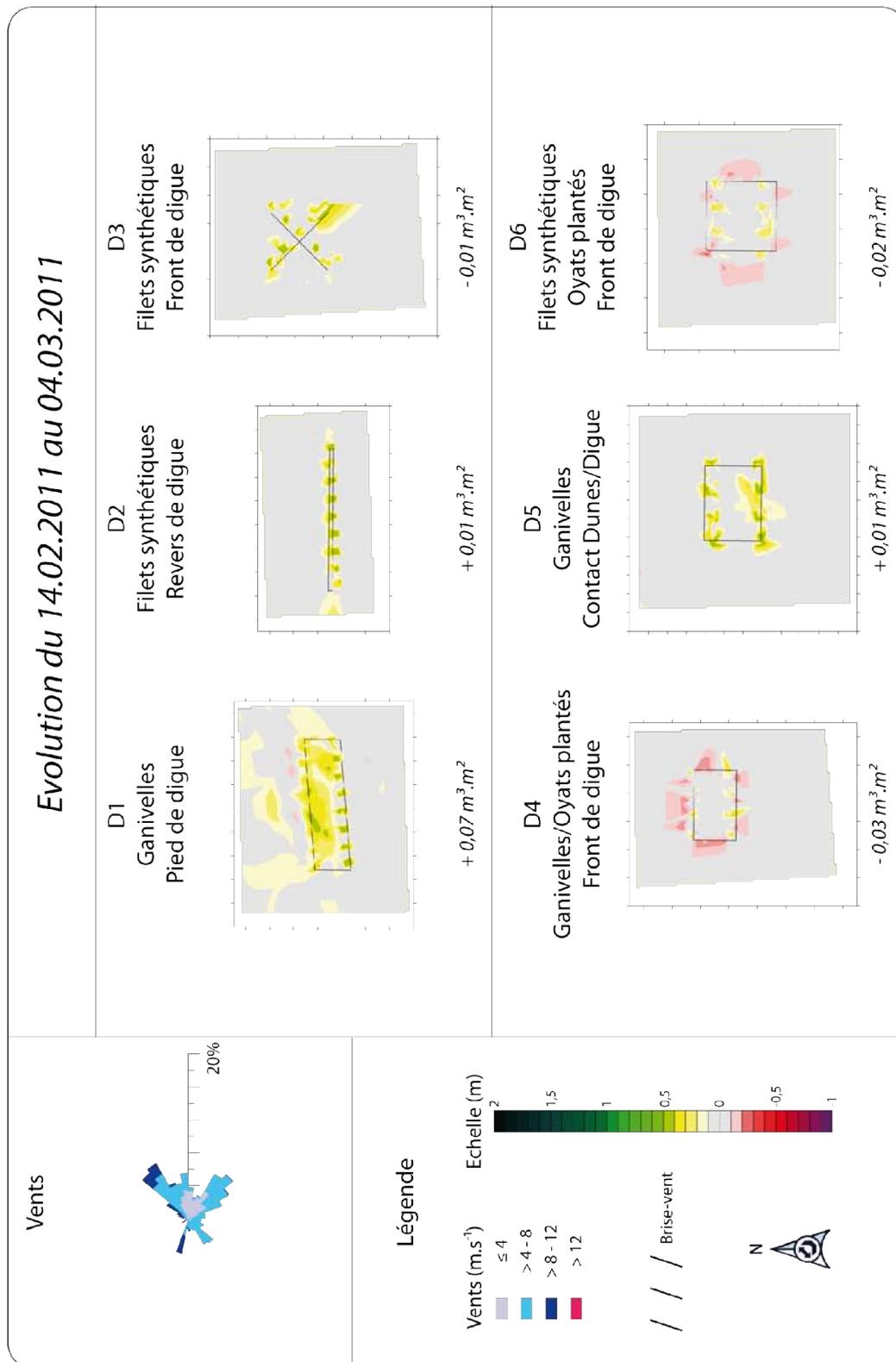


Figure 6.25. Rose des vents et cartographie différentielle des quadrats contenant des structures de captage sur la digue du Braeck entre le 14.02.2011 et le 04.03.2011

Cette orientation des vents les plus forts permet la déflation et le transport sur le haut de plage en direction de la digue et des dunes de pied de digue, et une partie de ce sable est capté par le casier de ganivelles au contact plage/digue (+0,07 m³.m²) (fig. 6.25). Ce transport

sur le haut de plage en direction des dunes par vent longitudinal a notamment été constaté lors des piégeages *in situ* (chapitre 3). La structure était vide au début (Figure 6.26 - A), et le 04.03.2011, le quadrat avait gagné 17,4 m³ de sable, dont 7,9 m³ à l'intérieur du casier. Il s'agit de la structure ayant capté le plus de sable pendant cette période. Le sable se dépose également en avant, sur le haut de plage, ce qui a immédiatement permis le développement de dunes embryonnaires à la fin de cette période et au début de la période suivante (printemps).



Figure 6.26. Photographie de 6 structures installées sur la digue le 14.02.2011 (cliché Tresca)

Deux autres structures ont permis une très faible accumulation de +0,01 m³.m², il s'agit de la ligne de filets synthétiques située en arrière de la digue (D2) (Figure 6.26 - B) et des ganivelles installées en arrière d'un couloir de déflation des dunes de pied de digue (D5) (Figure 6.25).

Les trois autres brise-vent ont perdu une faible quantité de sédiments : -0,01 m³.m² pour la structure de filets synthétiques en forme de croix (D3) (Figure 6.26 - C). Cette valeur négative ne reflète pas ce qui s'est passé en réalité, puisqu'il n'y avait pas de sable à l'intérieur de cette structure au départ. Il faut attribuer cette valeur négative au manque de précision du matériel utilisé. Les deux autres casiers, l'un en filets (D6) et l'autre en ganivelles (D4) (Figure 6.26 - D) ont perdu une petite partie du sable qui avait été déposé à l'intérieur en début de suivi, mais les quantités sont très réduites : -0,02 m³.m² et -0,03 m³.m² (Figure 6.25).

Les faibles apports de sable et la très légère érosion dans les casiers qui en contenaient au départ peut être expliquée par la très faible proportion de vents supérieurs à 12 m.s⁻¹, et la prédominance des vents non propices au transport éolien.

2.1.2. Période du 04.03.2011 au 11.04.11

Cette période se situe à la fin de l'hiver, et comporte une très forte proportion de vents longitudinaux, avec 74,35 %. Ces vents proviennent en grande partie d'ENE (47 %), cependant, la totalité des vents supérieurs à 12 m.s^{-1} (1,9 % du total) provenait du secteur OSO (rose des vents Figure 6.28). La quantité de précipitations était faible avec 18,9 mm.

Malgré une plus forte proportion de vents forts supérieurs à 12 m.s^{-1} que lors de la période précédente, les apports de sable ne sont guère plus importants. Cependant, aucun quadrat n'est en érosion. Les valeurs sont comprises entre $+0,02 \text{ m}^3.\text{m}^2$ (filets en croix D3, ganivelles sur le versant de la digue) et $+0,04 \text{ m}^3.\text{m}^2$ (ganivelles au contact plage/digue) (Figure 6.27 et Figure 6.28).

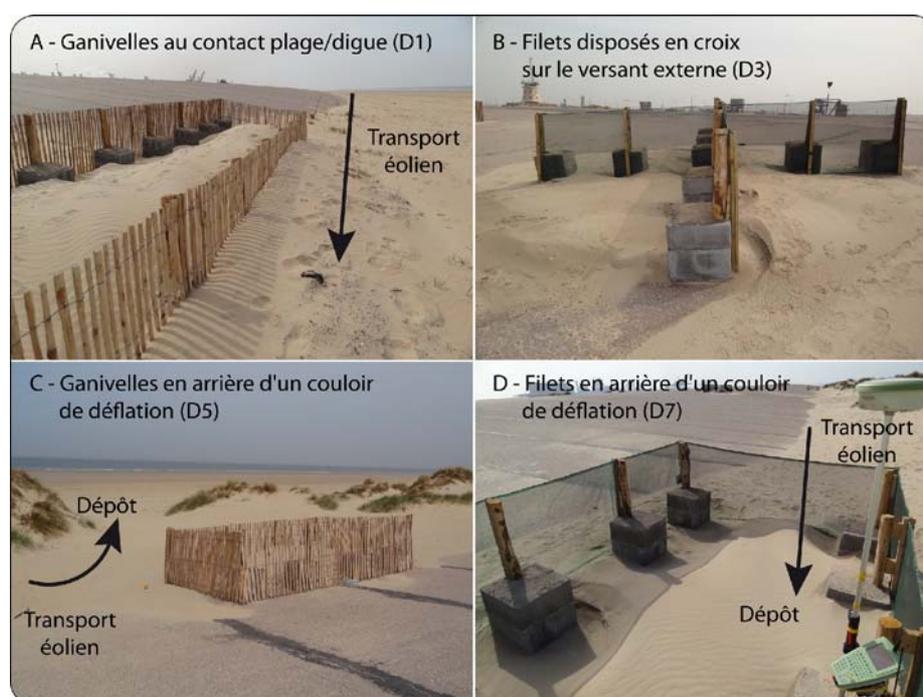


Figure 6.27 Photographie de 4 structures installées sur la digue le 04.11.2011 (clichés Tresca)

Les vents forts proviennent en totalité d'OSO, ils sont sub-parallèles à la digue. Comme pour les structures de la plage du Clipon, le sable se dépose du côté opposé à la direction dominante des vents les plus forts. Ici, cela se remarque plus particulièrement au niveau des casiers de ganivelles en arrière des dunes de pied de digue (D5) et des filets situés sur le versant externe (D6), où l'accumulation de sable se fait à l'Est (Figure 6.28).

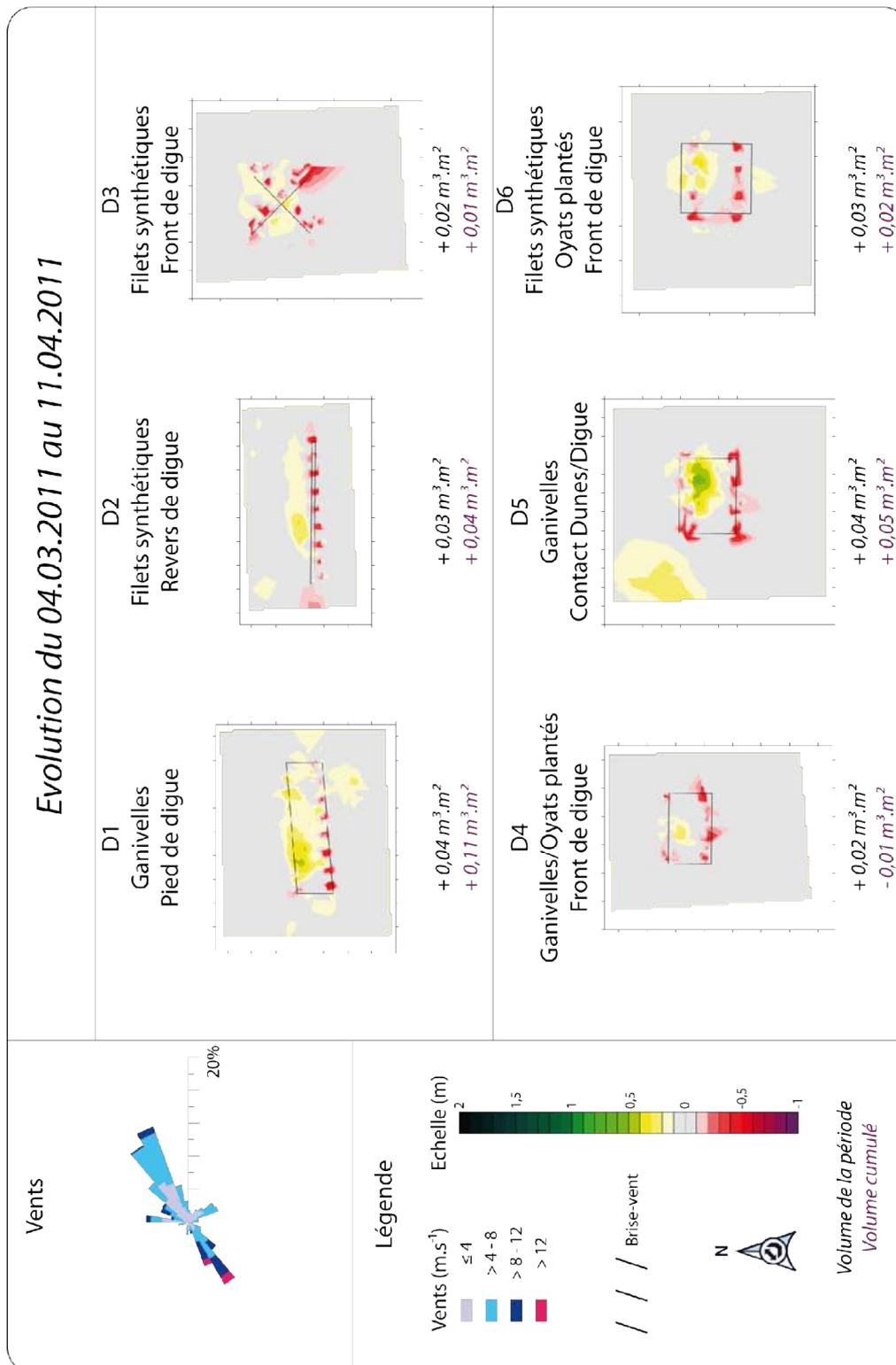


Figure 6.28 Rose des vents et cartographie différentielle des quadrats contenant des structures de captage sur la digue du Brack entre le 04.03.2011 et le 11.04.2011

Cependant, les apports éoliens restent faibles en raison de la source de sable qui est relativement plus réduite que par vents d'ENE. En effet, par vents subparallèles d'OSO, le

sable peut provenir des dunes de bassin ou des dépôts non végétalisés sur la route, une partie de ce sable est ensuite capté par les structures situées sur le versant externe (Figure 6.27 - B). Pour les casiers de ganivelles situés au contact plage/digue, le sable peut également provenir du haut de plage en cas de vents parallèles lorsqu'une barre recouvre le pied de digue, comme cela a pu être observé lors des piégeages *in situ* (chapitre 5), la source est donc plus importante dans ce cas (Figure 6.27 - A). Au niveau des casiers situés en arrière des couloirs de déflation (D5), le sable peut provenir des accumulations non végétalisées en arrière du cordon de dunes de pied de digue. Ce sable se dépose dans les casiers (Figure 6.27 - D) ainsi qu'à l'entrée des couloirs de déflation qui sont en situation d'abri (Figure 6.27 - C), ce qui explique l'accumulation au NO de la structure D5 (Figure 6.28 - D5).

2.1.3. Période du 11.04.2011 au 10.05.2011

Il s'agit de la seule période où des MNT ont pu être effectués au niveau des 10 structures de captage. Les vents frontaux sont très présents et représentent 25,3 % du total, et les vents supérieurs à 12 m.s^{-1} proviennent principalement de ce secteur (NNE à NE) (Figure 6.29). Les vents longitudinaux en provenance d'ENE représentent 40,5 %, et comprennent une forte proportion de vents compris entre 8 et 12 m.s^{-1} . Comme pour la période précédente, les précipitations ont été peu abondantes (39 mm).

La conséquence de ces vents forts originaires du NNE et d'ENE est le déplacement du sable dans les quadrats : alors que l'accumulation s'était faite au Nord des structures entre le 04.03.2011 et le 11.04.2011 (Figure 6.28) en raison de vents majoritairement originaires d'OSO, ici le sable a été redirigé au SO de la plupart des structures (Figure 6.29). Les variations volumétriques sont comprises entre $-0,03 \text{ m}^3.\text{m}^2$ (ganivelles (D4) et filets (D6) sur le versant externe) et $+0,10 \text{ m}^3.\text{m}^2$ (filets en arrière d'un couloir de déflation - D7) (Figure 6.29).

Le volume de sable au niveau des trois structures en ganivelles situées au centre et à l'Ouest de la digue est stable (Figure 6.29), ce qui est lié à l'absence de source de sable sec en haut de plage pour les alimenter dans ces secteurs du fait d'un niveau de plage plus bas (chapitre 4).



Figure 6.29 Rose des vents et cartographie différentielle des quadrats contenant des structures de captage sur la digue du Braeck entre le 11.04.2011 et le 10.05.2011

En revanche, la rangée de filets synthétiques qui se trouve en arrière de la digue (D2) a capté une quantité importante de sable, provenant probablement des dunes de pied de digue, et qui a été exportée en arrière et s'est déposée à ce niveau ($+0,04 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^2$, soit $+5,7 \text{ m}^3$) (Figure 6.30 - A). Cela confirme les observations faites lors des piégeages *in situ* par vent frontal à oblique (chapitre 5 - Erreur : source de la référence non trouvée, Erreur : source de la référence non trouvée et Erreur : source de la référence non trouvée).



Figure 6.30 Photographies de trois structures installées sur la digue (A, B & C), et du couloir de déflation en arrière du casier de filets synthétiques D7 (D) (clichés Tresca, 12.05.2011)

Au niveau des quadrats situés sur le versant externe de la digue (D3, D4 et D6), le sable s'est déposé à l'intérieur ainsi qu'autour de la structure (Figure 6.30 - B & C). Les vents de Nord et NE ont déplacé les sédiments au SO, vers le revers des brise-vent (Figure 6.29).

En ce qui concerne la structure en casier de filets synthétiques, le dépôt de sable s'est effectué au nord de la structure, dans le couloir de déflation (Figure 6.29 - D7). Cela est dû à la présence de dunes embryonnaires en haut de plage devant le couloir de déflation, qui se sont formées en début de période et ont favorisé le dépôt à ce niveau ainsi qu'en arrière, dans le couloir (Figure 6.30 - D). Du sable a en outre pu être repris en charge par le vent dans ce même couloir de déflation, et s'est déposé à l'intérieur du casier (Figure 6.29).

2.1.4. Période du 10.05.2011 au 14.06.2011

Lors de cette période de la fin du printemps 2011, les vents provenaient en grande majorité du secteur OSO (66 %). La part des vents supérieurs à 12 m.s^{-1} était de 2,2 %, et provenaient essentiellement de la même direction que les vents dominants (Figure 6.32). Les précipitations ont été faibles (25,6 mm), il s'agit donc à priori d'une période propice au transport éolien.

Une accumulation importante se produit en effet au niveau de plusieurs quadrats, en particulier le casier de filets synthétiques installé en arrière d'un couloir de déflation (D7), où l'accumulation est de $+0,21 \text{ m}^3.\text{m}^2$, soit $+24 \text{ m}^3$ (Figure 6.32). Ici, le sable des dunes de pied de digue est remobilisé par le vent dans de telles conditions et l'on observe de l'accumulation à l'entrée du couloir de déflation. Ce phénomène se produit également au niveau des ganivelles (D5), mais dans une moindre mesure ($+0,08 \text{ m}^3.\text{m}^2$) (Figure 6.32). Dans ce secteur, les dunes sont moins hautes et le couloir de déflation beaucoup moins long (Figure 6.31 - B), de ce fait les obstacles pour l'exportation du sable en direction du haut de plage sont moins nombreux que plus à l'Est (D7) où le couloir est plus abrité et retiendrait donc davantage le sable (Figure 6.31 - A).



Figure 6.31 Photographie de 4 structures installées sur la digue : (A) filets synthétiques en arrière des dunes de pied de digue ; (B) ganivelles en arrière des dunes de pied de digue ; (C) Dunes embryonnaires à l'avant des ganivelles au contact plage/digue ; (D) rangée de filets située en arrière de la digue (clichés Tresca, 14.06.2011)

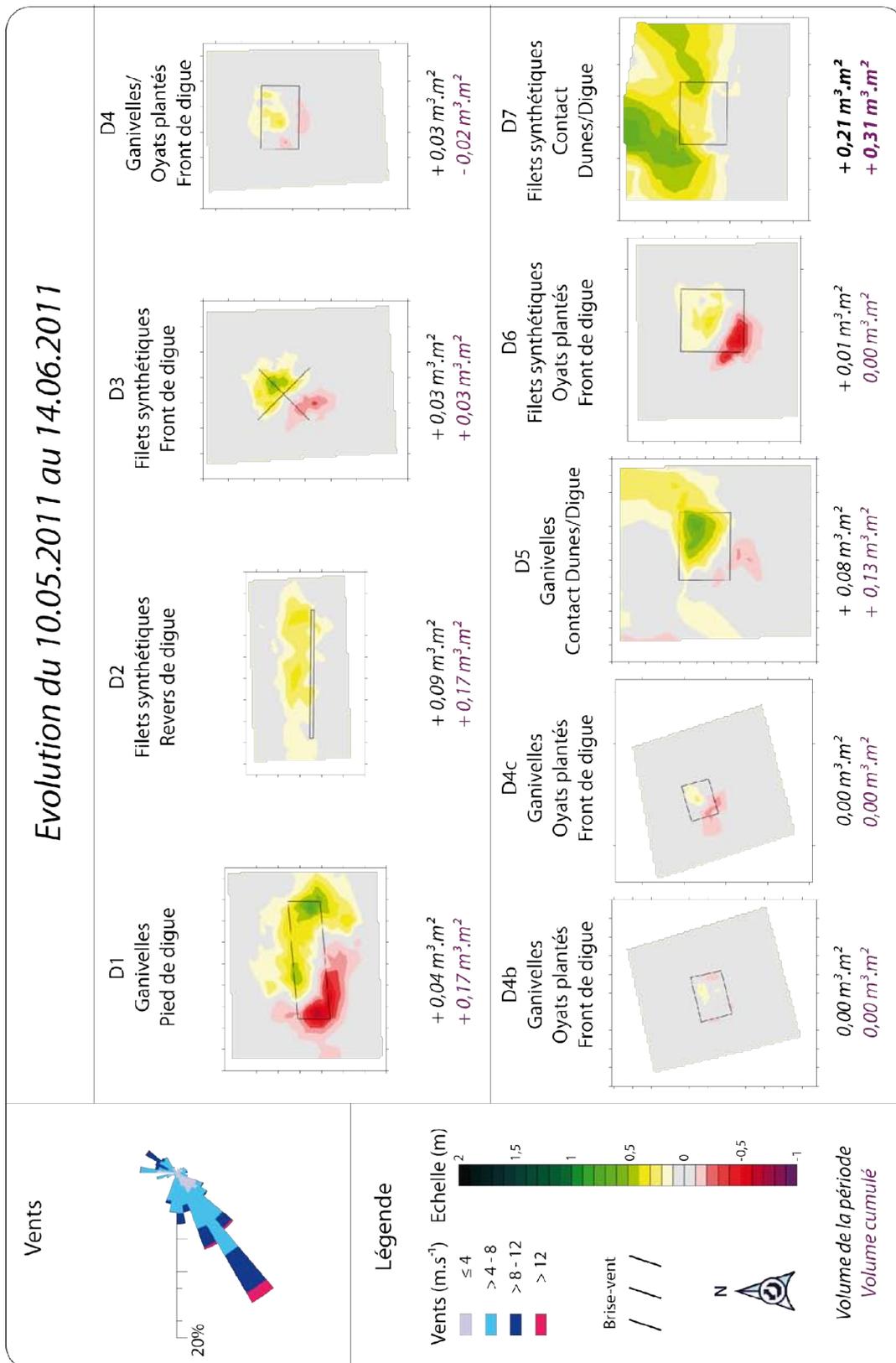


Figure 6.32 Rose des vents et cartographie différentielle des quadrats contenant des structures de captage sur la digue du Braek entre le 10.05.2011 et le 14.06.2011

Les structures ayant capté le moins de sable pendant cette période sont celles qui se situent sur le versant externe de la digue du Braek. Au centre et à l'Ouest de la digue, la

quantité de sable capté dans les casiers de ganivelles est restée stable (D4b et D4c, Figure 6.32). A l'intérieur des structures, le sable a été déplacé au NE en raison de la provenance des vents, comme c'est le cas également sur les casiers situés à l'Est, qu'il s'agisse de ganivelles (D5 : +0,03 m³.m²) ou de filets synthétiques (D7 : +0,01 m³.m²), ainsi que pour les filets disposés en croix (D3, +0,03 m³.m²) (Figure 6.32).

Au niveau de la structure en ganivelles située au contact plage/digue (D1 : +0,04 m³.m² – Figure 6.32), le sable a été exporté au NE, et la végétation du haut de plage (*Cakile maritima*, Figure 6.31 - C) a permis de capter du sable également.

Enfin, au niveau de la rangée de filets synthétiques situés en arrière de la digue, une accumulation importante de sable se produit au nord de la structure (+0,09 m³.m²). Le sable provient des dunes situées en bordure du bassin maritime et recouvre plus de la moitié du revers de la digue (Figure 6.31 - D).

2.1.5. Période du 14.06.2011 au 28.07.2011

Lors de cette période de début d'été 2011, les vents sont de nouveau majoritairement originaires d'OSO (52,9 %), bien que les vents frontaux soient bien plus présents que lors de la période précédente (23 %) (Figure 6.34). Les vents supérieurs à 8 m.s⁻¹ ont été les plus nombreux de tout le suivi, avec 20,9 % (18,2 % de vents compris entre 8 et 12 m.s⁻¹, et 2,7 % de vents supérieurs à 12 m.s⁻¹). Les vents les plus forts (> 12 m.s⁻¹) d'OSO soufflent en début de période (avant le 26.06.2011), tandis que ceux qui proviennent du secteur Nord soufflent vers la fin (14.07.2011) (Figure 6.33). Les précipitations ont été abondantes pendant cette période, atteignant une quantité cumulée de 100,2 mm, ce qui a pu contribuer à restreindre le transport éolien.

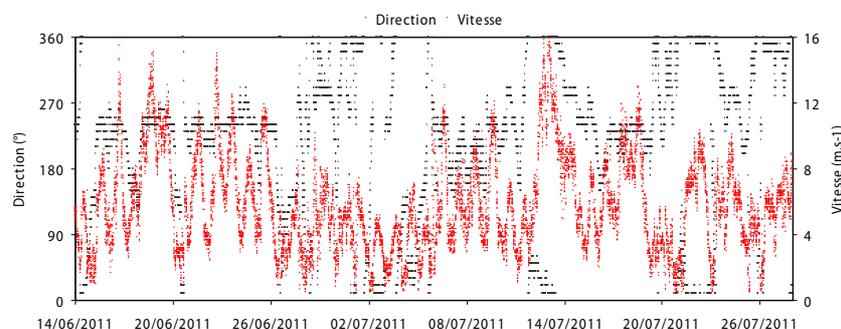


Figure 6.33 Série temporelle des vents (vitesse et direction) entre le 14.06.2011 et le 28.07.2011

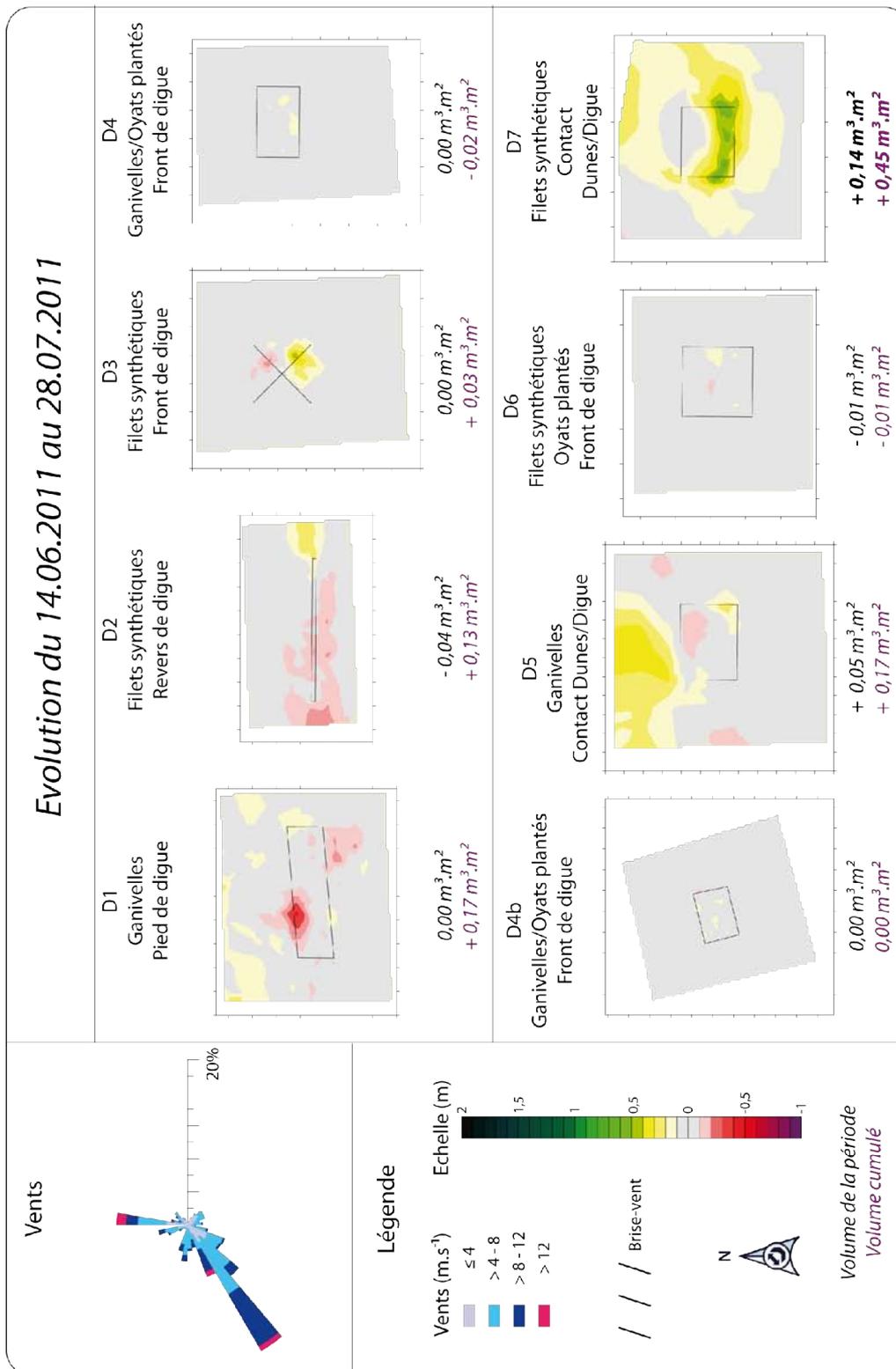


Figure 6.34 Rose des vents et cartographie différentielle des quadrats contenant des structures de captage sur la digue du Braeck entre le 14.06.2011 et le 28.07.2011



Figure 6.35 Photographies illustrant la fréquentation de la digue du Braek en été au niveau (A) des ganivelles au contact plage/digue (D1) ; (B) des ganivelles et (C) des filets synthétiques installés en arrière de couloirs de déflation (clichés Tresca, 02.08.2011)

De l'accumulation s'est produite dans 2 quadrats entre le 14.06.2011 et le 28.07.2011, il s'agit des deux dont les structures étaient situées en arrière d'un couloir de déflation : les ganivelles (D5) ont gagné $0,05 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^2$, et les filets synthétiques $+0,14 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^2$ (Figure 6.34). Au niveau des ganivelles, l'accumulation se fait au nord de la structure, tandis que pour les filets synthétiques, le dépôt se produit au nord ainsi qu'à l'intérieur du casier (Figure 6.34).

En ce qui concerne les autres structures, le volume de sable est stable ou en légère érosion (rangée de filets en arrière de la digue – D2 et filets synthétiques sur le versant externe de la digue-D6) (Figure 6.34). On remarque qu'au niveau des filets disposés en forme de croix (D3), l'accumulation sableuse s'est faite au SE de la structure (Figure 6.34), ce qui est la conséquence des vents d'OSO qui ont poussé le sable vers le NE, puis le coup de vent de Nord (Figure 6.33) qui a rabattu ce même sable au Sud. On constate le même phénomène, dans une moindre mesure, sur les ganivelles en front de digue (D4) et en arrière des dunes de pied de digue (D5 et D7) (Figure 6.34).

De manière générale, les faibles apports de sable peuvent être expliqués par le fait que les structures étaient déjà quasiment pleines (D1 en particulier - Figure 6.35 - A), ce qui a pu réduire leur efficacité de piégeage, comme cela a déjà été avancé par [Hotta et Horikawa \(1990\)](#), qui ont démontré que les brise-vent ne provoquaient plus le dépôt du sable lorsqu'ils étaient recouverts à plus de 80 % de leur hauteur. Des structures moins remplies telles que les filets disposés en croix (D3) et les casiers situés en arrière de couloirs de déflation (D5 et D7) ont provoqué davantage d'accumulation durant cette période.

Enfin, il faut noter les fortes perturbations anthropiques qui ont contribué au déplacement du sable, et ont eu une influence sur les endroits où le dépôt (ou l'érosion) s'est produit. Au niveau de la structure en filets située en arrière de la digue, le sable a été ramassé

par camion ce qui explique l'érosion au sud de la structure. Au niveau de l'ensemble des autres quadrats, malgré les panneaux pédagogiques interdisant de toucher aux structures, de nombreuses modifications sont dues aux usagers du site. Il s'agit en effet d'un site très fréquenté en été (Figure 6.35), ce qui eu pour conséquence une augmentation du piétinement ainsi que de nombreux jeux de plage (prélèvements de sable à l'aide de seaux ou pelles). Ces actions se sont produites préférentiellement dans les structures où le niveau de sable était élevé, ce qui facilitait l'accès à l'intérieur de celles-ci.

2.1.6. Période du 28.07.2011 au 15.09.2011

Durant cette période de fin d'été, les vents étaient à 63,1 % en provenance d'OSO, il s'agissait donc de vents dominants longitudinaux (Figure 6.36). Les vents forts provenaient également des secteurs OSO à SO, et représentaient 2,5 % ($> 12 \text{ m.s}^{-1}$) et 16 % (entre 8 et 12 m.s^{-1}) du total. On note également 11 % de vents frontaux, mais il s'agissait essentiellement de vents faibles peu propices au transport éolien. Les précipitations ont été peu abondantes (22,9 mm).

L'érosion prédomine sur la plupart des quadrats durant cette période. Les vents dominants d'OSO ont provoqué le déplacement du sable à l'Est de toutes les structures (Figure 6.36), sauf pour la rangée de filets en arrière de la digue (D2), où seule une érosion se produit. Le sable mobile sur la route et en bordure de bassin maritime ayant été ramassé lors de la période précédente, les apports de sable ont été limités à ce niveau.

Sur les autres quadrats, les deux facteurs évoqués lors de la période précédente, à savoir le remplissage des structures ainsi que la fréquentation touristique, sont également valables ici, et ont pu provoquer de l'érosion ou le déplacement du sable dans les structures. Cependant, on note une légère accumulation au niveau des structures situées sur le versant externe de la digue, comprise entre $+0,02 \text{ m}^3.\text{m}^2$ pour le casier de ganivelles (D4) et $+0,04 \text{ m}^3.\text{m}^2$ pour les filets disposés en croix (D3) (Figure 6.36). Ces structures ont pu capter le sable provenant du revers de digue, en arrière de la rangée de filets synthétiques (D2).

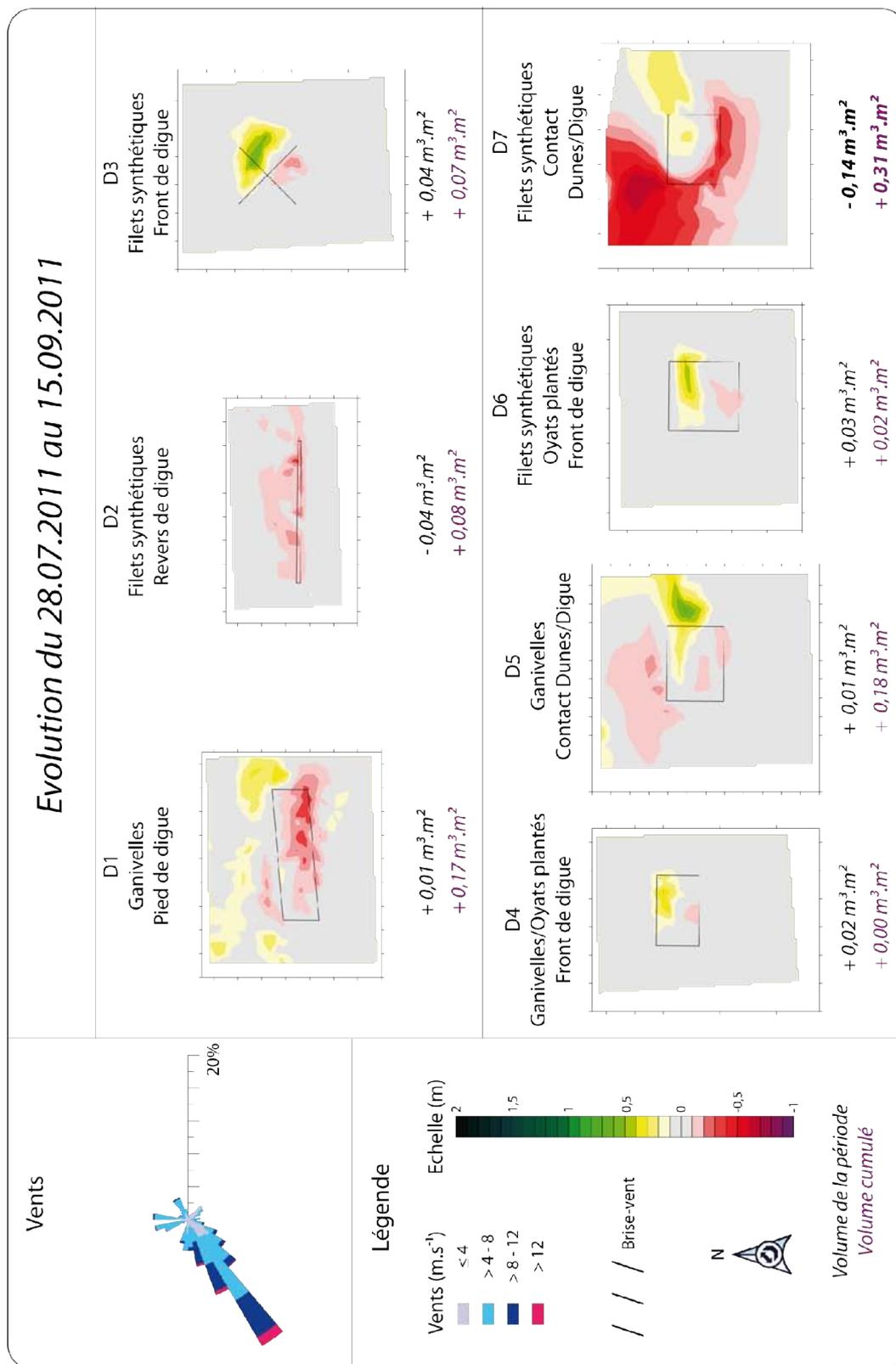


Figure 6.36 Rose des vents et cartographie différentielle des quadrats contenant des structures de captage sur la digue du Braek entre le 28.07.2011 et le 15.09.2011

Une érosion particulièrement importante se produit à l'Ouest du casier de ganivelles situé en arrière du couloir de déflation (D7 - Figure 6.36), ainsi que pour les ganivelles même

si le phénomène est moins prononcé à ce niveau (D5 – Figure 6.36). Il s’agit des importantes quantités de sable en provenance des dunes de pied de digue qui s’étaient déposées lors des périodes précédentes par vent d’OSO (Figure 6.34). Ce dépôt avait probablement été facilité par le fait que les structures étaient beaucoup moins remplies. Ici, entre le 28.07.2011 et le 15.09.2011, les structures étaient pleines. L’effet brise-vent des ganivelles ou des filets est fortement atténué, et la masse de sable qui recouvre les structures a pu faciliter le transfert du sable de l’Ouest vers l’Est. L’observation des changements au niveau du quadrat situé au contact plage/digue semble confirmer cette hypothèse : le dépôt du sable se produit essentiellement sur le haut de plage, tandis qu’une érosion se produit à l’intérieur du casier de ganivelles (D1 - Figure 6.36).

2.1.7. Période du 15.09.2011 au 21.12.2011

Cette dernière période d’étude se déroule pendant l’automne 2011. Les vents supérieurs à 8 m.s^{-1} représentent 19,6 % du total (dont 3,8 % supérieurs à 12 m.s^{-1}) et proviennent, comme la grande majorité des vents, du quart SO (Figure 6.37). Parmi l’ensemble des vents, 41,1 % sont longitudinaux, et 43,1 % sont des vents de terre dont une majorité en provenance de SSO, et également SSE avec une nette prédominance des vitesses les moins propices au transport éolien. La quantité de précipitations a été importante (180,8 mm).

Seules 6 structures sont encore intactes à la fin de l’étude, le casier de ganivelles en arrière d’un couloir de déflation (D5) ayant été endommagé à la fin du mois de septembre. De l’accumulation s’est produite dans la plupart des quadrats restants, excepté le casier de filets synthétiques placés en arrière des dunes de pied de digue, qui perd $0,06 \text{ m}^3.\text{m}^2$ (D7 – Figure 6.37). Cette érosion prononcée à l’Est du casier est due en partie à un ruissellement important en direction du haut de plage en raison de fortes précipitations à la fin de la période (Figure 6.38 - A).

Ce ruissellement est moins prononcé au niveau des structures situées sur le versant externe de la digue, en raison d’un filet synthétique au fond du casier qui a été installé au début du suivi lorsqu’une couche de sable et des oyats ont été mis dans la structure. Ce filet a pu limiter l’exportation du sable contenu à l’intérieur de la structure. En revanche, les dépôts

qui se sont produits autour ont été emportés en grande partie vers le bas du versant (Figure 6.38 - B, C et F).

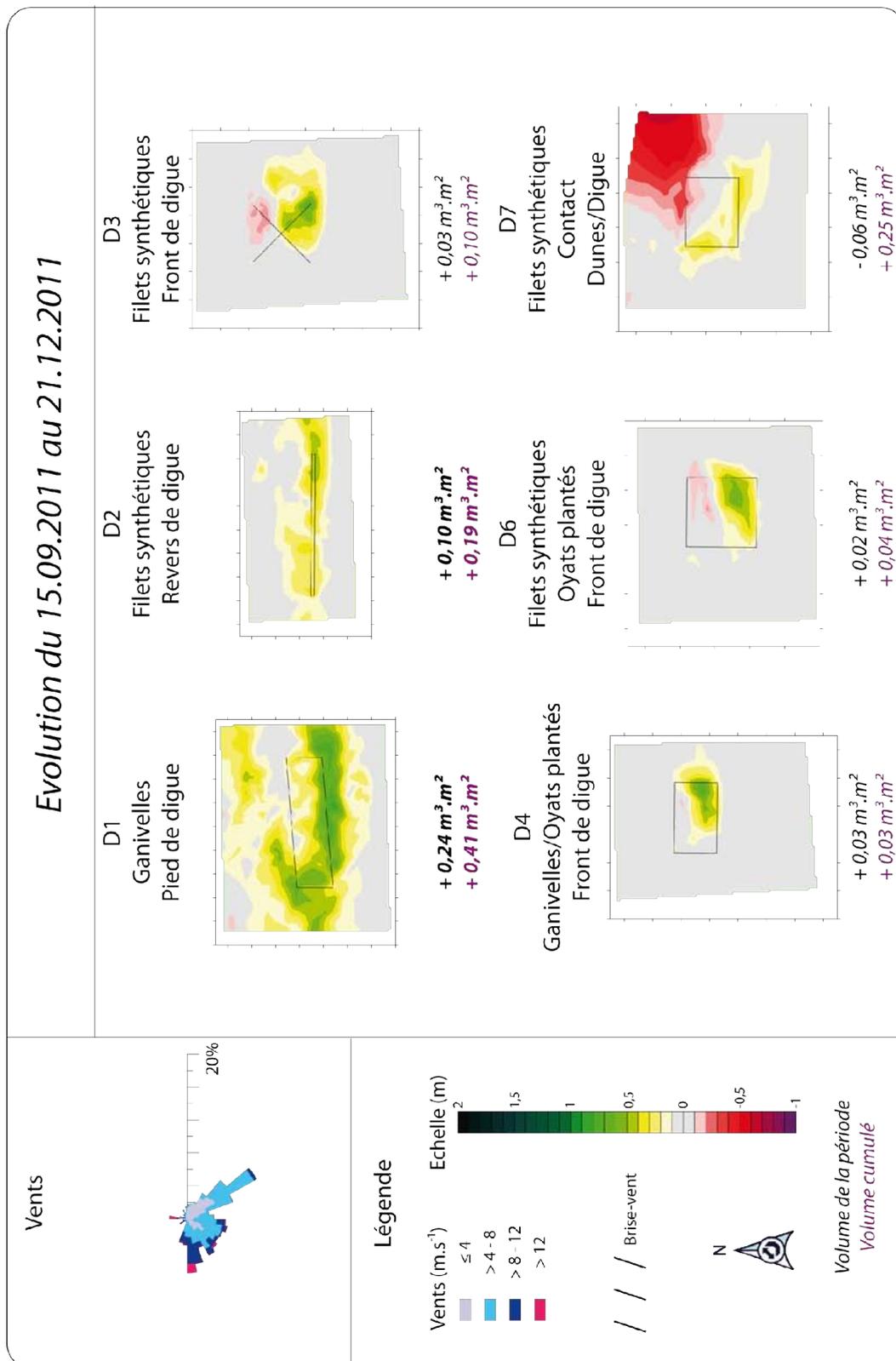


Figure 6.37 Rose des vents et cartographie différentielle des quadrats contenant des structures de captage sur la digue du Braeck entre le 15.09.2011 et le 21.12.2011



Figure 6.38. Photographies de 6 structures de captage du sable sur la digue du Braek (clichés Tresca, 16.12.2011)

Les vents forts en provenance d'Ouest, soufflant obliquement par rapport au trait de côte, ont permis un apport de sable important dans les structures (Figure 6.37). Ce sable provenait probablement du haut de plage ce qui expliquerait l'apport plus faible au niveau de la structure D7, à l'abri des dunes de pied de digue. Ces apports de sable importants ont permis également le développement de dunes embryonnaires sur le haut de plage à l'avant des ganivelles (D1 : Figure 6.38 - B), mais aussi sur la digue en arrière des ganivelles situées au contact plage/digue (D1 : Figure 6.38 - D), et à l'avant des ganivelles sur le versant externe (D5 : Figure 6.38 - B) et des filets en croix (D3 : Figure 6.38 - C).

2.2. Bilan de l'efficacité des différentes structures de captage du sable sur la digue du Braek

Etant donné que le suivi a été interrompu pour les quadrats situés au centre et à l'Ouest de la digue (D4a, D4b, D4c), ainsi qu'au niveau des ganivelles en arrière d'un couloir de déflation des dunes de pied de digue (D5), nous ne comparerons ici que les différents types de structures expérimentales installées à l'Est de la digue dont le suivi a été complet. Afin de rendre les comparaisons possibles, les volumes de sable calculés ont été pondérés par la superficie de chaque secteur.

De nettes différences apparaissent selon les quadrats (Tableau 6.2), les structures ayant le plus capté de sable étant celles qui étaient au contact des dunes (filets en arrière des dunes de pied de digue, D7 : $0,95 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^2$) ou du haut de plage (ganivelles au contact plage/digue,

D1 : 0,83 m³.m²). Les moins efficaces sont les casiers en filets synthétiques et ganivelles qui étaient situées sur le versant externe de la digue, et où des oyats ont été plantés dès le départ (D4 : 0,30 m³.m² et de D6 : 0,25 m³.m²) (Tableau 6.2).

Tableau 6.2. Volumes de sable accumulés entre le 14.02.2011 et le 21.12.2011 au niveau des quadrats et dans les structures (le volume interne de la structure D2 n'a pas été calculé car il s'agit d'un linéaire).

14.02.2011 au 21.12.2011			
	Volume +/- (m ³)	Superficie (m ²)	Ratio m ³ /m ²
Secteur entier			
D1	99,61	241,17	0,41
D2	28,87	153,05	0,19
D3	17,29	171,07	0,10
D4	4,37	148,58	0,03
D6	4,78	113,85	0,04
D7	37,30	115,37	0,32
Intérieur de la structure			
D1	25,40	30,47	0,83
D2	x	x	x
D3	9,00	15,30	0,59
D4	4,16	13,67	0,30
D6	3,90	15,31	0,25
D7	10,21	10,78	0,95

Si l'on considère non pas l'intérieur de la structure, mais la totalité du quadrat, on remarque que dans certains cas du dépôt s'est produit autour de la structure. C'est le cas là aussi de celles qui se trouvaient au contact des sources de sable principales (Tableau 6.2, Figure 6.39 et Figure 6.40). La quantité de sable gagnée au niveau des ganivelles au contact plage/digue est de 0,41 m³.m², et celle du casier de filets synthétiques à l'arrière d'un couloir de déflation est de 0,32 m³.m². Au niveau de la structure linéaire à la base du revers de digue (D2), le résultat est intermédiaire avec 0,19 m³.m². Les structures situées sur le versant externe ont été les moins efficaces, car elles sont davantage exposées au vent qui peut facilement prendre en charge le sable déposé autour des casiers (Figure 6.40). La moindre efficacité des structures du versant externe est due également aux eaux de ruissellement qui exportent le sable situé autour des casiers vers le bas de la digue. Sur les trois structures situées à mi-pente du versant externe, la plus efficace est la croix en filets synthétiques (D3 : 0,10 m³.m²), qui pourtant est une structure ouverte.

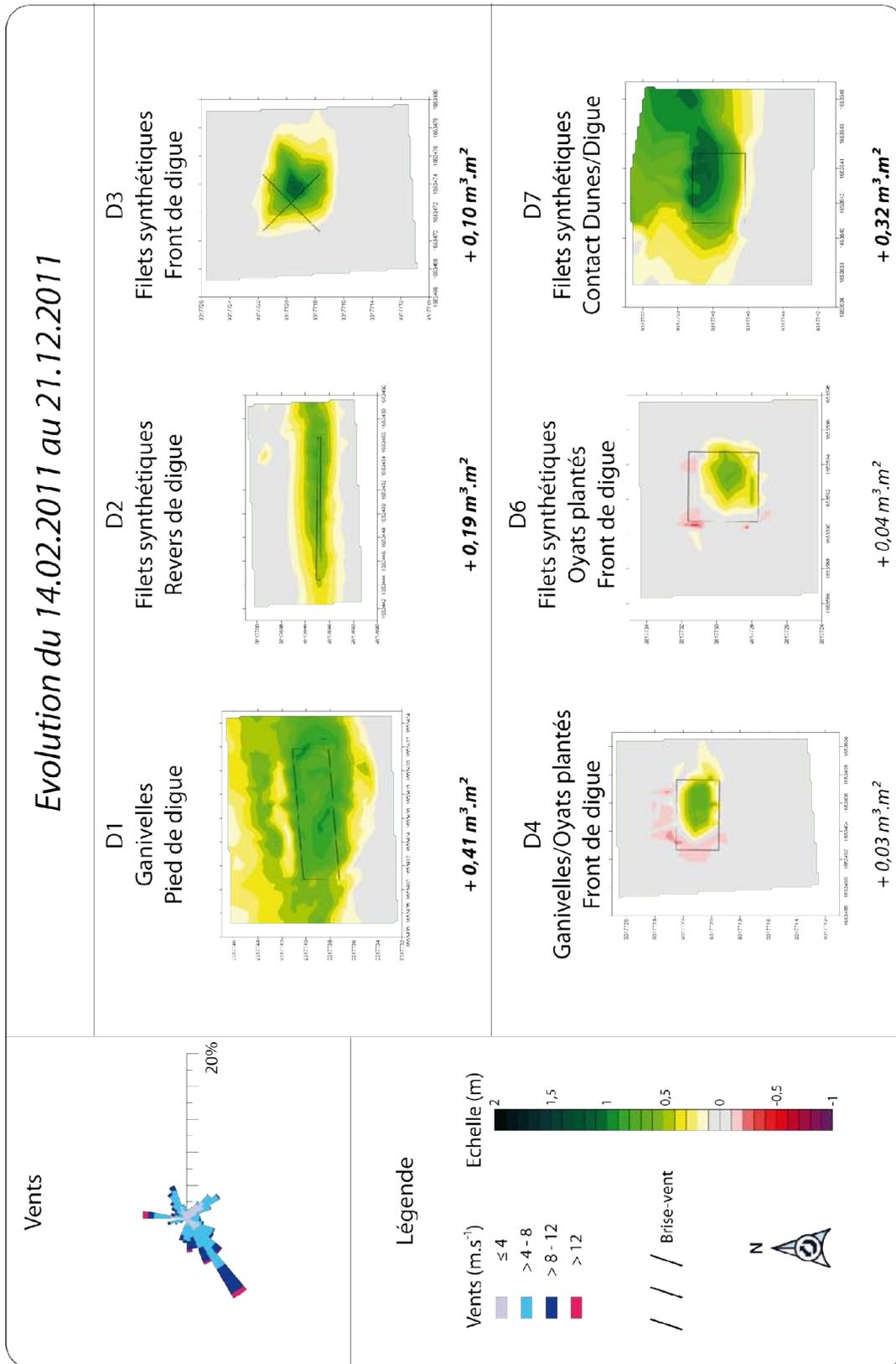


Figure 6.39 Bilan de l'évolution des différentes structures entre le 14.02.2011 et le 21.12.2011 par cartographie différentielle



Figure 6.40 Photographies des structures de captage du sable installées en arrière des dunes de pied de digue le 14.02.2011 (11.04.2011 pour D7) et le 16.12.2011 (clichés Tresca)

Enfin, le rythme d'évolution montre également que, si le bilan volumétrique est positif partout, certaines structures ont pu perdre du sable au cours du suivi (Figure 6.41). Celle qui a permis l'accumulation la plus rapide est la D7, qui a atteint un volume maximal le 28.07.2011 (Figure 6.41 Structures), pour ensuite perdre du sable. Le casier en ganivelles situé au contact plage/digue a gagné beaucoup de sable au départ, puis l'accumulation s'est stabilisée entre juin et octobre (Figure 6.41 structures). A partir du moment où les structures sont partiellement enfouies, elles semblent perdre leur efficacité.

Le rythme d'accumulation est plus régulier sur les autres structures qui se sont remplies plus lentement au départ, et l'on observe qu'il n'y a qu'une seule structure qui, au cours de l'ensemble du suivi, n'a jamais perdu de sable, il s'agit de D3 (Figure 6.41 - Total : courbe rouge). Cela peut sembler paradoxal, car il s'agit de la seule structure qui ait eu une forme ouverte permettant au sable capté de s'en échapper facilement ensuite, tandis que toutes les autres étaient des casiers fermés.

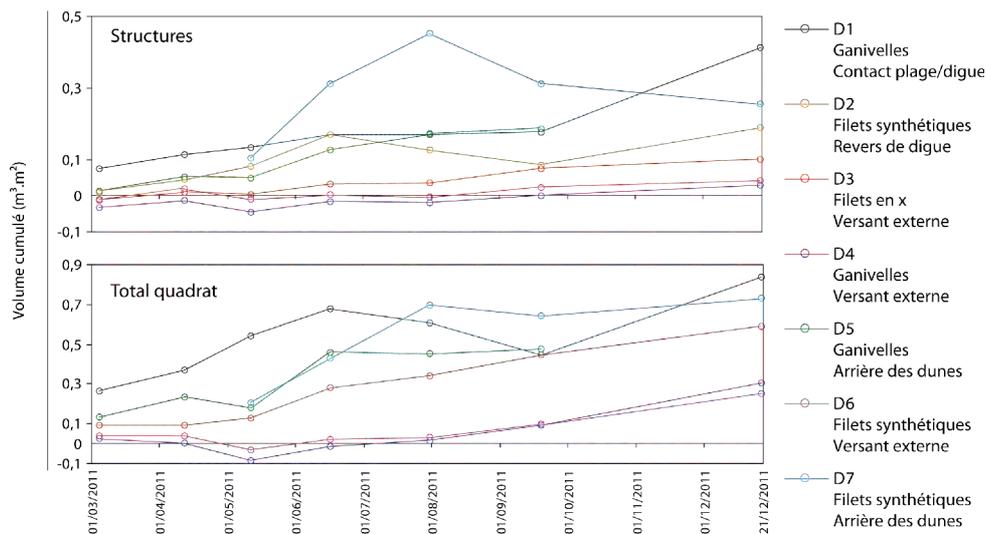


Figure 6.41 Volumes cumulés par unité de surface (m^2). Chaque graphique compare tous les volumes cumulés à l'intérieur des structure expérimentales (Structures), et pour l'ensemble du secteur (Total)

3. Evolution saisonnière et comparaison des dispositifs de captage du sable sur la plage du Clipon et la digue du Braek

3.1. Saisonnalité du captage sur la plage du Clipon

Une synthèse des mesures de captage effectuées par l'intermédiaire de structures brise-vent sur la plage du Clipon est présentée et mise en relation avec les données de vent (vitesse et direction) et de précipitations (Figure 6.42). Cette figure de synthèse tend à montrer que

l'accumulation du sable au sein de l'ensemble des structures se produit préférentiellement entre la fin de l'automne et le printemps (périodes 5 à 8, Figure 6.42).

Les périodes 1 à 3 correspondent à la saison estivale, et les apports de sable sont généralement faibles, bien que la part des vents les plus forts puisse être importante (9,2 % lors de la période 3). L'accumulation potentielle engendrée par ces vents forts a été annulée par l'érosion marine. Lors de cette période d'été, la structure C3c (brèche dunaire) profite de la forte fréquence des vents de terre (période 2 du 30.08.10 au 13.09.10). Ces trois périodes sont caractérisées par une faible fréquence des vents longitudinaux en provenance du secteur ENE (entre 3 % et 3,6 %). L'ensemble des structures ayant été installées dans la moitié Ouest de la plage du Clipon, elles bénéficient d'un long fetch par ces conditions de vent, les apports sont donc plus réduits lorsqu'ils sont peu fréquents. Ils sont en revanche bien plus fréquents à partir de l'automne. De plus, les vents supérieurs à 12 m.s^{-1} ont été peu fréquents (0,6 % entre le 30.08.10 et le 13.09.10), ce qui peut expliquer un transport éolien réduit.

Durant la première période d'automne, bien que la direction des vents soit potentiellement plus propice aux apports en sable qu'en été, on remarque de l'érosion (période 4, Figure 6.42) en raison d'un niveau d'eau élevé et de la faible part des vents forts supérieurs à 12 m.s^{-1} (0,7 %). Les périodes suivantes sont davantage propices à l'accumulation du sable, ce qui peut s'expliquer tout d'abord par une proportion de vents forts bien plus importante. Les vents supérieurs à 12 m.s^{-1} représentent 4,8 %, 5,6 % et 5 % du total des vents lors des périodes 5, 6 et 7. Cela est particulièrement vrai lors des périodes 5 et 6 (20.10.10 au 21.12.10 et 21.12.10 au 28.01.11), où les vents supérieurs à 8 m.s^{-1} représentent respectivement 23,3 % et 27,7 %. Ce sont ces deux périodes qui ont donné lieu à l'accumulation la plus importante : la période 5 au niveau des structures C1, C2 et C3c, et la période 6 au niveau des structures C3c, C3d et C3e.

De plus, la forte proportion de vents longitudinaux d'ENE et d'OSO (61,5 %) fait circuler le sable sur le haut de plage parallèlement à la côte qui est capté par les structures qui sont situées en pied de dune. Par vent de nord, ce sable est rabattu du haut de plage et vers le versant dunaire grâce à une rampe formée par l'accumulation dans la structure. Cet effet est plus prononcé au niveau de rangées de brise-vent parallèles (C3d et C3e) qu'au niveau des casiers de ganivelles. Ce phénomène, conjugué à de nombreux hauts niveaux d'eau, est à l'origine d'une érosion du haut de plage dans la plupart des cas, au profit du versant dunaire et des structures (Figure 6.42).

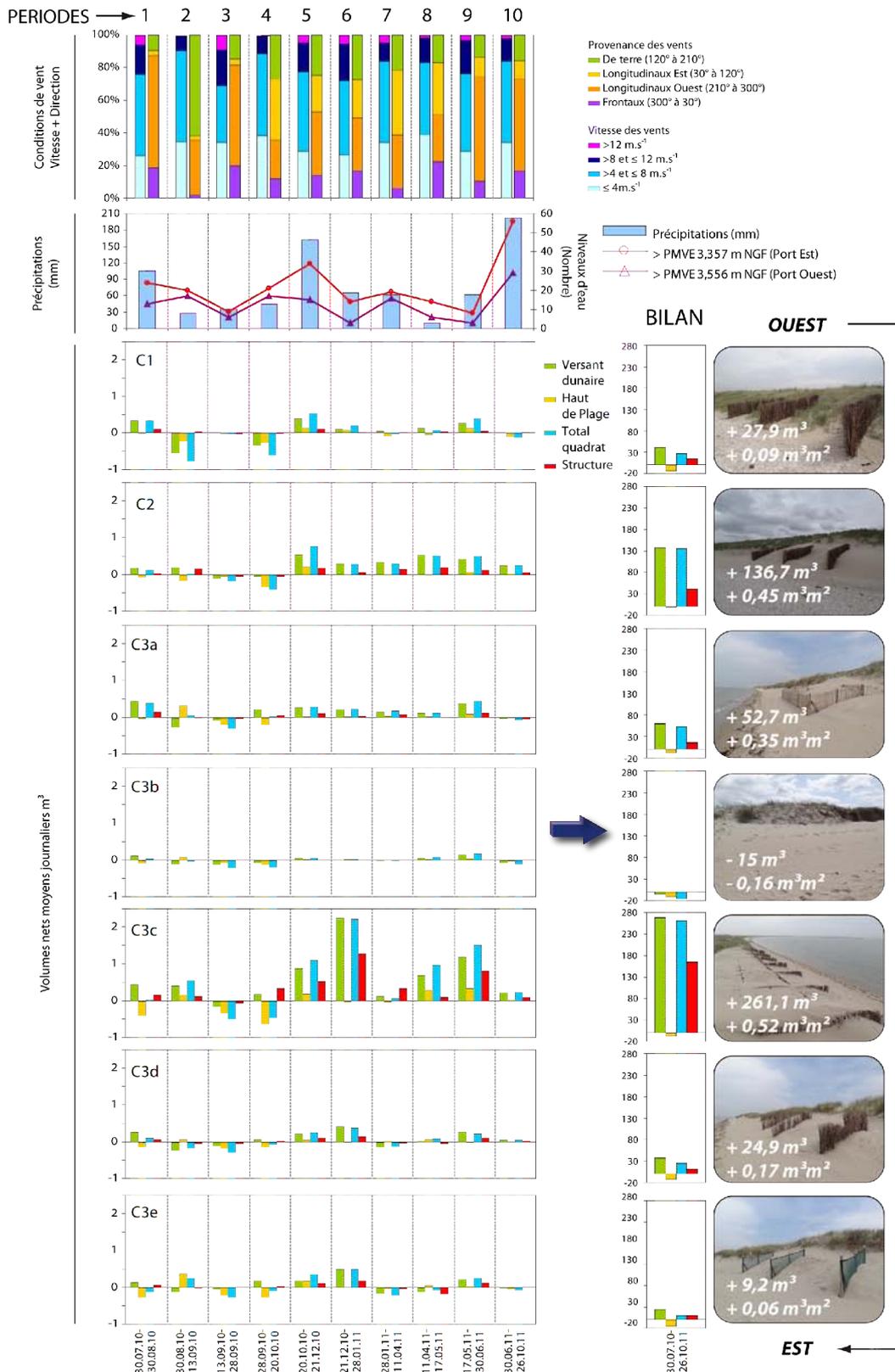


Figure 6.42 Rythme d'évolution, conditions météorologiques et bilan volumétrique sur les 7 secteurs de brise-vent de la plage du Clipon

A la fin de l'hiver (période 7) et au début du printemps (période 8), les vents forts sont moins fréquents (16,1 % et 16,3 %), mais les précipitations sont faibles (61,4 mm et 9,7 mm),

les apports éoliens sont donc maintenus. Ils sont encore plus importants lors de la période 9 au niveau de tous les secteurs sans exception, du fait de vents supérieurs à 8 m.s^{-1} fréquents (23,4 %) et de faibles précipitations (61,7 mm).

Enfin, lors de la dernière période qui s'étend de juin à octobre 2011, les structures ont été peu efficaces, en raison non seulement de vents forts moins fréquents (16,1 %), mais également en raison de la récurrence de niveaux d'eau supérieurs au niveau des PMVE (56 recensés pour le port Est, et 29 pour le port Ouest), ainsi qu'en raison du fait que certaines étaient déjà pleines de sable.

3.2. Saisonnalité du captage sur la digue du Braek

La période 1 a lieu à partir du mois de février, c'est-à-dire en hiver, et les ganivelles au contact plage/digue (D1) se remplissent très rapidement, en raison de vents longitudinaux à obliques en provenance d'Est (40,76 %) qui rabattent le sable du haut de plage vers la structure. Au niveau des ganivelles situées en arrière d'un couloir de déflation (D5), ce phénomène se produit également, même s'il est moins prononcé (Figure 6.43). Ce remplissage au niveau des quadrats situés au contact de la plage et des dunes est facilité par le fait que les structures sont vides et peuvent davantage capter le sable que lorsqu'elles sont pleines. Les autres structures sont plus éloignées des sources principales de sable et ont donc capté moins de sable, d'autant plus que les vents supérieurs à 12 m.s^{-1} n'ont quasiment pas soufflé (0,5 %).

Les périodes 2 à 4 correspondent au printemps. Les vents supérieurs à 12 m.s^{-1} sont bien plus fréquents (entre 1,9 et 2,2 %). La proportion des vents de terre faiblit, passant de 33,55 % lors de la période 1 à une part comprise entre 9,55 % et 20,05 % pour les trois périodes suivantes. Ces changements induisent d'une part un transport potentiellement plus important grâce aux vents plus forts, et une source de sable potentiellement plus grande puisque la déflation s'opère davantage sur le haut de plage et dans les dunes de pied de digue. De ce fait, la quasi-totalité des quadrats sont en accrétion (Figure 6.43). Cependant, pendant la période 3, on remarque une érosion dans les structures situées sur le versant externe de la digue (D3 : filets en croix ; D4 : casier de ganivelles ; D6 : casier de filets synthétiques) (Figure 6.43).

L'été correspond aux périodes 5 et 6, qui s'étendent du 14.06.2011 au 15.09.2011 (Figure 6.43). En dehors d'une accumulation marquée au niveau des filets situés en arrière des dunes de pied de digue lors de la période 5 (D7 : Figure 6.43), et au niveau des filets en croix pendant la période 6 (D3 : Figure 6.43), les structures sont très peu efficaces. Il est difficile de lier les conditions météorologiques aux volumes de sable mesurés étant donné les fortes perturbations dues aux activités humaines. La fréquentation touristique est bien plus importante sur la digue du Braek que sur la plage du Clipon ; alors que la faible efficacité des structures en été sur la plage du Clipon a été attribuée à l'érosion marine (faibles coefficients, même en cas de faible agitation) et la faible fréquence de vents efficaces, dans le cas de la digue du Braek les raisons sont davantage liées à des perturbations humaines, et des vents d'OSO dominants (61,69 % et 75,59 %) qui induisent une source de sable réduite par rapport aux vents de Nord et de NE, du fait de l'absence de plage sèche au droit de la digue plus à l'Ouest.

La dernière période, qui s'étend du 15.09.2011 au 21.12.2011 ce qui correspond à l'automne, est plus favorable au captage, surtout au niveau des ganivelles situées au contact plage/digue (D1 : Figure 6.43). Les vents de plus de 12 m.s^{-1} sont particulièrement présents (3,8%), et ont pu provoquer davantage de transport éolien qu'en été, ce qui pourrait expliquer cette plus forte accumulation. De plus la fréquentation touristique baisse en cette période, les perturbations sont donc moins importantes.

3.3. Comparaison des structures de la plage du Clipon et de la digue du Braek entre avril et mai 2011

Des levés topographiques ont été effectués sur l'ensemble des structures de la plage du Clipon et de la digue du Braek le 11.04.2011. Au niveau du Clipon, le levé suivant a été effectué le 17.05.2011, ce qui correspond à une période de 35 jours, tandis que sur la digue il a été effectué le 10.05.2011, soit une période de 28 jours. Entre le 10.05.2011 et le 17.05.2011, les vents ont été en provenance d'OSO (87,2 %), pour des vitesses comprises entre 4 et 8 m.s^{-1} à 68,8 % (12,5 % de vents entre 8 et 12 m.s^{-1}), et qui n'ont jamais excédé les 12 m.s^{-1} . Cela signifie que les vents les plus efficaces ont soufflé lors de la période commune.

Les volumes de sable qui se sont accumulés dans les quadrats de la plage du Clipon sont compris entre $-0,02 \text{ m}^3.\text{m}^2$ (3 rangées de filets synthétiques C3e) et $+ 0,07 \text{ m}^3.\text{m}^2$ (structure de comblement de brèche C3c) (Figure 6.44). Sur la digue du Braek, les valeurs

sont comprises entre $-0,03 \text{ m}^3.\text{m}^2$ (casiers de filets D6 et ganivelles D4 sur le versant externe de la digue) et $+0,10 \text{ m}^3.\text{m}^2$ (casier de filets en arrière d'un couloir de déflation) (Figure 6.44).

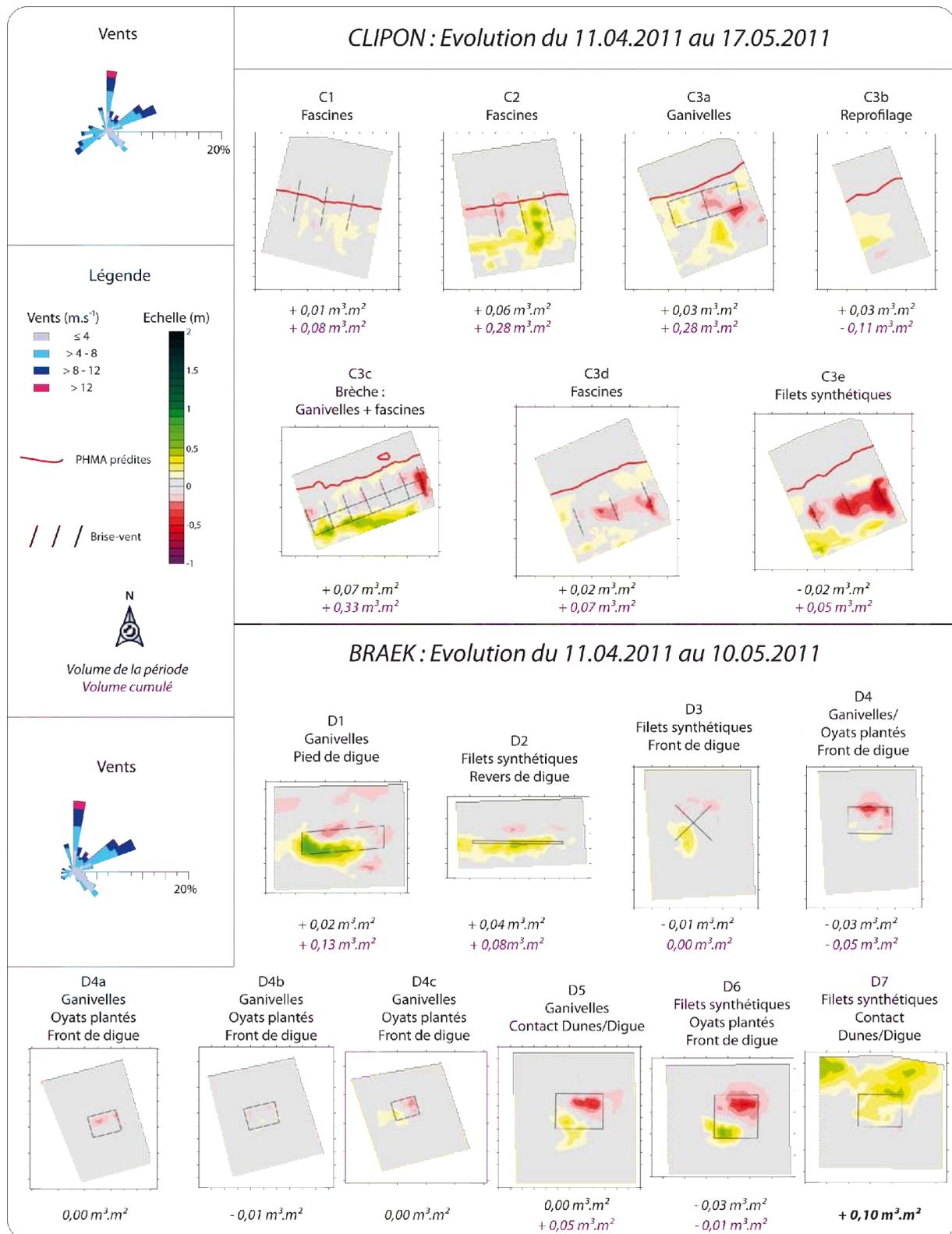


Figure 6.44 Comparaison des différentiels cartographiques et des quantités de sable capté au niveau des quadrats de la plage du Clipon et de la digue du Braek entre le 11.04.2011 et le 17.05.2011 (Clipon) ou le 10.05.2011 (Braek).

Que ce soit au niveau de la digue du Braek ou de la plage du Clipon, les vents supérieurs à 12 m.s^{-1} frontaux et obliques en provenance du NNE ont déplacé le sable au SO des structures, ce qui témoigne de la réponse identique des structures, qu'elles soient placées sur l'asphalte ou sur le sable.

CONCLUSION DU CHAPITRE 6

Au niveau de la plage du Clipon, les techniques de renforcement du cordon bordier ont toutes permis une accumulation sableuse en pied de dune, et des différences d'efficacité sont apparues selon les secteurs. A l'Ouest de la plage, le fetch est moins long, de ce fait la source de sable est moins grande et les structures se remplissent moins rapidement qu'au centre.

Cependant, les structures situées dans le centre ont subi l'érosion par les vagues, ce qui n'était pas le cas à l'Ouest, en raison de la dissipation de l'énergie de la houle sur la plateforme intertidale.

La structure de comblement de brèche a été la plus efficace : non seulement elle était située à un endroit où le fetch est long, mais elle se trouvait également hors de portée des hauts niveaux d'eau. De plus, il s'agissait d'un double dispositif comportant fascines sur le haut de plage et ganivelles dans la brèche.

Les structures expérimentales installées sur la digue du Braek ont montré que les brise-vent habituellement positionnés sur le haut de plage pouvaient également capter du sable lorsqu'elles sont sur un substrat en asphalte. Les plus efficaces sont celles qui étaient situées au contact d'une source de sable (D1 au contact plage/digue, D5 et D7 en arrière des dunes de pied de digue). De multiples dégradations ont été commises sur certaines structures, il a néanmoins été possible d'observer que celles qui étaient situées à l'Est de la digue ont permis l'accumulation de quantités de sable importantes, tandis que celles qui se trouvaient au centre et à l'Ouest n'ont quasiment pas piégé, en raison de l'absence de haut de plage sec.

Que ce soit sur la digue du Braek ou la plage du Clipon, les structures ont perdu de leur efficacité à partir du moment où elles étaient en partie remplies de sable. La végétation ne se développe que peu dans les structures, en raison d'importants mouvements de sable, mais des dunes embryonnaires sont apparues en haut de plage à l'Est de la digue du Braek.

Enfin, notons que sur la plage du Clipon, la source de sable principale provient du haut de plage, tandis que les structures qui étaient situées sur la digue du Braek pouvaient capter du sable provenant du haut de plage et des dunes de pied de digue, mais aussi de l'arrière de la digue, en raison de la présence de sable sur la route et en bordure du bassin maritime. Les conditions de vent pour lesquelles les dunes du Clipon peuvent capter du sable sont donc plus réduites que pour les structures qui sont sur la digue qui peuvent capter du sable lors de vents longitudinaux et transversaux.

Dans le chapitre suivant, l'ensemble des résultats mis en évidence lors de cette thèse seront synthétisés. Ils nous permettront ensuite de proposer des mesures de gestion adaptées à l'UG4 afin de contrôler le transport éolien et favoriser le développement de dunes.

CHAPITRE 7 - DYNAMIQUE EOLIENNE ET PROPOSITIONS DE GESTION SUR L'UG4

1. Dynamique dunaire

1.1. Bilan de l'évolution des dunes et superficies dunaires

L'étude de l'évolution moyen terme a révélé que la façade littorale du Grand Port Maritime de Dunkerque, bien que comportant plus de 6 km de dunes bordières le long de la moitié Ouest, était totalement artificielle. Les dunes végétalisées se sont fortement développées entre 1983 et 1999, contribuant également à une régularisation de la limite de la végétation. Cependant, depuis 1999, l'évolution des superficies dunaires s'est stabilisée, et depuis 1992, le centre du site est caractérisé par un recul du trait de côte.

1.1.1. Bilan à moyen terme

La dynamique dunaire a été fortement influencée par les aménagements humains. Au centre et à l'Est de la plage du Clipon, dans les secteurs « Falaise sableuse » et « Dunes du Clipon » (Figure 7.1), la plateforme supratidale artificielle a été peu à peu colonisée par la végétation depuis sa formation et un cordon bordier s'est formé en bordure externe de la plateforme au centre de la plage où l'on observe la plus forte augmentation des superficies dunaires (Dunes du Clipon : + 272 % de 1983 à 2009, Figure 7.1). A l'Est (falaise sableuse) le trait de côte recule depuis 1992, de ce fait les terrains gagnés lors de la construction de la plateforme supratidale ont été presque entièrement perdus. Il en résulte tout de même une augmentation des superficies dunaires faible par rapport à 1983 (+ 20%, Figure 7.1). A l'Ouest (plateforme intertidale), on se trouve en aval-dérive de la jetée Est de l'avant-port Ouest. Les études menées dans ce type de configuration montrent qu'habituellement un recul de trait de côte se produit du fait de l'interruption du transit sédimentaire causée par la présence d'une jetée (Walton et Sensabaugh, 1979; Mc Dougal et al., 1987 ; Kraus, et al., 1994 ; Basco, 2004 ; Aleman, 2012). C'est le cas également à quelques kilomètres de là, en aval-dérive de l'avant-port Est de Dunkerque (DHI, 2010), mais dans ce cas la jetée est beaucoup moins longue qu'au niveau de l'avant-port Ouest. Sur la plage du Clipon, on observe effectivement de l'érosion dans la partie Nord de la jetée de Ruytingen (chapitre 3). On n'observe pas le même phénomène en revanche plus au sud, à l'endroit où le trait de côte a la forme d'une anse. Dans le secteur de la plateforme intertidale, une augmentation des

superficies dunaires a été observée due à une flèche sableuse qui s'est accolée à la côte. Aujourd'hui, une deuxième flèche orientée Ouest-Est protège des vagues la plage et le cordon dunaire situés en arrière dans ce secteur, il en résulte un estran dénué de barres et de bâches et une sédimentation fine propice au développement de salicornes. Le fait que ce secteur ne soit pas en érosion pourrait également être expliqué par le fait que la distribution des vents soit caractérisée par deux directions dominantes : lors de vents d'OSO, le transit peut se faire d'Ouest en Est, tandis que lors de vents du quart NE, le centre du site peut constituer un secteur source pour l'Ouest, comme l'avaient déjà évoqué Bertier (2009) et plus récemment Héquette et al. (2012). Cependant, le secteur Ouest a peu évolué en termes de superficies (+ 20%, Figure 7.1). Une deuxième flèche s'est formée dès 1988, elle est enracinée à la base de la jetée du Clipon et orientée Ouest-Est. En arrière de la flèche, des dunes embryonnaires (*coppice dunes*) se sont formées.

Pour comparaison, à l'Est de Dunkerque jusqu'à la frontière belge (UG5), on observe une érosion généralisée du trait de côte entre 1983 et 1994, à un rythme de moyen de 0,92 m/an (Maspataud, 2011). Cette érosion pourrait être due à un nombre important d'évènements venteux persistants (plus de 72h) de secteur Nord (Maspataud, 2011). Sur la plage du Clipon, c'est une avancée que l'on observe (jusqu'à 250 m par endroits), surtout entre 1982 et 1988, mais elle est due comme nous l'avons vue à des interventions humaines. Cependant, la partie Est du Clipon est en érosion, ce qui coïncide avec les observations faites sur l'Est-Dunkerquois.

Entre 1994 et 2005, une stabilisation de la position du trait de côte a été observée à l'Est de Dunkerque (Dunes Dewulf et Dunes Marchand) (Maspataud, 2011), ce qui coïncide avec l'analyse de la position du trait de côte réalisée par J. Bertier (2009), ainsi qu'avec l'évolution de la limite de végétation, qui se stabilise sur l'UG4 au cours de cette même période. En effet, les superficies dunaires évoluent peu depuis 1999, en dehors de la formation d'un double cordon dunaire (*incipient foredune*) au centre de la plage du Clipon.

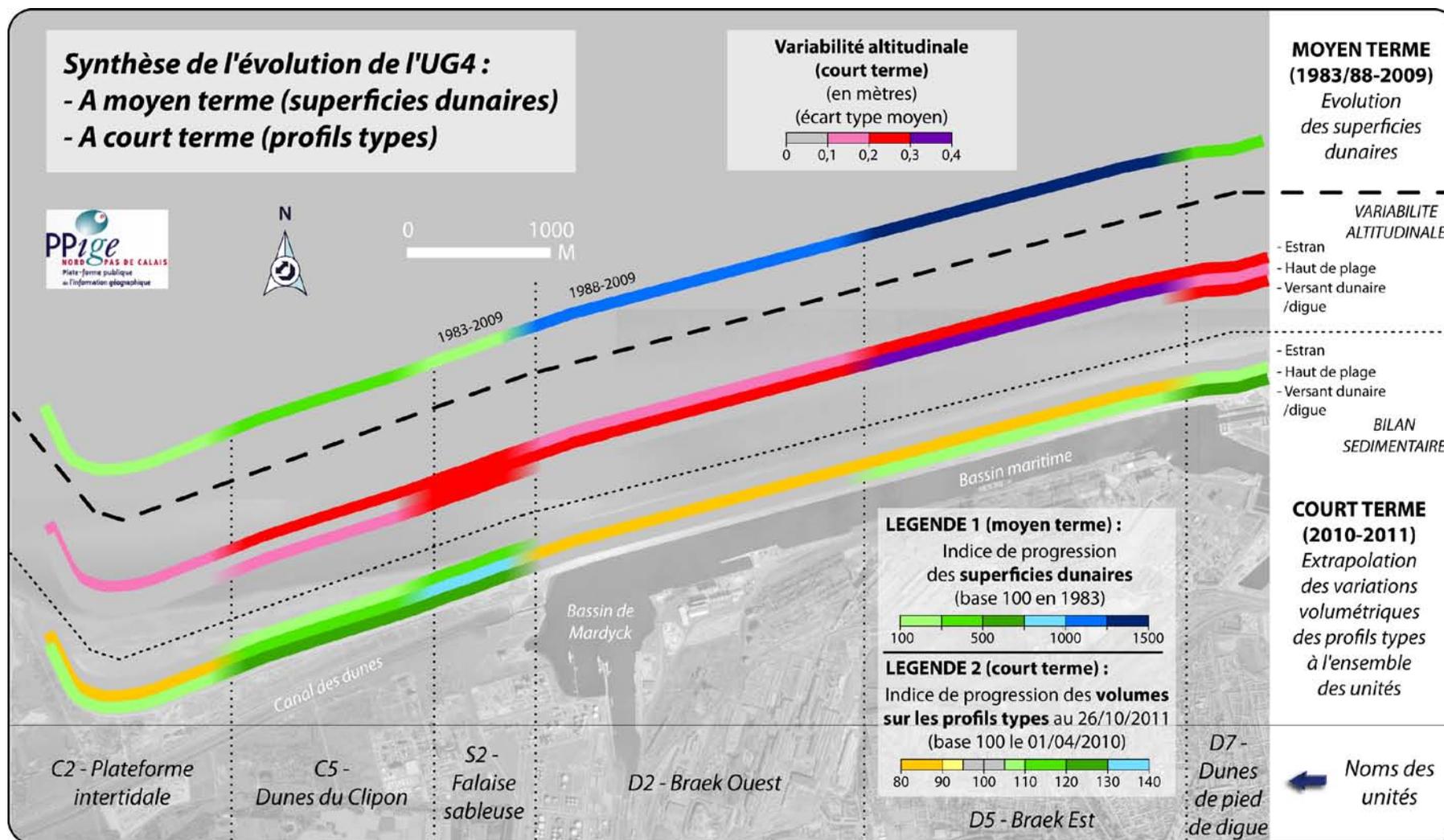


Figure 7.1. Synthèse de l'évolution de l'UG4 à long et à court terme, et variabilité altitudinale de la plage et du versant externe de la dune bordière. L'évolution des superficies dunaires et des volumes sur les profils types est exprimée en indice. L'indice 100 correspond à la superficie de la première photographie aérienne (1983) ou au premier volume pour les profils (01.04.2010), ce qui permet d'exprimer l'évolution dans le temps en pourcentage. Pour le court terme, ces valeurs ont été calculées pour les profils types et extrapolées à l'ensemble des unités définies, le reste des profils ayant confirmé une évolution homogène (Annexe 3). Néanmoins, ces évolutions pour une unité entière sont données à titre indicatif, et il se peut qu'il y ait des disparités qui n'apparaissent pas dans cette figure de synthèse.

En arrière du cordon de dunes bordières de la plage du Clipon, la plateforme supratidale n'a pas été remaniée ni par l'homme ni par le vent, de ce fait la morphologie interne est caractérisée par une multitude de buttes, et l'on n'observe pas de formes dunaires caractéristiques (dunes paraboliques) comme au niveau d'autres massifs dunaires « naturels », situés à quelques kilomètres de distance (Dunkerque Est). Le faible remaniement par le vent dans ces dunes internes est probablement dû au fait que la plateforme supratidale avait été constituée de matériaux issus du creusement du canal des dunes, composés d'une fraction fine (sablo-limoneux, chapitre 3). De ce fait le transport éolien a pu être limité, ce qui s'est traduit par une colonisation par la végétation sur la topographie en place, sans formation de dunes. A l'Ouest de la plateforme, au niveau des dunes qui se trouvent en arrière de la plateforme intertidale, la morphologie résulte de nombreuses interventions : exploitation d'une carrière de sable (carrière Sanson), incursions marines, plantations.

En résumé, la seule formation naturelle de dunes le long de la plage du Clipon est localisée au contact de la plage avec l'édification de la dune bordière actuelle qui a été permise par la granulométrie sableuse de la plage. En arrière du cordon bordier, la morphologie chaotique des dunes internes résulte de la formation d'une plateforme artificielle à l'aide de sédiments sablo-limoneux. Cette morphologie de buttes serait donc caractéristique sur ce site de l'intervention anthropique.

Sur la digue du Braek, l'évolution des superficies dunaires témoigne de l'activité éolienne sur le site, et de la formation de dunes, bien que le trait de côte soit resté stable pendant cette période. Sur la digue, la superficie des dunes a augmenté de 1200 à 1400 % entre 1988 et 2009, et la superficie de dunes de pied de digue a augmenté de 480 %. Cette forte progression par rapport à la plage du Clipon est due au fait qu'au départ, en 1983, les dunes étaient très peu développées. La progression est donc bien plus importante. La seule période où l'on a pu observer une réduction des superficies dunaires (1991 à 1994) correspond à la récurrence des événements venteux persistants de secteur Nord, qui avait provoqué de l'érosion à l'Est de Dunkerque. [J. Bertier \(2009\)](#) décrit que lors de conditions exceptionnellement agitées avec une houle en provenance du Nord, les vagues de tempête peuvent passer par-dessus la digue. La récurrence de ce type d'événements aurait pu provoquer une baisse de la superficie des dunes.

Malgré cette baisse des superficies dunaires pendant cette courte période, la particularité de ce site réside dans le fait que des dunes se sont développées sans intervention humaine spécifique. Alors que sur la plage du Clipon il a fallu intervenir afin de combler des brèches pour limiter l'érosion, sur la digue des dunes se créaient « naturellement ». Cette évolution est due en partie à la présence de la jetée de St-Pol à l'Est, qui bloque les transferts de sédiments, et permet la formation de dunes de pied de digue. La construction d'une jetée induit des modifications sur l'évolution du trait de côte, d'autant plus si elle est de dimension importante, comme c'est le cas des ouvrages portuaires. Cela provoque généralement un avancée du trait de côte en amont-dérive de jetées portuaires comme l'ont noté de nombreux auteurs (Ingle, 1996 ; Kraus et al., 1994 ; Sabatier, 2001 ; Schoonees et al., 2006 ; Samat, 2007 ; Ritphring and Tanaka, 2011 ; Kudale, 2010 ; Aleman et al., 2012).

L'observation des photographies aériennes au niveau de l'avant-port de Zeebrugge semble confirmer cela (cf. carte de localisation chapitre 1). A Zeebrugge, le trait de côte a la même orientation qu'à Dunkerque, et les conditions météo-marines sont identiques du fait de la proximité de ce site. On y observe de l'accumulation à l'Ouest de la jetée Ouest, confirmant l'interruption du transit de sédiments lorsqu'ils sont dirigés de l'Ouest vers l'Est (Figure 7.2). Cependant, l'extension de ces dunes dans le temps semble bien plus restreinte que les dunes de pied de digue à Dunkerque, ce qui peut être dû à des différences de gestion. A Zeebrugge, il s'agit d'une plage touristique aménagée (cabines de plages notamment - Figure 7.2), de ce fait l'extension des dunes est bien plus contrôlée que sur la digue du Braek où, bien que des extractions de sable aient pu avoir lieu dans le passé, l'extension des dunes de pied de digue n'a pas été gérée.

On voit également que de l'accumulation de produit à l'Est de l'avant-port de Zeebrugge, comme au niveau de la plateforme intertidale de l'UG4, ce qui appuie l'hypothèse non seulement du transit dirigé Est-Ouest, mais aussi de l'influence de la taille de la jetée sur l'évolution du trait de côte. Au niveau de l'UG4, on se situerait donc dans une situation de cellule sédimentaire quasiment fermée où les deux avant-ports bloqueraient les transferts de sédiments vers l'Ouest mais également vers l'Est. Ces sédiments proviendraient essentiellement du centre du site, qui est en érosion sur le long terme et contribueraient à l'alimentation de la plateforme intertidale à l'Ouest, et des dunes de pied de digue à l'Est.



Figure 7.2. Vue aérienne de l'avant-port de Zeebrugge (Belgique) avec, en médaillons, des zooms en 2007 et en 2009 sur les dunes formées près de la jetée Ouest © Google Earth

1.1.2. Bilan à court terme

L'étude des profils de plage (C2 et C3, annexes 3.1 à 3.4 et chapitre 4) a mis en évidence la stabilité de la plateforme intertidale située à l'Ouest du site (progression de 0 % pour le volume de l'ensemble du profil C2). L'écart type moyen des variations altitudinales le long du profil C2 est compris entre 0,06 m sur le haut de plage, et 0,12 m sur l'estran (Figure 7.1 et annexe 10).

Au centre de la plage (dunes du Clipon), la dune bordière est bien développée et en légère accrétion, surtout au niveau des profils C4 à C6 (annexes 3.5 à 3.10). Sur le profil C5, situé au centre de ce secteur, le volume au niveau du versant externe de la dune bordière a augmenté de 25 % entre le 01.04. 10 et le 26.10.11 (Figure 7.1). Sur l'estran, la variabilité altitudinale est plus importante qu'à l'Ouest du fait de la mobilité des barres et des bâches sur le profil (écart type moyen de 0.09 m sur le haut de plage et 0,24 m sur l'estran) (Figure 7.1 et annexe 10).

A l'Est de la plage (falaise sableuse), le volume du haut de plage est en augmentation de 34 %, et sur l'estran également mais de manière moins prononcée avec une hausse de 17 % (Figure 7.1). Cette accrétion est à nuancer sur l'ensemble du profil du fait de la plus grande variabilité altitudinale de la plage au niveau du profil S2 (écart type moyen en haut de plage

de 0,29 m, et 0,2 m en pied de falaise) (Figure 7.1 et annexe 10). L'évolution sur le court terme n'est donc pas conforme à ce que l'on observe sur le plus long terme.

Le long de la digue du Braek, le niveau de plage est bas et les barres intertidales proches du haut de plage, ce qui induit une forte variabilité altitudinale, surtout en pied d'ouvrage et dans la partie Braek Est. En effet, l'écart type moyen des variations altitudinales en pied de digue est de 0,23 m au niveau du profil D2 (Braek Ouest) et 0,39 m au niveau du profil D5 (Braek Est) (Figure 7.1 et annexe 10). Le bilan de l'évolution court terme montre une baisse des volumes de sable en pied de digue (-14 % pour D2 et -18 % pour D5), ce qui ne traduit pas forcément une érosion, mais une barre qui aurait migré vers le bas de plage au moment des mesures (Figure 7.1). Par ailleurs, le volume global au niveau de l'estran est stable, avec une baisse maximum de 1 % pour le profil D2.

Enfin, dans le secteur des dunes de pied de digue, l'estran est très stable également (volume en baisse d'1 %), en revanche, le volume des dunes s'est exhaussé de 7 % pendant la période de suivi des profils (Figure 7.1). Le fait que ces dunes soient peu couvertes de végétation engendre d'importantes variations de la quantité de sable, et l'écart type moyen est de 0,24 m dans la partie dunaire (au-dessus des PHMA) (Figure 7.1 et annexe 10).

1.1.3. Comparaison de l'évolution à moyen terme et à court terme

Cette thèse ainsi que l'étude d'évolution du trait de côte de J. Bertier (2009) montrent que durant la deuxième moitié du 20^{ème} siècle, les variations de la position du trait de côte ont été très importantes. Le rivage a gagné jusqu'à 900 m depuis 1949 au niveau du secteur Braek Ouest (Figure 7.3). Les mouvements les plus importants se sont produits au centre de l'UG4, avec une avancée minimum de 400 à 500 m pour le secteur des dunes du Clipon. Sur les marges en revanche (plateforme intertidale et dunes de pied de digue), la progradation du trait de côte est de l'ordre de 50 m (Figure 7.3). Ces changements sont tous dus à des travaux entrepris pour l'agrandissement de l'activité portuaire, il en a résulté un trait de côte à la position instable pendant des années.

Depuis 1988, c'est-à-dire après les plus grandes périodes de travaux, des profils levés par le Port Autonome de Dunkerque (jusqu'en 2001) puis par J. Bertier (2001 à 2006)

(Bertier, 2009) montrent que l'avancée du trait de côte n'est plus généralisée. De l'érosion (recul et abaissement du niveau de plage) se produit sur la partie Est de la plage du Clipon (profils P1800, P1300, P800 et P300) de 1988 à 2001, alors qu'au centre (profil P2300), la situation s'est stabilisée (Figure 7.3). Les données manquent pour le reste de l'UG4. Puis, jusqu'en 2006, l'érosion est très localisée de part et d'autre de la jonction entre la plage et la digue (comprise entre $-0,081 \text{ m}^3.\text{m}$ pour PDA et $-0,539 \text{ m}^3.\text{m}$ pour P300). Les profils P1800 et P1300 sont en situation d'accrétion, et la plateforme intertidale en légère érosion (Figure 7.3).

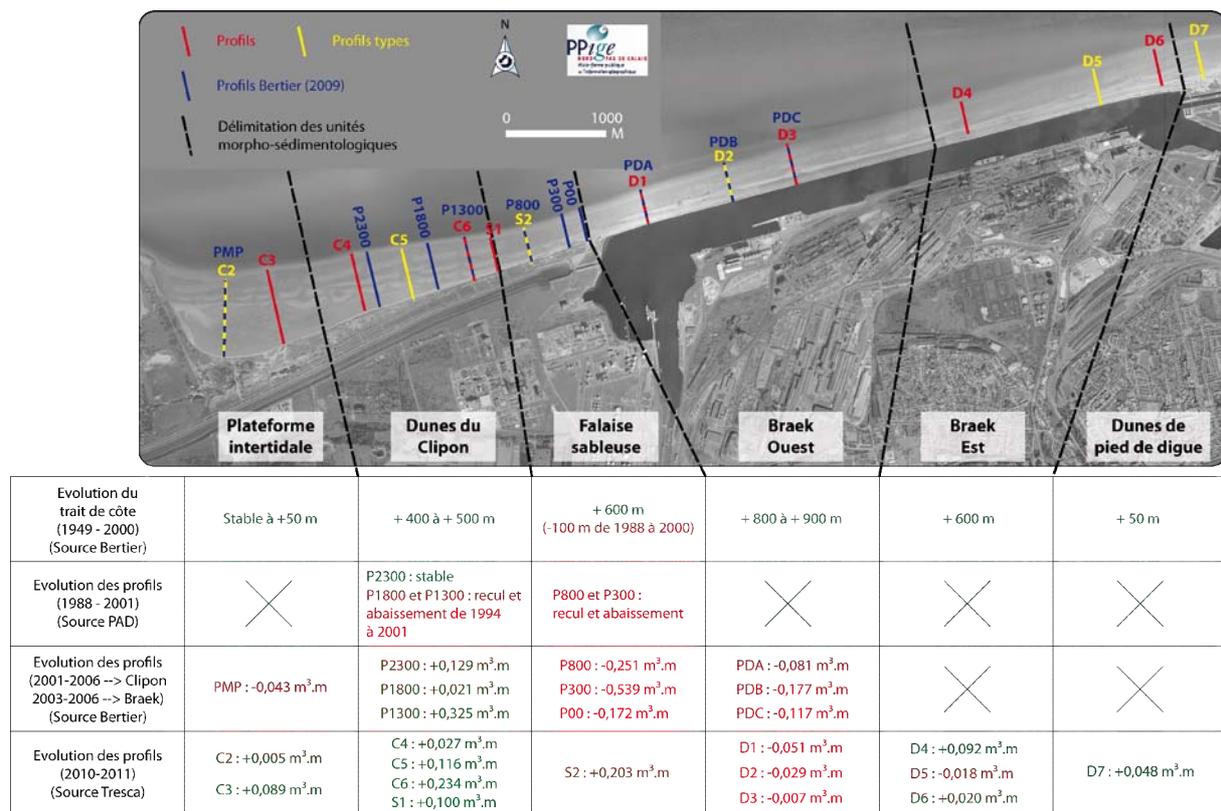


Figure 7.3. Comparaison des évolutions long terme et court terme à partir des profils (2011-2006) et de l'étude de trait de côte de Bertier (2009) ainsi que de levés topographiques du Port Autonome de Dunkerque entre 1988 et 2001

En 2010 et 2011, les variations sont de moindre importance. Au niveau du profil P800, qui est confondu avec le profil S2, alors que l'on pouvait observer de l'érosion jusqu'alors, on remarque une légère accrétion, qu'il faut néanmoins tempérer en raison des conditions météorologiques particulièrement calmes qui ont prévalu en 2010 et 2011. En effet, entre 2001 et 2006, des conditions de forte agitation avaient été enregistrées lors de coefficients de marée supérieurs à 100 (coups de vent de Nord avec des hauteurs significatives de vagues de plus de 2 m à la côte, voir Bertier, 2009) qui avaient provoqué de l'érosion dans ce secteur, ainsi qu'au droit de la digue.

Au fil du temps, on remarque donc que les variations de la position du trait de côte sont de moins en moins importantes. Les grands changements intervenus lors de la phase de travaux d'extension du port à la fin des années 1970 et au début des années 1980 sont le résultat d'interventions humaines qui ont pu contribuer à limiter l'érosion. Plus récemment, à partir du milieu des années 1990, les processus naturels et forçages ont contribué à régulariser puis stabiliser la position du trait de côte.

Cette stabilité actuelle est confirmée par les mesures faites dans le cadre d'un suivi hydro-sédimentaire de l'UG4 (Héquette et al., 2010 ; 2011 ; 2012). En effet, des MNT réalisés à partir de 42 profils topographiques répartis le long de l'UG4 effectués en avril 2010 et octobre 2011 (soit les mêmes dates que dans notre étude) montrent une accrétion globale de 134 000 m³. Cette valeur pourrait être interprétée comme une accrétion importante, mais si on la rapporte à la superficie du site d'étude (comprenant la plage et les dunes bordières) de 3 700 000 m², elle reste dans la marge d'erreur des systèmes de mesure utilisés, qui sont les mêmes que dans le cadre de notre étude (marge d'erreur altitudinale de +/- 10 cm), soit 370 000 m³.

1.2. Bilan de la dynamique éolienne

1.2.1. Les variables qui influencent le transport éolien

Les mesures *in situ* ont montré que la variabilité du transport éolien était forte, en raison d'un nombre important de variables environnementales difficiles à prendre en compte. Cette variabilité a été rencontrée dans de nombreuses études (Bauer et al., 1996 Gares et al., 1996; Jackson and Nordstrom, 1997; Meur-Férec and Ruz, 2002 ; Ruz and Meur-Férec, 2004). Dans cette thèse, les variables qui ont été identifiées comme influençant le transport sont : (1) le vent (vitesse et direction) ; (2) l'humidité ; (3) le fetch ; (4) la topographie ; (5) la source de sable disponible.

A l'Ouest du site (plateforme intertidale), le transport éolien est généralement faible ce qui a été mis en évidence non seulement par les piégeages *in situ*, mais aussi par les structures

en fascines C1 et C2 (chapitre 6). Par vent dominant d'OSO, la source de sable disponible pour le transport est très limitée du fait d'un fetch réduit. L'influence du fetch et de la source de sable a été mise en évidence dans de nombreuses études ([Davidson-Arnott and Law, 1990](#) ; [van der Wal, 1998](#) ; [Dong et al., 2004](#)), montrant que le transport augmentait parallèlement à l'allongement du fetch. C'est ce que nous avons montré dans notre étude lors de vitesses de vent intermédiaires comprises entre $6,6 \text{ m.s}^{-1}$ et 11 m.s^{-1} . Lors de ces conditions, le transport était plus important pour des vents parallèles à la côte sur le haut de plage sec au niveau du secteur central du Clipon (Tableau 7.1 - vents d'ENE). Comme l'a noté [Arens \(1996\)](#), le fetch et la source de sable sont maximaux lors de vents longitudinaux. Lorsque le vent est parallèle à la côte, un plus long fetch favorisera le transport éolien ([Bauer and Davidson-Arnott, 2002](#)).

En revanche, au centre de la plage du Clipon, ainsi qu'à l'Est de la digue du Braek, en conditions de fetch limité par vent oblique de NNE, nous avons obtenu les valeurs de transport parmi les plus importantes (Tableau 7.1 – vents de NNE). Les mêmes résultats ont été obtenus au niveau des dunes de pied de digue par vent longitudinal d'ENE, mais en conditions de fetch limité également du fait de la présence de la jetée de St-Pol. Lors de ces expérimentations, le vent soufflait à plus de 11 m.s^{-1} en moyenne, signifiant que lorsque la vitesse du vent est suffisante, du transport se produit même lorsque la surface de déflation est courte. Ces observations confirment celles faites par [Jackson et Cooper \(1999\)](#) en contexte macrotidal en Irlande du Nord. Ces auteurs ont démontré que lorsque la source de sable disponible est abondante et la vitesse du vent suffisante, le fetch a peu d'influence sur la quantité de sable transportée. Cette hypothèse a également été émise par [Lynch et al. \(2008\)](#), et plus récemment par [de Vries et al. \(2012\)](#), qui proposent un modèle conceptuel du transport éolien basé sur une relation linéaire entre vitesse du vent et la quantité de sable transporté.

La plupart du temps, l'humidité a été un frein au transport de sable, ce qui est conforme aux résultats de nombreuses autres études ([Hotta et al., 1984](#); [Sarre, 1987](#); [Bauer et al., 1990](#); [Kroon and Hoekstra, 1990](#); [Sherman et al., 1998](#)). En l'absence de précipitations, ce phénomène se produit principalement sur l'estran en contexte macrotidal, et particulièrement au niveau des bâches ([Vanhée, 2002](#) ; [Meur-Férec et Ruz, 2002](#) ; [Ruz et Meur-Férec, 2004](#) ; [Anthony et al., 2009](#)). En contexte microtidal, ce phénomène a été observé sur le haut de plage lors d'épisodes pluvieux ([Namikas et Sherman, 1995](#) ; [Jackson et Nordstrom, 1998](#)). Dans notre étude, le transport était fortement réduit lors de taux d'humidité supérieurs à 2 %, alors qu'il est communément admis que la valeur seuil est de 4 % ([Wiggs et al., 2004](#)). A

l'Ouest de la plage du Clipon, l'humidité quasiment constante au niveau de la plateforme intertidale réduit de ce fait les apports potentiels en direction du haut de plage et de la dune lors de vent obliques et frontaux.

Cependant, un transport important a pu se produire sur le haut de l'estran alors que le taux d'humidité était supérieur à 10 % (expérimentation du 16.06.11 – chapitre 5), renforçant ici encore le rôle prépondérant de la vitesse du vent. Bien que l'humidité de la surface sableuse puisse contribuer à réduire le transport éolien, celui-ci peut se produire même sur un substrat humide en cas de vent fort, ce qui a été mis en évidence notamment par une expérimentation *in situ* menée sur une plage au Danemark (Davidson-Arnott et al, 2005) et au Canada (Davidson-Arnott et al., 2007). Ces études démontrent que le rebond des grains de sable peut être facilité par la surface humide, à plus forte raison sur les surfaces planes ce qui était le cas ici, puisque ce résultat a été obtenu en limite de plateforme intertidale, sur une portion d'estran dénuée de barres et de bâches.

Tableau 7.1. Analyse annuelle des conditions de transport éolien potentiel

						Digue du Braek		Plage du Clipon	
						Sommet/front de digue	Contact plage/digue	Pied de dune	
Orientation du vent		Vent moyen pendant 10 min. à 2m (m.s ⁻¹)	Direction du vent (°)	Nombre d'heures par an	% du temps	Transport kg.m ⁻¹ .h ⁻¹	Transport m ³ .m ⁻¹ .an ⁻¹	Transport kg.m ⁻¹ .h ⁻¹	Transport m ³ .m ⁻¹ .an ⁻¹
Longitudinal	OSO	10,1 à 11,1	230 à 250	108	1,39%			68,6	2,80
		10,8 à 11,8		107	1,38%			95,5	3,85
	ENE	7,7 à 8,7	60 à 80	101	1,28%			29,5	1,12
		9,1 à 10,1		33	0,42%			40,2	0,50
Oblique	NNE	9,9 à 10,9	10 à 30	35	0,45%	28,7	0,38		
		9,8 à 10,8		38	0,49%	22,6	0,32		
		10,3 à 11,3		30	0,39%	26,3	0,30		
		10,6 à 11,6		68	0,86%			78,5	2,01

La topographie peut jouer un rôle important sur l'alimentation de la dune bordière. Lors de plusieurs expérimentations par vent oblique, il a été remarqué une différence dans les piégeages *in situ* entre les fortes valeurs de transport sur le haut de plage, et les faibles valeurs sur le versant externe de la dune bordière. Le pied de dune, qui constitue l'espace de contact entre la plage et la dune, est marqué par une rupture topographique qui serait favorable à l'accumulation du sable et au développement dunaire, comme l'ont noté Hesp et al. (2005), ce qui concorde avec nos observations au centre de la plage du Clipon.

Les dépôts à cet endroit favoriseraient les processus régularisation des micro-falaises dunaires dues à l'érosion par les vagues de tempêtes (Hesp et al., 2005). En situation de fetch court par vent oblique à la plage, les dépôts en pied de dune pourraient favoriser l'alimentation du cordon bordier plus haut sur le versant (profil C6 les 06.05.11 et 14.06.11). Cette hypothèse peut-être confirmée par les observations faites par Maspataud (2011) et Ruz and Anthony (2008) sur la côte de la plaine maritime flamande, ainsi que celles de Christiansen and Davidson-Arnott (2004) sur les côtes danoises. Ces auteurs ont montré que l'alimentation des dunes bordières pouvait se faire par remobilisation du sable en pied de versant, grâce à la formation d'une rampe à cet endroit.

1.2.2. Les spécificités du transport éolien sur la digue du Braek

Au cours de cette thèse, une attention particulière a été portée aux mouvements de sable qui se produisaient sur la digue du Braek. Le transport éolien au niveau de la digue du Braek est fortement influencé par trois paramètres principaux : la vitesse du vent, sa direction, et surtout la source de sable. Il apparaît qu'au niveau des parties Ouest et centrale de la digue, le transport éolien est très limité. Les structures de captage localisées à cet endroit ont permis de montrer que le captage y avait été insignifiant, même si les périodes de suivi ont été courtes. Ces faibles mouvements de sable peuvent être expliqués par l'absence de source de sable : absence de haut de plage sec, dunes de digue fixées par une végétation dense.

En revanche, à l'Est, les dunes de pied de digue sont encore très mobiles, en raison d'un couvert végétal peu dense et de nombreux couloirs de déflation, ce qui engendre des mouvements de sable (Figure 7.4). Lors de vitesses de vent intermédiaire (8 à 10 m.s⁻¹), les vents longitudinaux donnent lieu à un transport maximum sur le haut de plage. En effet, pour cette direction de vent, la plage constitue la principale source de sable, tandis que sur la digue le transport est réduit (Figure 7.4 -A et D). Par vent longitudinal de NE, le transport éolien est plus important sur la digue que sur la plage, grâce au stock sableux facilement mobilisable que représentent les dunes de pied de digue (Figure 7.4 -C), ce qui confirme les observations attestant que par fetch court, le transport est potentiellement important si la source de sable est suffisante (Jackson and Cooper, 1999 ; Lynch et al. 2008 ; de Vries et al., 2012).

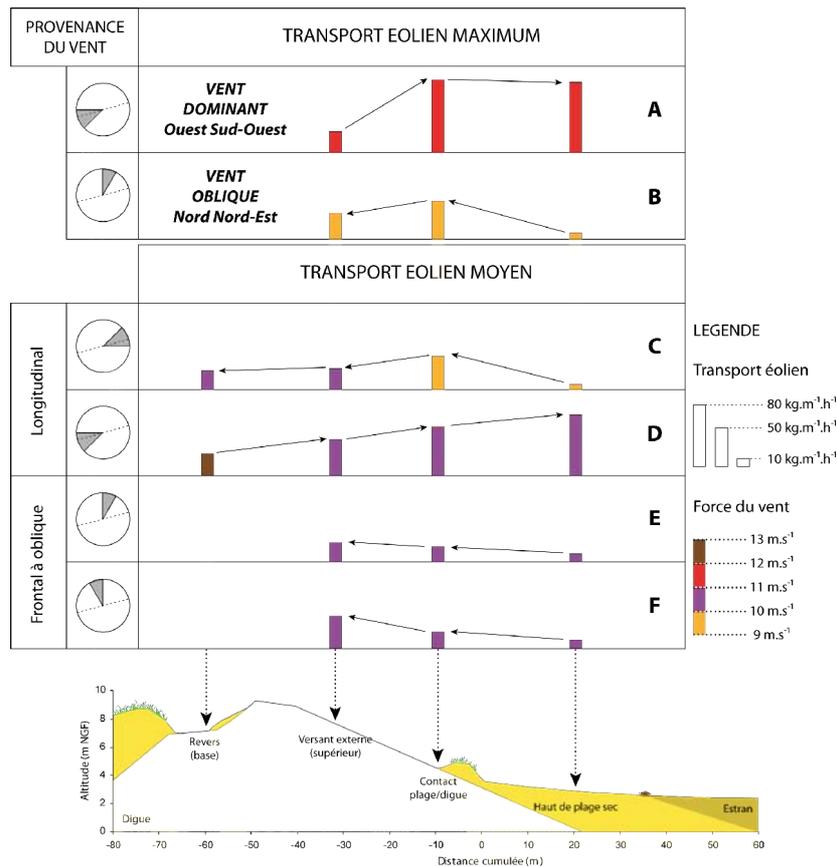


Figure 7.4. Synthèse des piègeages éoliens réalisés sur un profil transversal de la digue du Braek en fonction de l'angle d'incidence des vents. Le transport potentiel maximum lors des conditions dominantes d'OSO (A) et de NNE (B) a été distingué du transport éolien moyen sur l'ensemble des piègeages lors de différentes conditions de vent (C à F)

Les transferts de sable entre l'avant et l'arrière de la digue se produisent essentiellement lors de vents obliques et frontaux (NNO à NNE). Bien que sur cette partie de la digue nous disposions d'un haut de plage sec, le transport reste limité en raison de l'humidité du sable sur l'estran. En revanche, le transport éolien est plus important sur la digue (Figure 7.4 - B, E et F), en raison de l'exportation du sable provenant des dunes du pied de digue. Ce sable est exporté vers la route et le bassin maritime.

Ces observations tendent à montrer que malgré la séparation entre les dunes situées en bordure de bassin et la plage, des échanges se produisent, en raison de la forme de la digue qui permet une accélération de la vitesse du vent, confirmant les hypothèses émises par Nordstrom and Arens (1998). Le transport éolien sur la digue pourrait également être favorisé par les propriétés de l'asphalte qui semblent favoriser le rebond des sédiments, comme en attestent les piègeages à l'aide de coupelles (chapitre 5).

Les observations de transport éolien que nous venons de résumer peuvent être en partie expliquées par les mesures de vitesse du vent qui ont été faites aux endroits où étaient disposés les pièges (Tresca et al., 2012).

→ *Sur le versant externe de la digue*

Lors de conditions de vents de NNE et NNO (les plus propices au transfert du sable vers l'arrière de la digue), une forte accélération (« *speed up* », Hesp et al, 2005 ; Walker et al., 2009) se produit entre le pied de digue et la partie supérieure du versant externe. Cette accélération est plus marquée près du sol, et a atteint 30 % à 0,25 m lors de vents frontaux de NNO (fig. 7.36-A), et 50 % lors de vents obliques de NNE (fig. 7.36-B). Cette accélération permet de maintenir le transport éolien et de transférer le sable vers l'arrière de la digue.

Lorsque le vent est longitudinal, cette accélération est moins marquée puisqu'elle n'atteint pas 20 % (fig. 7.36-C). Pour ce type de conditions, la source de sable semble donc plus importante que la vitesse du vent.

En revanche, une légère décélération se produit à 0,25 m de hauteur entre le haut de plage et le pied de digue (fig. 7.36-A). Cette décélération au contact plage/digue semble être plus forte lorsque l'angle d'incidence des vents à la côte est important (vent frontal - fig. 7.36-A), elle faiblit lors d'un vent oblique (fig. 7.36-B), et elle est absente lorsque le vent est longitudinal (fig. 7.36-C).

Lors de vent dominant sub-parallèle d'OSO, les vitesses de vent sont plus importantes sur la digue que sur le haut de plage. Une décélération se produit donc entre ces deux points (fig. 7.36-D) en raison de la direction du vent légèrement offshore. Dans cette situation, la partie supérieure du versant externe est plus exposée, ce qui explique une vitesse de vent plus importante.

→ *Sur le versant interne de la digue*

Lors d'un vent sub-parallèle en provenance d'OSO, l'accélération entre le bas et le sommet du versant interne de la digue est forte, et bien plus prononcée à 0,25 m où elle atteint plus de 50 % (fig. 7.37-A). Cette accélération facilite l'exportation du sable en provenance des dunes du bassin vers le versant externe de la digue et la plage, où les vitesses décroissent.

Lorsque le vent provient du NE, il a été observé une accélération sur le versant externe, facilitant le transfert du sable des dunes vers la digue, puis quand il franchit le sommet, une décélération importante se produit (« *speed down* », Hesp, 2005) qui atteint 50 % (fig. 7.37-B), ce qui facilite le dépôt de sable à cet endroit.

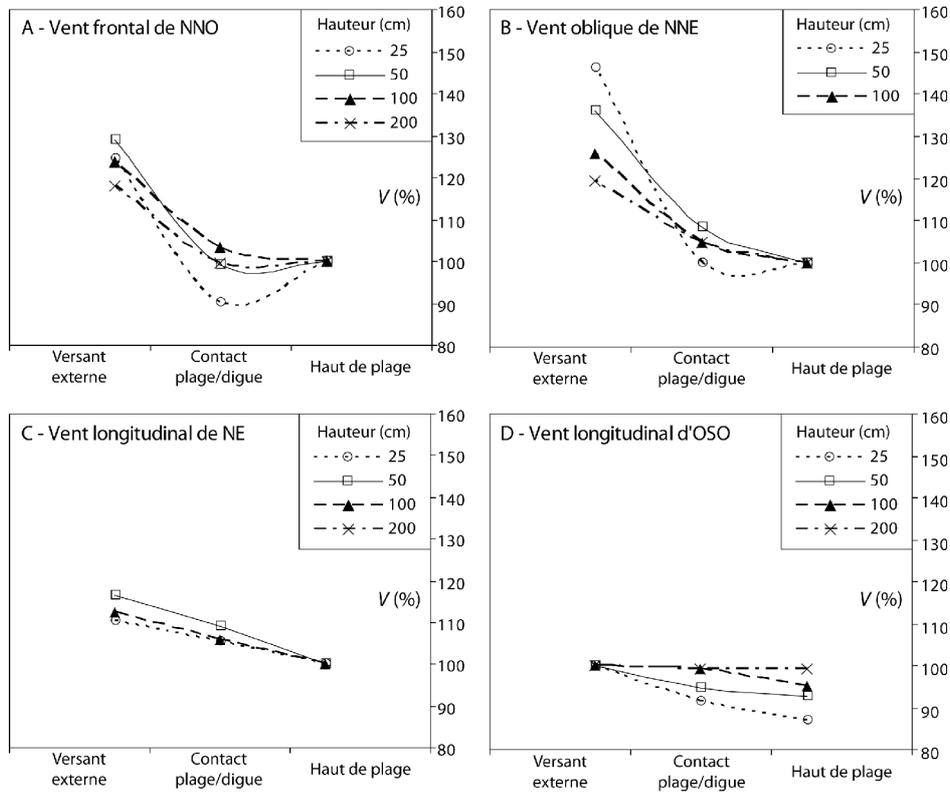


Figure 7.5. Accélération et décélération de la vitesse du vent entre le haut de plage et le versant externe de la digue par différentes conditions de vent et à différentes hauteurs. La vitesse (V) est indiquée en % par rapport à la vitesse la plus en amont qui est de 100%.

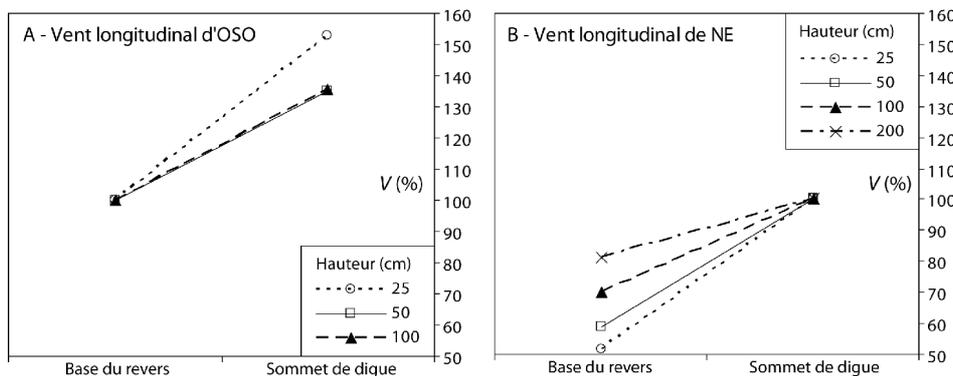


Figure 7.6. Accélération et décélération de la vitesse du vent entre le sommet et la base du versant interne de la digue par différentes conditions de vent et à différentes hauteurs. La vitesse (V) est indiquée en % par rapport à la vitesse la plus en amont qui est de 100%.

De nombreux travaux menés sur les versants dunaires ont mis en évidence les phénomènes d'accélération et de décélération dus à la topographie (Svasek & Terwindt, 1974 ; Christiansen & Davidson-Arnott, 2004 ; Hesp et al., 2005 ; Walker et al., 2009 ; Jarmalavicius et al., 2012). La digue semble donc jouer le même rôle ici.

En outre, les différences observées dans les vitesses au contact plage/digue en fonction de l'angle d'incidence des vents par rapport à la digue pourrait entraîner des modifications locales de la direction du vent dues à la topographie (*topographic steering*). C'est ce qu'ont révélé notamment les travaux de Hesp & Pringle (2001), Walker et al. (2006) et Walker & Hesp (2012) sur les dunes bordières lors de vents longitudinaux et obliques. Des mesures de la direction du vent à l'aide d'anémomètres à ultra-sons permettraient sans doute de préciser de tels effets 3D, qui peuvent également avoir une incidence sur la quantité de sable captés dans les pièges unidirectionnels, et avoir des répercussions en termes de gestion.

1.2.3. Dynamique générale du transport éolien le long de l'UG4

Le bilan de l'ensemble des observations faites sur le transport éolien le long de l'UG4 permet de mieux appréhender les sources de sable principales, les endroits et conditions pour lesquels le transport potentiel est le plus important (Figure 7.7).

Sur la plage du Clipon, la partie centrale est celle où le transport le plus important se produit lors de vents longitudinaux, en raison du long fetch à la fois par vents d'OSO et d'ENE. Les piégeages *in situ* ont permis de montrer l'importance du transport sur le haut de plage par vent longitudinal d'ENE. Par vent dominant d'OSO, parallèle à la dune bordière, les piégeages effectués au niveau des dunes de pied de digue montrent que les transferts sableux sont importants également. Cela est confirmé au niveau de la plage du Clipon non seulement par les apports plus importants dans les structures de captage situées les plus à l'Ouest, mais également par les profils topographiques où le bilan montre une accrétion plus importante en haut de plage à l'Est (profil S2) qu'à l'Ouest (profil C3) entre le 01.04.10 et le 26.10.11 (Figure 7.8), alors que les vents efficaces provenaient essentiellement d'OSO (chapitre 4).

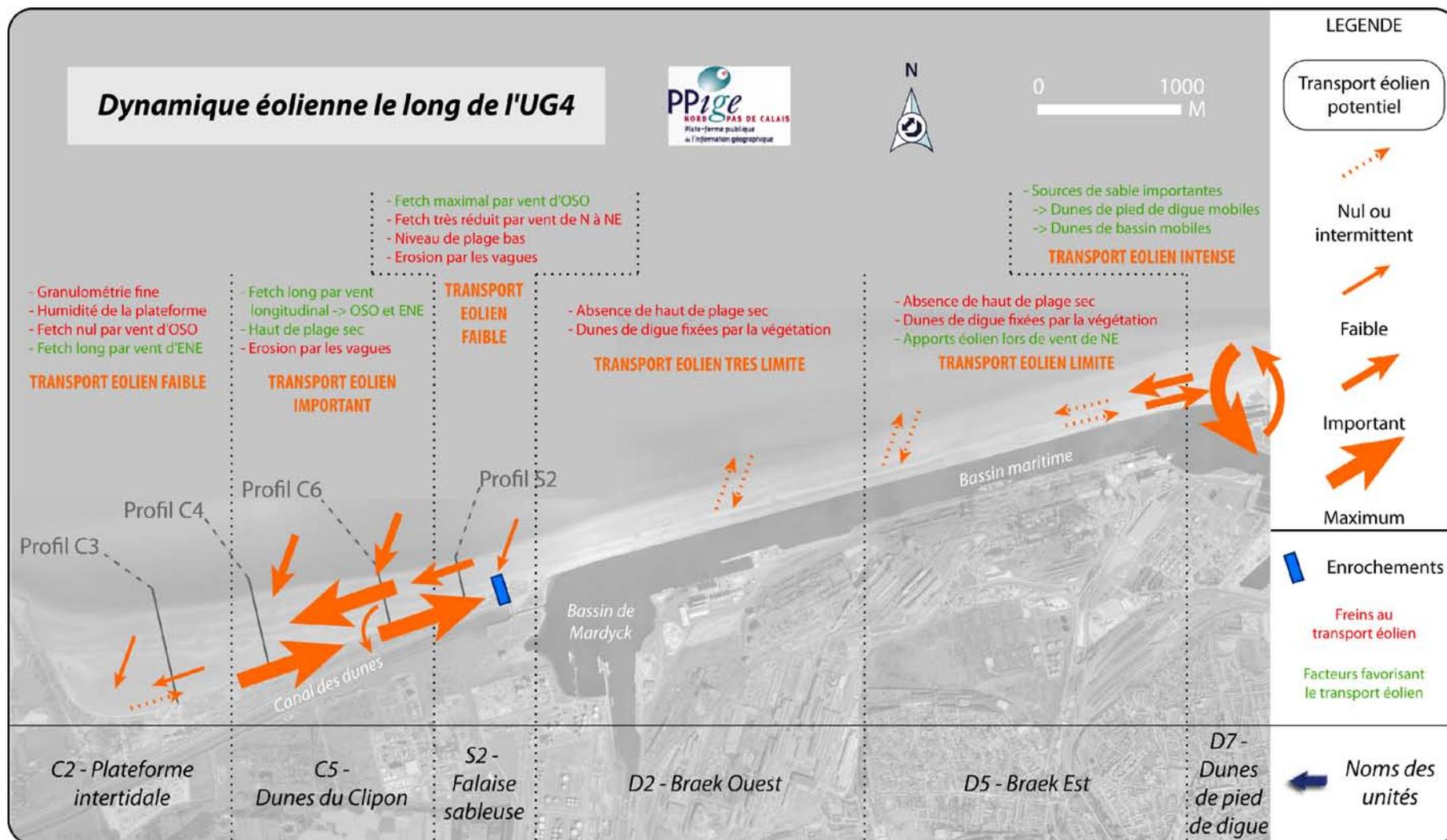


Figure 7.7. Représentation schématique de la dynamique éolienne le long de l'UG4

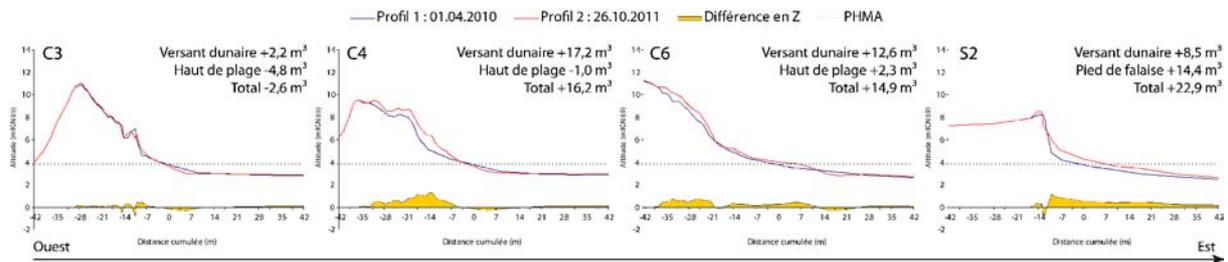


Figure 7.8. Evolution de 4 profils topographiques entre le 01.04.10 (bleu) et le 26.10.11 (rouge)

Les piégeages n'ont montré qu'une faible alimentation potentielle du versant dunaire, par l'intermédiaire de la création d'une rampe en pied de dune. Cependant, les structures de captage qui ont favorisé le dépôt au contact plage/digue ont confirmé que ce phénomène se produisait, confirmant ainsi les observations de terrain de [Ruz and Anthony \(2008\)](#) et [Anthony et al. \(2007\)](#) qui avaient observé ce phénomène avec des fascines. Si de l'accrétion peut se produire sur le versant dunaire au centre de la plage du Clipon par ce biais, ce n'est pas le cas à l'Est du Clipon, en raison de la falaise sableuse et de l'absence de dune bordière.

A l'Est du site, des échanges transversaux intenses se produisent en raison de la présence de dunes peu stabilisées en pied de digue. Des échanges longitudinaux se produisent également en raison de la présence d'un haut de plage sec (contrairement au centre et à l'Ouest de la digue).

De manière générale, sur l'ensemble de l'UG4, la vitesse du vent et la source de sable sont des variables clefs, qui peuvent potentiellement provoquer le transport éolien quelque soient les conditions environnementales par ailleurs (humidité, fetch).

2. Structures de captage et propositions de gestion

2.1. Discussion sur l'efficacité des structures de captage

2.1.1. Remarques générales

La comparaison de trois quadrats contenant des structures à celui qui en était dépourvu (C3b – reprofilage), tous situés dans le même secteur de la plage du Clipon, met en évidence

l'efficacité des différents types de brise-vent quels qu'ils soient (Figure 7.9). Le quadrat où a été effectué un reprofilage a perdu du sable, principalement sur le haut de plage ($-0,16 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^2$), sur l'ensemble de la période d'étude de 14 mois, tandis que dans ceux contenant des brise-vent, une accrétion comprise entre $+0,41 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^2$ (filets synthétiques) et $+0,66 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^2$ (ganivelles) s'est produite (Figure 7.9). Ce résultat permet de confirmer l'efficacité de ce type de mesures de gestion au contact plage/dune (Mendelssohn et al., 1991 ; Anthony et al., 2007 ; Ruz and Anthony, 2008 ; Grafals-Soto, 2012). Cela montre également que de fortes valeurs de transport éolien sur le haut de plage par vent longitudinal n'engendrent pas forcément d'accumulation en l'absence de structures brise-vent, comme l'avaient fait remarquer Ruz and Meur-Férec (2004).

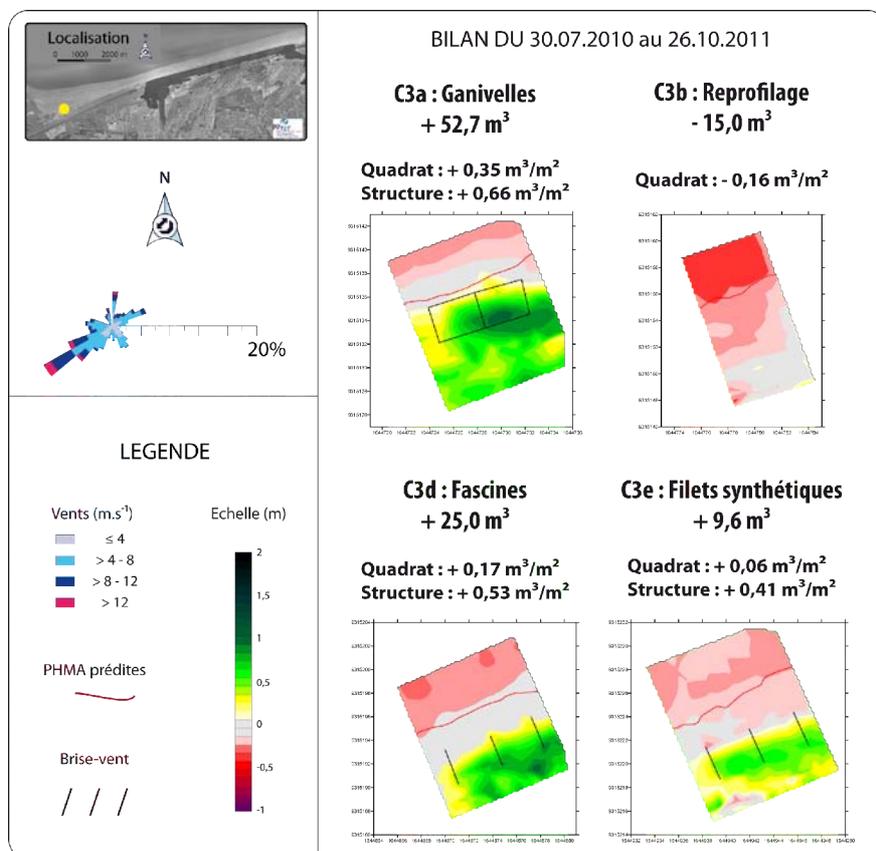


Figure 7.9. Compraison des MNT différentiels au niveau de quatre quadrats chacun équipés d'une mesure de gestion différente (brise-vent ou reprofilage dunaire).

Néanmoins, il a été démontré que l'accumulation du sable par l'intermédiaire de brise-vent ne pouvait se produire que sur les plages au budget sédimentaire en équilibre ou excédentaire (Ruz and Anthony, 2008), ce qui est le cas sur l'UG4. Sur le site d'étude, il a été remarqué une meilleure efficacité des structures entre l'automne et le printemps, surtout au niveau de la digue du Braek, principalement en raison de dégradations dues à la fréquentation

en été. Habituellement, les guides destinés aux gestionnaires locaux des dunes (NSW, 2001 ; SNH, 2000) préconisent d'installer les brise-vent juste avant l'été (mois de mai), afin d'éviter l'érosion par les vagues de tempête hivernales (Ruz and Meur-Férec, 2004), mais également pour favoriser le développement de la végétation pionnière au printemps (Favenec, 2001). Dans le cas de l'UG4, si les structures sont positionnées à la bonne altitude et qu'un entretien régulier est effectué, il serait judicieux d'installer les structures entre l'automne et le printemps, et de les retirer en été. Cela est particulièrement vrai pour la digue du Braek. En revanche, l'accès à la plage du Clipon étant réglementé depuis peu, la fréquentation sera moins importante (voire absente). De ce fait, les structures pourront être installées en été.

2.1.2. Vitesse d'accumulation

L'efficacité de certaines structures semble décliner lorsqu'elles sont même partiellement remplies, comme cela a pu être remarqué sur plusieurs autres plages (Grafals-Soto and Nordstrom, 2009) (Figure 7.10). Au moment de l'installation d'une barrière brise-vent, celle-ci perturbe le milieu original (*intrusive stage*), et plus elle est enfouie, moins elle aura d'impact sur son environnement (*integrated stage*). De ce fait, l'efficacité baisserait avec le temps.

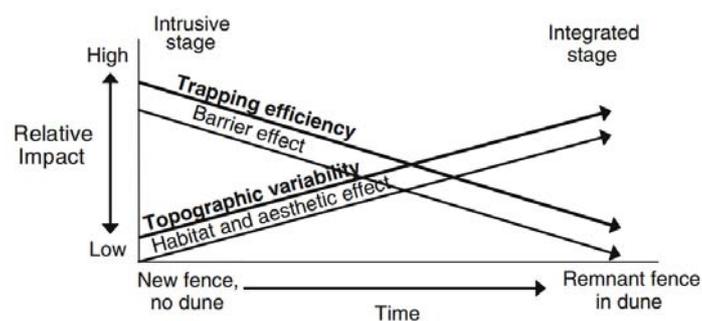


Figure 7.10. Impact des brise-vent sur l'accumulation du sable au cours du temps (Grafals-Soto and Nordstrom, 2009)

Une étude menée en soufflerie a permis de montrer que des ganivelles de différentes porosités (0 à 50%) perdaient de leur efficacité de captage lorsqu'elles étaient enfouies à plus de 80 % (Hotta and Horikawa, 1990). Dans notre étude menée *in situ*, le ralentissement du rythme d'accumulation semble se faire avant cette valeur d'enfouissement qui est intervenue seulement vers la fin du suivi. Cette expression de valeur d'enfouissement correspondrait à la hauteur de brise-vent enfouie sous le sable (une haie d'1 m de hauteur hors-sol au départ et

dont 0,8 m seraient enfouis à la fin du suivi aurait une valeur d'enfouissement de 80 %). Une valeur d'enfouissement de 50 % a été mise en évidence par [Lopez and Marcomini \(2004\)](#) à partir de mesures faites *in situ* sur la plage, ce qui semble davantage conforme à ce que nous avons pu observer.

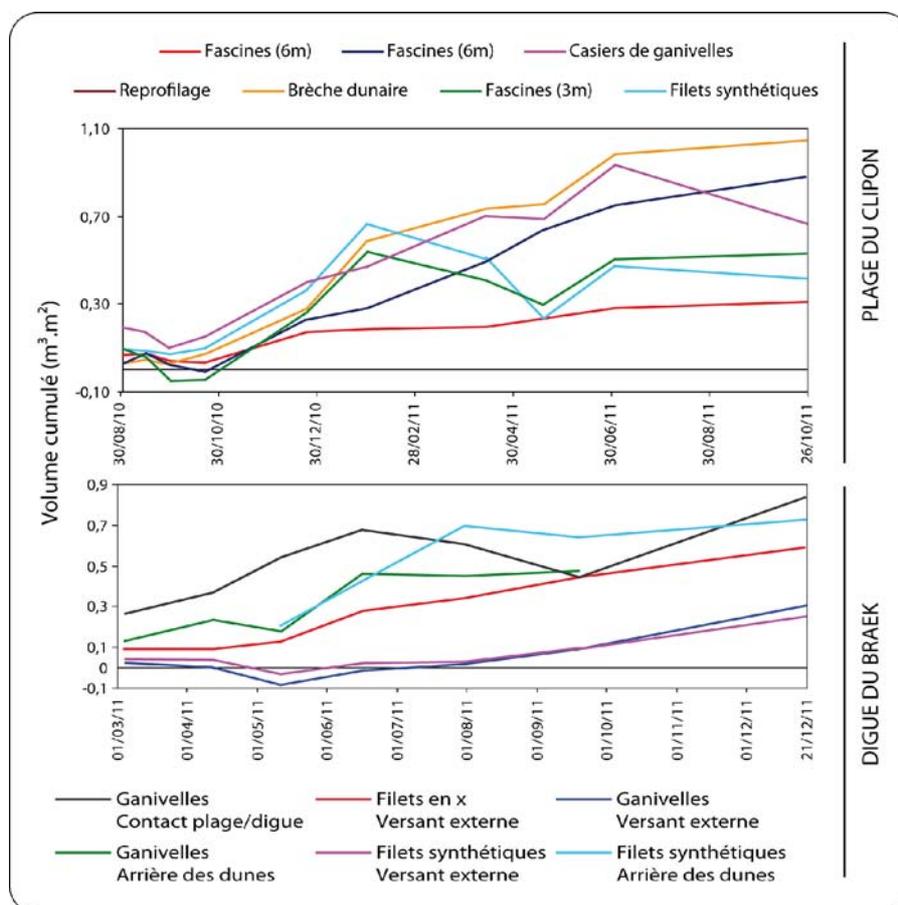


Figure 7.11. Vitesse d'accumulation au sein des structures de la plage du Clipon et la digue du Braek

Les structures se remplissent rapidement juste après leur implantation. Sur la plage du Clipon, la plupart du sable s'est déposé durant les 5 premiers mois (Figure 7.11), alors que la quantité de sable était comprise entre 0,5 et 0,7 $m^3.m^2$, puis le sable s'est déposé plus lentement, et certaines structures en ont même perdu (fascines de 3 m et filets synthétiques) (Figure 7.11). L'accumulation se poursuit dans trois structures : il s'agit des deux les plus grandes, qui pouvaient donc stocker davantage de sable (brèche dunaire et fascines de 6 m en bleu - Figure 7.11), ainsi que les fascines (6 m en rouge - Figure 7.11) situées à l'Ouest du Clipon où le transport est réduit, et donc l'accumulation plus lente. Par comparaison, [Mendelsohn et al. \(1991\)](#) ont noté un ralentissement de l'accumulation au bout de 27 mois seulement, mais cette étude avait été menée dans des conditions différentes : contexte

microtidal, source de sable limitée et nombre de brise-vent bien plus important (linéaire de 200 m alors que les structures dans notre étude font entre 4 et 9 m de long).

Sur la digue, le même phénomène se produit. L'accumulation est rapide au début, puis ralentit lorsque la quantité de sable est comprise entre 0,5 et 0,7 m³.m² (ganivelles au contact plage/digue et en arrière des dunes, et filets synthétiques en arrière des dunes) (Figure 7.11). Cependant, ce niveau de sable est atteint au bout de 3,5 mois, ce qui est plus rapide que sur la plage du Clipon. Au niveau des deux casiers (filets et ganivelles) artificiellement remplis au départ et situés sur le versant externe de la digue, la quantité de sable est stable au début du suivi, puis de l'accumulation se produit à partir de 5,5 mois. Enfin, au niveau de la structure en filets synthétiques en forme de croix, l'accumulation est continue tout au long du suivi.

2.1.3. *Quantités captées*

La comparaison des volumes captés dans les structures avec les changements volumétriques le long des profils topographiques tend à confirmer l'efficacité des différents types de brise-vent. Le profil topographique C3 est situé dans le même secteur que les structures C3a à C3e. Le volume le long du profil a été calculé sur la même emprise que celle des quadrats (15 m de long au dessus des PHMA). Alors que le profil C3 a été stable (perte de 0,05 m³.m⁻¹.an⁻¹, ce qui est inférieur à la marge d'erreur), les structures de pied de dune ont capté entre 0,31 m³.m².an⁻¹ (C3e : filets synthétiques) et 0,78 m³.m².an⁻¹ (C3c : structure de comblement de brèche).

Afin d'être en mesure de comparer les quantités de sable qui peuvent potentiellement transiter sur la plage à celles qui ont été captées dans les structures, nous avons changé les unités volumétrique (Tableau 7.2). Les captages seront ici exprimés en m³ par m² par année, et les résultats des piégeages en m³ par mètre linéaire par an. La quantité maximale de sable captée dans les structures est de 0,98 m³.m².an⁻¹, ce qui représente un volume inférieur à celui qui a été obtenu pour les conditions optimales de transport éolien potentiel (3,85 m³.m⁻¹.an⁻¹). Ces deux valeurs ont été obtenues au contact plage/digue à l'Ouest des dunes de pied de digue. Cette différence s'explique par le fait que le transport potentiel a été calculé pour les conditions les plus favorables (vent fort et unidirectionnel) et en 10 minutes, il s'agit d'une valeur maximale. A l'inverse, la quantité de sable capté dans la structure est le résultat de

conditions de vent variées, non optimales (toutes vitesses de vent, toutes directions, précipitations) et au cours d'une période de temps de plusieurs semaines.

Tableau 7.2. Comparaison du transport éolien potentiel et des variations volumétriques au niveau des profils et des structures de captage

Transport éolien potentiel					Structures de captage				Profils topographiques	
		m ³ .m ⁻¹ .an ⁻¹					m ³ .m ² .an ⁻¹			
		Digue du Braek		Plage du Clipon	Digue du Braek		Plage du Clipon			
Orientation du vent	Profil	Sommet/versant externe	Contact plage/digue	Pied de dune	Sommet/versant externe	Contact plage/digue	Pied de dune		m ³ .m ² .an ⁻¹	
Longitudinal	OSO	D6		2,80	D1			C2	-0,05	
				3,85		D3			0,69	C3
	ENE	C3			D4	0,36		C4	0,01	
		C5				D6	0,29		C5	0,11
Oblique	NNE	D6	0,38		C1			0,23	C6	0,14
			0,32		C2			0,66	S1	0,30
			0,30		C3a			0,50	S2	0,39
		C4		2,01	C3c			0,78		
					C3d			0,40		
						C3e		0,31		

Sur le versant externe de la digue du Braek, les valeurs de transport potentiel obtenues (0,30 à 0,38 m³.m⁻¹.an⁻¹) sont comparables aux volumes captés dans les casiers en ganivelles (D4 : 0,36 m³.m².an⁻¹) et en filets (D6 : 0,29 m³.m².an⁻¹). Ces deux structures sont cependant celles qui ont été les moins efficaces (Tableau 7.2).

Bien que ces résultats montrent l'efficacité des structures, les valeurs de captage semblent faibles par rapport à celles obtenues par [Mendelssohn et al. \(1991\)](#), qui avaient calculé une accumulation de 2,7 à 4,2 m³.m² dans des quadrats de fascines de 15 x 15 m, avec les mêmes caractéristiques (1,2 m de hauteur hors sol, 50 % de porosité), sur une plage microtidale soumise à des vents essentiellement frontaux à obliques ainsi qu'à des fortes précipitations et des tempêtes de forte intensité. Ce résultat est en partie expliqué par le fait que des plantations avaient été effectuées en même temps que l'installation des fascines. De ce fait, la réduction de l'efficacité des structures due à l'enfouissement a été tempérée par la végétation qui s'est développée et a joué le rôle de brise-vent lorsque les structures étaient pleines.

Trois autres études ayant analysé la quantité de sable lors de l'implantation de fascines obtiennent des résultats similaires avec des volumes de l'ordre de $0,016 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{j}^{-1}$ (soit $5,84 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{an}^{-1}$) (Miller et al., 2001), $0,08 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{j}^{-1}$ (soit $29,2 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{an}^{-1}$) (Lopez and Marcomini, 2004) et $14 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{an}^{-1}$ (Knutson, 1980). Cependant ces auteurs ne précisent pas la longueur des profils sur lesquels ces mesures ont été effectuées. A titre de comparaison, si l'on convertit les volumes que nous avons obtenus, dont l'unité initiale était le $\text{m}^3 \cdot \text{m}^2 \cdot \text{an}^{-1}$, pour l'étendre à la longueur des quadrats (15 m de la plage vers le sommet de dune), nous obtenons des valeurs comprises entre $3,45 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{an}^{-1}$ (correspondant aux $0,23 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^2 \cdot \text{an}^{-1}$ pour la structure en fascines C1, Tableau 7.2) et $11,7 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{an}^{-1}$ (correspondant aux $0,78 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^2 \cdot \text{an}^{-1}$ pour la structure de comblement de brèche C3c, Tableau 7.2), ce qui correspond aux volumes obtenues dans ces études et celle de Mendelsohn et al. (1991).

Les résultats d'une étude menée à Leffrinckoucke à l'Est de Dunkerque (Ruz and Anthony, 2008), sur des structures de captage du même type que celles qui sont analysées ici (trois rangées de fascines d'1,20 m hors sol), et soumises à des conditions de marnage et de météorologie similaires, ont révélé une accrétion de $+8,89 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-1}$ sur une période de 14 mois, sur un profil de 35 m de longueur. Cela correspond à une accumulation de $7,62 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{an}^{-1}$ sur les 35 m de profil, ou à une moyenne de $3,27 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^2$. Cette valeur est comprise dans l'intervalle de celles que nous avons obtenus dans les quadrats qui ont été mis en place ici ($+2,7$ à $+4,2 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^2$).

2.2. Préconisations pour le type de structures et leur localisation

2.2.1. Types de structures

Deux structures ont été installées sur le versant externe de la digue : un casier en filets (D6) et un casier en ganivelles (D4). Ces deux structures ont été peu efficaces, et ont capté la même quantité de sable.

Deux autres types de structures ont été implantées en arrière couloir de déflation (Figure 7.12). Les filets synthétiques (D7) semblent avoir été plus efficaces que les ganivelles (D5). Cependant, cette différence pourrait être expliquée par la localisation : à l'avant du casier en filets synthétiques, les dunes étaient plus hautes, de ce fait la structure était plus

abritée et il y avait moins de déflation autour. Au niveau du casier de ganivelles (D5), les dunes étaient plus basses, et le couloir de déflation plus court, de ce fait il s'agissait d'un endroit beaucoup plus ouvert où les vents ont pu exporter plus facilement les dépôts qui se sont créés.

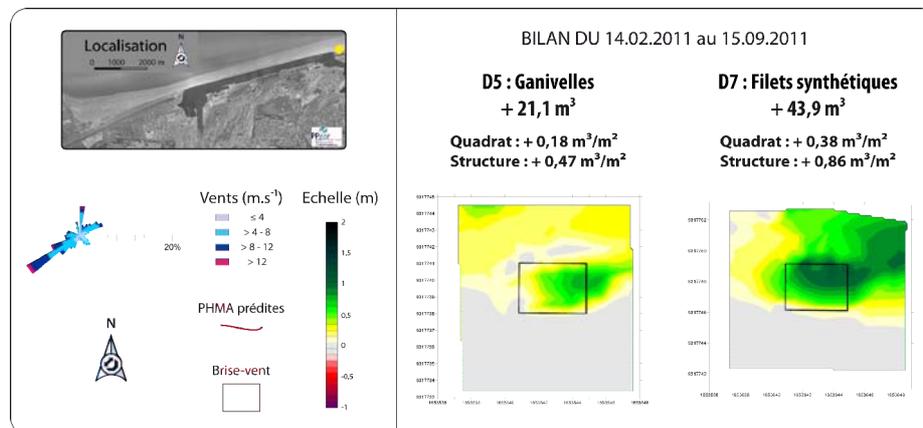


Figure 7.12. Comparaison d'un casier de ganivelles et d'un casier de fascines par MNT différentiel sur la digue du Braek

Sur la plage du Clipon, trois matériaux différents ont été placés en pied de dune. Les trois quadrats étaient éloignés les uns des autres d'une distance comprise entre 100 m et 200 m. La plus forte accumulation s'est faite au niveau des ganivelles (Figure 7.9) avec $+0,66 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^2$, devant les fascines ($+0,53 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^2$) et les filets synthétiques ($+0,41 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^2$). Cette plus faible efficacité au niveau des filets synthétiques tend à confirmer que l'influence de la localisation pour le remplissage D7 de la structure située en arrière des dunes de pied de digue (Figure 7.12).

Une étude comparative de l'effet des filets synthétiques et des fascines sur l'accumulation du sable a été menée par [Miller et al. \(2001\)](#), qui aboutit à une efficacité similaire pour ces deux types de matériaux. Ces auteurs mettent cependant en avant qu'au bout d'une période de 18 mois, les filets s'étaient fragilisés et avaient été arrachés par le vent, rendant leur effet brise-vent moins efficace que les fascines.

Les ganivelles ont été les plus efficaces, ce qui pourrait être expliqué par la forme en casier ayant favorisé l'accumulation du sable quelque soit la direction du vent. Les fascines étaient disposées en rangées et l'on peut penser qu'une partie du sable a pu être exportée vers la dune lorsque le vent était parallèle par effet de rampe ([Ruz and Anthony, 2008](#)). Si la forme

en casier a pu permettre une plus forte accumulation à l'intérieur, cela n'a cependant pas empêché le sable de gagner le versant dunaire en arrière, comme on peut s'en apercevoir sur la Figure 7.9. L'efficacité des fascines et des ganivelles semble donc proche, mais la disposition en casiers pourrait permettre une accumulation plus importante. Il pourrait être envisagé d'implanter sur le versant dunaire des structures en casiers, combinées à des rangées à l'avant sur le haut de plage, comme pour la structure de comblement de brèche, qui a été la plus efficace.

En ce qui concerne le prix de revient des différents types de matériaux, les filets synthétiques ont un prix global (comprenant le dispositif et son installation) bien inférieur (9 € le mètre linéaire) à celui des fascines et ganivelles, pour lesquels il est équivalent (20 € du mètre linéaire). De plus, les filets synthétiques ont l'avantage de pouvoir facilement régler le degré de perméabilité sur ce type de matière, contrairement aux fascines et ganivelles où ce type de réglage est plus approximatif. Cependant, et comme le faisait remarquer Favennec (2001), lorsque les structures sont remplies et recouvertes de sable, elles ne sont plus visibles mais restent sur site, il serait donc préférable d'utiliser un matériau naturel et biodégradable.

2.2.2. Localisation des structures

2.2.2.1. Localisation en fonction des sources de sable

Comme cela a été évoqué, l'efficacité des structures de captage dépend fortement de la source de sable disponible et de la direction des vents (influence du fetch, Delgado-Fernandez, 2010) (Figure 7.13). Deux séries de 3 rangées de fascines de 6 m de long ont été installées en pied de dune à 400 m de distance l'une de l'autre. La structure C1 était localisée à l'Ouest de l'UG4, et du fait du changement d'orientation du trait de côte dans ce secteur, les vents dominants d'OSO sont des vents de terre. Les vents les plus fréquents et les plus efficaces lors de cette période provenaient d'OSO, et les MNT différentiels ont permis de mettre en évidence une accumulation de $0,05 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^2$ au sein du quadrat, et de $0,31 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^2$ entre les rangées de fascines. La structure C2 était localisée à 400 m à l'Est de la première, il existait donc un fetch potentiel de 400 m sur le haut de plage par vent dominant d'OSO. Les MNT montrent que l'accumulation y a été bien plus importante que pour C1 avec $+0,45 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^2$ pour le quadrat, et $+0,88 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^2$ entre les fascines.

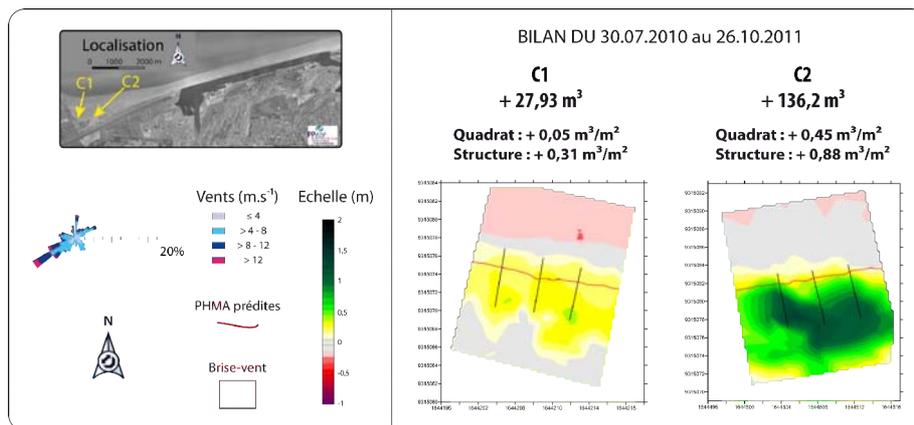


Figure 7.13. MNT différentiels au niveau des quadrats contenant des rangées parallèles de 6 m de long espacées de 3 m chacune entre le 30.07.2010 et le 26.10.2011

A l'Ouest de la digue du Braek (centre de l'UG4) ainsi qu'au niveau de la partie centrale de la digue, selon les fluctuations du niveau altitudinal de la plage, les fondations et palplanches situées en pied de digue sont parfois visibles (Figure 7.14 - A), et à marée haute la mer déferle sur la digue (Figure 7.14 - B). Le transport éolien s'en trouve fortement réduit dans ce secteur. Nous avons vu qu'il existe des dunes de sommet et de revers de digue, mais elles sont fixées par une couverture végétale dense et de ce fait peu mobiles, de ce fait, il y a très peu de déflation.

Malgré les dégradations subies sur par les structures situées au centre et à l'Ouest de la digue (D4a, D4b et D4c), il a été possible de mettre en évidence que les transferts de sable y ont sont très limités. Ils sont compris entre -0,95 m³ (ganivelles D4a du 11.04.2011 au 10.05.2011) et +0,71 m³ (ganivelles D4b du 14.06.2011 au 28.07.2011). Néanmoins, le transport éolien n'est pas nul. Lorsqu'une barre intertidale recouvre le pied de digue, on observe parfois du transport à l'Ouest. Cependant ces transferts restent minimes et le sable ne peut franchir le sommet de la digue en raison des dunes de sommet qui captent le sable (Figure 7.14 - C).

Que ce soit pour la plage du Clipon ou la digue du Braek, l'installation de structures brise-vent n'aura d'intérêt que s'il existe une source de sable à proximité afin d'alimenter en sable ces structures. En l'état actuel de la ressource en sable sur le site, des structures au niveau des secteurs de la plateforme intertidale et Braek et Ouest ne semble présenter que peu d'intérêt étant donné le faible transport éolien (Figure 7.7).



Figure 7.14. Au niveau du profil D3 (centre de la digue) à marée basse 22.03.2010 et marée haute le 21.02.2011, et dépôt au pied de dunes de sommet de digue le 22.03.2010

Pour que les structures soient efficaces sur la digue, il semble nécessaire de les implanter au contact direct des sources principales de sable. Le positionnement sur le versant externe paraît moins judicieux qu'en pied de digue et/ou en arrière des dunes de pied de digue. En effet, sur le versant externe, on observe moins d'accumulation autour de la structure en raison de :

- la plus grande exposition au vent, tandis que près des dunes de pied de digue on se trouve davantage en situation d'abri ;
- lors de conditions pluvieuses le ruissellement vers le bas de la digue provoque l'exportation du sable ;
- plus la structure se trouve loin du haut de plage et des dunes moins elle capte de sable par vent longitudinal car dans ce cas, les transferts entre l'avant et l'arrière de la digue sont plus faibles qu'en haut de plage. De plus, la végétation se développe plus rapidement sur le haut de plage (grâce à la laisse de mer), et permet de fixer le sable plus rapidement (c'est le cas en avant de D1)

Si la localisation proche des sources principales de sable paraît importante, certains paramètres peuvent néanmoins contribuer à de l'érosion.

2.2.2.2. *Localisation en fonction des hauts niveaux d'eau*

L'érosion du haut de plage et la création d'une micro-falaise d'érosion par les vagues de tempête est un phénomène commun sur les plages sableuses (Carter et al., 1990; Pye, 1991; Pye and Neal, 1994; Arens, 1996 ; Ruz et al., 2009 ; Maspataud et al., 2009). Ce type d'évènement contribue à l'exportation par la mer du sable qui s'était accumulé à l'aide de structures brise-vent sur le haut de plage (Ruz and Anthony, 2008). Dans notre étude, la plus forte érosion dans les structures a été provoquée par les vagues lors d'un haut niveau d'eau à

4,18 m NGF pour un coefficient de marée élevé (112 le 31.08.2011). L'étude des conditions météo-marines montre que les vents n'ont pas dépassé 8 m.s^{-1} et provenaient des secteurs Ouest et Nord à NE. En revanche, les vagues mesurées au large de Boulogne-sur-mer (bouée Vergoyer) ont dépassé les 2 m de hauteur (Hauteur maximum 4 m) quelques jours avant cette érosion du haut de plage (du 26.08.2011 au 28.08.2011), ce qui a pu provoquer des houles à la côte le 31.08.2011 expliquant cette érosion. Les structures sont donc exposées à l'érosion lorsqu'elles sont situées à une altitude inférieure à 4,18 m NGF, alors que les conditions d'agitation ont été calmes durant cette étude.

Les structures installées sur la digue du Braek ont été installées à une altitude bien supérieure et ont été à l'abri des vagues pendant toute la durée du suivi. La structure la plus basse (D1 : ganivelles au contact plage/digue) était placée à 4,66 m NGF et n'a pas subi de problème d'érosion marine. Cependant, cette altitude ne la protège pas totalement des vagues, comme en attestent des photographies du mois de février 2010, avant le début des mesures de terrain (Figure 7.15). Ce jour là les vagues ont atteint le niveau auquel la structure a été positionnée par la suite. Cependant, [Ruz and Anthony \(2008\)](#) ont démontré que la présence d'une structure qui permet l'accumulation sableuse contribue à la formation de dunes embryonnaires qui ne sont pas forcément atteintes par les vagues de tempête. C'est ce qui s'est produit au niveau de la structure D1 pendant la durée du suivi.



Figure 7.15. Emplacement de la structure de ganivelles situées au contact plage/digue lors d'une tempête en février 2010 (Cliché Tresca, 28.02.2010)

Dans le cas de la fermeture de brèche, la structure a été comblée en peu de temps. La très bonne efficacité peut être expliquée par le fait qu'elle se trouvait hors d'atteinte des hauts niveaux d'eau pendant l'étude : la base des fascines se trouvait à 4,483 m NGF. De plus, en arrière se trouvait des casiers qui pouvaient capter du sable par vents transversaux en provenance du couloir de déflation plus au sud (vents de terre). Ce type de structure pourrait servir à stopper les transferts sableux en direction de la digue dans les couloirs de déflation au niveau des dunes de pied de digue. Cependant au Clipon, aucune végétation ne s'est développée, certainement en raison des mouvements de sable trop importants. Si l'on veut limiter les transferts de sable vers l'arrière de la digue par les couloirs de déflation, il sera nécessaire de procéder à des plantations sur le sable accumulé grâce aux structures. En effet, si les structures de comblement de brèches sont pleines, elles ne seront plus en mesure de capter le sable et les transferts recommenceront. Il serait donc nécessaire de rehausser la structure ou de planter oyats lorsque l'altitude voulue est atteinte (par exemple, le sommet des dunes environnantes).

En ce qui concerne l'altitude à laquelle les structures doivent être implantées, plusieurs scénarii sont possibles en fonction de l'occurrence des plus hauts niveaux d'eau et de l'action des vagues. Le plus haut niveau d'eau atteint à Dunkerque a été enregistré en 1953, atteignant 5,207 m NGF (Figure 7.16) (Maspataud et al., 2012). L'étude de Pirazzoli (2006) confère à un tel niveau d'eau une période de retour de plus de 100 ans, étant donnée la valeur exceptionnelle de la surcote, estimée à 2,40 m. A titre de comparaison, le niveau d'eau marégraphique enregistré suite à la légère érosion du haut de plage dans notre étude était de 3,757 m. Toujours selon Pirazzoli (2006), une surcote d'1,80 m correspondrait à une période de retour décennale, 2,15 m pour une surcote cinquantennale et 2,25 m pour une surcote centennale. Afin de calculer le risque de hauts niveaux d'eau associés à des surcotes de tempêtes à Dunkerque, Simon (2008) a pu calculer les périodes de retour des niveaux d'eau extrêmes à marée haute à partir des bases de données d'observation marégraphiques : 10 ans (4,42 m NGF), 20 ans (4,5 m NGF), 50 ans (4,63 m NGF) et 100 ans (4,74 m NGF). Une étude du SHOM plus récente sur les niveaux marins extrêmes des côtes de France (SHOM, 2012) selon la même méthodologie que Simon (2008) mais avec un jeu de données plus long (4 ans de plus) établit le niveau centennal à 4,70 m NGF.

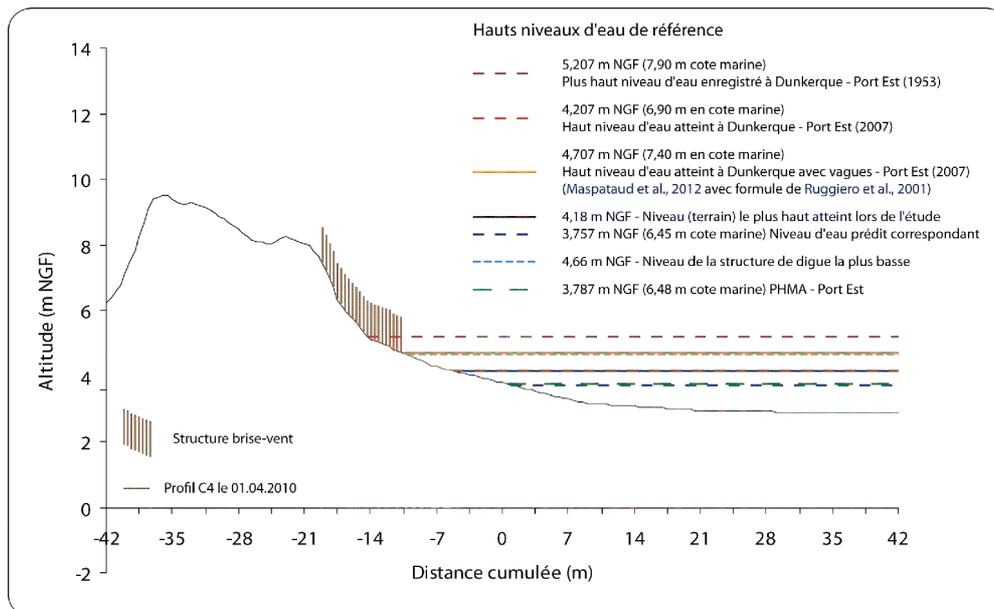


Figure 7.16. Positionnement altitudinal des structures de captage du sable par rapport à plusieurs niveaux d'eau de référence

Par ailleurs, comme nous l'avons vu lors du chapitre 4, les vagues ont une influence et peuvent provoquer de l'érosion à un niveau supérieur à celui enregistré au niveau du marégraphe (*Run up*) (Komar, 1998; Ruggiero et al., 2001; Stockdon et al., 2006). Maspataud (2011) a calculé le niveau atteint par les vagues en 2007 lors de l'une des surcotes de tempête les plus importantes depuis 1953. Lors de cet épisode, des vents forts ($> 10 \text{ m.s}^{-1}$), frontaux (N à NO) et persistants (48 h d'affilée) ont provoqué une surcote d'1,20 m, ce qui correspondait à un niveau marégraphe de 4,207 m NGF. A partir de la formule de Ruggiero et al. (2001), l'action du run-up a entraîné une érosion jusqu'à une altitude estimée à 4,707 m (Maspataud et al., 2012), c'est-à-dire 0,5 m de plus que le niveau d'eau marégraphe (Figure 7.16). A partir du niveau d'eau centennal calculé par Simon (2008), c'est-à-dire 4,74 m NGF, l'estimation d'une surcote de déferlement (*run up*) centennale a été estimée à 1 m (DHI, 2011). L'association du niveau marégraphe centennal (avec surcote météorologique) à la surcote de déferlement centennale engendre donc un niveau d'eau maximum de 5,74 m NGF à Dunkerque.

L'analyse faite à partir des mesures terrain et des plus hauts niveaux d'eau permet donc de mieux appréhender à partir de quelle altitude des structures de captage du sable peuvent être potentiellement impactées. Lors des conditions de faible agitation analysées à partir des données de terrain de notre étude, les structures devront être positionnées à une altitude supérieure à 4,18 m NGF afin de ne pas subir d'érosion (Figure 7.16). Cependant, les

vagues ont pu atteindre le niveau auquel la structure au contact plage/digue (D1) avait été par la suite installée, à 4,66 m NGF (cf. chapitre 4). Ce niveau correspond à peu de choses près au *run up* de la tempête de 2007 décrit plus tôt (4,707 m NGF, soit 0,047 m de plus) (Figure 7.16), et au niveau d'eau centennal (sans *run-up*) calculé par [Simon \(2008\)](#) (4,74 m NGF). Il conviendrait donc d'installer les structures au-dessus de 4,74 m NGF pour éviter qu'elles soient atteintes par un niveau d'eau centennal, ou lors de tempêtes exceptionnelles telles que celle de 2007.

2.3. Propositions de gestion du transport éolien et des dunes bordières le long de l'UG4

Les éléments mis en avant dans cette thèse vont nous permettre de proposer des mesures de gestion du transport éolien et de renforcement des dunes bordières adaptées aux particularités de l'UG4. Ces propositions tiendront compte non seulement du type de structures et de leur agencement, mais aussi des spécificités morphologiques de chacune des six unités homogènes et de leur évolution à court et moyen terme. L'ensemble de ces propositions sont résumées dans un tableau (Tableau 7.3). Ce tableau permet de faire le point sur les caractéristiques de chaque secteur et des solutions adaptées en conséquence. Mais la gestion de la dynamique éolienne sur la plage du Clipon pourrait également être envisagée de manière globale, ce que nous présenterons dans un deuxième temps.

2.3.1. Mesures ponctuelles de gestion du transport éolien

Les résultats acquis au cours de cette thèse ont permis de mettre en avant les spécificités de six secteurs homogènes le long de l'UG4. Ces secteurs ont eu une évolution différente, et le transport éolien y est plus ou moins intense. Pour chaque secteur, l'évolution, les spécificités et les préconisations de gestion sont résumées dans un tableau (Tableau 7.3).

Tableau 7.3. Particularités de la façade maritime du GPMD, apports éoliens potentiels et propositions de gestion

	Secteur	Enjeu en arrière du trait de côte	Particularités géomorphologiques du TDC et de la plage	Evolution long terme	Evolution court terme	Apports éoliens potentiels	Préconisation de gestion	Plan global : action proposée	Action combinée éventuelle (1)	Action combinée éventuelle (2)
Plage du Clipon	1 - Plateforme intertidale	Terminal méthanier en arrière du cordon bordier; Sternes naines; Salicorne	Plateforme intertidale de 450m humide; Flèche littorale et estran à barres et à bâches en avant; Dissipation de l'énergie des vagues et sédimentation fine; cordon dunaire de faible altitude (6 à 9 m NGF).	TDC Stable; Brèche cordon dunaire et incursion marine en 1994	Stable	Faibles par vent dominants d'OSO; réduits par vent frontal à oblique	Renforcement du cordon dunaire (élargissement + exhaussement) pour éviter éviter les brèches et incursion marines	Brise-vent sur le haut de plage (pied de dune) au-delà des PHMA; Rehausser par une deuxième série de brise-vent dès remplissage de la première série		
	2 - Dunes du Clipon	Bassins de rétention (mesures compensatoires); canal des dunes; route d'accès au port Ouest	Dune bordière en accrétion; incipient foredune et dunes embryonnaires sur le haut de plage en été; Estran à barres et bâches	Avancée du TDC et des superficies dunaires en raison de rechargements de plage	Accrétion de la dune bordière et du haut de plage	Importants lors de vents dominants longitudinaux (max. pied de dune) --> possibilité de captage avec brise-vent en pied de dune; Importants vers la dune lors de vents forts (> 12 m.s-1)	Comblent les brèches; rehausser le cordon bordier en installant des brise-vent			
	3 - Falaise sableuse	Gazoduc; Parking; Poste de gardiennage; Canal et écluse des dunes	Falaise sableuse (sommets à 8 m NGF) ; Niveau de plage bas; Estran à barres et bâches	Recul du TDC et des superficies dunaires depuis 1994	Accrétion haut de plage	Maximums lors de vents dominants longitudinaux d'OSO; Réduits par vent frontal à oblique du fait de l'absence de plage sèche + en arrière d'un enrochement	Limiter le recul du trait de côte; Reprofiler la falaise sableuse en pente douce pour recréer les échanges plage/dune ; stabiliser par végétation	Rehausser le niveau altitudinal de la plage par rechargements en sable réguliers	Reconstituer un cordon dunaire artificiel avec casiers de fascines sur le versant externe (pour favoriser l'accrétion) et stabilisation par plantations d'oyats le versant interne (pour éviter transferts vers l'arrière des dunes).	
Digue du Braek	4 - Braek Ouest	Stabilité de la digue; Bassin de Mardyck; Industries	Dunes de revers de digue; Dunes d'obstacle; Estran à barres et bâches; absence de plage sèche; niveau de plage bas	TDC Stable; augmentation des superficies dunaires sur la digue	Stable; forte variabilité altitudinale en pied de digue	Faibles par vent longitudinal d'OSO (en arrière d'enrochements), et par vent oblique (absence de plage sèche)		Rehausser le niveau altitudinal de la plage par rechargements en sable réguliers	Reconstituer un cordon dunaire artificiel en pied de digue avec casiers de brise-vent sur le versant externe (pour favoriser l'accrétion) et stabilisation par plantations d'oyats sur le versant interne (pour éviter les transferts vers l'arrière de la digue)	Canalisation de la fréquentation touristique afin de limiter la dégradation du couvert végétal, et pour garantir la pérennité des aménagements (passerelles piétons etc.)
	5 - Braek Est	Stabilité de la digue; Bassin maritime; Terminaux vracs solides; Industries	Dunes de sommets de digue; Dunes de bassin maritime; Dunes d'obstacles; Estran à barres et bâches; absence de plage sèche (dépend des barres intertidales qui peuvent recouvrir le pied de digue); niveau de plage bas	TDC Stable; augmentation des superficies dunaires sur la digue	Stable; forte variabilité altitudinale en pied de digue	Faibles par vent longitudinal d'OSO (en arrière d'enrochements), et par vent oblique (absence de plage sèche); Dépend de la position des barres intertidales		Rehausser le niveau altitudinal de la plage par rechargements en sable réguliers	Reconstituer un cordon dunaire artificiel en pied de digue avec casiers de brise-vent sur le versant externe (pour favoriser l'accrétion) et stabilisation par plantations d'oyats sur le versant interne (pour éviter les transferts vers l'arrière de la digue)	
	6 - Dunes de pied de digue	Contraintes d'exploitation (déblayage de la route; dragage du bassin maritime); Bassin maritime	Dunes de pied de digue partiellement végétalisées; Dunes de bassin maritime; Situation d'abri et sédimentation; Estran plat	Avancée du TDC; augmentation des superficies dunaires	Accrétion au niveau des dunes de pied de digue	Importants lors de vents forts (supérieurs à 12 m.s ⁻¹); Importants vers l'arrière de la digue lors de vents obliques à frontaux; importants sur le haut de plage par vent oblique	Stabiliser les dunes de pied de digue (plantations) et de bassin (brise-vent) : combler les brèches ; canaliser les usagers du site pour éviter le piétinement ; combler les brèches	Stabilisation des dunes de pied de digue par plantations d'oyats; brise-vent dans la continuité Ouest des dunes de pied de digue pour qu'elles s'étendent; dragage du bassin maritime; combler les couloirs de déflation		

A court terme, des mesures de gestion ne sont pas nécessaires sur l'ensemble du site. Les parties centrale et Ouest de la digue du Braek ne sont que très peu concernées par les envols de sable en raison de l'absence de haut de plage sec. De ce fait, Il n'existe pas de contraintes particulières liées à la dynamique éolienne, d'autant plus que d'éventuels transferts de la plage vers l'arrière de la digue pourraient être interceptés par les dunes de sommet et de revers de digue, dont la couverture végétale est dense.

Au centre de la plage du Clipon, nous avons vu que la dune bordière avait tendance à se développer, et depuis 1983, les superficies dunaires végétalisées ont gagné une superficie importante. Cette avancée de la végétation a été bien aidée par des actions de rechargement artificielles, mais aujourd'hui le développement se poursuit naturellement, il ne semble donc pas nécessaire dans l'immédiat de favoriser artificiellement l'accumulation du sable dans ce secteur. Le seul type d'intervention à envisager serait le comblement d'éventuelles brèches qui seraient créées dans le cordon bordier en cas de tempête. La problématique de stabilisation des envols de sable dans les dunes ne se pose pas non plus étant donné l'absence d'infrastructures et d'activités à proximité de ces dunes actuellement.

Seuls trois secteurs pourraient être concernés par des mesures de gestion de la dynamique éolienne sur l'UG4 : il s'agit du secteur de la plateforme intertidale à l'Ouest, de celui de la falaise sableuse au centre, et celui des dunes de pied de digue à l'Est.

2.3.1.1. Rehausser le cordon dunaire en bordure de plateforme intertidale à l'Ouest

Dans ce secteur, la dynamique éolienne semble moins intense que sur le reste de la plage du Clipon en raison non seulement d'un fetch court par vent dominant d'OSO, mais aussi de la plateforme intertidale où la granulométrie plus fine qu'à l'Est est moins propice aux envols de sable (humidité et présence de végétation – salicornes). De ce fait, la dune bordière est faiblement alimentée en sables éoliens. Dans le passé, des incursions marines ont créé des brèches dans ce cordon (1994 notamment, ch. Chapitre 3). Malgré la présence de la flèche littorale qui abrite cette partie du site, une érosion par les vagues est possible en cas de tempête. Il conviendrait donc de procéder à un renforcement (rehaussement et élargissement) de la dune bordière pour éviter son franchissement. La pose de structures brise-vent n'aurait que peu d'effets à court terme étant donné la faiblesse des apports éoliens potentiels. Le fait de modeler un cordon dunaire artificiel en le stabilisant à l'aide de plantations d'oyats serait

une solution plus rapide. Les plantations d'oyats éviteraient la déflation sur cet apport de sable artificiel, et permettraient donc la pérennité des salicornes qui pourraient être menacées par un excès de sable. La création d'un cordon dunaire artificiel et sa stabilisation par des plants d'oyats est un procédé largement utilisé par ailleurs, et qui a prouvé son efficacité ([Favenec \(coord.\), 2002](#) ; [Matias et al., 2004](#) ; [Heurtefeux et Richard, 2005](#) ; [Bezzi et al., 2009](#)).

2.3.1.2. Reprofilage de la plateforme sableuse au centre du site

Dans ce secteur, malgré un niveau de plage bas et une morphologie en falaise dunaire, des apports de sables éoliens sont possibles comme nous l'avons vu lors de vents dominants d'OSO (fetch maximum sur le haut de plage), et ce sable est bloqué par les enrochements en pied de falaise. Le fait de reprofiler la falaise dunaire en pente douce, avec éventuellement un apport sableux externe (de granulométrie similaire) pourrait aider à recréer des échanges plage/dune et recréer une dynamique positive. En effet, cela pourrait permettre au sable qui s'accumule en haut de plage d'alimenter cette nouvelle dune bordière lors de vents obliques de N à NNE. Aujourd'hui, la falaise sableuse empêche ces échanges. En outre, cela constituerait un bourrelet protecteur (effet tampon) supplémentaire en cas de tempête, et permettrait de freiner le recul du trait de côte (tendance observée sur le plus long terme, cf. chapitre 3) comme cela est mis en avant dans plusieurs guides de gestion ([SNH, 2000](#)). Ce reprofilage devra être accompagné de mesures de fixation du sable par plantations d'oyats pour éviter la déflation et l'envahissement des installations situées en arrière du trait de côte (poste de garde pour l'accès au terminal méthanier, parking).

2.3.1.3. Stabiliser les sources de sable principales à l'Est (dunes de pied de digue)

Il a été mis en évidence que les dunes de pied de digue constituaient la principale source de sable à l'origine des dépôts que l'on retrouve sur la digue du Braek, ainsi que sur la route et dans le bassin portuaire situés en arrière. Afin de limiter ces envols et ainsi remédier aux contraintes d'exploitation qui en découlent, il conviendrait de pouvoir stabiliser ces dunes de pied de digue. L'étude de leur morphologie a montré qu'elles étaient mobiles (couvert végétal peu dense) et parcourues par de nombreux couloirs de déflation orientés Nord-Sud, permettant au vent de facilement mobiliser le sable. Ces couloirs de déflation pourraient être fermés à l'aide de structures de comblement de brèche telles que celle qui a été utilisée sur la

plage du Clipon (cf. structure C3c : chapitre 2 et chapitre 6). C'est cette structure qui a été la plus efficace de toutes celles qui ont été testées. Il a également été montré que l'efficacité de ce type de structure brise-vent déclinait avec le temps en raison de leur enfouissement progressif. Pour maintenir leur efficacité de captage, il serait nécessaire de les rehausser dès qu'elles sont enfouies dans le sable à 50 % de leur hauteur. Lorsque les couloirs de déflation auront été comblés, le niveau de sable atteindra la même altitude que celle des dunes de pied de digue environnantes, il pourrait être envisagé à ce stade non plus de rehausser les structures, mais de stabiliser le sable avec des oyats. Cette action de fixation du sable pourra être menée sur l'ensemble des dunes de pied de digue parallèlement à la fermeture des couloirs de déflation pour limiter la déflation.

A l'Ouest des dunes de pied de digue, il existe un haut de plage sec où le sable peut également être pris en charge par le vent et exporté vers l'arrière de la digue. Il serait envisageable d'empêcher ces transferts en installant des casiers de ganivelles au contact plage/digue (même structure que celle qui a été testé dans cette étude - structure D1 : chapitre 2 et chapitre 6). De même que pour la fermeture des brèches, il sera nécessaire de rehausser les structures dès qu'elles seront partiellement recouvertes de sable et de fixer le sable par des oyats. Ce système devra être étendu vers l'Ouest au fur et à mesure que le pied de digue sera recouvert par un haut de plage sec.

Il a également été possible d'observer lors des expérimentations *in situ* que des échanges de sable se produisent depuis les dunes de bassin en direction de l'avant de la digue lors de vents sub-parallèles au trait de côte. Lors de ces conditions, le sable s'accumule également sur la route. Afin d'éviter ces transferts, il conviendrait de bloquer le sable à la source, au niveau du bassin maritime, en installant un linéaire de ganivelles qui longerait ces dunes, et en les fixant avec des oyats. Il pourrait également être envisageable de prélever le sable de ces dunes de bassin et, si la granulométrie et la qualité des sédiments le permettent, de l'utiliser afin de faciliter le reprofilage de la falaise sableuse au centre de l'UG4.

2.3.1.4. *Entretien et aménagements pour l'information et l'accueil du public*

Comme de nombreuses études de réhabilitation de cordons dunaires et de fixation de dunes l'ont souligné, le succès de ce type d'opération passe par un entretien régulier, ainsi que

par de la sensibilisation des usagers et des aménagements spécifiques. En effet, la fréquentation et le piétinement font partie des causes de la dégradation du couvert végétal des dunes (Gomez-Pina et al., 2002 ; Alonso et al., 2002). C'est le cas au niveau des dunes de pied de digue, où les couloirs de déflation persistent en raison du passage répété des passants. La sensibilisation des usagers du site ainsi que la canalisation des piétons sont des actions nécessaires sans lesquelles le succès de telles opérations de réhabilitation n'est pas garanti (SNH, 2000 ; NSW, 2001 ; Bergin et al., 2007 ; Favennec, 2002). De ce fait, des mesures de gestion du transport éolien nécessitent une réactivité importante, non seulement pour réparer les éventuelles dégradations et assurer l'efficacité des mesures mises en place, mais également pour redimensionner les structures lorsque cela est nécessaire.



Figure 7.17. Exemple d'aménagements créés pour les usagers suite à la création d'un cordon dunaire artificiel à Okaura beach (Nouvelle-Zélande) : (A) passerelles pour piétons ; (B) plantations et clôture (Bergin et al., 2007)



Figure 7.18. Projet de protection du littoral mené par le « Waterschap Scheldestromen » sur la côte sud des Pays-Bas : l'accès à la plage est canalisé par des haies de fascines qui empêchent le piétinement au niveau des zones fixées par les oyats (photographies A. Provoost, 2010)

2.3.2. Plan de gestion global à l'aide d'un rechargement en sable

2.3.2.1. Rechargement de la plage

Plusieurs éléments ont permis de mettre en évidence que le transport éolien était réduit voire inexistant sur certains secteurs de l'UG4, notamment au droit des parties centrale et Ouest de la digue du Braek. On observe à ce niveau un affouillement en pied de digue. Plusieurs études ont permis de mettre en évidence que l'affouillement qui se crée à la base de ce type d'ouvrage de défense longitudinal est du aux caractéristiques des houles (Griggs and Tait, 1988 ; Tait and Griggs, 1990). Ce type de phénomène pourrait entraîner des problèmes de stabilité de la digue, en raison des vagues qui déferlent sur l'ouvrage, comme cela a pu être observé au niveau de plusieurs autres sites de la région (Wissant, Hardelot-Plage). A l'Est du Clipon, au niveau de la falaise sableuse, le niveau de plage est bas également et le trait de côte recule sur le moyen terme. De ce fait, l'implantation de structures de captage du sable s'avèrerait inefficace (des tests ont été effectués par le passé, Figure 7.19 – A), même si des apports éoliens sont possibles lors de périodes calmes. Afin de pouvoir non seulement protéger la base de la digue Braek des assauts de la mer, mais également de recréer une dynamique éolienne sur l'ensemble du site, il pourrait être envisagé de procéder à un réensablement massif de certaines parties du site.



Figure 7.19. (A) Structures de captage du sable détruites par la mer au niveau du profil S2 (falaise sableuse) en 2004 (cliché Port Autonome de Dunkerque, 2004) ; (B) Formation d'une microfalaise d'érosion au niveau du profil S2 en février 2010 (cliché Tresca 2010)

Le rechargement de plage est aujourd'hui largement utilisée de par le monde et a prouvé son efficacité (Moller et al., 1990 ; Leonard et al., 1990 ; Hanson et al., 2002 ; Hamm et al., 2002 ; Bezzi et al., 2009). Ce procédé est utilisé de manière systématique aux Pays-Bas

qui allouent 12 millions de m³ par an à ce type d'opérations (Gilardino et al., 2012). Il s'agit d'une technique de gestion souple, en opposition aux ouvrages statiques (épis, digues, perrés), consistant en un apport de sédiments sur les plages (Pupiez-Dauchez, 2002). Différents types de rechargements sont envisageables selon que le sable soit déposé dans les petits fonds, sur l'estran ou en haut de plage et au niveau du cordon dunaire (Deltares, 2010). Le type de rechargement envisagé ici serait en haut de plage (*beachfill*), afin de protéger le pied de digue et de contribuer au renforcement du cordon dunaire. Ce type d'opération permet donc de protéger la côte tout en maintenant la dynamique naturelle.

Cependant, les rechargements de plage comportent un certain nombre d'inconvénients. Ce type de mesure ne mettra pas fin à l'érosion aux endroits qui sont en déficit sédimentaire, c'est pourquoi il nécessite des rechargements d'entretien réguliers dans les années qui suivent le rechargement principal (Raudkivi and Dette, 2002). Cela nécessite donc des volumes de sable disponible lors du rechargement principal, ainsi que sur le plus long terme. Les volumes estimés nécessaires pour un rechargement de plage sont compris entre 30 et 75 m³/m pour sur les côtes de la Mer du Nord, ce qui représente un apport en sable de 2 à 3 m d'épaisseur (Deltares, 2010). Si l'on s'en tient à ces chiffres et que l'on envisage une opération sur un linéaire de 15 km, le volume nécessaire pour le rechargement principal est compris entre 450 000 m³ et 1 125 000 m³. Le sable nécessaire soit être de granulométrie supérieure à celui présent naturellement sur le site afin d'obtenir une pente de plage proche de la pente d'équilibre naturelle (Verhagen, 1992 ; Hamm et al., 2002 ; Hanson et al., 2002), soit au moins 0,3 à 0,4 mm sur l'UG4 selon les secteurs (Héquette et al., 2012). Plusieurs études menées sur les côtes de la Mer du Nord, notamment en Allemagne (Raudkivi and Dette, 2002) et aux Pays-Bas (van Rijn et al., 2002 ; van Rijn 2009) ont mis en évidence une érosion moyenne comprise entre 1 et 10 m³/m/jour pendant les mois d'hiver, où les conditions d'agitation sont les plus érosives, et les volumes déposés au départ peuvent potentiellement être érodés en deux hivers. Ces mêmes auteurs conseillent donc un suivi topographique régulier et dense afin de recharger tous les deux ans à hauteur des volumes perdus. L'ensemble de ces éléments font du rechargement de plage (*beachfill*) une méthode adaptée mais coûteuse. Pour des rechargements réguliers effectués tous les 3 ans, le pris estimé est de 200 à 300 €/m/an sur une période de 50 ans (travaux initiaux et entretien compris) (Deltares, 2010).

2.3.2.2. *Création d'un cordon dunaire en pied de digue et renforcement des dunes bordières au Clipon*

Le fait d'effectuer un rechargement permettrait de rehausser le niveau altitudinal de la plage. De tels travaux ne permettraient plus à la mer de déferler sur la digue et l'on disposerait à nouveau d'un haut de plage sec. Au droit de la digue du Braek, cette situation entrainerait irrémédiablement des envols de sable vers l'arrière, comme cela a pu être observé au niveau des dunes de pied de digue. Il serait donc nécessaire de créer une barrière pour empêcher ces transferts transversaux. Deux possibilités peuvent être envisagées à cet effet.

→ Interruption des transferts en pied de digue

Cette première solution pourrait être réalisable de deux manières différentes. Premièrement, il pourrait être envisagé de disposer des structures de captage du sable telles que celle qui a été installée au contact plage/digue lors des expérimentations menées dans cette étude (structure D1 - chapitre 6). Deux rangées de casiers longitudinales seraient installées sur l'ensemble du linéaire de digue pour interrompre le transport éolien de la plage vers la digue. Des rangées de fascines à l'avant sur le haut de plage permettraient de capter le sable lors de transferts longitudinaux sur le haut de plage (Figure 7.20).

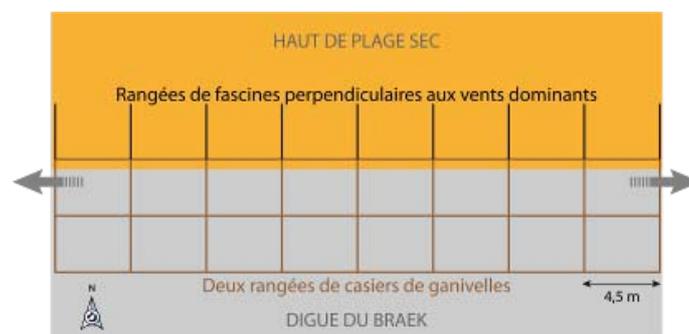


Figure 7.20. Disposition schématique de structures au contact haut de plage sec/digue le long de la digue du Braek

Une fois les structures pleines, il sera nécessaire de les rehausser par l'implantation du même dispositif par-dessus, et/ou en effectuant des plantations d'oyats. La végétation permet de piéger les sédiments, ce qui est essentiel dans la perspective de développement dunaire (Arens, 1996). Sur le haut de plage, la laisse de mer donnerait lieu au développement de dunes embryonnaires éventuellement colonisées par des espèces pionnières, dont l'extension spatiale est très rapide (De Lillis et al., 2004). Cette solution aurait l'inconvénient de

nécessiter énormément de main d'œuvre et de surveillance, afin non seulement de redimensionner l'ouvrage à chaque fois que c'est nécessaire, mais également pour réparer les éventuels dommages.

La deuxième solution consisterait à créer artificiellement un cordon dunaire sur l'ensemble de la façade littorale du port. Ce cordon dunaire se situerait en avant de la digue et se prolongerait au niveau de la dune bordière du Clipon, qui se trouve dans la continuité. Sur le versant interne et le sommet de cette dune, le sable serait stabilisé par un couvert végétal dense, tandis que sur le versant externe (côté plage), des casiers seraient disposés entre le pied de dune et le sommet afin de favoriser le dépôt du sable. Un dispositif similaire a pu être observé en Belgique dans la commune de De Haan, où un cordon dunaire a été rehaussé, et un deuxième créé en avant, et associé à un rechargement de plage (Malherbe et al., s.d.) (Figure 7.21).



Figure 7.21. Photographies illustrant un projet de développement dunaire par le recouvrement de casiers de fascines sur le versant externe de la dune bordière De Haan, Belgique (photos terrain Tresca, 2012 ; Photographie aérienne © Google Earth)

De tels travaux de recreation d'un cordon dunaire ont déjà été entrepris en contexte industriel par le Grand Port Maritime de Marseille, le long de la flèche de la gracieuse sur un linéaire de 4 km (Heurtefeux et Richard, 2005). Le résultat a abouti à un ensablement régulier et une stabilité du trait de côte, auparavant en érosion, grâce à un entretien régulier des installations. Cependant, cette étude note que le couvert végétal ne se met pas en place automatiquement. L'aide à la végétalisation ne doit pas être une simple mesure

d'accompagnement, elle est une condition nécessaire pour le succès d'une telle opération. Sur la côte de la plaine maritime flamande, des plantations d'*Ammophila arenaria* ont été effectuées avec succès pour la réhabilitation d'un cordon dunaire (Ruz et al., 2005) (Figure 7.22). En 7 ans, de 2003 à 2010, ces mesures ont permis une avancée du pied de dune de 30 m et une augmentation de 87,6 m³ par mètre linéaire (d'après Maspataud, 2011).



Figure 7.22. Mesures de phytostabilisation effectuées à Bray-Dunes, à l'Est de Dunkerque (d'après Ruz et al., 2005 in Maspataud, 2011)

Un projet de rechargement et création de dune en avant d'un ouvrage de défense longitudinal contre la mer a été mené en Italie, sur l'île de Pellestrina (Bezzi et al., 2009). Les vents dominants sur ce site sont subparallèles, longitudinaux à légèrement offshore, et le site est ouvert contrairement à l'UG4 qui est une cellule sédimentaire entre deux jetées. Sur 11 km de côte, 4,6 millions de m³ ont été déposés en deux fois, à trois ans d'intervalle. Lors de la deuxième opération de rechargement, des fascines ont été installées en haut de plage, et des plantations de *Tamarix gallica* ont été effectuées afin d'intercepter le sable avant qu'il n'envahisse la digue et les espaces urbains situés en arrière. Lors des deux années qui ont suivi ces travaux, une érosion importante de la plage s'est produite (recul du trait de côte de 16 m/an). En revanche, le développement d'une dune bordière parallèle à la digue a été concluant. Sept années après l'installation des fascines et les plantations, une dune dont le sommet se trouvait à une hauteur de 3 à 6 m au dessus du niveau moyen des mers s'est formée. Elle s'est végétalisée naturellement, et des dunes embryonnaires se sont formées en avant. Les auteurs insistent néanmoins sur le fait que l'érosion de la plage risque à terme de causer l'érosion des dunes. En effet, la compression du système engendrée par la présence d'un ouvrage fixe en arrière ne permet pas à la dune de reculer.

→ Interruption des transferts en sommet de digue

Outre la possibilité de capter le sable sur le haut de plage avant qu'il n'atteigne la digue, il serait également possible de créer une barrière au sommet. Il s'agirait en réalité de généraliser à l'ensemble de la digue la formation de dunes de sommet de digue (cf.

chapitre 3). Ce type de configuration a pu être observé sur une digue en asphalté à Breskens (Pays-Bas). Aucune information n'a pu être trouvée concernant le type d'ouvrage qu'il s'agit, nous ne sommes donc pas en mesure de dire si c'est une digue en enrobé bitumineux en dessous de laquelle on retrouve du sable, comme pour la digue du Braek.

Sur la plage à l'avant de la digue, des épis (pieux en bois) ont été disposés perpendiculairement au rivage afin de favoriser l'accumulation du sable. En sommet de digue, une dune a été artificiellement créée et recouverte de végétation, ainsi que sur le revers. Sur la digue, des places de parking ont été prévues pour les automobiles, et une ligne de bus y permet également l'accès. L'arrière de la digue est totalement végétalisé, et des escaliers permettent l'accès des piétons.

Si les transferts de sable vers l'arrière de la digue pouvaient être stoppés par ce biais, le transport éolien sur le versant externe de la digue ne serait pas stoppé, il serait même accentué par la présence d'un haut de plage sec. Etant donné qu'il s'agit d'un lieu de passage de véhicule, cette solution pourrait gêner la circulation en cas de grands vents. De plus, la digue du Braek est un ouvrage en enrobé bitumineux soumis à de fortes conditions de pression. Il serait donc nécessaire de procéder à une étude structurale de l'ouvrage pour savoir quel poids maximal de sable il pourrait supporter, d'autant plus que la dune pourrait être amenée à se développer.

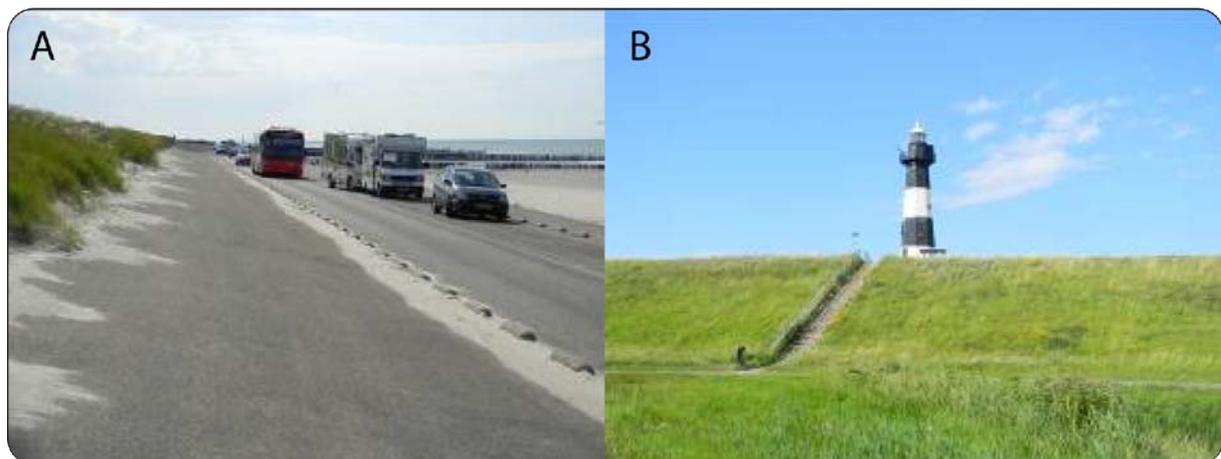


Figure 7.23. Aménagement d'une digue en asphalté près de Breskens, Pays-Bas : (A) versant externe et (B) versant interne).

Conclusion générale

Ce travail de thèse avait pour objectif de répondre à 3 questionnements principaux.

→ **Quelles sont les formes dunaires sur un site industrialo-portuaire, et comment évoluent-elles ?**

Sur le moyen terme, il a été mis en évidence une avancée importante de la limite de végétation et une forte augmentation des superficies dunaires sur l'ensemble du site qui, rappelons le, a été gagné sur la mer.

Le long de la plage du Clipon, cette extension des dunes a été facilitée par des apports artificiels à la fin des années 1970 et au début des années 1980. Ces rechargements ont été effectués à l'aide de matériaux sablo-limoneux qui confèrent aujourd'hui aux dunes une forme anarchique, composée d'une multitude de buttes. La limite de végétation a gagné du terrain grâce à la colonisation d'une plateforme supratidale sableuse. Les échanges sableux entre la plage et l'avant de cette plateforme supratidale ont permis la formation d'un cordon bordier qui est en cours de développement au centre de la plage. Ce développement est facilité par les apports sableux potentiellement importants en raison d'un long fetch à la fois par vents d'OSO et d'ENE. A l'Ouest, la formation de dunes résulte de l'accolement à la côte d'une flèche littorale. L'abri engendré non seulement par la jetée Est de l'avant-port Ouest, mais aussi par la formation d'une deuxième flèche sableuse orientée Ouest-Est engendre une sédimentation fine dans ce secteur dénué de barres et de bâches, et le développement d'une végétation spécifique (salicornes). Le transport éolien y est réduit par la plateforme humide et sablo-vaseuse, ainsi que du fait d'un fetch très réduit par vent dominant. A l'Est de la plage du Clipon, le niveau de plage est bas et le trait de côte recule sur le moyen terme. Cependant, ces deux dernières années des apports éoliens en pied de falaise se sont produits. Cette accumulation a été permise par des vents d'OSO majoritaires, ainsi que par la présence d'enrochements qui interrompent le transport du sable d'Ouest en Est.

La long de la digue du Braek, des dunes se sont développées sur l'enrobé bitumineux. Lorsqu'une source de sable est disponible, des envols se produisent sur l'asphalte. Le sable peut se déposer à l'abri d'un obstacle (dépôts en revers de digue essentiellement) et il est

rapidement colonisé par les oyats qui peuvent s'enraciner dans le sable qui se situe sous l'enrobé, grâce à des fissures. Des dunes se créent jusqu'à devenir coalescentes. Une typologie de ces dunes a été présentée. A l'Ouest et au centre de la digue, le niveau de plage est bas, le transport éolien est donc limité à l'heure actuelle en raison de l'absence de source de sable. Deux types de dunes ont été décrits dans ce secteur : les dunes de revers de digue, et les dunes de sommet de digue dont la morphologie rappelle celle d'un cordon bordier. A l'Est, le transport sédimentaire, majoritairement orienté Ouest-Est le long de la plaine maritime flamande, est bloqué par la jetée de St-Pol, ce qui contribue à la formation de dunes en pied de digue. Le couvert végétal y est peu dense, le sable est donc facilement mobilisable par le vent, ce qui explique des transferts vers l'arrière de la digue par vents frontaux à obliques, et la formation de dunes de bassin en arrière.

Différentes espèces végétales ont été observées en plus des oyats au niveau des dunes de revers de digue, notamment *Eryngium campestre*, qui est une espèce patrimoniale, prouvant que la biodiversité peut se développer même sur un site artificiel.

→ **Quelles sont les caractéristiques du transport éolien sur une plage artificielle et des infrastructures portuaires ?**

Le transport éolien est conditionné par les paramètres météo-marins et la topographie. L'humidité de surface de la plage et des dunes peut contribuer à réduire le transport de sable, mais lorsque la vitesse du vent est suffisante ($> 11 \text{ m.s}^{-1}$) et la source de sable disponible abondante, le transport éolien est potentiellement important. Pour des vitesses de vent moindres, les plus fortes valeurs de transport éolien ont été obtenues en pied de dune lors de vents parallèles à la côte.

Au niveau de la plage du Clipon, l'alimentation des dunes bordières peut se faire lors de vents frontaux et obliques, de NNO à NNE, de même que pour les transferts vers l'arrière de la digue à l'Est. A ce niveau et pour cette direction de vent, le transport éolien sur la digue est facilité par une accélération du vent sur le versant externe. Cette accélération se produit également sur le versant interne lors de vents sub-parallèles d'OSO. Ces phénomènes permettent de maintenir des échanges sableux entre les dunes de bassin et les dunes de pied de digue, malgré la présence de cet ouvrage de défense contre la mer.

→ **Quelle efficacité peuvent avoir des structures de captage du sable sur une plage artificielle et une digue en asphalte ?**

Les différents tests de captage du sable effectués à l'aide de brise-vent ont permis de montrer que l'efficacité des structures était principalement conditionnée par leur localisation et leur enfouissement par le sable.

Les structures placées sur le haut de plage peuvent potentiellement capter une quantité de sable importante, puisque c'est à cet endroit que le transport éolien est le plus important lors de vitesses de vent intermédiaire. Lorsqu'elles sont placées en pied de dune perpendiculairement aux vents dominants, elles peuvent capter le sable. Lors de vents frontaux, ce sable pourra ensuite être redistribué vers la dune bordière pour la renforcer.

Sur la digue du Braek, la problématique était différente, car il est nécessaire de réduire les échanges transversaux lors de vents frontaux. A cet effet, des structures en casiers semblent adaptées.

Sur la plage du Clipon, les structures les plus efficaces sont celles qui étaient placées les plus à l'Est (plus long fetch, et donc plus grande source de sable disponible par vent dominant), et à une altitude suffisante pour éviter qu'elles soient atteintes par les vagues. Sur la digue, nous avons vu que le même type de structures que celles qui sont habituellement installées sur la plage pouvaient être efficaces. Elles capteront davantage de sable si elles sont situées au contact des sources principales d'envols (haut de plage et dunes de pied de digue).

Afin de pérenniser l'efficacité des structures, il convient de les renforcer régulièrement, et notamment de les rehausser lorsqu'elles sont enfouies sous le sable à plus de 50 % de leur hauteur.

→ **Propositions de gestion souple de la dynamique éolienne sur un site industrialo-portuaire**

L'ensemble des résultats obtenus à différents échelles de temps nous ont permis de proposer des mesures de gestion adaptées au site. Les sources de sable à l'origine des accumulations sableuses sur les infrastructures portuaires ont été identifiées, et il convient de

les fixer. Cela est particulièrement vrai pour la partie Est du site avec les dunes de pied de digue et les dunes de bassin. Pour cela, des modes de gestion souples à l'aide de structures brise-vent et plantations d'oyats semblent adaptées. Au niveau de la plage du Clipon, les mesures de gestion à mettre en place consistent en une surveillance régulière afin de combler d'éventuelles brèches dans le cordon dunaire, et renforcer celui-ci aux endroits où il est le plus érodé (falaise sableuse) ou le moins haut (en arrière de la plateforme intertidale). Pour cela, le sable qui constitue les dunes de bassin pourrait être utilisé (sous réserve d'analyses granulométriques).

En dehors de ces mesures ponctuelles qui participeront à supprimer les contraintes d'exploitation pour le port, la gestion de l'UG4 pourrait se faire de manière globale, en reconstituant un cordon dunaire artificiel sur l'ensemble de la façade maritime. Cette opération pourrait se faire par rechargement de plage associé à des mesures généralisées d'installation de brise-vent. Les matériaux pour le rechargement pourraient provenir de dragages, sous réserve de la qualité des sédiments et de la granulométrie adaptée de ceux-ci. Il s'agit néanmoins d'une option coûteuse puisque des rechargements d'entretien sont nécessaires tous les 2 à 5 ans.

Dans tous les cas, des mesures de gestion ne seront efficaces que si elles font l'objet d'une surveillance régulière et d'un entretien permanent. Les tests effectués au niveau des structures de captage du sable se sont avérés concluants, et ils pourraient être utilisés pour d'autres sites portuaires, ou sur d'autres digues le long de fronts de mer urbanisés, dans le but de maîtriser les envols de sable.

Bien que la connaissance du fonctionnement de l'UG4 ait été approfondie, certains aspects mériteraient cependant d'être approfondis, notamment en ce qui concerne les processus du transport éolien sur la digue. En effet, la rupture de pente au niveau du pied de digue, ainsi que l'accélération du vent sur le versant externe pourraient entraîner des modifications locales de la direction du vent. Ce type d'information pourrait être obtenu grâce à des mesures *in situ* plus précises de la direction. De plus, il serait utile de pouvoir multiplier les piégeages à l'aide de coupelles, afin de se faire une meilleure idée de la hauteur à laquelle le sable transite sur la digue. Le sable obtenu lors de ce type de piégeage pourrait faire l'objet d'analyses granulométriques afin de préciser la taille des sables qui sont transportés.

Deuxièmement, il a été observé que le centre de l'UG4 était caractérisé par une érosion : le niveau de plage est plus bas que sur les marges, l'Est de la plage du Clipon est entaillé en falaise, et le trait de côte a tendance à reculer sur le long terme à ce niveau. Comme cela a pu être évoqué dans d'autres travaux sur ce même site (Héquette, 2010 ; 2011 ; 2012), l'UG4 serait une cellule sédimentaire à part entière au sein de laquelle les sédiments sont redistribués du centre vers les extrémités. Il conviendrait de pouvoir mieux étudier les échanges sédimentaires entre la plage et les petits-fonds, notamment par l'intermédiaire de levés bathymétriques à l'avant-côte.

En conclusion, nous pouvons dire que la façade littorale du Grand Port Maritime de Dunkerque est une cellule sédimentaire quasi-fermée au sein de laquelle les formes dunaires résultent de l'imbrication de facteurs humains et naturels. Cette étude a permis de montrer que la dynamique éolienne et dunaire sur ce littoral artificialisé était influencée par les infrastructures portuaires et des travaux de rechargement de plage d'une part, ainsi que par de nombreux paramètres météo-marins d'autre part. Aujourd'hui, malgré de nombreuses interventions par le passé, la dynamique naturelle prévaut sur ce site totalement aménagé par l'homme.

Références bibliographiques

- Adriani, M.J., Terwindt, J.H.J., 1974.** Sand stabilization and dune building. *Rijkswaterstaat Communications*, 19. The Hague: Government Publishing Office, 68 p.
- Aernouts D., 2005.** *Le rôle des changements bathymétriques à l'avant-côte sur l'évolution des littoraux meubles du Cap Gris-Nez à Dunkerque, Côte d'Opale, Nord de la France.* Thèse de doctorat de géographie physique, Université du Littoral Côte d'Opale, 248 p.
- Aleman, N., Michel, C., Robin, N., Certain, R., Barusseau, J-P., 2012.** Impact des ouvrages portuaires sur la morphodynamique des barres sédimentaires d'avant-côte du Languedoc-Roussillon. *Actes des Journées Nationales Génie Côtier Génie Civil*, 159-168. DOI:10.5150/jngcgc.2012.019-B
- Alonso, J., Alcantara-Carrio, Cabrera, L., 2002.** Tourist resorts and their impact on beach erosion at Sotavento Beaches, Fuerteventura, Spain. *Journal of Coastal Research*, SI36, 1-7.
- Andrews, B.D., Gares, P.A., Colby, J.D., 2002.** Techniques for GIS modeling of coastal dunes. *Geomorphology*, 48, 289-308.
- Anthony E.J., Héquette A., 2007.** The grain-size characterisation of coastal sand from the Somme estuary to Belgium: Sediment sorting processes and mixing in a tide- and storm-dominated setting. *Sedimentary Geology*, 202, 3, 369-382.
- Anthony E.J., Mrani-Alaoui M. et Héquette A., 2010.** Shoreface sand supply and mid- to late Holocene aeolian dune formation on the storm-dominated macrotidal coast of the southern North-Sea. *Marine Geology*, doi : 10.1016/j.margeo.2010.07.006.
- Anthony, E.J., Ruz, M.H., Vanhée, S., 2009.** Aeolian sand transport over complex intertidal bar-trough beach topography. *Geomorphology*, 105, 95-105.
- Anthony, E.J., Vanhée, S., Ruz, M.H., 2006.** Short-term beach-dune sand budgets on the north sea coast of France : Sand supply from shoreface to dunes, and the rôle of wind and fetch. *Geomorphology*, 81, 316-329.
- Anthony, E.J., Vanhée, S., Ruz, M-H., 2007.** An assessment of the impact of experimental brushwood fences on foredune sand accumulation based on digital elevation models. *Ecological Engineering*, 31, 41-46.
- Arche, A. and Vilas, F. 2001.** Sedimentos eólicos de grano fino en la bahía de San Sebastián, Tierra del Fuego, Argentina (Fine-grained eolian sediments in San Sebastian Bay, Tierra del Fuego, Argentina). In: Palma, R.M. (ed), *Nuevos enfoques sobre la geología de Argentina (New focus on the geology of Argentina).* *Cuadernos de Geología Iberica (Journal of Iberian Geology)* 27:159-173. (in Spanish)
- Arens, S.M., 1994.** *Aeolian Processes in the Dutch Foredunes.* Thèse de doctorat, Université d'Amsterdam, 150p.
- Arens, S.M. 1996.** Rates of aeolian transport on a beach in a temperate humid climate. *Geomorphology* 17(1-3):3-18.
- Arens, S.M., Van der Lee, G.E.M., 1995.** Saltation sand traps for the measurement of aeolian transport into the foredunes. *Soil Technology*, 8, 61-74.
- Arens, S.M. and Wiersma, J. 1994.** The Dutch foredunes; inventory and classification. *Journal of Coastal Research* 10(1):189-202.

- Ashton, W., 1909.** *The battle of land and sea on the Lancashire, Cheshire and North Wales Coasts, and the origin of Lancaster sandhills.* Southport: W. Ashton, 217 p.
- Aubry, A., Lesourd, S., Gardel, A., Dubuisson, P., Jeanson, M., 2009.** Sediment textural variability and mud storage on a large accreting sand flat in a macrotidal, storm-wave setting : the North Sea coast of France. *Journal of Coastal Research*, SI 56, 163-167.
- Avis, A.M., 1989.** A review of coastal dune stabilization in the Cape province of South Africa. *Landscape and Urban Planning*, 18, 55-68.
- Baas, A.C.W., 2008.** Challenges in aeolian geomorphology : Investigating aeolian streamers. *Geomorphology*, 93, 3-16.
- Baeteman C., 1999.** The Holocene depositional history of the palaeovalley of the IJzer (western Belgian coastal plain) with reference to the factors controlling the formation of intercalated peat beds. *Geologica Belgica*, 2, 39-72.
- Baeteman C., Scott D.B. et Strydonck M., 2002.** Changes in coastal zone processes at a high sea-level strand: a late Holocene example from Belgium. *Journal of Quaternary Sciences*, 17, 547-559.
- Baeteman C, Verhaeghe F, Thoen H, De Meulemeester J, Termote J, Dewilde M, De Ceunynck, R., 1984.** Archeologie in de Westhoek. *WAVO Berichten* 4:1-72
- Bagnold, R.A., 1937.** The transport of sand by wind. *Geographical Journal* 89, 409-38.
- Bagnold, R.A., 1938.** The measurement of sand storms. *Proceedings of the Royal Society of London*, A 167, 282-91.
- Bagnold, R.A., 1941.** *The physics of blown sand and desert dunes.* Chapman and Hall (Ed.), London, 265p.
- Basco, D.R., 2004.** Seawall Impact on Adjacent Beaches: separating Fact from fiction, *Journal of Coastal Research*, Special Issue 39, 24-28.
- Battiau-Queney, Y., Billet, J-F., Chaverot, S., Lanoy-Ratel, P., 2003.** Recent shoreline mobility and geomorphologic evolution of macrotidal sandy beaches in the north of France. *Marine Geology*, 194, 31-45.
- Bauer, B.O., Davidson-Arnott, R.G.D., 2002.** A general framework for modeling sediment supply to coastal dunes including wind angle, beach geometry, and fetch effects. *Geomorphology*, 49, 89-108.
- Bauer, B.O., Davidson-Arnott, R.G.D., Hesp, P.A., Namikas, S.L., Ollerhead, J., Walker, I.J., 2009.** Aeolian sediment transport on a beach : surface moisture, wind fetch and mean transport. *Geomorphology*, 105, 106-116.
- Bauer, B.O., Davidson-Arnott, R.G.D., Nordstrom, K.F., Ollerhead, J., Jackson, L.J., 1996.** Indeterminacy in Aeolian Sediment Transport Across Beaches, *Journal of Coastal Research*, 12, 3, 641-653.
- Bauer, B.O., Sherman, D.J., Nordstrom, K.F. & Gares, P.A., 1990.** Aeolian transport measurement and prediction across a beach and dune at Castrovill, California. In : Nordstrom, K.F., Psuty, N. & Carter, R.W.G. (Eds.) *Coastal Dunes - Form and Process*, Wiley, Chichester, 39-55.
- Belderson R.H., Johnson M.A., Kenyon N.H., 1982.** Bedforms. Dans : Stride A.H. (ed.), *Offshore Tidal Sands, Processes, and Deposits*, 27-57.
- Bergin, D., Miller, E., Leslie, J., Jamieson, P., 2007.** *Performance of indigenous sand-binders planted on a reshaped foredune at Oakura Beach*, New-Plymouth. Coastal dune vegetation network, ENSIS, SCION, New Plymouth District Council, 36 p.

- Berte, C.J., Mohamed, M.O., Saleck, M.O., 2010.** *Fighting sand encroachment, lessons from Mauritania.* Edité par Food and Agriculture Organization of the United Nations. 74 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, ULCO, Dunkerque, 292 p.
- Berger, F., 2006.** Eléments sur la crise de la sidérurgie en vue d'une approche comparative. Le cas du Nord-Pas-de-Calais et du groupe USINOR. *Revue du Nord : La reconversion industrielle des bassins charbonniers vue dans une perspective comparative.* Hors Série 21, 43-57.
- Bezzi, A., Fontolan, G., Nordstrom, K.F., Carrer, D., Jackson, N.L., 2009.** Beach nourishment and foredune restoration: practices and constraints along the Venetian shoreline, Italy. *Journal of Coastal Research*, SI56, ICS 2009 Proceedings, 287-291.
- Biotope, 2007.** *Etude d'impact liée au projet de terminal méthanier. Etat initial – Site du Clipon – Commune de Loon-Plage (Nord). Port Autonome de Dunkerque, Dunkerque.* GREET Nord-Pas-de-Calais.
- Bremontier, N.T., 1833.** Mémoires sur les dunes. *Annales des Ponts et Chaussées*, 1, 145-224.
- Briquet A., 1930.** *Le littoral du Nord de la France et son évolution morphologique.* Thèse, 431 p.
- Bonnefille R., Lepetit J.P., Graff, M., Leroy J., 1971.** *Nouvel Avant-Port de Dunkerque. Mesures en Nature.* Rapport n°3. EDF, Direction des E. Et R., Rapport HC042/05, 35 p. + planches.
- Bowler, J.M. 1968.** Australian Landform example no. 11: Lunette. *The Australian Geographer*, 10(5), 402-404
- Bowler, J.M. 1973.** Clay dunes: their occurrence, formation and environmental significance. *Earth-Science Reviews* 9(4):315-338, doi:10.1016/0012-8252(73)90001-9
- Bruyelle, P. 1964.** Dunkerque : expansion et problème d'aménagement. *L'information géographique*, 28, 4, 139-152.
- Carter, R.W.G., 1988.** *Coastal Environnement - An introduction to the physical, ecological and cultural systems of coastlines.* Academic Press, 617 p.
- Carter R.W.G, Nordstrom K.F., Psuty, N.P., 1990.** The study of coastal dunes. In *Coastal Dunes : Form and Process.* Edited by K.F. Nordstrom, N.P. Psuty and R.W.G. Carter. Chapter 1, 1-14.
- Cartier A., 2012.** *Evaluation des flux sédimentaires sur la côte du Nord -Pas de Calais : vers une meilleure compréhension des plages macrotidales.* Thèse de Doctorat, Université du Littoral Côte d'Opale, 411 p.
- Cartier, A., Héquette, A., 2011.** Variation in longshore sediment transport under low to moderate conditions on barred macrotidal beaches. *Journal of Coastal Research* SI, 57, 45-49.
- Case, G.O. 1914.** *Coast sand dunes, sand spits and sand wastes.* London: St. Bride's Press, 162 pp.
- Chaverot S., 2006.** *Impacts 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, 251 p.
- Chaverot S., Héquette A., Cohen O., 2005.** Evolution of climatic forcings and potentially eroding events on the coast of Northern France. *Proceedings 5th International Conference on Coastal Dynamics*, Barcelone, Espagne, Avril 2005, Cd-Rom, 11 p.
- Christiansen M., Davidson-Arnott R.G.D., 2004.** The effects of dune ramps on sediment supply to coastal foredunes, Skallingen Denmark. *Geografisk Tidsskrift (Danish Journal of Geography)*, 104, 29-41.
- Clabaut P., Chamley H., Marteel H., 2000.** Evolution récente des dunes littorales à l'Est de Dunkerque (Nord de la France). *Géomorphologie : relief, processus, environnement*, 2, 125-136.

- Clique P.M., Lepetit J.P., 1986.** *Catalogue sédimentologique des côtes françaises, côtes de la mer du Nord et de la Manche*. LNH, Eyrolles, Paris, 133 p.
- Crowell, M., Leatherman, S.P. and Buckley, M.K., 1991.** Historical shoreline change: error analysis and mapping accuracy. *Journal of Coastal Research*, 7(3): 839-852.
- Cooke, R.U. and Warren, A. 1973.** *Geomorphology in Deserts* London: Batsford Ltd. 347 p.
- Corbau C., 1995.** *Dynamique sédimentaire en domaine macrotidal : exemple du littoral du Nord de la France (Dunkerque)*. Thèse de doctorat en Géologie et géochimie sédimentaires, Université des Sciences et techniques de Lille I, 200 p.
- Corbin A. (1988)** *Le territoire du vide, l'Occident et le désir de rivage 1750-1840*. Flammarion. Paris, 407 p.
- Cornelis, W.M., Gabriels, D., 2005.** Optimal windbreak design for wind-erosion control. *Journal of Arid Environments*, 61, 315-332.
- Davidson-Arnott, R.G.D., Law, M.N. 1990.** Seasonal patterns and controls on sediment supply to coastal foredunes, Long Point, Lake Erie. In: Nordstrom, K., Psuty, N. and Carter, R.W.G. (eds), *Coastal dunes: processes and geomorphology*, New York: John Wiley and Sons, pp. 177-200.
- Davidson-Arnott, R.G.D., MacQuarrie, K., Aagaard, T., 2005.** The effects of wind gusts, moisture content and fetch length on sand transport on a beach. *Geomorphology*, 68, 115-129.
- Davidson-Arnott, R.G.D., Yang, Y., Ollerhead, J., Hesp, P.A., Walker, I.J., 2007.** The effects of surface moisture on aeolian sediment transport threshold and mass flux on a beach. *Earth Surface Processes and Landforms*, 33(1), 55-74.
- De Ceunynck R., 1992.** Het duinlandschap, ontstaan en evolutie. In: Termote J (ed) *Tussen land en zee, het duingebied van Nieuwpoort tot De Panne*. Lannoo, Tielt, pp 18-45
- De Lillis, M., Costanzo, L., Bianco, P.M., Tinelli, A., 2004.** Sustainability of sand dune restoration along the coast of the Tyrrhenian Sea. *Journal of Coastal Conservation*, 10, 93-100.
- De Moor G., Lanckneux J., 1989.** Acoustic teledetection of sea-bottom structures in the Southern Bight. *Bull. Soc. Belg. Géol.* 97, 199-210.
- De Vries, S., Stive, M., van Rijn, L., Ranasinghe, R., 2012.** A new conceptual model for aeolian transport rates on beaches. *Coastal Engineering Proceedings*, 1(33), sediment.39. doi:10.9753/icce.v33.sediment.39
- Delgado-Fernandez, I., 2010.** A review of the application of the fetch effect to modelling sand supply to coastal foredune. *Aeolian Research*, 2, 61-70.
- Deltares, 2010.** *Coastal Erosion Control based on the concept of sediment cells*. Project : Concepts and Science for Coastal Erosion Management, Task Leader Leo van Rijn, Deliverable D13a, 76 p.
- Dewez S., Clabaut P., Vicaire O., Beck C., Chamley H., Augris C., 1989.** Transits sédimentaires résultants aux confins Manche-mer du Nord. *Bull. Soc. Géol. France*, V(5), 1043-1053.
- DHI, 2010.** *Etudes hydrauliques et de conception d'un dispositif de confortement de la digue des Alliés. Partie 1c : Etude de caractérisation de la zone d'étude. Fonctionnement hydrosédimentaire*.
- DHI, 2011.** *Détermination de l'aléa de submersion marine intégrant les conséquences du changement climatique en région Nord-Pas-de-Calais. Etape 2 : Modélisation des aléas littoraux actuels*. DREAL Nord-Pas-de-Calais.
- Dolan R., Fenster M. S., Holme S. J., 1991.** Temporal analysis of shoreline recession and accretion. *Journal of Coastal Research*, 7(3), 723-744.

- Dong, Z., Wang, H., Liu, X., Wang, W., 2004.** The blown sand flux over a sandy surface: a wind tunnel investigation of the fetch effect. *Geomorphology*, 57, 117-127.
- Durand, P., 1998.** Cinématique d'un littoral sableux à partir de photographies aériennes et de cartes topographiques. Exemple du littoral d'Argelès-Plage à Saint-Cyprien (Roussillon, France). *Géomorphologie : Relief, Processus, Environnement*, 2, 155-166.
- Ehlers, J, Kunz, H., 1993.** Morphology of the Wadden Sea : natural processes and human interference. In Hillen, R., and H.J. Verhagen editors, *Coastlines of the southern North Sea*. New York: American Society of Civil Engineers, 65-84.
- Fabbri, P., 1996.** Present and future directions for EUCC – The European Union for Coastal Conservation. In Jones, P.S., Healy, M.G. and Williams, A.T. editors, *Studies in European Coastal Management*. Cardigan, UK : Samara Publishing LTD., 191-6.
- Favenec, J., 2001.** Le contrôle souple des dunes littorales atlantiques. *Revue forestière française*, LIII, Numéro spécial, 279-287.
- Favenec, J. (coord.), 2002.** *Connaissance et gestion durable des dunes de la côte Atlantique. Manuel récapitulatif des enseignements du projet européen Life-Environnement de « Réhabilitation et gestion durable de quatre dunes françaises*. Les dossiers forestiers n°11 ; Edité par Office National des Forêts, 394 p.
- Fenley, J.M. 1948.** Sand dune control in Les Landes, France. *Journal of Forestry* 46(7):514-520.
- Folk, R.L. & Ward, W.C., 1957.** Brazos river bar: a study in the significance of grain size parameters. *Journal of Sedimentary Petrology*, 27, 3-26.
- Gares, P.A., Davidson-Arnott, R.G.D., Bauer, B.O., Sherman, D.J., Carter, R.W.G., Jackson, D. Nordstrom, K.F. 1996.** Alongshore variations in aeolian sediment transport, sediment size and moisture at Carrick Finn Strand, Ireland. *Journal of Coastal Research* 12(3):673-682.
- Giardino, A., Santinelli, G., Bruens, A., 2012.** *The state of the coast (Toestand van de kust). Case study: North Holland*. Deltares, 57 p.
- Gile, L. H. 1975** Holocene soils and soil-geomorphic relations in an arid region of southern New Mexico. *Quaternary Research* 5:321-360.
- Goeldner-Gianella, L., 2007.** Dépoldériser en Europe Occidentale. *Annales de Géographie* 655, 3, 339-360.
- Goldsmith, V., Rosen, P. & Gertner, Y., 1988.** *Eolian sediments transport on the Israeli coast. Final report*, US-Israël, BSF Haifa, National Oceanographic Institute.
- Gomez-Pina, G., Munoz-Perez, J.J., Ramirez, J.L., Ley, C., 2002.** Sand dune management problems and techniques, Spain. *Journal of Coastal Research*, SI 36, ICS Proceedings, 325-332.
- Grafals-Soto, R., 2012.** Effects of sand fences on coastal dune vegetation distribution. *Geomorphology*, 145-146, 45-55.
- Grafals-Soto, R., Nordstrom, K.F., 2009.** Sand fences in the coastal zone: intended and unintended effects. *Environmental Management*, 44, 420-429.
- Grandjean C., 1896.** *Les Landes et les dunes de Gascogne*; J. Rothschild, Paris, 94 pages.
- Gratiot N., Anthony E.J., Gardel A., Gaucherel C., Proisy C., Wells J.T., 2008.** Significant contribution of the 18,6 year tidal cycle to regional coastal changes. *Nature Geoscience*, 1, 169-172.

- Grenier, A. & Dubois J.M.M., 1990.** Evolution littorale récente par télédétection : synthèse méthodologique. *Photo-interprétation*, 6, 3-16.
- Gosselet , 1893.** La plaine maritime du nord de la France et de la Belgique. In: *Annales de Géographie*. 1893, t. 2, n°7. pp. 306-314.
- Griggs, G.B., Tait, J.F., 1988.** The effects of coastal protection structures on beaches along northern Monterey Bay, California. *Journal of Coastal Research*, SI 4, 93-111.
- Komar, P.D., 1998** *Beach processes and sedimentation*, 2nd edn. Prentice Hall, Upper Saddle River, p 544
- Guerber, E., Le Cozannet, G., Pedreros, R., 2008.** Modélisation statistique du vent. Influence du changement climatique sur le transport éolien. *Actes des 10^{èmes} Journées Nationales Génie Côtier Génie Civil*, Sophia Antipolis. 467-476.
- Guilcher A., 1954.** *Morphologie littorale et sous-marine*, Paris, P.U.F., collection Orbis, 216 p.
- 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*, 47, 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* 47, 81–111.
- Harlé E., 1914.** La fixation des dunes de Gascogne; *Bulletin de la Section de Géographie*, 1914 ; Imprimerie Nationale Paris, 48 pages.
- Hemdane Y., 2006.** *Dynamique hydrosédimentaire de l'avant-côte de type macrotidal : le cas du littoral du Nord-Pas de Calais, France*. Thèse de Géographie physique, Université du Littoral Côte d'Opale, 195 p.
- Héquette A. et Aernouts D., 2010.** The influence of nearshore sand bank dynamics on shoreline evolution in a macrotidal coastal environment, Calais, Northern France. *Continental Shelf Research*, 30, 1349-1361.
- Héquette A., Hemdane Y., Anthony E.J., 2008a.** Sediment transport under wave and current combined flows on a tide-dominated shoreface, northern coast of France. *Marine Geology*, 249, 226–242.
- Héquette A., Hemdane, Y., Anthony, E.J., 2008b.** 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*, 24, 3, 695-707.
- Héquette, A., Marin, D., Sipka, V., Ruz, M-H., 2011.** *Suivi morpho-sédimentaire de l'UG4. Rapport annuel 2010*. Laboratoire LOG, ULCO, Dunkerque, 51p.
- Héquette, A., Marin, D., Sipka, V., Ruz, M-H., 2011.** *Suivi morpho-sédimentaire de l'UG4. Rapport intermédiaire, juillet 2010*. Laboratoire LOG, ULCO, Dunkerque, 34 p.
- Héquette A., Moses C.M., 2008.** *SIG BAR. Projet INTERREG IIIA « Beaches At Risk »*, CD-Rom.
- Héquette, A., M-H. Ruz, D. Marin, V. Sipka, 2012.** *Suivi morpho-sédimentaire de l'UG4. Rapport annuel 2011*. Laboratoire LOG, ULCO, 45p.
- Hesp, P., 1984.** Fore-dune formation in Southeast Australia. In: Thom, B.G. (Ed.), *Coastal Geomorphology in Australia*. Sydney, Academic Press, 69-97.
- Hesp, P., 2002.** Fore-dunes and blowouts : initiation, geomorphology and dynamics. *Geomorphology*, 48, 245-268.

- Hesp, P.A. 2005.** Flow reversal and dynamics of foredunes and climbing dunes on a Leeward East Coast, New Zealand. *Zeitschrift für Geomorphologie Supplementbände* 141:123-134.
- Hesp, P.A., 2011.** Dunes coasts, in Wolanski, E., and McLusky, D. (Eds. In chief) : *Treatise on Estuarine and Coastal Science*, vol.3, 193-222.
- Hesp, P.A., Davidson-Arnott, R., Walker, I.J., Ollerhead, J., 2005.** Flow dynamics over a foredune at Prince Edward Island, Canada. *Geomorphology*, 65, 71-84.
- Hesp P.A. and Pringle, A. 2001;** Wind flow and topographic steering within a trough blowout. *Journal of Coastal Research* SI 34: 597-601.
- Hesp, P., Short, A.D., 1980.** Dune forms of the Younghusband Peninsula, S.E. South Australia. *Proc. Conf. Aeolian landscapes in the semi-arid of South Eastern Australia*. Riverina Branch, Australian Society of Soil Science, 65-66.
- Hesp, P.A., Walker, I.J., 2012.** Three-dimensional aeolian dynamics within a bowl blowout during offshore winds: Greenwich dunes, Prince Edward Island, Canada. *Aeolian Research*, 3, 389-399.
- Heurtefeux, H., Richard, P., 2005.** Vingt ans de protection des dunes littorales par des techniques douces : bilan et perspectives à travers quelques exemples en Méditerranée française. *In Milieux littoraux, nouvelles perspectives d'étude*. Paris : Éd. l'Harmattan. pp. 143-166.
- Horikawa, K., Hotta, S., Kubota, S., Katori, S., 1984.** Field measurement of blown sand transport rate by trench trap. *Coastal Engineering in Japan*, 27, 213-232.
- Hotta, S., and Harikai, S., 2011.** State-of-the-art in Japan on controlling wind-blown sand on beaches. *Coastal Engineering Proceedings*, 1(32), sediment.110. doi:10.9753/icce.v32.sediment.110
- Hotta, S. and K. Horikawa, 1990.** Function of sand fence placed in front of embankment, *Proc. 22nd Coastal Eng. Conf.*, ASCE, pp. 2754-2767.
- Hotta, S., N.C. Kraus and K. Horikawa, 1991.** Functioning of Multi-row sand fences in forming foredunes, *Proc. Coastal Sediments '91*, ASCE, pp. 261-273.
- Hotta, S., Kubota, S., Katori, S., & Horikawa, K., 1984.** Sand transport by wind on a wet surface. *Coastal Engineering Proceedings*, 1(19). doi:10.9753/icce.v19.
- Houbolt J.H.C., 1968.** Recent sediments in the Southern Bight of the North Sea. *Geol. Mijnbouw*, 47, 245-273.
- Hsu, S.A., 1971.** Wind stress criteria in sand transport. *Journal of Geophysical Research*, 76, 8684-8686.
- Huddart D, Roberts G, Gonzalez S., 1999.** Holocene human and animal footprints and their relationships with coastal environmental change, Formby Point, NW England. *Quatern Int* 55:29-41
- IDRA Environnement, 2012.** *Demande d'autorisation pour le rechargement en sables de la digue des Alliés par application des articles L.214-1 à L.214-6 du Code de l'Environnement - Grand Port Maritime de Dunkerque*. 139 p. + planches
- Ingle, J.C., 1966.** *Developments in sedimentology*, 5, vi-vii.
- Institution Interdépartementale des Wateringues, 2007.** *Les Wateringues, des territoires gagnées sur la mer au cours des siècles, à force de travail et d'obstination*. Poster conçu à l'occasion des 30 ans, Conseil Général du Nord et Conseil Général du Pas-de-Calais.
- Jackson, D.W.T., Cooper, J.A.G., 1999.** Beach fetch distance and aeolian sediment transport. *Sedimentology*, 46, 517-522.

- Jackson, N.L., Nordstrom, K.F., 1997.** Effects of time-dependent moisture content of surface sediments on aeolian transport rates across a beach, Wildwood, New Jersey, USA. *Earth Surface Processes and Landforms* 22(7):611-621.
- Jackson, N.L., Nordstrom, K.F., 1998.** Aeolian transport of sediment on a beach during and after rainfall, Wildwood, NJ, USA. *Geomorphology*, 22, 151-157.
- Jackson, N.L., Nordstrom, K.F., 2011.** Aeolian sediment transport and landforms in managed coastal systems : a review. *Aeolian Research*, 3, 181-196.
- Jarmalavicius, D., Satkunas, J., Zilinskas, G., Pupienis, D., 2012.** The influence of coastal morphology on wind dynamics. *Estonian Journal of Earth Sciences*, 61, 120-130.
- Joly C., 2004.** Histoire végétale d'une tourbière littorale: le Marais des Bourbes (Olonne-sur-Mer, Vendée). *Ann Paleont* 90:187–207
- Kadib, A.A., 1965.** *A function of sand movement by wind*. University of California, Berkeley, Technical Report, HEL 2, 12 p.
- Kawamura, R., 1964.** *Study of sand movement by wind*. Hydraulic Engineering Laboratory Technical Report, HEL-2-8, University of California, Berkeley, 99-108.
- Knutson, P.L., 1980.** Experimental dune restoration and stabilization, Nauset beach, Cape Cod, Massachusetts. US Army Corps of Engineers, Coastal Engineering Research Center, TP80-5, Fort Belvoir, Virginia, 42 p.
- Komar, P.D., 1998** *Beach processes and sedimentation*, 2nd edn. Prentice Hall, Upper Saddle River, p 544
- Kraus, N.C., Hanson, H., Blomgren, S.H., 1994.** “Modern Functional Design of Groin Systems”. *Proceedings of the 24th Coastal Engineering Conference*, 1327-1342.
- Kroon, A., Hoekstra, P., 1990.** Eolian sediment transport on a natural beach. *Journal of Coastal Research*, 6, 367-379.
- Kudale M.D., 2010.** Impact of port development on the coastline and the need for protection. *Indian Journal of Geo-Marine Sciences*, Vol. 39(4), pp 597-604.
- Leonard L. A., Dixon K. L., Pilkey O. H., 1990,** A comparison of beach replenishment of the U.S. atlantic, pacific, and gulf coasts. *Journal of Coastal Research*, Special Issue, n°6, pp. 127-140.
- Lettau, K. & Lettau, H.H., 1978.** Experimental and micrometeorological field studies of dune migration. In : H.H. Lettau & K. Lettau (Eds.), *Exploring the World's Driest Climate*, University of Wisconsin-Madison, Institute For Environmental Studies, IES Report 101, 110-147.
- Lopez, R.A., Marcomini, S.C., 2004.** Monitoring the foredune restoration by fences at Buenos Aires coast. *Journal of Coastal Research* SI 39, 955-958.
- Lynch, K., Jackson, D.W.T., Cooper, J.A.G., 2008.** Aeolian fetch distance and secondary airflow effects. The influence of micro-scale variables on meso-scale foredune development. *Earth Surface Processes and Landforms*, 33, 991-1005.
- Malezieux, J., 1979.** *Les centres sidérurgiques des rivages de la Mer du Nord et leur influence sur l'organisation de l'Espace*. Thèse de doctorat, Université de la Sorbonne, Publications de la Sorbonne, 1019 p.
- Malherbe, B, Sans date.** *EUROSION Case Study : De Haan (Belgium)*. Haecon, 13 p.

- Manohar, M., Bruun, P., 1970.** Mechanics of dune growth by sand fences. *Dock and Harbour Authorities*, 51, 243-252.
- Maspataud, A., 2011.** *Impacts des tempêtes que la morphodynamique du profil côtier en milieu macrotidal.* Thèse de doctorat, ULCO, Dunkerque, 467 p.
- Maspataud, A., Ruz, M-H, Héquette, A., 2009.** Spatial variability in post-storm beach recovery along a macrotidal barred beach, southern North Sea. *Journal of Coastal Research*, SI 56, 88-92.
- Maspataud, A., Ruz, M-H., Vanhée, S., 2012.** Potential impacts of extreme storm surges on a low-lying densely populated coastline: the case of Dunkirk area, Northern France. *Natural Hazards*, 17p. DOI 10.1007/s11069-012-0210-9
- Matias, A., Ferreira, O., Dias, J.A., Vila-Concejo, A., 2004.** Development of indices for the evaluation of dune recovery techniques. *Coastal Engineering*, 51, 261-276.
- McCave I.N., 1971.** Sand waves in the North Sea off the coast of Holland. *Marine Geology*, 10, 3, 199-225.
- McCave, I.N., 1978.** Grain-size trends and transport along beaches : an example from eastern England. *Marine Geology*, 28, p. 43-51.
- McDougal, W., Sturtevant, M., Komar, P., 1987.** "Laboratory and Field Investigations of the Impact of Shoreline Stabilization Structures on Adjacent Properties" *Proceedings of Coastal sediments 1987*, 961-973.
- McKenna-Neuman, C. and Maljaars Scott, M. 1998.** A wind tunnel study of the influence of pore water on aeolian sediment transport. *Journal of Arid Environments* 39(3):403-419.
- McLaren, P. et Bowles, D., 1985.** The effects of sediment transport on grain-size distributions. *Journal of sedimentary Petrology*, 55, p. 457-470.
- Mendelssohn, I.A., Hester, M.W., Monteferrante, F.J., Talbot, F., 1991.** Experimental dune building and vegetative stabilization in a sand-deficient barrier island setting on the Louisiana coast, USA. *Journal of Coastal Research*, 7-1, 137-149.
- Meur-Férec C., 1995.** « La préservation des espaces naturels littoraux dans le Nord Pas-de-Calais : acteurs et politiques d'intervention », *Hommes et terres du Nord*, 1-2, 2-10.
- Meur-Férec, 2006.** *De la dynamique naturelle à la gestion intégrée de l'espace littoral : un itinéraire de géographe.* Document présenté en vue de l'Habilitation à Diriger des Recherches. Volume 1 – Essai inédit. Université de Nantes, 247 p.
- Meur-Férec C. et Morel V., 2004.** L'érosion sur la frange côtière : un exemple de gestion des risques. *Nature Science et Société* 12, p. 263-273.
- Meur-Férec C. et Ruz M.-H., 1998.** *Coastal dune reestablishment on an artificial rubble foundation, Dunkirk Port - France.* Poster, European Dune Symposium, programme Life Sefton Coast, Southporth, U.-K., 22-26 sept. 1998.
- Meur-Férec C., Ruz, M-H. 2002.** Transports éoliens réels et théoriques en haut de plage et sommet de dune (Wissant, Pas-de-Calais, France). *Géomorphologie*, 4, 321-334.
- Miller, D.L., Thetford, M., Yager, L., 2001.** Evaluation of sand fences and vegetation for dune building following overwash by hurricane opal on Santa Rosa Island, Florida., *Journal of Coastal Research* 17, 4, 936-948.

- Moller J.T., 1990.** Artificial beach nourishment on the danish north sea coast. *Journal of Coastal Research*, Special Issue, n° 6, pp. 1-9.
- Namikas, S.L. & Sherman, D.J., 1995.** A review of the effects of surface moisture content on aeolian sand transport. In : V. Tchakarjian (Ed.). *Desert Aeolian Processes*, Chapman and Hall, London, 269-293.
- Nickling, W.G., Davidson-Arnott, R.G.D., 1990.** Aeolian sediment transport on beaches and coastal sand dunes. *Proceedings Canadian Symposium on Coastal Sand Dunes*, 1-35.
- Nickling, W.G., McKenna Neuman, C., 1997.** Wind tunnel evaluation of a wedge-shaped Aeolian sediment trap. *Geomorphology* 18: 333-345.
- Nickling, W.G., McKenna Neuman, C., Lancaster, N., 2002.** Grainfall processes in the lee of transverse dunes, Silver Peak, Nevada. *Sedimentology*, 49, 191-209.
- Noin D., 1999.** La population des littoraux du monde. *L'Information Géographique*, n°2-1999, p. 65-73.
- Nordstrom, K.F., 1988.** Dune grading along the Oregon coast, USA : a changing environmental policy. *Applied Geography*, 8, 101-116.
- Nordstrom, K.F., Arens, S.M., 1998.** The role of human actions in evolution and management of foredunes in The Netherlands and New Jersey, USA. *Journal of Coastal Conservation*, 4, 169-180.
- Nordstrom, K.F., Jackson, N.L., 1998.** Effects of a high-rise building on windflow and beach characteristics at Atlantic City, NJ, USA. *Ocean & Coastal Management*, 39, 245-263.
- Nordstrom, K.F., Jackson, N.L., Bruno, M.S., de Butts, H.A., 2002.** Municipal initiatives for managing dunes in coastal residential areas: a case study of Avalon, New Jersey, USA. *Geomorphology*, 47, 137-152.
- Nordstrom, K.F., McCluskey, J.M., Rosen, P.S., 1986.** Aeolian processes and dune characteristics of a developed shoreline. In: Nickling, W.G. (Ed.), *Aeolian Geomorphology*. Allen and Unwin, Boston, 131-147.
- NSW Department of Land and Water Conservation 2001,** *Coastal Dune Management: A Manual of Coastal Dune Management and Rehabilitation Techniques*, Coastal Unit, DLWC, Newcastle, 96 p.
- Oblinger, A., 2008.** *Caractérisation morphodynamique des plages à barresintertidales de Calais Hoverport et de Malo-les-Bains (Dunkerque), Nord de la France.* Thèse de doctorat, Université du Littoral Côte d'Opale, Dunkerque, 178 p.
- ONLM Observatoire National de la mer et du littoral, 2012.** Trois quarts des rivages métropolitains sont non artificialisés. Le point sur, observations et statistiques, n°153. 4 p.
- Owens, J.S., 1927.** The movement of sand by wind. *Engineer*, 143, 377.
- Paskoff R., 2001.** *L'élévation du niveau de la mer et les espaces côtiers, le mythe et la réalité.* Institut Océanographique, Paris, 200 p.
- Paskoff R., 2004.** *Côtes en danger.* 2e édition : L'Harmattan, 250 p. PASKOFF R., 2001. L'élévation du niveau de la mer et les espaces côtiers, le mythe et la réalité. Institut Océanographique, Paris, 200 p.
- Paskoff R., 2005.** Les plages vont-elles disparaître? *Les petites pommes du savoir*, éditions Le Pommier, 58 p.
- Petit-Berghem Y., 1996.** *Etude de la dynamique des milieux forestiers du littoral du nord de la France.* Thèse de doctorat, Université des Sciences et Technologies, UFR de Géographie, Lille
- Pin, X., Nau, F., Garcin, J-L., 2007.** *Mise hors d'eau du polder des waterings dans le Nord-Pas-de-Calais.* Rapport : Conseil général de l'agriculture, de l'alimentation et des espaces ruraux ; Conseil général des Ponts et chaussées ; Inspection générale de l'environnement. 80p.

- Pirazzoli PA., 2006.** *Projet Discobole—Contribution à la tâche 5: calcul de hauteur des niveaux d'eau extrêmes sur le littoral français.* Meudon, CNRS, Laboratoire de Géographie Physique (UMR no. 8591), 93 p.
- Provoost, S.; Laurence M.; Jones, M. and Edmondson, S. E., 2009.** Changes in landscape and vegetation of coastal dunes in northwest Europe: a review. *Journal of Coastal Conservation*, doi:10.1007/s11852-009-0068-5.
- Psuty, N.P., 1990.** Foredune mobility and stability, Fire Island, New York. In : Nordstrom, K.F., Psuty, N., Carter, B. (Eds.), *Coastal Dunes : Form and Process*. Chichester, Wiley and Sons Ltd., 159-176.
- Psuty, N.P., 1992.** Spatial variation in coastal foredune development, in R.W./G. Carter, T.G.F. Curtis and M.J. Sheeley-Skeffington (Eds), *Coastal dunes, Geomorphology, Ecology and Management for Conservation*, A.A. Balkema, Rotterdam, 3-13.
- Pupiez-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 de Géographie, Brest, 510 p.
- Pye, K., 1983.** Coastal dunes. *Progress in Physical Geography*, 7, 531-557.
- Pye, K. 1991.** Beach deflation and backshore dune formation following erosion under storm conditions: an example from northwest England. *Acta Mechanica Supplementum 2*:171-181.
- Pye, K. and Neal. A., 1994.** Coastal dune erosion at Formby Point, north Merseyside, England: causes and mechanisms. *Marine Geology* 119, 39-56
- Rasmussen, K.R. and Mikkelsen, H.E., 1991.** Wind tunnel observations of aeolian transport rates. *Acta Mech. Suppl.*, 1: 135-144.
- Rivière, J-L., Oddone, P., 2010.** *Dunkerque Grand Littoral : 40 ans au service du territoire.* 50 p.
- Raudkivi, A.J., Dette, H.H., 2002.** Reduction of sand demand for shore protection. *Coastal Engineering*, 45, 239-259.
- Reichmüth, B., 2003.** *Contribution à la connaissance de la morphodynamique des plages à barres intertidales : exemple de la côte d'Opale, nord de la France.* Thèse de géographie, Université du Littoral Côte d'Opale de Dunkerque, 248 p.
- Reichmüth, B., Anthony, E. J., 2002.** The variability of ridge and runnel beach morphology: examples from northern France. *Journal of Coastal Research*, SI 36, 612-621.
- Reichmüth B., Anthony E.J., 2008.** Seasonal-scale morphological and dynamic characteristics of multiple intertidal bars. *Zeitschrift für Geomorphologie*, 52, 3, 79-90.
- Ritphring S., Tanaka H., 2011.** Morphology variability in the vicinity of coastal structures. *Proceedings of 32nd Conference on Coastal Engineering*, Shanghai, China
- Rosenberg, N.J., 1974.** *Microclimate : the biological environment.* John Wiley & Sons, New York.
- Ruggiero, P., Kaminsky, G., Gelfenbaum, G., 2003.** Linking proxy-based and datum-based shorelines on a high energy coastline : implications for shoreline change analyses. *Journal of Coastal Research*, SI 38, 57-82.
- Ruggiero P., Komar P.D., McDouglas W.G., Marra J.J., Beach R.A., 2001.** Wave runup, extreme water levels and erosion of properties backing beaches. *Journal of Coastal Research*, 17, 2, 407-419.
- Ruz, M-H, Anthony, E.J., 2008.** Sand trapping by brushwood fences on a beach-foredune contact: the primacy of the local sediment budget. *Zeitschrift für Geomorphologie (SI Beaches at Risk)*, 52, 3, 179-194.

- Ruz M-H., Anthony E.J., Faucon L., 2005.** Coastal dune evolution on a shoreline subject to strong human pressure: the Dunkirk area, northern France. In Herrier J.-L., J. Mees, A. Salman, J. Seys, H. Van Nieuwenhuysse and I. Dobbelaere (Eds). *Proceedings 'Dunes and Estuaries 2005' – International Conference on Nature Restoration. Practices in European Coastal Habitats*, Koksijde, Belgium, 19-23 September 2005, 441-449.
- Ruz M-H., Héquette A., Maspataud A., 2009.** Identifying forcing conditions responsible for foredune erosion on the northern coast of France. *Journal of Coastal Research*, SI 56, ICS2009, 356-360.
- Ruz, M-H, Meur-Férec, C., 2004.** Influence of high water levels on aeolian sand transport : upper beach/dune evolution on a macrotidal coast, Wissant Bay, northern France. *Geomorphology*, 60, 73-87.
- Sabatier, F., 2001.** *Fonctionnement et dynamiques morpho-sédimentaires du littoral du delta du Rhône*. Thèse de doctorat, Université Aix-Marseille III, 274 p.
- Sarre, R.D. 1987.** Aeolian sand transport. *Progress in Physical Geography* 11(2):157-182.
- 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 Géographie physique, Université du Littoral Côte d'Opale, 197 p.
- 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*, 244, 201-229.
- Samat, O., 2007.** *Efficacité et impact des ouvrages en enrochement sur les plages microtidales. Le cas du Languedoc et du delta du Rhône*. Thèse de Doctorat, Université d'Aix-Marseille I.
- Sarre, R.D., 1987.** Aeolian sand transport. *Progress in Physical Geography*, 11, 157-182.
- Savage, R.P., Woodhouse, W.W., 1969.** Creation and stabilization of coastal barrier dunes. *Proceedings of the 11th Coastal Engineering Conference*, London, 1, 671-700.
- Schoonees, J.S., Theron, A.R., Bevis, D., 2006.** Shoreline accretion and sand transport at groynes inside the port of Richard Bay. *Coastal Engineering*, 53(12), 983-1062.
- Scottish Natural Heritage, 2000.** *A guide to managing coastal erosion in beach/dune systems*. Edité par Scottish Natural Heritage, 128 p.
- SHOM, Service Hydrographique et Océanographique de la Marine, 2011.** *Références altimétriques maritimes, Ports de France et d'outre-mer*. Service Hydrographique et Océanographique de la Marine, Paris, 98 p.
- SHOM, Service Hydrographique et Océanographique de la Marine, 2012.** *Statistiques des niveaux marins extrêmes des côtes de la France (Manche et Atlantique)*, 160 p.
- Shao, Y., McTainsh, G.H., Leys, J.F., 1993.** Efficiencies of sediment samplers for wind erosion measurements. *Aust. J. Soil Res.* 31 : 519-532.
- Sherman, D.J., 1990.** A method for measuring aeolian sediment transport rates. *Proceedings Canadian Symposium on Coastal Sand Dunes*, 37-47.
- Sherman, D.J., Hotta, S., 1990.** Aeolian sediment transport : theory and measurement. In : K.F. Nordstrom, N.P. Psuty & R.W.G. Carter (Eds.) *Coastal Dunes - Form and Process*. Wiley, Chichester, 17-37.
- Sherman, D.J., Jackson, D.W.T., Namikas, S.L., Wang, J., 1998.** Wind-blown sand on beaches : an evaluation of models. *Geomorphology*, 22, 113-133.

- Sherman, D.J., Li, B., 2012.** Predicting aeolian sand transport rates: a reevaluation of models. *Aeolian Research*, 3, 371-378.
- Short, A.D., 1988.** Wave, beach, foredune, and mobile dune interactions in Southeast Australia, *Journal of Coastal Research*, SI3, 5-9.
- Short, A.D., Hesp, P.A., 1982.** Wave, beach and dune interactions in southeast Australia, *Marine Geology*, 48, 259-284.
- Simon, B., 2008.** *Statistiques des niveaux marins extrêmes de pleine mer Manche et Atlantique*. SHOM-CETMEF
- Sipka V., 1998.** *Les plages macrotidales du Nord – Pas-de-Calais : contexte environnemental et caractérisation morphodynamique*. Thèse de doctorat de Géographie physique, Université du Littoral Côte d'Opale, 207 p.
- Sipka V., Anthony E.J., 1999.** Morphology and hydrodynamics of a macrotidal ridge and runnel under modal low wave conditions. *Journal de Recherche Océanographique*, 24, 25-31.
- Sommé J., 1975.** *Les plaines du Nord de la France et leur bordure. Etude géomorphologique*. Doctorat d'Etat, Université de Paris I., 810 p.
- Stockdon H.F., Holman R.A., Howd P.A., Sallenger A.H., 2006.** Empirical parametrization of setup, swash and runup. *Coast Eng* 53(7):573–588
- Stride A.H., 1982.** *Offshore tidal sands, processes and deposits*. Chapman & Hall, London, 222 p.
- Suanez, S., 1997.** *Dynamiques sédimentaires actuelles et récentes de la frange littorale orientale du delta du Rhône*, Université d'Aix-en-Provence, 282 p.
- Suanez S., Cariolet J-M., 2010.** L'action des tempêtes sur l'érosion des dunes : les enseignements de la tempête du 10 mars 2008. *Norois*, n° 215, 2010/2, p 77-99.
- Suanez S., Fichaut B., Gouedranche L., Sparfel L., 2006.** Niveaux marins extrêmes et érosion du cordon dunaire de la plage du Vougot (commune de Guissény, Finistère). De la mesure à la réponse gestionnaire. *Actes des IXèmes Journées Nationales Génie Civil – Génie Côtier*, 12-14 septembre 2006, Brest, 439-446.
- Svasek, J.N. et Terwindt, J.H.J., 1974.** Measurements of sand transport by wind on a natural beach. *Sedimentology*, 21, 311-322.
- Syndicat Mixte de la Côte d'Opale, 2003.** Région Nord-Pas-de-Calais, Ministère de l'Equipement, MEDD, *Plan Littoral d'Actions pour la Gestion de l'Erosion*, Lille. 185 p.
- Tait, J.F., Griggs, G.B., 1990.** *Beach response to the presence of a seawall*, *Shore and Beach*, 58(2), 11-28.
- TBM, 2008.** *Étude Faune Flore Habitats sur le territoire du Port Autonome de Dunkerque*. PAD, Dunkerque, décembre 2008.
- Tekin, M., 2004.** Un type original de dunes embryonnaires sur la plage macrotidale du Frot-Vert (Pas-de-Calais), France. *Bulletin de l'Association des Géographes Français*, publié avec le concours du CNRS, 81^{ème} année, 3, 418-426.
- Tessier B., Corbau C., Chamley H., Auffret J. P., 1999.** Internal structure of shoreface banks revealed by high-resolution seismic reflection in a macrotidal environment (Dunkerque area, northern France). *Journal of Coastal Research*, 15, 593-606.

- Thieler, E.R., Himmelstoss, E.A., Zichichi, J.L., and Ergul, Ayhan, 2009.** *Digital Shoreline Analysis System (DSAS) version 4.0—An ArcGIS extension for calculating shoreline change*. U.S. Geological Survey Open-File Report 2008-1278, 79 p.
- Trentesaux A., Le Bot S., Garlan T., 2004.** Combined tide and wind-generated processes at the origin of the architecture of very large dunes in the Dover Strait, Southern North Sea. In: Bartholdy J., PEDERSEN J.B.T. (Eds.), *6th International Conference on Tidal Sedimentology. Institute of Geography*. University of Copenhagen, Copenhagen, 186-189.
- Tresca, A., Ruz, M., Raison, S., Grégoire, P. 2012.** Management of aeolian sand transport on a dike, Dunkirk Seaport, France. *Coastal Engineering Proceedings*, 1(33), sediment.91. doi:10.9753/icce.v33.sediment.91
- Valeix, J. (Coord), 2007.** *Rendez-vous techniques n°17*. Edité par l'Office National des Forêts, 72 p.
- Van Dieren J.W., 1934.** *Organogene Dünenbildung. Eine geomorpho-logische Analyse der Dünenlandschaft der West-friesischen insel Terschelling en mit pflanzensoziologischen methoden*. Martinus Nijhof,'s-Gravenhage
- Von Kármán–Prandtl, T., 1934.** Turbulence and skin friction. *Journal of Aeronautical Science*,1, 1-20 .
- van der Wal, D., 1998.** Effects of fetch and surface texture on aeolian sand transport on two nourished beaches. *Journal of Arid Environments*, 39, 533-547.
- van der Wal, D., 2001.** Modelling aeolian sand transport and morphological development in two beach nourishment areas. *Earth Surface Processes and landforms*, 25, 77-92.
- van der Wal, D., 2004.** Beach-Dune Interactions in Nourishment Areas along the Dutch Coast. *Journal of Coastal Research*, 20, 1, 317-325.
- van Rijn, L.C., 2009.** Prediction of dune erosion due to storms. *Coastal Engineering*,56, p. 441-457
- van Rijn, L.C., Ruessink, B.G. and Mulder, J.P.M., 2002.** COAST3D-EGMOND; the behaviour of a straight sandy coast on the time scale of storms and seasons. *Aqua Publications*, Amsterdam. (www.aquapublications.nl)
- Vanhée, 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 ULCO, 233 p.
- Vasseur B., Héquette A., 2000.** Storm surges and erosion of coastal dunes between 1957 and 1988 near Dunkerque (France), southwestern North Sea. Coastal Geomorphology and Shoreline Management Unit JE 2208, ULCO. From PYE K. and ALLEN J.R.L. (eds). *Coastal and estuarine environnements : sedimentology, geomorphology and geoarcheology*. Geological Society, London Special Publications, 175, 99-107.
- Verger, F., 2011.** Dignes et polders littoraux : réflexions après la tempête Xynthia. *Physio-Géo – Géographie, Physique, Environnement*, 5, 95-105.
- Verhagen, H.J., 1992.** Method for artificial beach nourishment. *Proceedings of International Conference on Coastal Engineering*, Venice, Italy, 12 p.
- Vicaire O., 1991.** *Dynamique hydro-sédimentaire en mer du Nord méridionale (du Cap Blanc-Nez à la frontière belge)*. Thèse de doctorat, Université des Sciences et Techniques de Lille-Flandres Artois, 255 p.

- Walker, I.J., Hesp, P.A., 2012 in press.** Fundamentals of Aeolian Sediment Transport: Airflow over dunes. Ch. 11.7, Vol. 11: *Aeolian Geomorphology, Treatise on Geomorphology*. Elsevier: Oxford.
- Walker, I.J., Hesp, P.A., Davidson-Arnott, R.G.D., Bauer, B.O., Namikas, S.L. and Ollerhead, J. 2009.** Responses of three-dimensional flow to variations in the angle of incident wind and profile form of dunes: Greenwich Dunes, Prince Edward Island, Canada. *Geomorphology* 105(1-2):127-138, doi:10.1016/j.geomorph.2007.12.019
- Walker, I.J., Hesp, P.A., Davidson-Arnott, R.G.D., Ollerhead, J., 2006.** Topographic steering of alongshore airflow over a vegetated foredune: Greenwich Dunes, Prince Edward Island, Canada. *Journal of Coastal Research* 22(5), 1278–1291.
- Walker, I.J., Nickling, G.N., 2002.** Dynamics of secondary airflow and sediment transport over and in the lee of transverse dunes. *Progress in Physical Geography*, 26, 1, 47-75.
- Walton, T., Sensabaugh, W., 1978.** “*Seawall Design on Sandy Beaches*”. University of Florida Sea Grant Report.
- White, B.R., 1979.** Soil transport by winds of Mars. *Journal of Geophysical Research*, 84, 4643-461.
- White, B.R., 1982.** Two-phase measurements of saltating turbulent boundary-layer flow. *Int. J. Multiphase Flow*, 8: 459-473.
- White, B.R., Tsoar, H. 1998.** Slope effect on saltation over a climbing sand dune. *Geomorphology* 22(2):159-180.
- Wiggs, G.F.S., Baird, A.J., Atherton, R.J., 2004.** The dynamic effects of moisture on the entrainment and transport of sand by wind. *Geomorphology*, 59, 13-30.
- Woodhouse, W.W. Jr. 1978.** *Dune Building and Stabilization With Vegetation*. U.S. Army Corp of Engineers. Vol.3: 9-104.
- Zhang, K.C., Qu, J.J., Liao, K.T., Niu, Q.H., Han, Q.J., 2010.** Damage by wind-blown sand and its control along Qinghai-Tibet Railway in China. *Aeolian Research*, 1, 143-146.
- Zhang, C.L., Zou, X.Y., Cheng, H., Yang, S., Pan, X.H., Liu, Y.Z., Dong, G.R., 2007.** Engineering measures to control windblown sand in Shiquanhe Town, Tibet. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 95, 53-70.
- Zingg, A.W., 1953.** Wind tunnel studies of the movement of sedimentary material. *Proc. 5th Hydraulic Conference Institute of Hydraulics*, Iowa City, 111-135.

Table des figures

INTRODUCTION

FIGURE 0.1. (A) DEPOTS EOLIENS SUR UNE ROUTE PORTUAIRE (11.01.10) ET (B) EROSION DU TRAIT DE COTE (28.02.10) (PHOTOGRAPHIES, TRESCA)	11
FIGURE 0.2. (A) DEPOT DE SABLE EN BORDURE DE BASSIN PORTUAIRE (05.06.12) ET (B) ET MINERALIER EN MANŒUVRE DANS UN BASSIN PORTUAIRE AVEC AU PREMIER PLAN DES DEPOTS EOLIENS DE SABLE COLONISES PAR DES OYATS (13.04.11) (PHOTOGRAPHIES, TRESCA)	11

CHAPITRE 1

FIGURE 1.1 CARTE DE LOCALISATION DE LA FAÇADE MARITIME DU PORT DE DUNKERQUE ET DE LA PLAINE MARITIME FLAMANDE (D' APRES OBLINGER, 2008)	18
FIGURE 1.2 DELIMITATION DU SITE D'ETUDE (SOURCE DE LA PHOTOGRAPHIE AERIENNE : ORTHOLITTORALE 2000)	19
FIGURE 1.3 PLAN DE LA RADE DE DUNKERQUE EN 1792. LE DEVELOPPEMENT DE LA VILLE SE FAIT EN ARRIERE DE L' ACTUEL AVANT-PORT EST. LES DEUX ANCIENNES JETEEES PORTUAIRES PARALLELES APPARAISSENT SUR CE PLAN. (AUTEUR : PIERRE MECHAIN ; SOURCE : BIBLIOTHEQUE NATIONALE DE FRANCE)	20
FIGURE 1.4 PEINTURE REPRESENTANT LES DEUX JETEEES DU PORT AINSI QUE LA VILLE DE DUNKERQUE, A L' ARRIERE PLAN, AU XVII ^{EME} SIECLE (SOURCE : MUSEE PORTUAIRE DE DUNKERQUE ; PHOTOGRAPHIE : M-H RUZ).....	20
FIGURE 1.5 CARTE D'ETAT MAJOR AU 1:40.000 DATANT DU 19 ^{EME} SIECLE, ET SUPERPOSITION DU TRAIT DE COTE ACTUEL (EN BLEU) SOURCE : GEOPORTAIL, SERVEUR DE VISUALISATION DE DONNEES GEOGRAPHIQUES ET GEOLOCALISEES, © IGN 2012	21
FIGURE 1.6 VUE AERIENNE OBLIQUE ORIENTEE VERS LE SO MONTRANT LES DEBUTS DE LA CONSTRUCTION DU BASSIN MARITIME ET DE LA DIGUE DU BRAEK (SOURCE : ARCHIVES GPMD, 1962)	21
FIGURE 1.7 PHOTOGRAPHIES PRISES AVANT (1970), PENDANT (1984) ET APRES (2004) LE CREUSEMENT DU CANAL DES DUNES (SOURCES : ARCHIVES GPMD, 1970 ; PAD, 1984 ; PAD, 2004).....	22
FIGURE 1.8 VUE AERIENNE DE LA COTE EN 1932 ET SUPERPOSITION DU TRAIT DE COTE ACTUEL (EN BLEU). SOURCE : SEXTANT, SERVEUR DE DONNEE GEOREFERENCEES MARINES, © IFREMER 2011	22
FIGURE 1.9 ROSES DES VENTS SAISONNIERES (DONNEES VLIZ, PAS DE TEMPS DE 10 MINUTES, WESTHINDER, 1997-2007, D' APRES GUERBER ET AL., 2008).....	24
FIGURE 1.10 (A) ROSE DES VENTS A DUNKERQUE (DONNEES TRIHORAIREES METEOFRANCE 01.01.1991-31.08.2007) ; (B) SCHEMA DES VENTS FRONTAUX, DE TERRE ET LONGITUDINAUX PAR RAPPORT A L' ORIENTATION GENERALE DU TRAIT DE COTE	26
FIGURE 1.11 REPARTITION MENSUELLE DES PRECIPITATIONS AU SEMAPHORE DE DUNKERQUE (IDRA ENVIRONNEMENT, 2012).....	26
FIGURE 1.12 ROSE DES HOULES (Hs : HAUTEURS SIGNIFICATIVES) (BOUEE WESTHINDER 1997-2007, HEQUETTE ET MOSES, 2008 ; MASPATAUD, 2011) (SOURCE DES DONNEES : AGENCY FOR MARITIMES SERVICES AND COAST – DIVISION COAST, BELGIQUE).....	28
FIGURE 1.13 ORIENTATION DES TRANSITS SEDIMENTAIRES A LA JONCTION MANCHE-MER DU NORD ET LOCALISATION DES PRINCIPAUX GROUPES DE BANCS TIDAUX ET VAGUES DE SABLE (MODIFIE, D' APRES DEWEZ ET AL., 1989 ; STRIDE, BELDERSON ET AL., 1982 ; MCCAVE, 1971 ; HOUBOLT, 1968 IN MASPATAUD, 2011).....	30
FIGURE 1.14 VARIATIONS RECENTES DU NIVEAU MARIN RELATIF POUR LES STATIONS DE DUNKERQUE ET OOSTENDE (SOURCE : PSMSL)	31

CHAPITRE 2

FIGURE 2.1. LOCALISATION DES STRUCTURES DE CAPTAGE DU SABLE SUR LA PLAGE DU CLIPON.....	37
FIGURE 2.2. LOCALISATION DES STRUCTURES EXPERIMENTALES DE CAPTAGE DU SABLE SUR LA DIGUE DU BRAEK.	39
FIGURE 2.3. LOCALISATION DES STRUCTURES EXPERIMENTALES DE CAPTAGE DU SABLE SUR LE PROFIL DE DIGUE.	40
FIGURE 2.4. CARTE DE REPARTITION DES STATIONS PERMANENTES ORPHEON SUR LE TERRITOIRE METROPOLITAIN.	42
FIGURE 2.5. CARTE DE LOCALISATION DES PROFILS TRANSVERSAUX.	44

FIGURE 2.6. EXEMPLE DE SEMIS DE POINTS ET EXTRAPOLATION EN LIGNE SUR LE PROFIL C6 DU 26.10.2011. LA DENSITE DE MESURE MOYENNE DANS CET EXEMPLE EST D'UN POINT TOUTS LES 6 M. LES PLUS HAUTES MERS ASTRONOMIQUES PREDITES PAR LE SHOM CONSTITUENT LA LIMITE ENTRE LA DUNE ET LA PLAGE POUR LE CALCUL DES VOLUMES.	45
FIGURE 2.7. ILLUSTRATION DES DEGATS CAUSES A CERTAINES STRUCTURES, ICI AU NIVEAU DE D4C ET D5 (PHOTOGRAPHIES TRESCA 16.12.2011).....	47
FIGURE 2.8. (A) MODELE NUMERIQUE DE TERRAIN ET (B) SEMIS DE POINTS AU NIVEAU DE LA STRUCTURE C2 – LEVE DU 30.08.2010. LES COORDONNEES SONT EXPRIMEES EN METRES (REFERENTIEL LAMBERT 93 CC50). LA LIGNE D'ALTITUDE ROUGE A 4,036 M EST LA LIMITE ENTRE LA PLAGE ET LE VERSANT DUNAIRE (PHMA) AU PORT OUEST, LE PLUS PROCHE DES STRUCTURES. LES LIGNES MARRON REPRESENTENT LES FASCINES... 48	48
FIGURE 2.9. EXEMPLE DE DEUX CARTOGRAPHIES DIFFERENTIELLES PRESENTANT DE L'ACCUMULATION (C2) ET DE L'EROSION (C3A). LES UNITES SONT EN METRES (LAMBERT 93 CC50). LES LIGNES DE COULEUR NOIRE REPRESENTENT LES BRISE-VENT.	49
FIGURE 2.10. EXEMPLE DU SEMIS DE POINTS (EN ROUGE) OBTENU LORS D'UN LEVER DU TRAIT DE COTE A L'AIDE DU RECEPTEUR GNSS LE 07/09/2010 (SUPERPOSE A UNE VUE AERIENNE DE 2005), ET TABLEAU DES DATES DE LEVER DU TRAIT DE COTE.	51
FIGURE 2.11. ILLUSTRATION DE LA POSITION DES DIFFERENTS TRAIT DE COTE DE LA PLAGE DU CLIPON, DE LA LIGNE DE REFERENCE ET DES DIFFERENTS TRANSECTS ESPACES DE 50 M.....	53
FIGURE 2.12. (A) METHODE DE CALCUL DE L'ENVELOPPE (SCE = SHORELINE CHANGE ENVELOPPE) ET (B) METHODE DE CALCUL DE L'EVOLUTION NETTE DE LA POSITION DU TRAIT DE COTE (NSM = NET SHORELINE MOVEMENT) (THIELER ET AL., 2009).	54
FIGURE 2.13. ILLUSTRATION DE LA METHODE DE DELIMITATION DU MASSIF DUNAIRE DU CLIPON (AVEC LES EXEMPLE DE 1983 ET 2009), ET LOCALISATION DU CANAL DES DUNES.	55
FIGURE 2.14. EXEMPLE DE DELIMITATION DES DUNES LE LONG DE LA DIGUE DU BRAEK A L'AIDE DU LOGICIEL ARCGIS.	57
FIGURE 2.15. PIEGE A SABLE VERTICAL DE TYPE « LEATHERMAN » (SCHEMA D'APRES GOLDSMITH ET AL., 1988), ET AFFOUILLEMENT CREE A LA BASE DU PIEGE (PHOTOGRAPHIE A. TRESCA).....	58
FIGURE 2.16. PIEGE A SABLE VERTICAL DE TYPE « GTW » (SCHEMA D'APRES NICKLING & MCKENNA NEUMAN, 1997), ET PHOTOGRAPHIE DE L'UN DES PIEGES CONSTRUIT POUR CETTE ETUDE, FIXE SUR UNE PLAQUE EN METAL.....	59
FIGURE 2.17. PIEGE A SABLE A COUPELLES (D'APRES ARENS & VAN DER LEE, 1995), ET PHOTOGRAPHIE DE TERRAIN (TRESCA, 2011)	61
FIGURE 2.18. PHOTOGRAPHIES DE L'EXPERIMENTATION DE TERRAIN VISANT A COMPARER DIFFERENTS TYPES DE PIEGES A SABLE (PHOTOGRAPHIE A. TRESCA, 14.01.11)	61
FIGURE 2.19. RESULTATS DE LA COMPARAISON DE L'EFFICACITE DE DIFFERENTS TYPES DE PIEGES : (A) CONDITIONS DE VENT ; (B) TRANSPORT MESURE LORS DU PIEGEAGE DE 10 MIN ; (C) HAUTEUR DE PIEGEAGE AU NIVEAU DU PIEGE DE TYPE ARENS.....	62
FIGURE 2.20. STATION METEOROLOGIQUE <i>PROFESSIONAL OREGON SCIENTIFIC WMR 200</i> : DATA LOGGER, CAPTEURS, ET PHOTOGRAPHIE SUR LE TERRAIN (PHOTOGRAPHIE A.TRESCA)	63
FIGURE 2.21. CARTE DE LOCALISATION DES CAPTEURS DE VENT, PRECIPITATIONS (METEOFRANCE) ET DES MAREGRAPHES.	64
FIGURE 2.22. SUPPORT DES MATS A ANEMOMETRES INCLINES (A ET B) ET DISPOSITION DES ANEMOMETRES SUR LE MAT LORS D'UNE EXPERIMENTATION SUR LA DIGUE (C) (PHOTOGRAPHIES A. TRESCA).....	65
FIGURE 2.23. LOCALISATION DES BOUEES CANDHIS	68

CHAPITRE 3

FIGURE 3.1 POSITIONS SUCCESSIVES DE LA LIMITE DE VEGETATION DE LA PLAGE DU CLIPON DEPUIS 1983	75
FIGURE 3.2 EVOLUTION DE LA PLAGE DU CLIPON AVANT (1983) ET APRES (1988) RECHARGEMENT A L'OUEST ET PLATEFORME SUPRATIDALE A L'EST. LE « LOBE » DANS LA PARTIE OUEST EN 1988 CORRESPONDANT A UN RECHARGEMENT DE PLAGE (CLICHES IGN 1983, 1988)	76
FIGURE 3.3. CLICHE AERIEN DE 1994 MONTRANT UNE INCURSION MARINE AU NIVEAU DU TRANSECT T14 AINSI QUE LES DEUX FLECHES LITTORALES ET L'EROSION AU NORD DE LA DIGUE DE RUYTINGEN (PHOTOGRAPHIE : OBJECTIF VIDEO, 1994).....	77
FIGURE 3.4. (A) EN BLEU, LIMITE ENTRE, A GAUCHE LA VEGETATION RECOUVERTE A MAREE HAUTE, ET A DROITE, LA VEGETATION DU VERSANT DUNAIRE (PHOTO PRISE EN DIRECTION DU SE AU NIVEAU DU TRANSECT 10) – (B) EN ROUGE, LE TRAIT DE COTE ACTUEL, ET EN JAUNE, LE TRAIT DE COTE AVANT 1997 (PHOTO PRISE VERS LE SE AU NIVEAU DU TRANSECT T5) (CLICHES TRESCA, 2010, 2011)	77
FIGURE 3.5. INCURSION MARINE ET RIDEAUX DE FASCINES LONGITUDINAUX EN 1994 DANS LES DUNES DU CLIPON AU NIVEAU DES TRANSECTS T14 ET T15 (CLICHE ARCHIVES GPMD, 1994).	78

FIGURE 3.6. CARRIERE DE SABLE DANS L'ANSE DE LA PLAGE DU CLIPON EN 1975 (SOURCE : LIVRET CUD)	79
FIGURE 3.7. PHOTOGRAPHIES PRISES ENTRE LES TRANSECTS T70 ET T85 : (A) SUR LE TERRAIN LORS D'UNE TEMPETE EN 1994 AUX ENVIRONS DE T75 (CLICHE GPMD, 1994) ; (B) VUE AERIENNE OBLIQUE SUITE A LA TEMPETE DE 1994, ON PEUT VOIR LES RESTES DE FASCINES QUI ONT ETE DEBLAYEES PAR LA MER (CLICHE GPMD, 1994) ; (C) EXEMPLE DE FASCINES IMPLANTEES SUR LE HAUT DE PLAGE EN 1998 PRES DU TRANSECT T70 (CLICHE RUZ, 1998).....	81
FIGURE 3.8. EVOLUTION DE LA POSITION DE LA LIMITE DE VEGETATION ET VARIABILITE MAXIMALE DE 1983 A 2011	82
FIGURE 3.9. TOPOGRAPHIE DU CLIPON LE LONG DE 7 PROFILS TOPOGRAPHIQUES TRANSVERSAUX ET TOPOGRAPHIE INITIALE DE LA PLATEFORME ARTIFICIELLE SUPRATIDALE A L'EST (A), ET PHOTOGRAPHIE AERIENNE OBLIQUE (B) (CLICHE PAD, 1994)	83
FIGURE 3.10. COMPARAISON DE L'EVOLUTION DE LA LIMITE DE VEGETATION (A) ET DE LA DYNAMIQUE DU TRAIT DE COTE DE BERTIER (2009) (B).....	85
FIGURE 3.11. LOCALISATION DE LA PORTION DE TRAIT DE COTE AVEC LES DUNES HEMISPHERIQUES (A) EN PLAN, (B) SUR UN PROFIL TRANSVERSAL REPRESENTATIF, ET (C) PHOTOGRAPHIES PRISES VERS L'ESE (C1) ET LE NE (C2).....	87
FIGURE 3.12. LOCALISATION DES DUNES BORDIERES DENSEMENT VEGETALISEES (A) EN PLAN, (B) SUR UN PROFIL TRANSVERSAL REPRESENTATIF, ET (C) PHOTOGRAPHIES PRISES VERS L'E (C1) ET L'O (C2).....	88
FIGURE 3.13. LOCALISATION DES DUNES BORDIERES AU VERSANT EXTERNE IRREGULIER (A) EN PLAN, (B) SUR UN PROFIL TRANSVERSAL REPRESENTATIF, ET (C) PHOTOGRAPHIES PRISES VERS L'O (C1) ET L'E (C2).....	90
FIGURE 3.14. LOCALISATION DES DUNES BORDIERES HAUTES AU VERSANT EXTERNE IRREGULIER (A) EN PLAN, (B) SUR UN PROFIL TRANSVERSAL REPRESENTATIF, ET (C) PHOTOGRAPHIES PRISES VERS L'O (C1) ET L'OSO (C2).....	91
FIGURE 3.15. LOCALISATION DE LA PLATEFORME ARTIFICIELLE SABLEUSE EN EROSION (A) EN PLAN, (B) SUR UN PROFIL TRANSVERSAL REPRESENTATIF, ET (C) PHOTOGRAPHIES PRISES VERS L'O (C1) ET L'OSO (C2).	92
FIGURE 3.16. EVOLUTION DE L'EXTENSION SPATIALE DE LA VEGETATION DE LA PLAGE DU CLIPON DE 1983 A 2009. (A) PLATEFORME INTERTIDALE; (B) DUNES DU CLIPON; (C) FALAISE SABLEUSE	93
FIGURE 3.17. LOCALISATION DES DUNES DE PIED DE DIGUE (A) EN PLAN ET (B) SUR UN PROFIL TRANSVERSAL REPRESENTATIF, ET (C) PHOTOGRAPHIE PRISE VERS LE NNE (CLICHE, TRESCA, 2011).....	96
FIGURE 3.18. COULOIR DE DEFLATION RELIANT LA DIGUE A LA PLAGE (A) ET COLONISATION DE <i>CAKILE MARITIMA</i> SUR LE HAUT DE PLAGE EN AVANT DES DUNES DE PIED DE DIGUE (B) (CLICHES TRESCA 19/06/2011).....	96
FIGURE 3.19. LOCALISATION DES DUNES EN BORDURE DU BASSIN MARITIME (A) EN PLAN ET (B) SUR UN PROFIL TRANSVERSAL REPRESENTATIF, ET (C1 & C2) PHOTOGRAPHIES PRISES VERS L'OSO (CLICHES, TRESCA, 2010).....	97
FIGURE 3.20. LOCALISATION DES DUNES DE REVERS DE DIGUE (A) EN PLAN ET (B) SUR UN PROFIL TRANSVERSAL REPRESENTATIF, ET (C1) PHOTOGRAPHIE PRISE DE LA CRETE VERS LE NNE ET (C2) SUR LA ROUTE EN ARRIERE VERS L'OSO (TRESCA, 2010).....	98
FIGURE 3.21. PHOTOGRAPHIES DE LA NAISSANCE DE DUNES SUR LA DIGUE PAR L'EXPLOITATION DES FISSURES DANS L'ENROBE (CLICHES, TRESCA, 28/07/2010).....	99
FIGURE 3.22. COLONISATION DE <i>CAKILE MARITIMA</i> (A ET B) ET <i>ERYNGIUM CAMPESTRE</i> (B) SUR LES DUNES DE REVERS DE DIGUE (CLICHES TRESCA 28/07/2010).....	99
FIGURE 3.23. LOCALISATION DES DUNES DE SOMMET DE DIGUE (A) EN PLAN ; (B) SUR UN PROFIL TRANSVERSAL. (C1) : PHOTOGRAPHIE PRISE DE LA CRETE VERS LE NNE, ET (C2) PHOTOGRAPHIE PRISE DEPUIS LE SE (CLICHES, TRESCA, 2010).	100
FIGURE 3.24. PHOTOGRAPHIES DE DUNES D'OBSTACLES SUR LA DIGUE DU BRAEK. (A) DUNE DE TAILLE MODESTE (0,5 M DE HAUT) FORMEE SUR UN BLOC, (B) DUNE DE 2 M DE HAUTEUR FORMEE SUR UN AMAS DE GRAVATS ET BLOCS (CLICHES, TRESCA, 2010).....	101
FIGURE 3.25. COLONISATION DE <i>CAKILE MARITIMA</i> SUR UNE DUNE D'OBSTACLE AU NIVEAU DE LA LAISSE DE MER SUR LA DIGUE DU BRAEK (CLICHE TRESCA 05/06/2012).	101
FIGURE 3.26. EVOLUTION DE LA SUPERFICIE OCCUPEE PAR LES DUNES SUR LA DIGUE DU BRAEK DE 1988 A 2009.	103

CHAPITRE 4

FIGURE 4.1. CARTE DE LOCALISATION DES PROFILS DE PLAGE.....	109
FIGURE 4.2. MORPHOLOGIE DES PROFILS DE L'UG4. (A) SUPERPOSITION DES PROFILS ET (B) REPRESENTATION EN PLAN DES PROFILS SELON DIFFERENTES CLASSES D'ALTITUDE. LA DISTANCE 0 CORRESPOND AU NIVEAU DES PHMA. CETTE ORIGINE COMMUNE A TOUS LES PROFILS PERMET DE LES COMPARER ENTRE EUX.....	111
FIGURE 4.3. GRANULOMETRIE DE SURFACE (REPARTITION DU GRAIN MOYEN) DE L'UG4 AU MOIS DE MAI 2010 (HEQUETTE ET AL., 2011).....	112

FIGURE 4.4. CARTE DE LOCALISATION DES 6 UNITES ET DES PROFILS TYPES.....	113
FIGURE 4.5. DETAIL DES CALCULS DE VOLUMES SUR LES PROFILS TOPOGRAPHIQUES.....	116
FIGURE 4.6. VARIATIONS VOLUMETRIQUES MENSUELLES MOYENNES SUR LE VERSANT DUNAIRE ET LE HAUT DE PLAGE DES PROFILS TYPES POUR CHAQUE PERIODE, ET ROSES DES VENTS.	118
FIGURE 4.7. SERIES TEMPORELLES DE LA DIRECTION DU VENT ET DES PRECIPITATIONS DU 01.04.10 AU 01.06.10	119
FIGURE 4.8. CONDITIONS METEO-MARINES LORS DES PERIODES DE SUIVI DES PROFILS TOPOGRAPHIQUES TRANSVERSAUX : VITESSE (A) ET DIRECTION (B) DES VENTS, PRECIPITATIONS ET NIVEAUX D'EAU (C).	121
FIGURE 4.9. PHOTOGRAPHIE AU NIVEAU DU PROFIL D5, ILLUSTRANT LA DIGUE RECOUVERTE DE SABLE EN PROVENANCE DES DUNES DE PIED DE DIGUE (CLICHE TRESCA, 27.03.2011)	123
FIGURE 4.10. SERIES TEMPORELLES DE LA DIRECTION DU VENT ET DES PRECIPITATIONS DU 29.06.11 AU 26.10.11.	123
FIGURE 4.11. BILAN TOPOGRAPHIQUE ET VOLUMETRIQUE DU VERSANT DUNAIRE ET DU HAUT DE PLAGE DES SIX PROFILS TYPES (LES VALEURS SUPERIEURES A LA MARGE D'ERREUR SONT NOTEES EN GRAS), ET ROSE DES VENTS GENERALE DE LA PERIODE D'ETUDE	127
FIGURE 4.12. EVOLUTION DE L'ESTRAN SUR LES PROFILS TYPES DES SIX UNITES MORPHOLOGIQUES DE L'UG4 ET ROSE DES VENTS POUR LA PERIODE DU 01/04/2010 AU 15/02/2011. LES VALEURS EN GRAS SONT CELLES QUI SONT SUPERIEURES A LA MARGE D'ERREUR, EN BLEU LES VALEURS POSITIVES ET EN ROUGE LES VALEURS NEGATIVES. LES VOLUMES SONT EXPRIMES EN $m^3.m^2$ CAR LES PROFILS N'ONT PAS TOUS LA MEME LONGUEUR.	130
FIGURE 4.13. CONDITIONS METEO-MARINES LORS DES PERIODES DE SUIVI DES PROFILS TOPOGRAPHIQUES TRANSVERSAUX : VITESSE (A) ET DIRECTION (B) DES VENTS, PRECIPITATIONS ET NIVEAUX D'EAU (C).	131
FIGURE 4.14. EVOLUTION DE L'ESTRAN SUR LES PROFILS TYPES DES SIX UNITES MORPHOLOGIQUES DE L'UG4 ET ROSE DES VENTS POUR LA PERIODE DU 15/02/2011 AU 26/10/2011. LES VALEURS EN GRAS SONT CELLES QUI SONT SUPERIEURES A LA MARGE D'ERREUR, EN BLEU LES VALEURS POSITIVES ET EN ROUGE LES VALEURS NEGATIVES. LES VOLUMES SONT EXPRIMES EN $m^3.m^2$ CAR LES PROFILS N'ONT PAS TOUS LA MEME LONGUEUR.	133
FIGURE 4.15. BILAN DE L'EVOLUTION DE L'ESTRAN SUR LES SIX PROFILS TYPES DE UNITES MORPHOLOGIQUES DE L'UG4 DU 01/04/2010 AU 26/10/2011. LES VALEURS EN GRAS SONT CELLES QUI SONT SUPERIEURES A LA MARGE D'ERREUR, EN BLEU LES VALEURS POSITIVES ET EN ROUGE LES VALEURS NEGATIVES. LES VOLUMES SONT EXPRIMES EN $m^3.m^2$ CAR LES PROFILS N'ONT PAS TOUS LA MEME LONGUEUR.....	135
FIGURE 4.16. BILAN VOLUMETRIQUE AU NIVEAU DES DIFFERENTS PROFILS DE PLAGE. LES PROFILS NUMEROTES EN ROUGES SONT LES PROFILS TYPES. LES VOLUMES SONT EXPRIMES EN $m^3.m^2$ CAR LES PROFILS N'ONT PAS TOUS LA MEME LONGUEUR.	137
FIGURE 4.17. PHOTOGRAPHIES PRISES AU NIVEAU DU PROFIL C4 APRES LA TEMPETE DE FIN FEVRIER 2010 (A) LE 03.03.2010 ET (B) LE 27.04.2010 (TRESCA, 2010)	139
FIGURE 4.18. PHOTOGRAPHIES PRISES (A) AVANT ET (B) APRES L'EPISODE D'EROSION DU HAUT DE PLAGE DU 25- 26/09/2010 (CLICHES, TRESCA, 2010)	140
FIGURE 4.19. CONDITIONS METEO-MARINES LORS D'UN EPISODE D'EROSION DU HAUT DE PLAGE ENTRE LE 24/09/2010 ET LE 28/09/2010 : (A) VITESSE ET DIRECTION DU VENT, (B) NIVEAUX D'EAU PREDITS ET OBSERVES AU MAREGRAPHE DU PORT OUEST ET (C) DU PORT EST.	141
FIGURE 4.20. PHOTOGRAPHIES PRISES SUR LA PLAGE DU CLIPON (A) AVANT ET (B1) APRES L'EPISODE D'EROSION DU HAUT DE PLAGE DU 30/08/2011, AINSI QUE SUR LA PLAGE AU NIVEAU DU PROFIL D7 A L'EST DE L'UG4 VERS L'EST (B2) ET VERS L'OUEST (B3) APRES L'EROSION AU CLIPON (TRESCA, 2011).....	142
FIGURE 4.21. CONDITIONS METEO-MARINES LORS D'UN EPISODE D'EROSION DU HAUT DE PLAGE ENTRE LE 29/08/2011 ET LE 03/09/2011 : (A) VITESSE ET DIRECTION DU VENT, (B) NIVEAUX D'EAU PREDITS ET OBSERVES AU MAREGRAPHE DU PORT OUEST ET (C) DU PORT EST.	143
FIGURE 4.22. TOPOGRAPHIE DU VERSANT DUNAIRE ET DU HAUT DE PLAGE DES PROFILS C5 (CENTRE DES DUNES DU CLIPON) EN BLEU, ET D7 (DUNES DE PIED DE DIGUE, A L'EST DE L'UG4) EN ROUGE.....	144

CHAPITRE 5

FIGURE 5.1. CARTE DE LOCALISATION DES PIEGEAGES IN SITU SUR LA PLAGE DU CLIPON	149
FIGURE 5.2. PIEGEAGE EOLIEN SUR LE PROFIL C2 A L'OUEST DE LA PLAGE DU CLIPON LE 30.04.2010 PAR VENT D'OSO	150
FIGURE 5.3. LOCALISATION DES PIEGES ET DIRECTION DU VENT (SOURCE PHOTO. AERIENNE : ORTHOLITTORALE 2000).....	151
FIGURE 5.4. PIEGEAGE EOLIEN SUR LE PROFIL C3 A L'OUEST DE LA PLAGE DU CLIPON LE 15.06.2010 PAR VENT DE NE.....	152

FIGURE 5.5. PHOTOGRAPHIES DE TERRAIN DU 15.06.2010 SUR LE PROFIL C3 A L'OUEST DE LA PLAGE DU CLIPON. (A) DEFLATION SUR L'ESTRAN DEVANT LES PIEGES P5 ET P6 ; (B) EMBLACEMENT DES PIEGES (CLICHES TRESCA, 2010)	152
FIGURE 5.6. PIEGEAGE EOLIEN SUR LE PROFIL C5 DANS LA PARTIE CENTRALE DE LA PLAGE DU CLIPON LE 16.06.2010 PAR VENT DE NE.....	153
FIGURE 5.7. PHOTOGRAPHIE DE TERRAIN LORS DU PIEGEAGE DU 16.06.2010 SUR LE PROFIL C5, AU CENTRE DE LA PLAGE DU CLIPON (CLICHE TRESCA, 2010)	154
FIGURE 5.8. PIEGEAGE EOLIEN SUR LE PROFIL C4 DANS LA PARTIE CENTRALE DE LA PLAGE DU CLIPON LE 16.06.2010 PAR VENT DE NNE.....	155
FIGURE 5.9. PHOTOGRAPHIES DE TERRAIN LORS DU PIEGEAGE DU 16/06/2010 SUR LE PROFIL C4 (CLICHE TRESCA, 2010).....	156
FIGURE 5.10. PIEGEAGE EOLIEN SUR LE PROFIL C6 DANS LA PARTIE CENTRALE DE LA PLAGE DU CLIPON LE 06/05/2010 PAR VENT DE NNE.....	157
FIGURE 5.11. PHOTOGRAPHIE DE TERRAIN LORS DU PIEGEAGE DU 06.05.2010 SUR LE PROFIL C6 (CLICHE TRESCA, 2010).....	157
FIGURE 5.12. PIEGEAGE EOLIEN SUR LE PROFIL C6 DANS LA PARTIE CENTRALE DE LA PLAGE DU CLIPON LE 14/06/2010 PAR VENT DE NNE.....	159
FIGURE 5.13. PHOTOGRAPHIES DE TERRAIN LORS DES PIEGEAGE DU 14/06/2010 (A ET B) ET DU 06/05/2010 (C) SUR LE PROFIL C6 (CLICHES TRESCA, 2010)	159
FIGURE 5.14. PIEGEAGE EOLIEN SUR LE PROFIL S2 A L'EST DE LA PLAGE DU CLIPON LE 17/06/2010 PAR VENT DE NNE.....	160
FIGURE 5.15. PHOTOGRAPHIE DE TERRAIN LORS DU PIEGEAGE DU 17/06/2010 SUR LE PROFIL S2 (CLICHE TRESCA, 2010).....	160
FIGURE 5.16. TRANSPORT EOLIEN COMPARE A LA VITESSE DES VENTS. LES DONNEES SONT TRIEES SELON L'EMPLACEMENT DU PIEGE (HAUT DE PLAGE, PIED DE DUNE, VERSANT DUNAIRE, ESTRAN)	162
FIGURE 5.17. TRANSPORT EOLIEN COMPARE AU TAUX D'HUMIDITE DU SUBSTRAT. LES DONNEES SONT TRIEES SELON L'EMPLACEMENT DU PIEGE (HAUT DE PLAGE, PIED DE DUNE, VERSANT DUNAIRE, ESTRAN). ON OBSERVE NOTAMMENT DANS LE COIN SUPERIEUR DROIT DU GRAPHIQUE UNE VALEUR DE TRANSPORT ELEVEE LIEE A UN TAUX D'HUMIDITE IMPORTANT.....	164
FIGURE 5.18. PROFILS VERTICAUX DE VITESSE MOYENNEE PENDANT LES 10 MINUTES DE PIEGEAGE ET QUANTITES DE SABLE CAPTE EN FRONT DE DIGUE ET EN HAUT DE PLAGE LORS D'UNE EXPERIMENTATION DU 03 MARS 2011 PAR CONDITIONS DE VENT LONGITUDINAL DE NE.....	168
FIGURE 5.19. LOCALISATION DES PIEGES ET DES DUNES DE PIED DE DIGUE LORS DE L'EXPERIMENTATION DU 03.03.11 A 17:16. LA PHOTOGRAPHIE AERIENNE (© GOOGLE EARTH) DATE DE 2007. LES TRAINES DE SABLE EN ARRIERE DES DUNES DE PIED DE DIGUE ILLUSTRENT PARFAITEMENT LE TRANSFERT DE SABLE VERS LA ROUTE ET LE BASSIN, OU UN CAMION EXPORTE LE SABLE.	169
FIGURE 5.20. SERIE TEMPORELLE DES VITESSES DE VENT A 0,25 M AU NIVEAU DES MATS M1 (HAUT DE PLAGE), M2 (CONTACT PLAGE/DIGUE) ET M3 (DIGUE) LORS DE L'EXPERIMENTATION DU 03.03.11 A 17 :16	169
FIGURE 5.21. PROFILS VERTICAUX DE VITESSE MOYENNEE PENDANT LES 10 MINUTES DE PIEGEAGE ET QUANTITES DE SABLE CAPTE EN FRONT DE DIGUE LORS D'UNE EXPERIMENTATION DU 04 FEVRIER 2011 PAR CONDITIONS DE VENT LONGITUDINAL DE SO.....	170
FIGURE 5.22. SERIES TEMPORELLES A 0,25 M (A), 0,5 (B), 0,75 (C) ET 1 M (D) AU NIVEAU DES MATS M1 (BAS), M2 (MILIEU) ET M3 (HAUT) LORS DE L'EXPERIMENTATION DU 04.02.11 A 09:56.....	171
FIGURE 5.23. PHOTOGRAPHIE DE TERRAIN DU 04.02.2011 MONTRANT LE TRANSFERT DU SABLE DE L'ARRIERE DE LA DIGUE VERS LE VERSANT EXTERNE ET LE HAUT DE PLAGE (CLICHE TRESCA, 2011).....	171
FIGURE 5.24. PROFILS VERTICAUX DE VITESSE MOYENNEE PENDANT LES 10 MINUTES DE PIEGEAGE ET QUANTITES DE SABLE CAPTE EN FRONT DE DIGUE ET HAUT DE PLAGE LORS D'UNE EXPERIMENTATION DU 26 MAI 2011 PAR CONDITIONS DE VENT LONGITUDINAL D'OSO.	172
FIGURE 5.25. PHOTOGRAPHIE DE TERRAIN DU 26.05.2011 (CLICHE TRESCA 2011).....	173
FIGURE 5.26. PROFILS VERTICAUX DE VITESSE MOYENNEE PENDANT LES 10 MINUTES DE PIEGEAGE ET QUANTITES DE SABLE CAPTE EN FRONT DE DIGUE ET HAUT DE PLAGE LORS D'UNE EXPERIMENTATION DU 27 AVRIL 2011 PAR CONDITIONS DE VENT FRONTAL DE NNE.....	174
FIGURE 5.27. SERIES TEMPORELLES DE VITESSE DU VENT A 0,25 M (A) ET 2 M (B) LORS DU PIEGEAGE DU 27/04/2011 PAR VENT OBLIQUE DE NNE.....	174
FIGURE 5.28. PHOTOGRAPHIE DE TERRAIN MONTRANT LA POSITION DES MATS M1 ET M2 PAR RAPPORT A LA DIRECTION DU VENT DOMINANT DE NNE (CLICHE TRESCA 2011).....	175
FIGURE 5.29. PHOTOGRAPHIE DE TERRAIN MONTRANT LA LOCALISATION DES 3 MATS DE MESURE ET LES PIEGES LORS DE LA SORTIE DU 12/04/2011 PAR VENT FRONTAL DE NNO (CLICHE TRESCA 2011)	176

FIGURE 5.30. PROFILS VERTICAUX DE VITESSE MOYENNEE PENDANT LES 10 MINUTES DE PIEGEAGE ET QUANTITES DE SABLE CAPTE EN FRONT DE DIGUE ET HAUT DE PLAGE LORS D'UNE EXPERIMENTATION DU 12 AVRIL 2011 PAR CONDITIONS DE VENT FRONTAL DE NNO	177
FIGURE 5.31. PHOTOGRAPHIE DE TERRAIN MONTRANT LA POSITION DES MATS DE MESURE PAR RAPPORT AUX VENTS DE NE LORS DE LA SORTIE DU 03/05/2011 (CLICHE TRESCA 2011)	178
FIGURE 5.32. PROFILS VERTICAUX DE VITESSE MOYENNEE PENDANT LES 10 MINUTES DE PIEGEAGE ET QUANTITES DE SABLE CAPTE SUR LE REVERS ET LE SOMMET DE DIGUE LORS D'UNE EXPERIMENTATION DU 03 MAI 2011 PAR CONDITIONS DE VENT LONGITUDINAL DE NE.	178
FIGURE 5.33. SERIES TEMPORELLES DE VITESSE DU VENT A 0,25 M (A) ET 2 M (B) LORS DU PIEGEAGE DU 03/05/2011 PAR VENT LONGITUDINAL DE NE.....	179
FIGURE 5.34. PROFILS VERTICAUX DE VITESSE MOYENNEE PENDANT LES 10 MINUTES DE PIEGEAGE ET QUANTITES DE SABLE CAPTE SUR LE REVERS ET LE SOMMET DE DIGUE LORS D'UNE EXPERIMENTATION DU 05 FEVRIER 2011 PAR CONDITIONS DE VENT LONGITUDINAL DE SO	180
FIGURE 5.35. SERIES TEMPORELLES DE VITESSE DU VENT AU NIVEAU DES MATS M1 ET M2 LORS DU PIEGEAGE DU 05/02/2011 A 0,25 M (A) ET 1 M (B)	180
FIGURE 5.36. PHOTOGRAPHIE PRISE VERS L'OUEST SUR LA ROUTE SITUEE EN CONTREBAS DU VERSANT INTERNE DE LA DIGUE (COTE BASSIN) LORS DE L'EXPERIMENTATION DU 05 FEVRIER 2011 MENEE LORS DE VENT DE SO. LE SABLE EN BORDURE DE BASSIN EST RABATTU SUR LA ROUTE PUIS SUR LE VERSANT INTERNE DE LA DIGUE ET FRANCHIT LE SOMMET DE L'OUVRAGE (TRESCA, 2011).....	181
FIGURE 5.37. RESULTATS DE PIEGEAGES SUR L'ASPHALTE ET SUR LE SABLE LORS DE VENT DE NNE, DE NE ET DE SO A L'AIDE DE COUPELLES ARENS.....	182
FIGURE 5.38. REPARTITION DE LA VITESSE (A) ET DE LA DIRECTION (B) DES VENTS SUR 3 SERIES TEMPORELLES DIFFERENTES	192
FIGURE 5.39. REPARTITION SAISONNIERE DES VENTS SELON LA VITESSE (TOUS LES VENTS, VENTS SUPERIEURS A 8 M.S ⁻¹ ET VENTS SUPERIEURS A 12 M.S ⁻¹).....	193

CHAPITRE 6

FIGURE 6.1 CARTE DE LOCALISATION DES STRUCTURES DE CAPTAGE DU SABLE SUR LA PLAGE DU CLIPON (CLICHES TRESCA 2011 ET PHOTOGRAPHIE AERIENNE © PPIGE, 2005)	201
FIGURE 6.2 ROSE DES VENTS ET CARTOGRAPHIE DIFFERENTIELLE DES QUADRATS CONTENANT DES DISPOSITIFS DE RENFORCEMENT DE LA DUNE BORDIERE ENTRE LE 30.07.2010 ET LE 30.08.2010.....	202
FIGURE 6.3 CONDITIONS DE VENT A LA STATION DE L'AVANT –PORT OUEST ENTRE LE 30.07.2010 ET LE 30.08.2010	203
FIGURE 6.4 ROSE DES VENTS ET CARTOGRAPHIE DIFFERENTIELLE DES QUADRATS CONTENANT DES DISPOSITIFS DE RENFORCEMENT DE LA DUNE BORDIERE ENTRE LE 30.08.2010 ET LE 13.09.2010.....	204
FIGURE 6.5 ROSE DES VENTS ET CARTOGRAPHIE DIFFERENTIELLE DES QUADRATS CONTENANT DES DISPOSITIFS DE RENFORCEMENT DE LA DUNE BORDIERE ENTRE LE 13.09.2010 ET LE 28.09.2010.....	206
FIGURE 6.6 CONDITIONS DE VENT A LA STATION DE L'AVANT –PORT OUEST ENTRE LE 13.09.2010 ET LE 28.09.2010	207
FIGURE 6.7 PHOTOGRAPHIES DES STRUCTURES C3A, C3B ET C3D LE 28.09.2010 (CLICHE TRESCA)	207
FIGURE 6.8 ROSE DES VENTS ET CARTOGRAPHIE DIFFERENTIELLE DES QUADRATS CONTENANT DES DISPOSITIFS DE RENFORCEMENT DE LA DUNE BORDIERE ENTRE LE 28.09.2010 ET LE 20.10.2010.....	209
FIGURE 6.9 PHOTOGRAPHIES DES STRUCTURES C3A, C3C ET C3E LE 08.12.2010 (CLICHES TRESCA, 08.12.2010)	210
FIGURE 6.10 ROSE DES VENTS ET CARTOGRAPHIE DIFFERENTIELLE DES QUADRATS CONTENANT DES DISPOSITIFS DE RENFORCEMENT DE LA DUNE BORDIERE ENTRE LE 20.10.2010 ET LE 21.12.2010.....	211
FIGURE 6.11 ROSE DES VENTS ET CARTOGRAPHIE DIFFERENTIELLE DES QUADRATS CONTENANT DES DISPOSITIFS DE RENFORCEMENT DE LA DUNE BORDIERE ENTRE LE 21.12.2010 ET LE 28.01.2011.....	213
FIGURE 6.12 CONDITIONS DE VENT A LA STATION DE L'AVANT –PORT OUEST ENTRE LE 21.12.2010 ET LE 28.01.2010	214
FIGURE 6.13 ROSE DES VENTS ET CARTOGRAPHIE DIFFERENTIELLE DES QUADRATS CONTENANT DES DISPOSITIFS DE RENFORCEMENT DE LA DUNE BORDIERE ENTRE LE 28.01.2011 ET LE 11.04.2011.....	215
FIGURE 6.14 PHOTOGRAPHIES DE LA STRUCTURE DE COMPLEMENT DE BRECHE (C3C) (A & B) ET DES FILETS SYNTHETIQUES (C) ILLUSTRANT LA DEFLATION AU DESSUS DES STRUCTURES (CLICHES TRESCA, 11.04.2011)	216
FIGURE 6.15 ROSE DES VENTS ET CARTOGRAPHIE DIFFERENTIELLE DES QUADRATS CONTENANT DES DISPOSITIFS DE RENFORCEMENT DE LA DUNE BORDIERE ENTRE LE 11.04.2011 ET LE 17.05.2011.....	217
FIGURE 6.16 ROSE DES VENTS ET CARTOGRAPHIE DIFFERENTIELLE DES QUADRATS CONTENANT DES DISPOSITIFS DE RENFORCEMENT DE LA DUNE BORDIERE ENTRE LE 17.05.2011 ET LE 30.06.2011.....	219

FIGURE 6.17 PHOTOGRAPHIES DE LA STRUCTURE EN CASIERS DE GANIVELLES (C3A) : AU DEBUT DU SUIVI (AOÛT 2010), AVANT (AOÛT 2011) ET APRES (SEPTEMBRE 2011) L'ÉPISODE D'ÉROSION DU HAUT DE PLAGE DU 31 AOÛT 2011 (CLICHES TRESCA)	220
FIGURE 6.18 ROSE DES VENTS ET CARTOGRAPHIE DIFFÉRENTIELLE DES QUADRATS CONTENANT DES DISPOSITIFS DE RENFORCEMENT DE LA DUNE BORDIÈRE ENTRE LE 17.05.2011 ET LE 30.06.2011.....	221
FIGURE 6.19 PHOTOGRAPHIES DES STRUCTURES C1 – FASCINES DE 6 M (A), C2 – FASCINES DE 6 M (B), C3D – FASCINES DE 3 M (C) ET C3E – FILETS SYNTHÉTIQUES (D) LE 31.08.2011 (CLICHES TRESCA)	222
FIGURE 6.20 COMPARAISON DU BILAN PAR MNT POUR TOUS LES QUADRATS ENTRE LE 30.07.2010 ET LE 26.10.2011	224
FIGURE 6.21 PHOTOGRAPHIES DES STRUCTURES DE CAPTAGE DU SABLE SUR LA PLAGE DU CLIPON LE 30.07.2010 ET LE 02.08.2011	225
FIGURE 6.22 VOLUMES CUMULÉS PAR UNITÉ DE SURFACE (M ²). CHAQUE GRAPHIQUE COMPARE TOUS LES SECTEURS SUR CHACUN DES COMPARTIMENTS (STRUCTURES, VERSANT DUNAIRE, HAUT DE PLAGE) ET POUR LE TOTAL.....	227
FIGURE 6.23 LOCALISATION DES STRUCTURES DE CAPTAGE DU SABLE SUR LA DIGUE DU BRAEK (CLICHES TRESCA 2011 ET PHOTOGRAPHIE AÉRIENNE © PPIGE, 2005).....	228
FIGURE 6.24 PHOTOGRAPHIES ILLUSTRANT LES DÉTERIORATIONS AU NIVEAU DES STRUCTURES INSTALLÉES AU CENTRE (A & B) ET À L'OUEST (C) DE LA DIGUE DU BRAEK (CLICHES TRESCA, 12.05.2011)	229
FIGURE 6.25. ROSE DES VENTS ET CARTOGRAPHIE DIFFÉRENTIELLE DES QUADRATS CONTENANT DES STRUCTURES DE CAPTAGE SUR LA DIGUE DU BRAEK ENTRE LE 14.02.2011 ET LE 04.03.2011.....	230
FIGURE 6.26. PHOTOGRAPHIE DE 6 STRUCTURES INSTALLÉES SUR LA DIGUE LE 14.02.2011 (CLICHE TRESCA) ...	231
FIGURE 6.27 PHOTOGRAPHIE DE 4 STRUCTURES INSTALLÉES SUR LA DIGUE LE 04.11.2011 (CLICHES TRESCA)...	232
FIGURE 6.28 ROSE DES VENTS ET CARTOGRAPHIE DIFFÉRENTIELLE DES QUADRATS CONTENANT DES STRUCTURES DE CAPTAGE SUR LA DIGUE DU BRAEK ENTRE LE 04.03.2011 ET LE 11.04.2011	233
FIGURE 6.29 ROSE DES VENTS ET CARTOGRAPHIE DIFFÉRENTIELLE DES QUADRATS CONTENANT DES STRUCTURES DE CAPTAGE SUR LA DIGUE DU BRAEK ENTRE LE 11.04.2011 ET LE 10.05.2011	235
FIGURE 6.30 PHOTOGRAPHIES DE TROIS STRUCTURES INSTALLÉES SUR LA DIGUE (A, B & C), ET DU COULOIR DE DÉFLATION EN ARRIÈRE DU CASIER DE FILETS SYNTHÉTIQUES D7 (D) (CLICHES TRESCA, 12.05.2011).....	236
FIGURE 6.31 PHOTOGRAPHIE DE 4 STRUCTURES INSTALLÉES SUR LA DIGUE : (A) FILETS SYNTHÉTIQUES EN ARRIÈRE DES DUNES DE PIED DE DIGUE ; (B) GANIVELLES EN ARRIÈRE DES DUNES DE PIED DE DIGUE ; (C) DUNES EMBRYONNAIRES À L'AVANT DES GANIVELLES AU CONTACT PLAGE/DIGUE ; (D) RANGÉE DE FILETS SITUÉE EN ARRIÈRE DE LA DIGUE (CLICHES TRESCA, 14.06.2011)	237
FIGURE 6.32 ROSE DES VENTS ET CARTOGRAPHIE DIFFÉRENTIELLE DES QUADRATS CONTENANT DES STRUCTURES DE CAPTAGE SUR LA DIGUE DU BRAEK ENTRE LE 10.05.2011 ET LE 14.06.2011	238
FIGURE 6.33 SÉRIE TEMPORELLE DES VENTS (VITESSE ET DIRECTION) ENTRE LE 14.06.2011 ET LE 28.07.2011 ..	240
FIGURE 6.34 ROSE DES VENTS ET CARTOGRAPHIE DIFFÉRENTIELLE DES QUADRATS CONTENANT DES STRUCTURES DE CAPTAGE SUR LA DIGUE DU BRAEK ENTRE LE 14.06.2011 ET LE 28.07.2011	240
FIGURE 6.35 PHOTOGRAPHIES ILLUSTRANT LA FRÉQUENTATION DE LA DIGUE DU BRAEK EN ÉTÉ AU NIVEAU (A) DES GANIVELLES AU CONTACT PLAGE/DIGUE (D1) ; (B) DES GANIVELLES ET (C) DES FILETS SYNTHÉTIQUES INSTALLÉS EN ARRIÈRE DE COULOIRS DE DÉFLATION (CLICHES TRESCA, 02.08.2011)	241
FIGURE 6.36 ROSE DES VENTS ET CARTOGRAPHIE DIFFÉRENTIELLE DES QUADRATS CONTENANT DES STRUCTURES DE CAPTAGE SUR LA DIGUE DU BRAEK ENTRE LE 28.07.2011 ET LE 15.09.2011.....	243
FIGURE 6.37 ROSE DES VENTS ET CARTOGRAPHIE DIFFÉRENTIELLE DES QUADRATS CONTENANT DES STRUCTURES DE CAPTAGE SUR LA DIGUE DU BRAEK ENTRE LE 15.09.2011 ET LE 21.12.2011.....	245
FIGURE 6.38. PHOTOGRAPHIES DE 6 STRUCTURES DE CAPTAGE DU SABLE SUR LA DIGUE DU BRAEK (CLICHES TRESCA, 16.12.2011)	246
FIGURE 6.39 BILAN DE L'ÉVOLUTION DES DIFFÉRENTES STRUCTURES ENTRE LE 14.02.2011 ET LE 21.12.2011 PAR CARTOGRAPHIE DIFFÉRENTIELLE.....	248
FIGURE 6.40 PHOTOGRAPHIES DES STRUCTURES DE CAPTAGE DU SABLE INSTALLÉES EN ARRIÈRE DES DUNES DE PIED DE DIGUE LE 14.02.2011 (11.04.2011 POUR D7) ET LE 16.12.2011 (CLICHES TRESCA).....	249
FIGURE 6.41 VOLUMES CUMULÉS PAR UNITÉ DE SURFACE (M ²). CHAQUE GRAPHIQUE COMPARE TOUS LES VOLUMES CUMULÉS À L'INTÉRIEUR DES STRUCTURES EXPÉRIMENTALES (STRUCTURES), ET POUR L'ENSEMBLE DU SECTEUR (TOTAL)	250
FIGURE 6.42 RYTHME D'ÉVOLUTION, CONDITIONS MÉTÉOROLOGIQUES ET BILAN VOLUMÉTRIQUE SUR LES 7 SECTEURS DE BRISE-VENT DE LA PLAGE DU CLIPON	252
FIGURE 6.43 RYTHME D'ÉVOLUTION, CONDITIONS MÉTÉOROLOGIQUES ET BILAN VOLUMÉTRIQUE SUR LES 7 STRUCTURES TEST DE LA DIGUE DU BRAEK	254
FIGURE 6.44 COMPARAISON DES DIFFÉRENTS CARTOGRAPHIQUES ET DES QUANTITÉS DE SABLE CAPTÉ AU NIVEAU DES QUADRATS DE LA PLAGE DU CLIPON ET DE LA DIGUE DU BRAEK ENTRE LE 11.04.2011 ET LE 17.05.2011 (CLIPON) OU LE 10.05.2011 (BRAEK).	256

CHAPITRE 7

FIGURE 7.1. SYNTHÈSE DE L'ÉVOLUTION DE L'UG4 A LONG ET A COURT TERME, ET VARIABILITÉ ALTITUDINALE DE LA PLAGE ET DU VERSANT EXTERNE DE LA DUNE BORDIÈRE. L'ÉVOLUTION DES SUPERFICIES DUNAIRES ET DES VOLUMES SUR LES PROFILS TYPES EST EXPRIMÉE EN INDICE. L'INDICE 100 CORRESPOND À LA SUPERFICIE DE LA PREMIÈRE PHOTOGRAPHIE AÉRIENNE (1983) OU AU PREMIER VOLUME POUR LES PROFILS (01.04.2010), CE QUI PERMET D'EXPRIMER L'ÉVOLUTION DANS LE TEMPS EN POURCENTAGE. POUR LE COURT TERME, CES VALEURS ONT ÉTÉ CALCULÉES POUR LES PROFILS TYPES ET EXTRAPOLÉES À L'ENSEMBLE DES UNITÉS DÉFINIES, LE RESTE DES PROFILS AYANT CONFIRMÉ UNE ÉVOLUTION HOMOGENE (ANNEXE 3). NEANMOINS, CES ÉVOLUTIONS POUR UNE UNITÉ ENTIÈRE SONT DONNÉES À TITRE INDICATIF, ET IL SE PEUT QU'IL Y AIT DES DISPARITÉS QUI N'APPARAISSENT PAS DANS CETTE FIGURE DE SYNTHÈSE.	263
FIGURE 7.2. VUE AÉRIENNE DE L'AVANT-PORT DE ZEEBRUGGE (BELGIQUE) AVEC, EN MÉDAILLONS, DES ZOOMS EN 2007 ET EN 2009 SUR LES DUNES FORMÉES PRÈS DE LA JETÉE OUEST © GOOGLE EARTH	266
FIGURE 7.3. COMPARAISON DES ÉVOLUTIONS LONG TERME ET COURT TERME À PARTIR DES PROFILS (2011-2006) ET DE L'ÉTUDE DE TRAIT DE CÔTE DE BERTIER (2009) AINSI QUE DE LEVÉS TOPOGRAPHIQUES DU PORT AUTONOME DE DUNKERQUE ENTRE 1988 ET 2001	268
FIGURE 7.4. SYNTHÈSE DES PIÈGEAGES ÉOLIENS RÉALISÉS SUR UN PROFIL TRANSVERSAL DE LA DIGUE DU BRAEK EN FONCTION DE L'ANGLE D'INCIDENCE DES VENTS. LE TRANSPORT POTENTIEL MAXIMUM LORS DES CONDITIONS DOMINANTES D'OSO (A) ET DE NNE (B) A ÉTÉ DISTINGUÉ DU TRANSPORT ÉOLIEN MOYEN SUR L'ENSEMBLE DES PIÈGEAGES LORS DE DIFFÉRENTES CONDITIONS DE VENT (C À F)	273
FIGURE 7.5. ACCELERATION ET DECELERATION DE LA VITESSE DU VENT ENTRE LE HAUT DE PLAGE ET LE VERSANT EXTERNE DE LA DIGUE PAR DIFFÉRENTES CONDITIONS DE VENT ET À DIFFÉRENTES HAUTEURS. LA VITESSE (V) EST INDICUÉE EN % PAR RAPPORT À LA VITESSE LA PLUS EN AMONT QUI EST DE 100%	275
FIGURE 7.6. ACCELERATION ET DECELERATION DE LA VITESSE DU VENT ENTRE LE SOMMET ET LA BASE DU VERSANT INTERNE DE LA DIGUE PAR DIFFÉRENTES CONDITIONS DE VENT ET À DIFFÉRENTES HAUTEURS. LA VITESSE (V) EST INDICUÉE EN % PAR RAPPORT À LA VITESSE LA PLUS EN AMONT QUI EST DE 100%.	275
FIGURE 7.7. REPRÉSENTATION SCHEMATIQUE DE LA DYNAMIQUE ÉOLIENNE LE LONG DE L'UG4	277
FIGURE 7.8. ÉVOLUTION DE 4 PROFILS TOPOGRAPHIQUES ENTRE LE 01.04.10 (BLEU) ET LE 26.10.11 (ROUGE) ...	278
FIGURE 7.9. COMPARAISON DES MNT DIFFÉRENTIELS AU NIVEAU DE QUATRE QUADRATS CHACUN ÉQUIPÉS D'UNE MESURE DE GESTION DIFFÉRENTE (BRISE-VENT OU REPROFILAGE DUNAIRE)	279
FIGURE 7.10. IMPACT DES BRISE-VENT SUR L'ACCUMULATION DU SABLE AU COURS DU TEMPS (GRAFALS-SOTO AND NORDSTROM, 2009)	280
FIGURE 7.11. VITESSE D'ACCUMULATION AU SEIN DES STRUCTURES DE LA PLAGE DU CLIPON ET LA DIGUE DU BRAEK	281
FIGURE 7.12. COMPARAISON D'UN CASIER DE GANIVELLES ET D'UN CASIER DE FASCINES PAR MNT DIFFÉRENTIEL SUR LA DIGUE DU BRAEK	285
FIGURE 7.13. MNT DIFFÉRENTIELS AU NIVEAU DES QUADRATS CONTENANT DES RANGÉES PARALLÈLES DE 6 M DE LONG ESPACÉES DE 3 M CHACUNE ENTRE LE 30.07.2010 ET LE 26.10.2011	287
FIGURE 7.14. AU NIVEAU DU PROFIL D3 (CENTRE DE LA DIGUE) À MAREE BASSE 22.03.2010 ET MAREE HAUTE LE 21.02.2011, ET DÉPÔT AU PIED DE DUNES DE SOMMET DE DIGUE LE 22.03.2010	288
FIGURE 7.15. EMPLACEMENT DE LA STRUCTURE DE GANIVELLES SITUÉES AU CONTACT PLAGE/DIGUE LORS D'UNE TEMPÊTE EN FÉVRIER 2010 (CLICHE TRESCA, 28.02.2010)	289
FIGURE 7.16. POSITIONNEMENT ALTITUDINAL DES STRUCTURES DE CAPTAGE DU SABLE PAR RAPPORT À PLUSIEURS NIVEAUX D'EAU DE RÉFÉRENCE	291
FIGURE 7.17. EXEMPLE D'AMÉNAGEMENTS CRÉÉS POUR LES USAGERS SUITE À LA CRÉATION D'UN CORDON DUNAIRE ARTIFICIEL À OKAURA BEACH (NOUVELLE-ZÉLANDE) : (A) PASSERELLES POUR PIÉTONS ; (B) PLANTATIONS ET CLOTURE (BERGIN ET AL., 2007)	297
FIGURE 7.18. PROJET DE PROTECTION DU LITTORAL MÈNE PAR LE « WATERSCHAP SCHELDESTROMEN » SUR LA CÔTE SUD DES PAYS-BAS : L'ACCÈS À LA PLAGE EST CANALISÉ PAR DES HAIES DE FASCINES QUI EMPÊCHENT LE PIÉTINEMENT AU NIVEAU DES ZONES FIXÉES PAR LES OYATS (PHOTOGRAPHIES A. PROVOOST, 2010) ...	297
FIGURE 7.19. (A) STRUCTURES DE CAPTAGE DU SABLE DÉTRUITES PAR LA MER AU NIVEAU DU PROFIL S2 (FALAISE SABLEUSE) EN 2004 (CLICHE PORT AUTONOME DE DUNKERQUE, 2004) ; (B) FORMATION D'UNE MICROFALAISE D'ÉROSION AU NIVEAU DU PROFIL S2 EN FÉVRIER 2010 (CLICHE TRESCA 2010)	298
FIGURE 7.20. DISPOSITION SCHEMATIQUE DE STRUCTURES AU CONTACT HAUT DE PLAGE SEC/DIGUE LE LONG DE LA DIGUE DU BRAEK	300
FIGURE 7.21. PHOTOGRAPHIES ILLUSTRANT UN PROJET DE DÉVELOPPEMENT DUNAIRE PAR LE RECOUVREMENT DE CASIERS DE FASCINES SUR LE VERSANT EXTERNE DE LA DUNE BORDIÈRE DE HAAN, BELGIQUE (PHOTOS TERRAIN TRESCA, 2012 ; PHOTOGRAPHIE AÉRIENNE © GOOGLE EARTH)	301
FIGURE 7.22. MESURES DE PHYTOSTABILISATION EFFECTUÉES À BRAY-DUNES, À L'EST DE DUNKERQUE (D'APRÈS RUZ ET AL., 2005 IN MASPATAUD, 2011)	302

FIGURE 7.23. AMENAGEMENT D'UNE DIGUE EN ASPHALTE PRES DE BRESKENS, PAYS-BAS : (A) VERSANT EXTERNE
ET (B) VERSANT INTERNE)..... 303

Table des tableaux

CHAPITRE 1

TABLEAU 1.1. COTES DES NIVEAUX MARINS CALES SUR LE ZERO HYDROGRAPHIQUE A DUNKERQUE (CM : COTE MARINE) (SOURCE : SHOM, 2011).....	27
----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	----

CHAPITRE 2

TABLEAU 2.1. ETUDE COMPARATIVE DE LA PRECISION ALTITUDINALE DES DEUX RECEPTEURS GNSS UTILISES POUR CETTE ETUDE : LA COLONNE TOPO CUD DONNE LES COORDONNEES DE 3 POINTS DE REFERENCES DE LA COMMUNAUTE URBAINE DE DUNKERQUE, MATERIALISES SUR LE TERRAIN PAR DES CLOUS TOPOGRAPHIQUES.....	43
TABLEAU 2.2. SYNTHSE DES DATES DE LEVE DES PROFILS TRANSVERSAUX, AINSI QUE DE LA LONGUEUR DE CHACUN, DU COEFFICIENT DE MAREE ET TU TYPE DE RECEPTEUR GNSS UTILISE. LES VALEURS EN GRAS INDIQUENT LES DATES CHOISIES POUR L'ETUDE DE L'EVOLUTION DE L'ESTRAN.	46
TABLEAU 2.3. SYNTHSE DES DATES DE LEVES TOPOGRAPHIQUES AU NIVEAU DES SECTEURS D'IMPLANTATION DES STRUCTURES DE CAPTAGE DU SABLE SUR LES SECTEURS DE LA PLAGE DU CLIPON ET DE LA DIGUE DU BRAEK. (LES CROIX INDIQUENT QUE LE SECTEUR A ETE LEVE).....	47
TABLEAU 2.4. DATES, SOURCES ET RESOLUTION DES PHOTOGRAPHIES AERIENNES UTILISEES POUR L'ANALYSE DE L'EVOLUTION DU TRAIT DE COTE ET DES DUNES DE LA PLAGE DU CLIPON.....	52
TABLEAU 2.5. DATES, SOURCES ET RESOLUTION DES PHOTOGRAPHIES AERIENNES UTILISEES POUR L'ANALYSE DE L'EVOLUTION DES DUNES SUR LA DIGUE DU BRAEK.	56

CHAPITRE 4

TABLEAU 4.1. RESUME DES CARACTERISTIQUES DE CHAQUE PROFIL TOPOGRAPHIQUE SELON LES CRITERES DE TYPE DE SUBSTRAT, DE PENTE, DE MORPHOLOGIE ET DE GRANULOMETRIE. LES NOMS DE PROFILS EN GRAS CORRESPONDENT AUX PROFILS TYPES.....	115
TABLEAU 4.2. TABLEAU RECAPITULATIF DES VARIATIONS VOLUMETRIQUES MENSUELLES MOYENNES SUR LE VERSANT DUNAIRE ET LE HAUT DE PLAGE SUR L'ENSEMBLE DES PROFILS SUIVIS. LES PROFILS EN GRAS CORRESPONDENT AUX PROFILS TYPES.	117
TABLEAU 4.3. TABLEAU RECAPITULATIF DES VARIATIONS VOLUMETRIQUES SUR LE VERSANT DUNAIRE, LE HAUT DE PLAGE ET L'ESTRAN SUR L'ENSEMBLE DES PROFILS SUIVIS. LES PROFILS EN GRAS CORRESPONDENT AUX PROFILS TYPES.....	129

CHAPITRE 5

TABLEAU 5.1. SYNTHSE DE MESURES <i>IN SITU</i> DE TRANSPORT EOLIEN SUR LA PLAGE DU CLIPON, ET PRINCIPALES VARIABLES ENVIRONNEMENTALES ASSOCIEES.	166
TABLEAU 5.2. SYNTHSE DE MESURES <i>IN SITU</i> DE TRANSPORT EOLIEN SUR LA DIGUE DU BRAEK, ET PRINCIPALES VARIABLES ENVIRONNEMENTALES ASSOCIEES.....	184
TABLEAU 5.3. TRANSPORT POTENTIEL ANNUEL SUR LA PLAGE DU CLIPON LORS DES CONDITIONS DE PIEGEAGE, POUR UN SABLE A LA MASSE VOLUMIQUE DE 2650 KG.M ³ . LES VALEURS EN GRAS REPRESENTENT LE TRANSPORT POTENTIEL EN M ³ .M ⁻¹ .AN ⁻¹ ; EN ROUGE LES CONDITIONS DE TRANSPORT EOLIEN MAXIMAL ; EN BLEU, LES CONDITIONS DE TRANSPORT EOLIEN LORS DE VENT LONGITUDINAL.	187
TABLEAU 5.4. TRANSPORT POTENTIEL ANNUEL SUR LA DIGUE DU BRAEK LORS DES CONDITIONS DE PIEGEAGE. LES VALEURS EN GRAS REPRESENTENT LE TRANSPORT POTENTIEL EN M ³ .M ⁻¹ .AN ⁻¹ ; EN ROUGE LES CONDITIONS LES PLUS PROPICES AU TRANSFERT DU SABLE VERS L'ARRIERE DE LA DIGUE ; EN BLEU, LES CONDITIONS DE TRANSPORT EOLIEN MAXIMAL.....	190
TABLEAU 5.5. POURCENTAGES DE VENTS EN FONCTION DE LA SAISON ET DE LA DIRECTION.....	195
TABLEAU 5.6. POURCENTAGES DES VENTS DE PLUS DE 8 M.S ⁻¹ ET DE PLUS DE 12 M.S ⁻¹ SELON LES SAISONS.....	195

CHAPITRE 6

TABLEAU 6.1. BILAN VOLUMETRIQUE DU 30/07/2010 AU 26/10/2011 POUR LE QUADRAT ENTIER ET LA STRUCTURE.....	226
---------------------------------------------------------------------------------------------------------	-----

TABLEAU 6.2. VOLUMES DE SABLE ACCUMULES ENTRE LE 14.02.2011 ET LE 21.12.2011 AU NIVEAU DES QUADRATS ET DANS LES STRUCTURES (LE VOLUME INTERNE DE LA STRUCTURE D2 N'A PAS ETE CALCULE CAR IL S'AGIT D'UN LINEAIRE).	247
--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	-----

CHAPITRE 7

TABLEAU 7.1. ANALYSE ANNUELLE DES CONDITIONS DE TRANSPORT EOLIEN POTENTIEL	271
TABLEAU 7.2. COMPARAISON DU TRANSPORT EOLIEN POTENTIEL ET DES VARIATIONS VOLUMETRIQUES AU NIVEAU DES PROFILS ET DES STRUCTURES DE CAPTAGE	283
TABLEAU 7.3. PARTICULARITES DE LA FAÇADE MARITIME DU GPMD, APPORTS EOLIENS POTENTIELS ET PROPOSITIONS DE GESTION	293

Table des matières

Remerciements	3
Sommaire	6
Introduction générale.....	8
CHAPITRE 1 - PRESENTATION DU SITE D'ETUDE.....	17
1. Localisation et évolution historique du site d'étude	18
1.1. Localisation : façade de la plaine maritime flamande	18
1.2. Evolution historique	19
1.2.1. <i>L'extension du port de Dunkerque</i>	19
1.2.2. <i>Un littoral artificiel où la nature reprend ses droits</i>	23
2. Conditions météorologiques et hydrodynamiques générales et contexte sédimentaire régional	24
2.1. Les différents types de temps	24
2.2. Rose des vents à Dunkerque.....	25
2.3. Précipitations.....	26
2.4. Les conditions hydrodynamiques générales	27
2.4.1. <i>La marée</i>	27
2.4.2. <i>Les houles</i>	28
2.5. Les surcotes.....	29
2.6. Dynamique sédimentaire régionale	29
2.7. Variations du niveau marin relatif.....	30
CHAPITRE 2 - MÉTHODOLOGIE, TECHNIQUES D'ACQUISITION ET D'ANALYSE DES DONNÉES..	34
1. Quantification de l'accumulation éolienne à l'aide de structures brise-vent	35
1.1. Expérimentations de renforcement de la dune bordière	36
1.1.1. <i>Types de structures test</i>	36
1.1.2. <i>Localisation des structures de captage sur la plage du Clipon</i>	37
1.2. Expérimentations de captage du sable sur la digue du Braek.....	38
1.2.1. <i>Types de structures et technique d'implantation</i>	38
1.2.2. <i>Localisation sur la digue</i>	38
2. Mesures topographiques de terrain et restitution 2D/3D	41
2.1. Levés à l'aide de systèmes de positionnement par satellite GNSS.....	41
2.1.1. <i>Matériel</i>	41
2.1.2. <i>Etude comparative des récepteurs Leica 1200 et Trimble R8 et systèmes de coordonnées</i> . ..	42
2.1.3. <i>Marge d'erreur altimétrique globale des mesures GNSS</i>	43
2.2. Suivi des profils de plage transversaux	44
2.2.1. <i>Localisation et répartition</i>	44
2.2.2. <i>Densité de points</i>	44
2.2.3. <i>Restitution en 2D et calculs de volumes</i>	45
2.2.4. <i>Dates des mesures</i>	45
2.3. Suivi des structures expérimentales de captage du sable.....	46
2.3.1. <i>Dates des mesures</i>	46
2.3.2. <i>Limites de quadrats et densité de points</i>	47
2.3.3. <i>Modèles Numériques de Terrain (M.N.T.)</i>	48
2.3.3.1. <i>Restitution cartographique et techniques d'extrapolation</i>	48
2.3.3.2. <i>Calculs de volumes et différentiels</i>	48
2.4. Suivi de la limite de végétation	50
2.4.1. <i>Définition de la limite de végétation</i>	50
2.4.2. <i>Densité de points et dates de mesures</i>	51
2.4.3. <i>Restitution cartographique</i>	51
3. Evolution de la limite de végétation et des superficies dunaires par analyse diachronique de photographies aériennes	51

3.1.	Evolution de la limite de végétation dunaire de 1983 à 2009 le long de la plage du Clipon.....	51
3.1.1.	<i>Dates et source des campagnes aériennes</i>	51
3.1.2.	<i>Calcul des valeurs de variations de la limite de végétation à l'aide du programme Digital Shoreline Analysis System</i>	52
3.1.3.	<i>Délimitation des dunes</i>	54
3.1.4.	<i>Marges d'erreurs</i>	55
3.1.4.1.	Evolution de la limite de végétation.....	55
3.1.4.2.	Délimitation des dunes.....	55
3.2.	Analyse de l'évolution des dunes de 1988 à 2009 sur la digue du Braek.....	56
3.2.1.	<i>Dates des campagnes aériennes</i>	56
3.2.2.	<i>Délimitation des dunes</i>	56
3.2.3.	<i>Marge d'erreur</i>	56
4.	Evaluation du transport éolien par piégeages in situ.....	57
4.1.	Expérimentations du printemps 2010 : plage du Clipon et digue du Braek	58
4.2.	Expérimentations du printemps 2011 : digue du Braek.....	59
4.2.1.	<i>Pièges verticaux triangulaires de type « GTW »</i>	59
4.2.2.	<i>Pièges à coupelles</i>	60
4.3.	Comparaison de l'efficacité des différents types de pièges utilisés.....	61
5.	Caractérisation des paramètres environnementaux influençant le transport éolien	63
5.1.	Conditions météo-marines.....	63
5.1.1.	<i>Conditions de vent et profils de vitesse</i>	63
5.1.1.1.	Enregistrement de la vitesse et de la direction du vent	63
5.1.1.2.	Profils de vitesse du vent	64
5.1.1.3.	La vitesse de mise en mouvement des sédiments.....	65
5.1.2.	<i>Humidité du sédiment</i>	67
5.1.3.	<i>Hauteur d'eau et vagues au large</i>	67
5.1.3.1.	Hauteur d'eau.....	67
5.1.3.2.	Vagues au large.....	68
5.1.4.	<i>Précipitations</i>	69
5.2.	Granulométrie	69

CHAPITRE 3 - EVOLUTION PLURIANNUELLE DES SUPERFICIES DUNAIRES ET DE LA LIMITE DE VEGETATION..... 73

1.	Evolution de la plage du Clipon de 1983 à 2011	74
1.1.	Extrémité Ouest : sans intervention majeure depuis 1983 (transects 1 à 20)	76
1.2.	Centre de la plage du Clipon : rechargement de plage (transects 20 à 38).....	78
1.3.	Partie Est du Clipon : plage artificielle (transects 38 à 89)	79
1.4.	Bilan de l'évolution de la limite de végétation de 1983 à 2011	81
1.5.	Comparaison de l'évolution de la limite de végétation et du trait de côte.....	84
2.	Typologies dunaires de l'UG4 et évolution des superficies.....	85
2.1.	Typologie et évolution des dunes le long de la plage du Clipon	86
2.1.1.	<i>Typologie des dunes bordières de la plage du Clipon</i>	86
2.1.1.1.	Double cordon bordier et dunes embryonnaires hémisphériques.....	86
2.1.1.2.	Dunes bordières densément végétalisées	88
2.1.1.3.	Dunes bordières au versant externe plus irrégulier	89
2.1.1.4.	Dunes bordières hautes au versant externe irrégulier.....	90
2.1.1.5.	Plateforme artificielle sableuse en érosion.....	91
2.1.2.	<i>Evolution de la superficie dunaire au Clipon depuis 1983</i>	92
2.2.	Typologie et évolution des dunes le long de la digue du Braek	94
2.2.1.	<i>Typologie des dunes de la digue du Braek</i>	94
2.2.1.1.	Dunes de pied de digue de la jetée de St-Pol	95
2.2.1.2.	Dunes en bordure du bassin maritime	97
2.2.1.3.	Dunes de revers de digue	98
2.2.1.4.	Dunes de sommet de digue	100
2.2.1.5.	Dunes d'obstacles	101
2.2.2.	<i>Evolution des superficies dunaires sur la digue du Braek depuis 1988</i>	102

CHAPITRE 4 - EVOLUTION A COURT TERME DES PROFILS DE PLAGE ET REPONSE AUX EVENEMENTS MORPHOGENES	108
1. Caractérisation de 6 unités morpho-sédimentologiques sur l'UG4.....	109
1.1. Pentés de plage, morphologie du profil et type de substrat	110
1.2. Granulométrie de surface	111
1.3. Identification de six unités morpho-sédimentologiques sur l'UG4.....	113
1.3.1. Profils C2 à C3 : Plateforme intertidale.....	113
1.3.2. Profils C4 à S1 : Dunes du Clipon.....	113
1.3.3. Profils S2 : Falaise sableuse	114
1.3.4. Profils D1 à D3 : Braek Ouest.....	114
1.3.5. Profils D4 à D6 : Braek Est.....	114
1.3.6. Profil D7 : Dunes de pied de digue	115
2. Evolution du versant dunaire et du haut de plage des profils types	115
2.1. Période du 01.04.10 au 01.06.10	119
2.2. Période du 01.06.10 au 14.09.10	119
2.3. Période du 14.09.10 au 15.02.11	120
2.4. Période du 15.02.11 au 13.04.11	122
2.5. Période du 13.04.11 au 29.06.11	122
2.6. Période du 29.06.11 au 26.10.11	123
2.7. Observations générales.....	124
3. Bilan de l'évolution du versant dunaire et du haut de plage sur les profils types	125
4. Evolution des profils types et échanges estran / haut de plage - dune	128
4.1. Période du 01.04.10 au 15.02.11	128
4.2. Période du 15/02/2011 au 26/10/2011.....	131
5. Bilan volumétrique et morphologique	134
5.1. Bilan de l'évolution de l'estran sur les six profils types.....	134
5.2. Bilan global des quatorze profils topographiques	136
6. Etude de deux cas d'érosion du haut de plage en septembre 2010 et août 2011.....	139
6.1. Remarques générales sur la représentativité des conditions météo-marines	139
6.2. Période du 24 au 26 septembre 2010.....	139
6.3. Période du 29 août au 3 septembre 2011.....	141
 CHAPITRE 5 - TRANSPORT EOLIEN : RESULTATS DES EXPERIMENTATIONS <i>IN SITU</i>	 148
1. Caractérisation du transport éolien sur le haut de plage et le versant externe de la dune bordière de la plage du Clipon	149
1.1. Par vent longitudinal	150
1.1.1. Conditions de vent dominant en provenance d'Ouest Sud-Ouest	150
1.1.2. Vent en provenance du Nord-Est	151
1.1.2.1. Piégeage du 15.06.2010	151
1.1.2.2. Piégeage du 16/06/2010.....	153
1.2. Par vent frontal oblique de Nord Nord-Est.....	154
1.2.1. Piégeage du 16.06.2010.....	154
1.2.2. Piégeage du 06.05.2010.....	156
1.2.3. Piégeage du 14.06.2010.....	158
1.2.4. Piégeage du 17.06.2010.....	159
1.3. Bilan des mesures de transport éolien in situ sur la plage du Clipon	161
1.3.1. Vitesse du vent	161
1.3.2. Le fetch et la direction du vent.....	162
1.3.3. L'humidité du substrat	163
1.3.4. La topographie.....	164
1.3.5. Remarques générales.....	165
2. Caractérisation du transport éolien sur la digue du Braek : expérimentations in situ du printemps 2011	167
2.1. Sur le versant externe de la digue.....	167
2.1.1. Vent longitudinal parallèle à la digue	167
2.1.1.1. Provenance du NE.....	167
2.1.1.2. Provenance d'OSO : vents dominants.....	169

2.1.2.	<i>Vent frontal oblique</i>	173
2.1.2.1.	Provenances du NNE	173
2.1.2.2.	Provenance du NNO	175
2.2.	Versant interne de la digue	177
2.2.1.	<i>Vent longitudinal de NE</i>	177
2.2.2.	<i>Vent longitudinal de SO</i>	179
2.3.	Bilan des mesures du transport éolien sur la digue du Braek	181
3.	Conditions optimales et transport éolien potentiel.....	185
3.1.	<i>Conditions optimales et transport éolien potentiel sur la plage du Clipon</i>	185
3.1.1.	Vents obliques supérieurs à 11 m.s ⁻¹	185
3.1.2.	Vents longitudinaux	186
3.2.	<i>Transport potentiel sur la digue du Braek</i>	188
3.2.1.	Vents forts longitudinaux (supérieur à 11 m.s ⁻¹).....	188
3.2.2.	Vents intermédiaires longitudinaux (SO à OSO).....	188
3.2.3.	Transferts vers l'arrière de la digue par vent oblique à frontal (NNO à NNE)	189
3.3.	Répartition saisonnière de la vitesse et de la direction des vents pendant l'étude.....	191
3.3.1.	<i>Représentativité des conditions de vent pour la période d'étude</i>	191
3.3.2.	<i>Répartition saisonnière des vents</i>	192

CHAPITRE 6 - QUANTIFICATION DE L'ACCUMULATION EOLIENNE A L'AIDE DE STRUCTURES BRISE-VENT 199

1.	Structures de captage du sable sur la plage du Clipon	200
1.1.	Analyse de l'évolution des structures à l'aide de la cartographie différentielle des Modèles Numériques de Terrain	201
1.1.1.	<i>Période du 30.07.2010 au 30.08.2010</i>	201
1.1.2.	<i>Période du 30.08.2010 au 13.09.2010</i>	203
1.1.3.	<i>Période du 13.09.2010 au 28.09.2010</i>	205
1.1.4.	<i>Période du 28.09.2010 au 20.10.2010</i>	208
1.1.5.	<i>Période du 20.10.2010 au 21.12.2010</i>	210
1.1.6.	<i>Période du 21.12.2010 au 28.01.2011</i>	212
1.1.7.	<i>Période du 28.01.2011 au 11.04.2011</i>	214
1.1.8.	<i>Période du 11.04.2011 au 17.05.2011</i>	216
1.1.9.	<i>Période du 17.05.2011 au 30.06.2011</i>	218
1.1.10.	<i>Période du 30.06.2011 au 26.10.2011</i>	220
1.2.	Bilan de l'efficacité des différentes structures de renforcement de la dune bordière	223
2.	Structures de captage sur la digue du Braek	228
2.1.	Analyse de l'évolution des structures à l'aide d'une cartographie différentielle des Modèles Numériques de Terrain	229
2.1.1.	<i>Période du 14.02.2011 au 04.03.2011</i>	229
2.1.2.	<i>Période du 04.03.2011 au 11.04.11</i>	232
2.1.3.	<i>Période du 11.04.2011 au 10.05.2011</i>	234
2.1.4.	<i>Période du 10.05.2011 au 14.06.2011</i>	237
2.1.5.	<i>Période du 14.06.2011 au 28.07.2011</i>	239
2.1.6.	<i>Période du 28.07.2011 au 15.09.2011</i>	242
2.1.7.	<i>Période du 15.09.2011 au 21.12.2011</i>	244
2.2.	Bilan de l'efficacité des différentes structures de captage du sable sur la digue du Braek.....	246
3.	Evolution saisonnière et comparaison des dispositifs de captage du sable sur la plage du Clipon et la digue du Braek	250
3.1.	Saisonnalité du captage sur la plage du Clipon	250
3.2.	Saisonnalité du captage sur la digue du Braek	253
3.3.	Comparaison des structures de la plage du Clipon et de la digue du Braek entre avril et mai 2011	255

CHAPITRE 7 - DYNAMIQUE EOLIENNE ET PROPOSITIONS DE GESTION SUR L'UG4 260

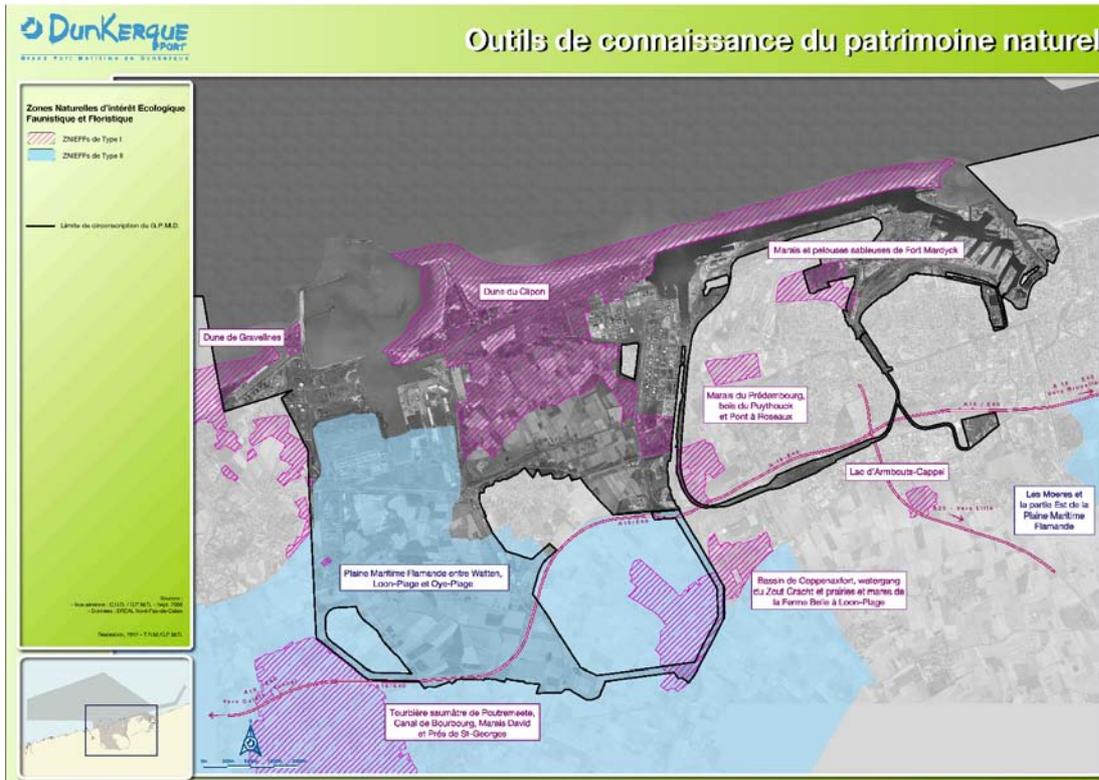
1.	Dynamique dunaire.....	261
1.1.	Bilan de l'évolution des dunes et superficies dunaires	261
1.1.1.	<i>Bilan à moyen terme</i>	261
1.1.2.	<i>Bilan à court terme</i>	266

1.1.3.	<i>Comparaison de l'évolution à moyen terme et à court terme</i>	267
1.2.	Bilan de la dynamique éolienne	269
1.2.1.	<i>Les variables qui influencent le transport éolien</i>	269
1.2.2.	<i>Les spécificités du transport éolien sur la digue du Braek</i>	272
1.2.3.	<i>Dynamique générale du transport éolien le long de l'UG4</i>	276
2.	Structures de captage et propositions de gestion.....	278
2.1.	Discussion sur l'efficacité des structures de captage.....	278
2.1.1.	<i>Remarques générales</i>	278
2.1.2.	<i>Vitesse d'accumulation</i>	280
2.1.3.	<i>Quantités captées</i>	282
2.2.	Préconisations pour le type de structures et leur localisation	284
2.2.1.	<i>Types de structures</i>	284
2.2.2.	<i>Localisation des structures</i>	286
2.2.2.1.	Localisation en fonction des sources de sable.....	286
2.2.2.2.	Localisation en fonction des hauts niveaux d'eau.....	288
2.3.	Propositions de gestion du transport éolien et des dunes bordières le long de l'UG4.....	292
2.3.1.	<i>Mesures ponctuelles de gestion du transport éolien</i>	292
2.3.1.1.	Rehausser le cordon dunaire en bordure de plateforme intertidale à l'Ouest.....	294
2.3.1.2.	Reprofilage de la plateforme sableuse au centre du site	295
2.3.1.3.	Stabiliser les sources de sable principales à l'Est (dunes de pied de digue).....	295
2.3.1.4.	Entretien et aménagements pour l'information et l'accueil du public.....	296
2.3.2.	<i>Plan de gestion global à l'aide d'un rechargement en sable</i>	298
2.3.2.1.	Rechargement de la plage	298
2.3.2.2.	Création d'un cordon dunaire en pied de digue et renforcement des dunes bordières au Clipon	300
	Conclusion générale	305
	Références bibliographiques	310
	Table des figures	326
	Table des tableaux.....	335
	Table des matières.....	338
	Annexes.....	343

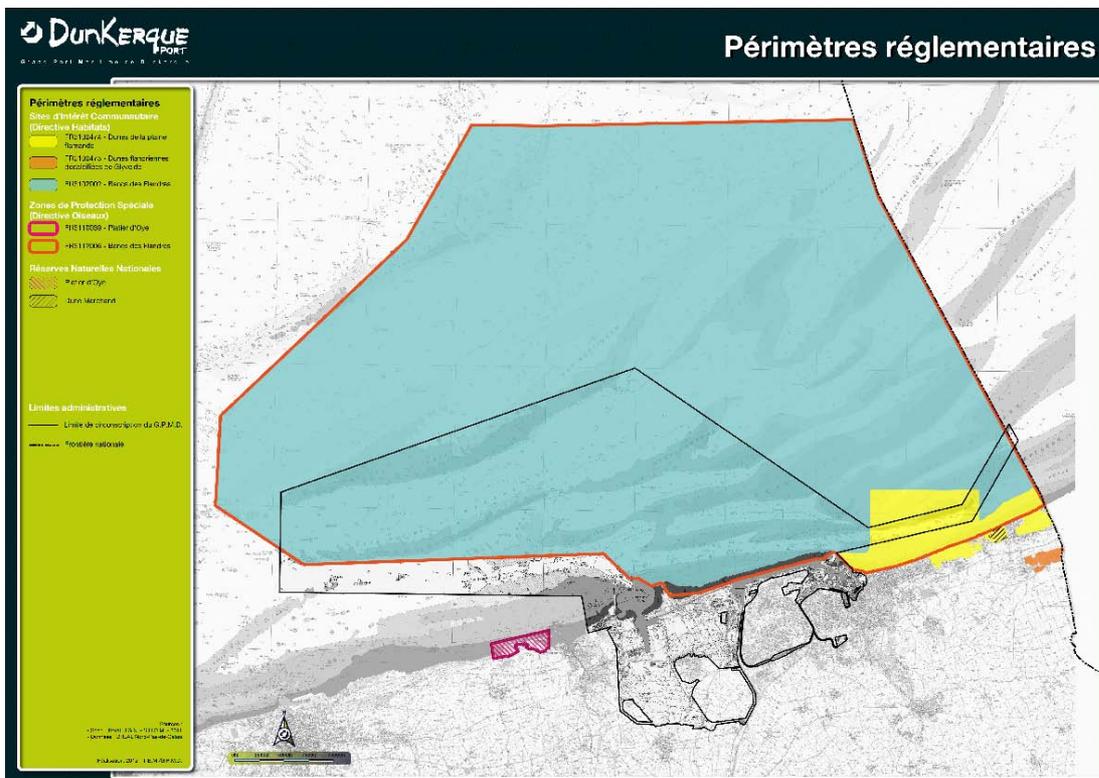
Annexes

ANNEXE 1 – Inventaires faunistiques et floristiques et périmètres réglementaires sur le territoire du GPMD

Annexe 1.1 : les Zone Naturelles d'Intérêt Ecologique Faunistique et Floristique



Annexe 1.2 : Les périmètres réglementaires de la circonscription portuaire



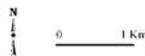
Annexe 1.4 : Cartographie des espèces végétales protégées (Biotope, 2007 ; TBM, 2008)



5.a - ESPÈCES VÉGÉTALES PROTÉGÉES
 Etude Faune Flore Habitats sur le territoire du Port Autonome de Dunkerque - 2008



- Chou marin - *Crambe maritima*
- Panicaut maritime - *Frygiatum maritimum*
- Pigamon des dunes - *Thalictrum minus*
- Leyme des sables - *Leymus arenarius*
- Artoche stipitée - *Atriplex longipes*
- ☆ Données Biotope



Carte réalisée par TBM, 2008
 Données cartographiques : Biotope, 2007 & TBM, 2008
 Source cartographique : Orthophotographies 2007



5.c - ESPÈCES VÉGÉTALES PROTÉGÉES
 Etude Faune Flore Habitats sur le territoire du Port Autonome de Dunkerque - 2008



- Ophrys abeille - *Ophrys apifera*
- Laiche distame - *Carex distans*
- Baldelle fausse-renoncule - *Baldellia r. ramunculoides*
- Pigamon jaune - *Thalictrum flavum*
- Salicorne d'Europe - *Salicornia gr. europaea*
- ☆ Données Biotope



Carte réalisée par TBM, 2008
 Données cartographiques : Biotope, 2007 & TBM, 2008
 Source cartographique : Orthophotographies 2007

Annexe 1.5 : Localisation des sites de reproduction des oiseaux patrimoniaux (TBM, 2008)

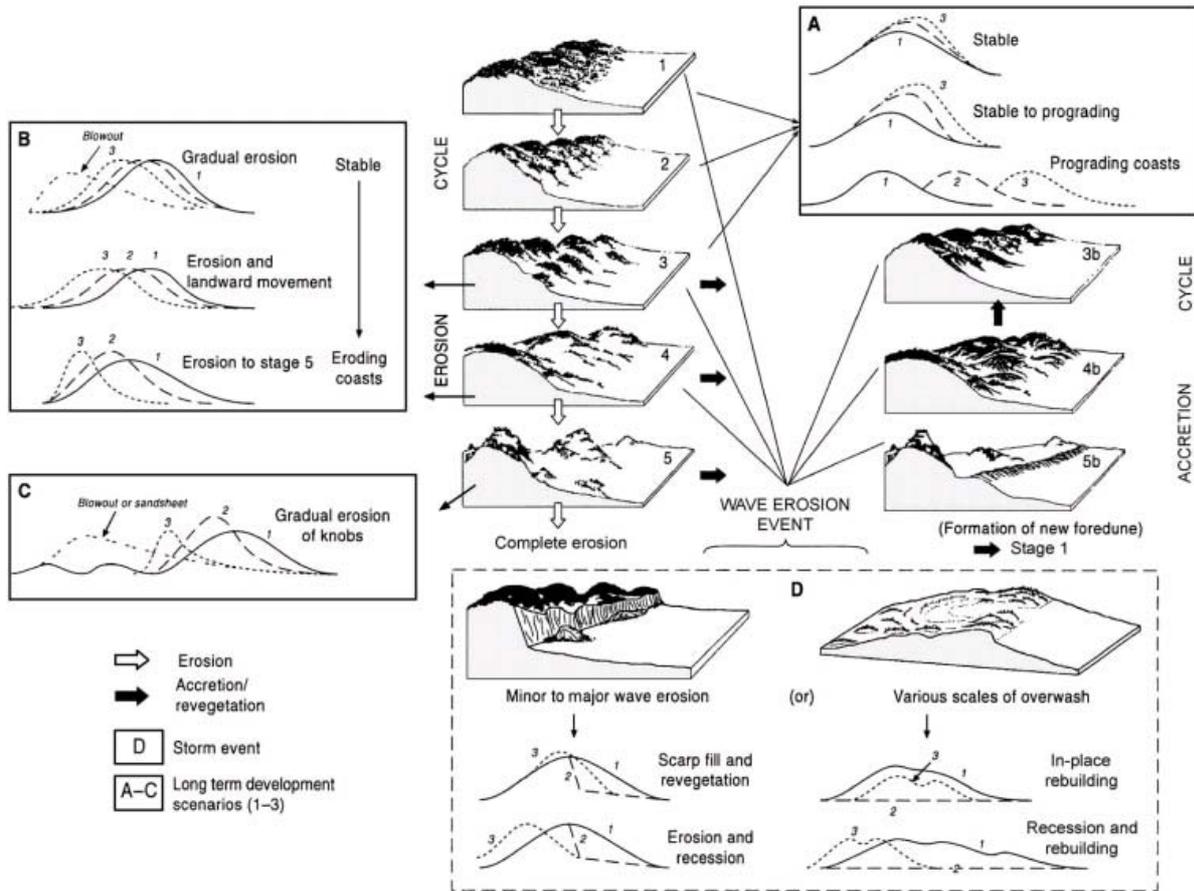


6.a - LOCALISATION DES SITES DE REPRODUCTION DES OISEAUX PATRIMONIAUX

Etude Faune Flore Habitats sur le territoire du Port Autonome de Dunkerque - 2008

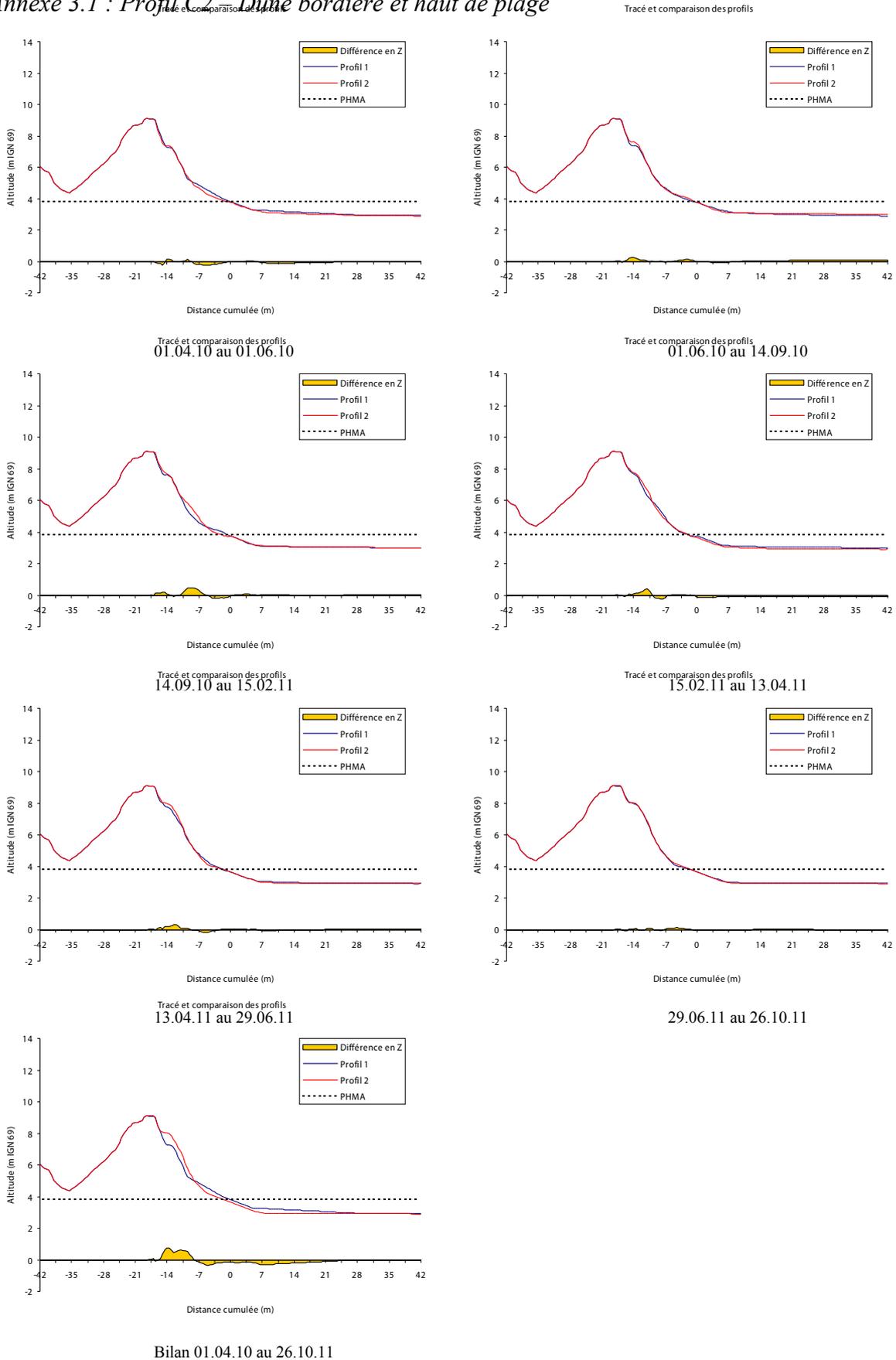


ANNEXE 2 – Modèle d'évolution des dunes bordières (Hesp, 2002)

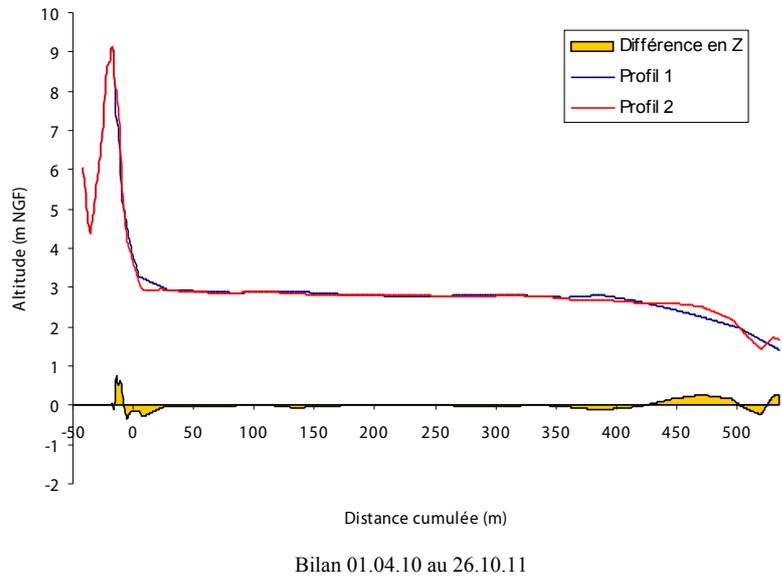
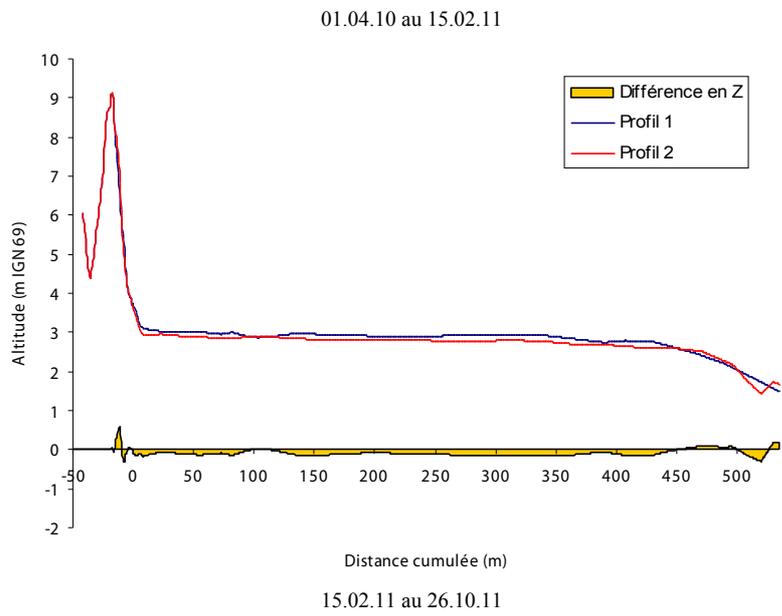
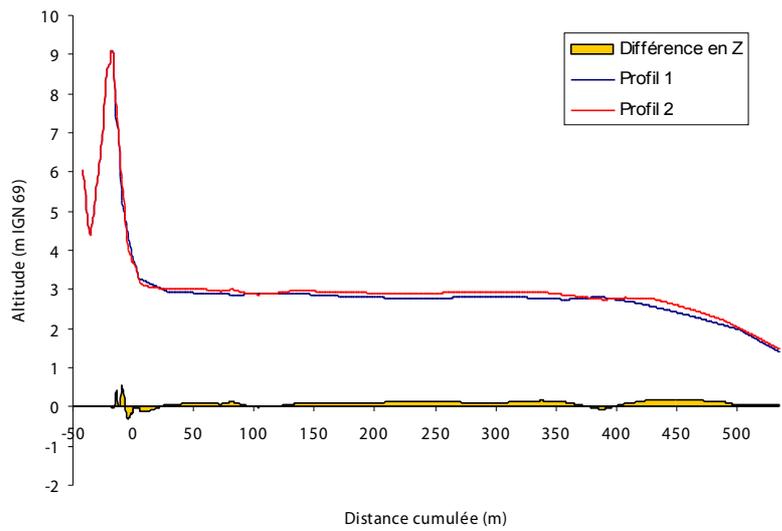


ANNEXE 3 – Relevés topométriques au niveau des 14 profils de plage

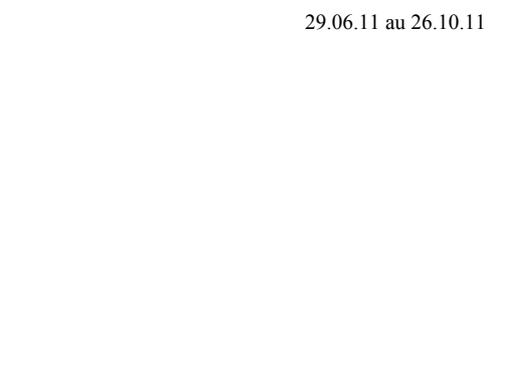
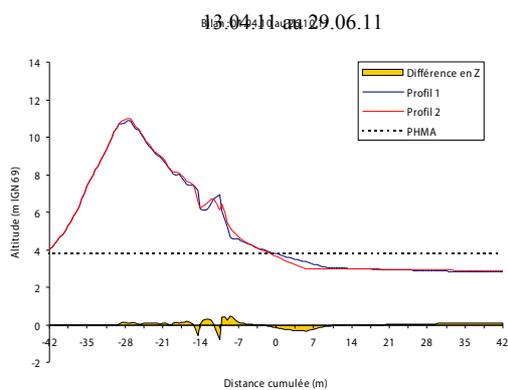
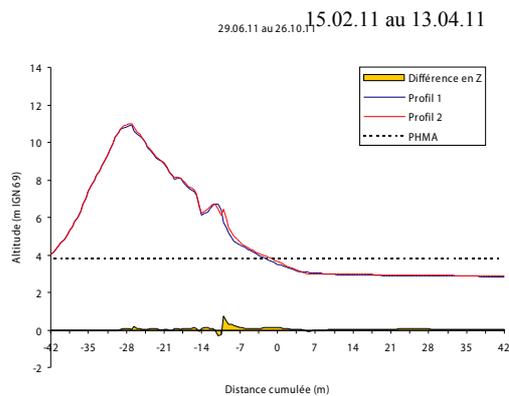
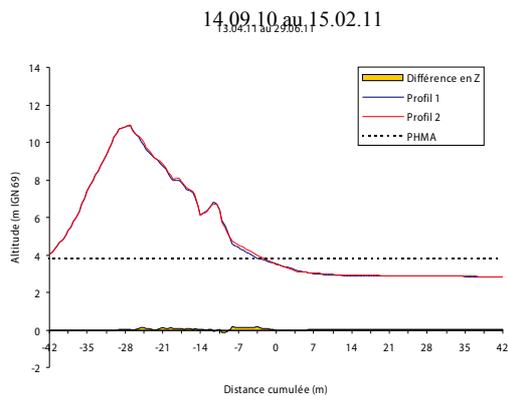
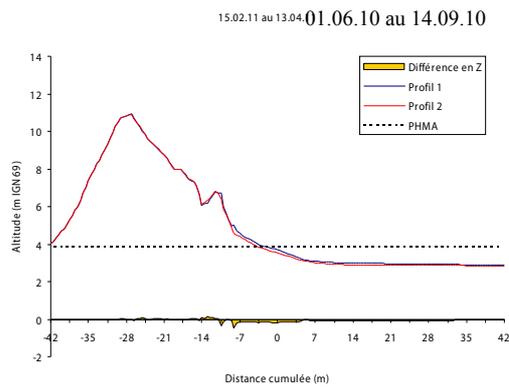
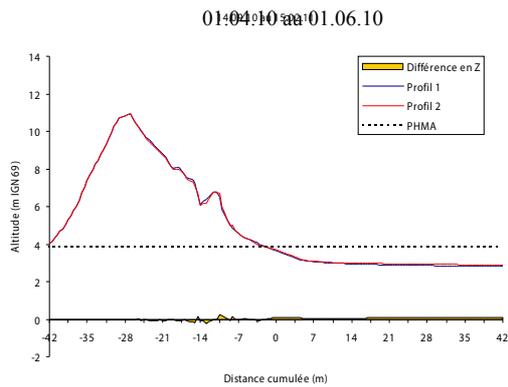
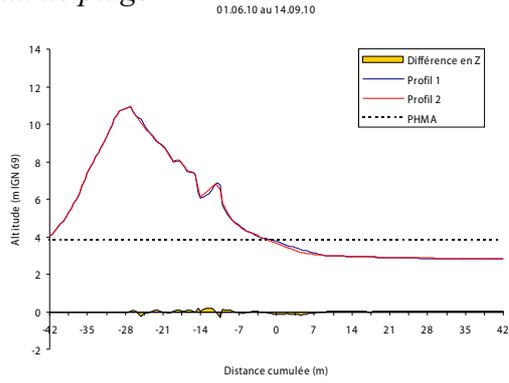
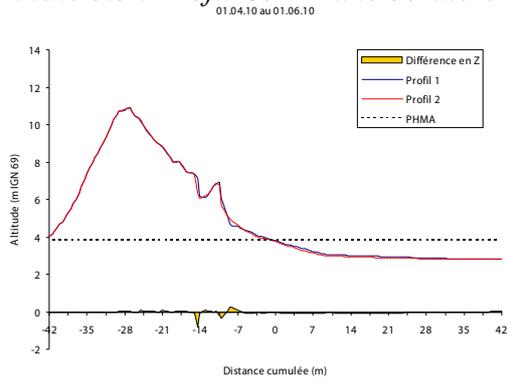
Annexe 3.1 : Profil C2 – Dune bordière et haut de plage



Annexe 3.2 : Profil C2 - Estran

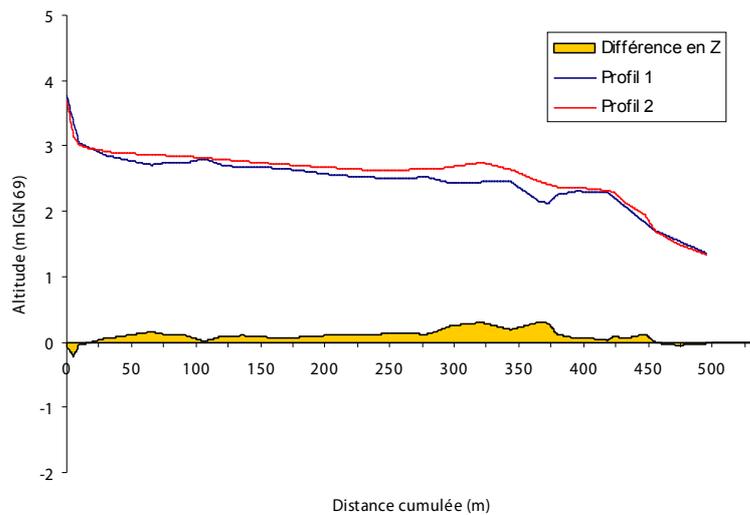


Annexe 3.3 : Profil C3 – Dune bordière et haut de plage

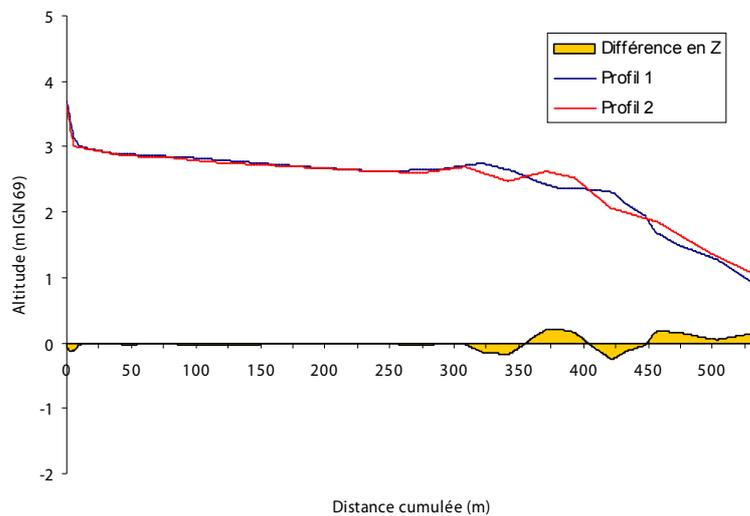


Bilan 01.04.10 au 26.10.11

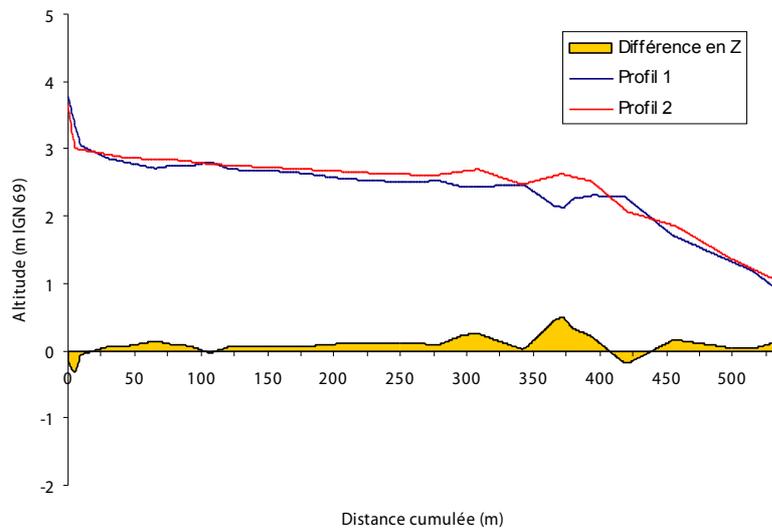
Annexe 3.4 : Profil C3 - Estran



01.04.10 au 15.02.11



15.02.11 au 26.10.11

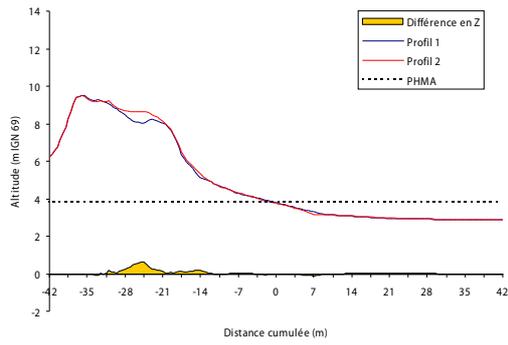


Bilan 01.04.10 au 26.10.11

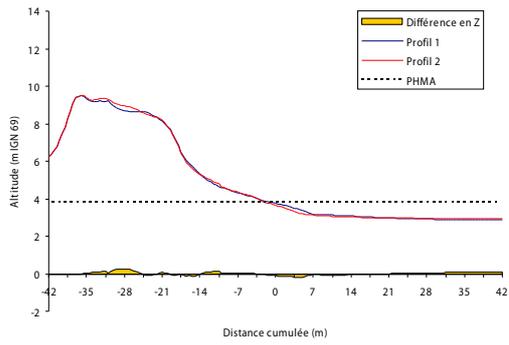
Annexe 3.5 : Profil C4 – Dune bordière et haut de plage

Tracé et comparaison des profils

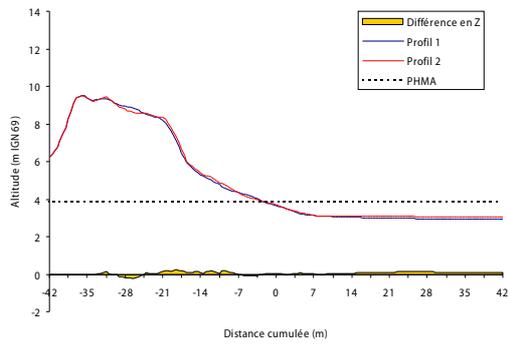
Tracé et comparaison des profils



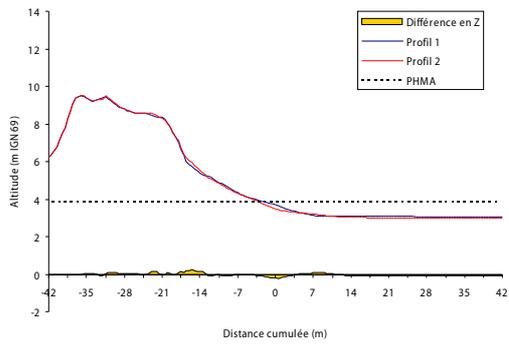
01.04.10 au 01.06.10



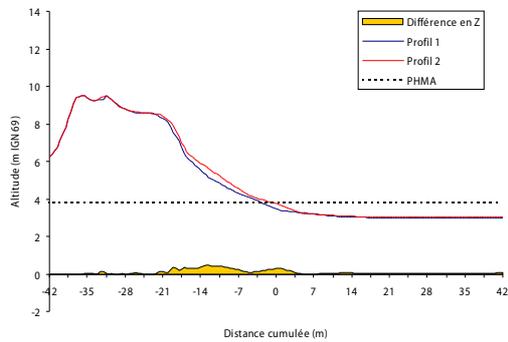
01.06.10 au 14.09.10



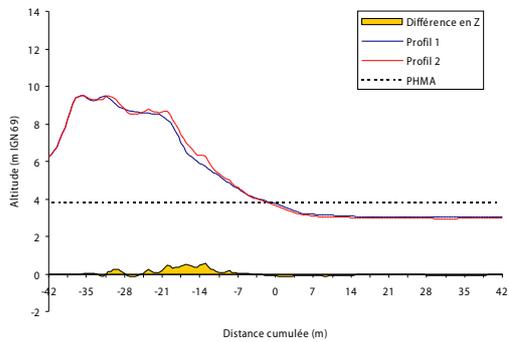
14.09.10 au 15.02.11



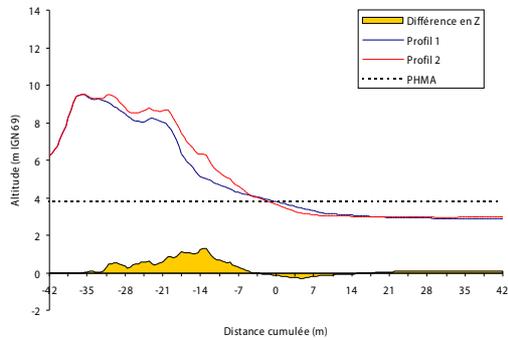
15.02.11 au 13.04.11



13.04.11 au 29.06.11

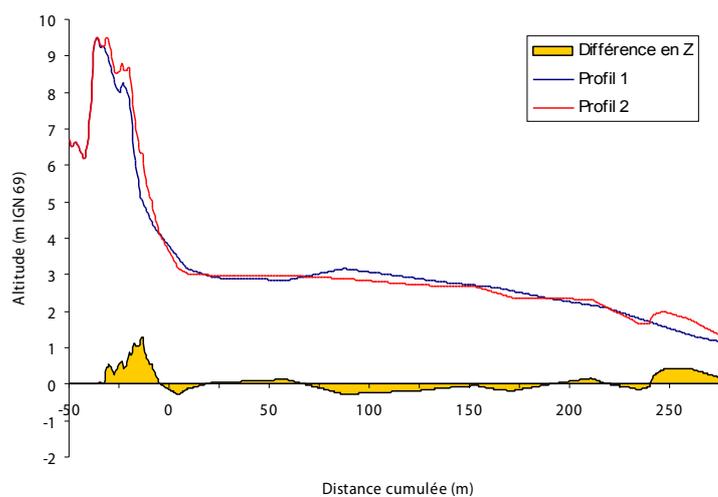
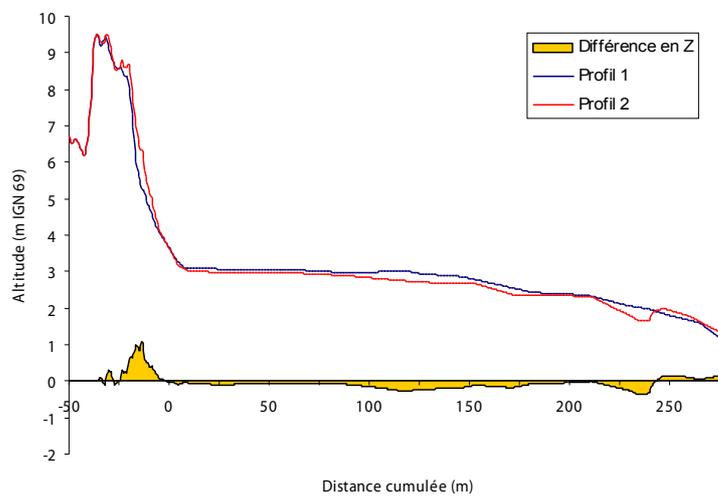
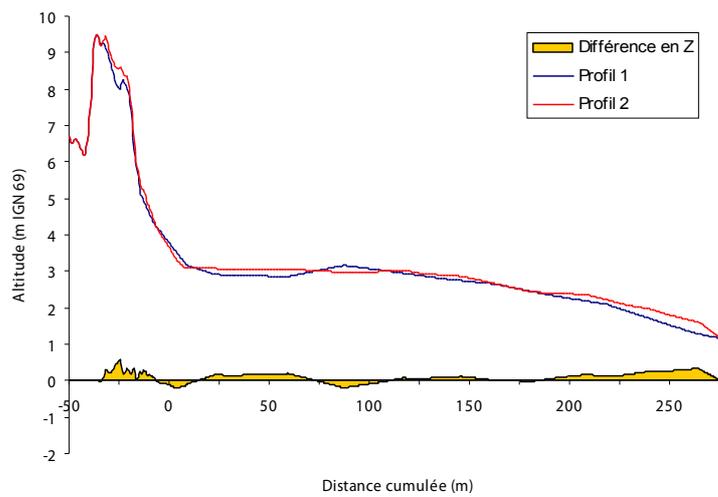


29.06.11 au 26.10.11



Bilan 01.04.10 au 26.10.11

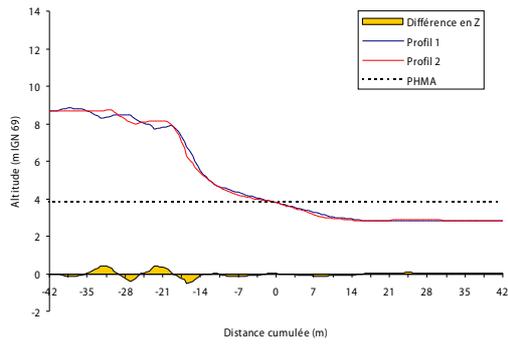
Annexe 3.6 : Profil C4 - Estran



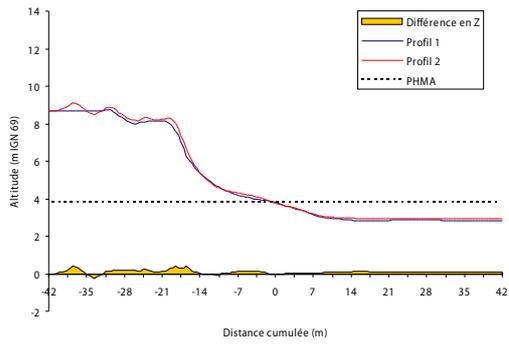
Annexe 3.7 : Profil C5 – Dune bordière et haut de plage

Tracé et comparaison des profils

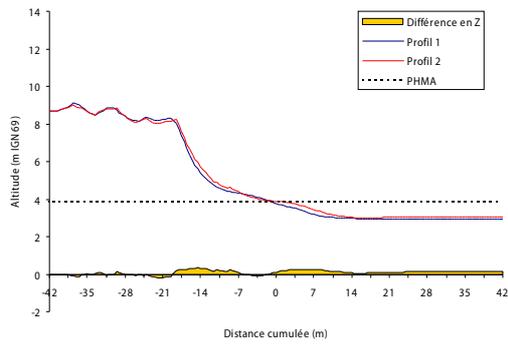
Tracé et comparaison des profils



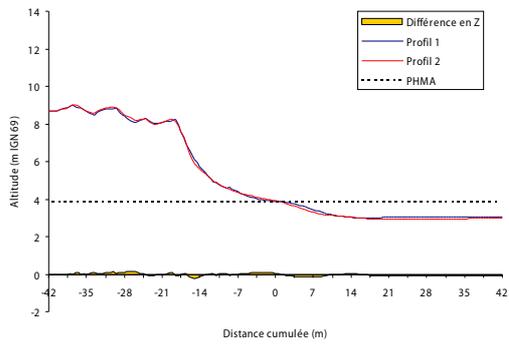
01.04.10 au 01.06.10



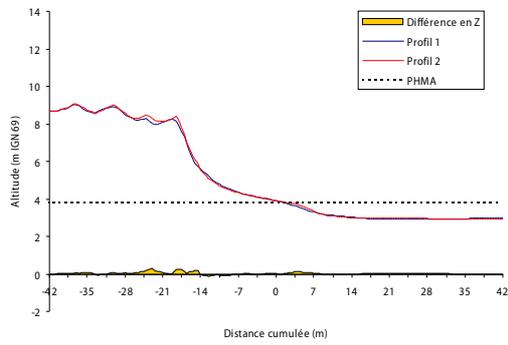
01.06.10 au 14.09.10



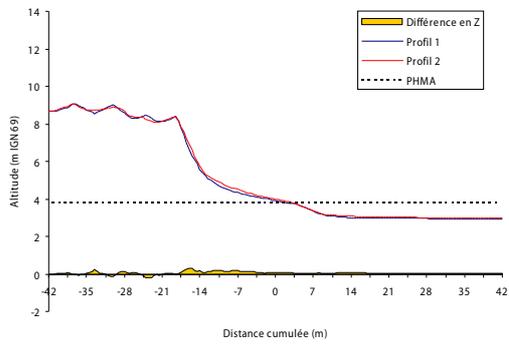
14.09.10 au 15.02.11



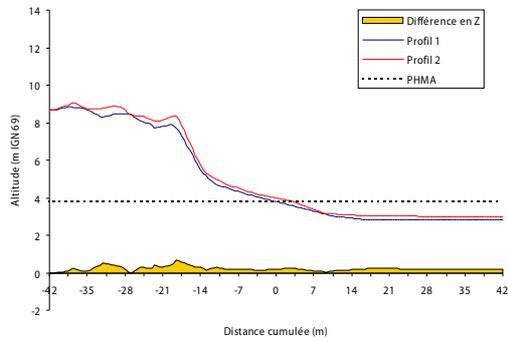
15.02.11 au 13.04.11



13.04.11 au 29.06.11

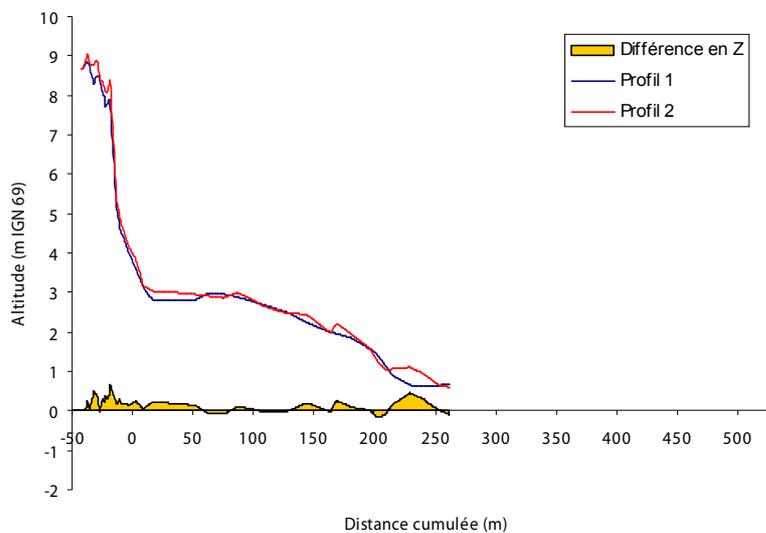
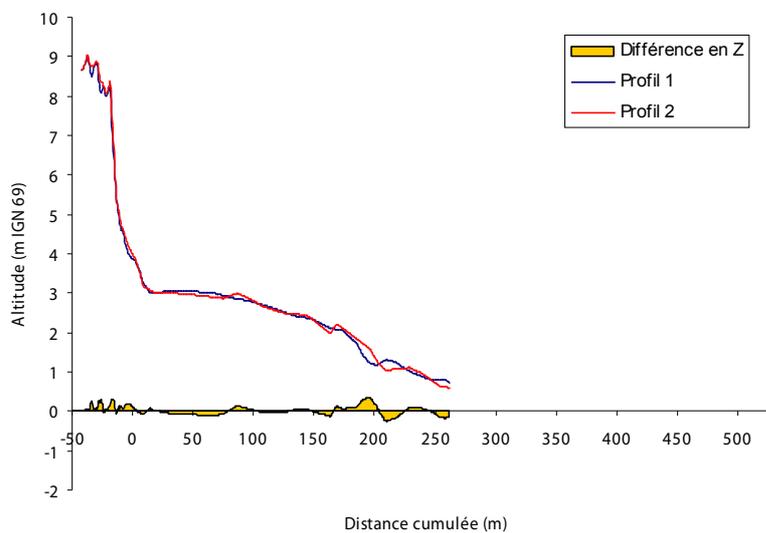
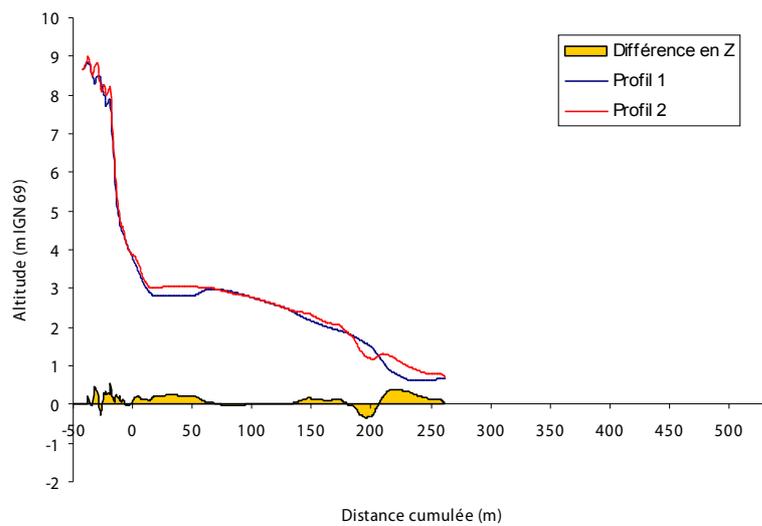


29.06.11 au 26.10.11



Bilan 01.04.10 au 26.10.11

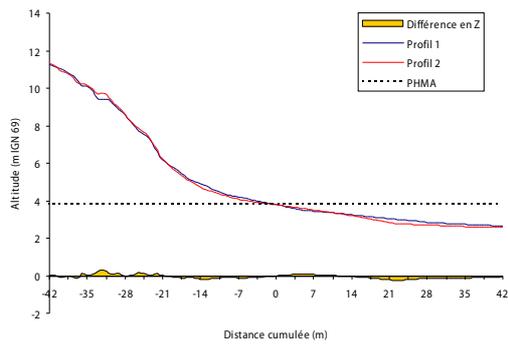
Annexe 3.8 : Profil C5 - Estran



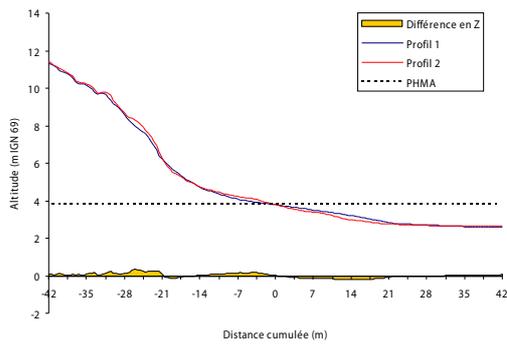
Annexe 3.9 : Profil C6 – Dune bordière et haut de plage

Tracé et comparaison des profils

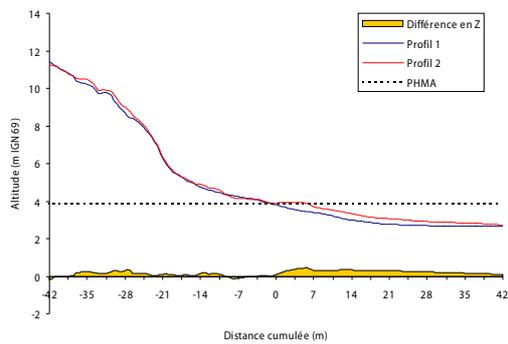
Tracé et comparaison des profils



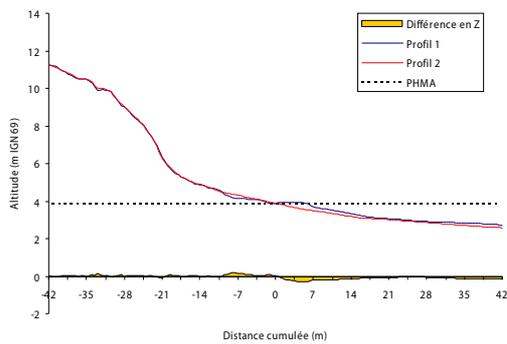
01.04.10 au 01.06.10



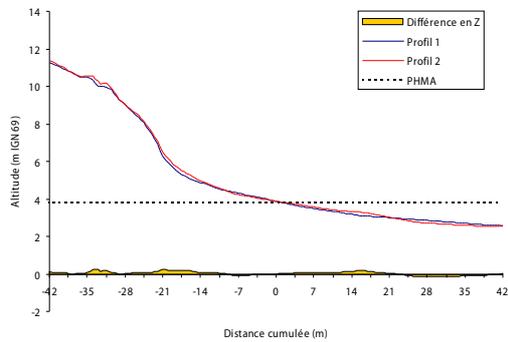
01.06.10 au 14.09.10



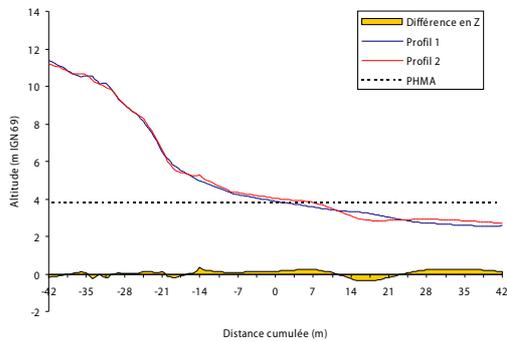
14.09.10 au 15.02.11



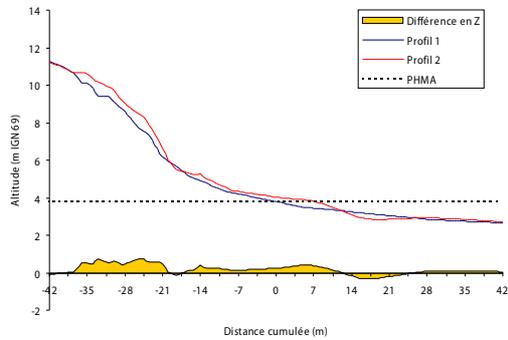
15.02.11 au 13.04.11



13.04.11 au 29.06.11

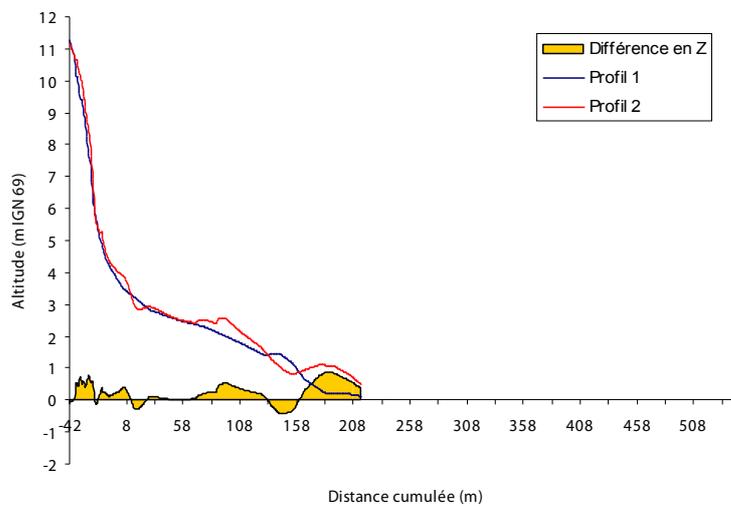
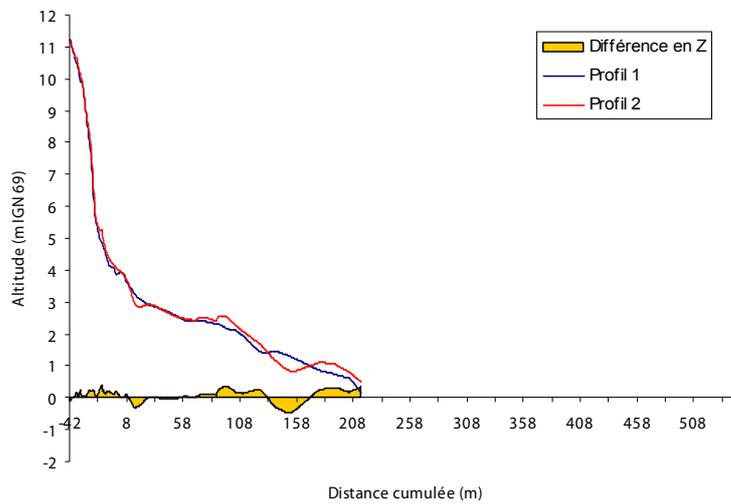
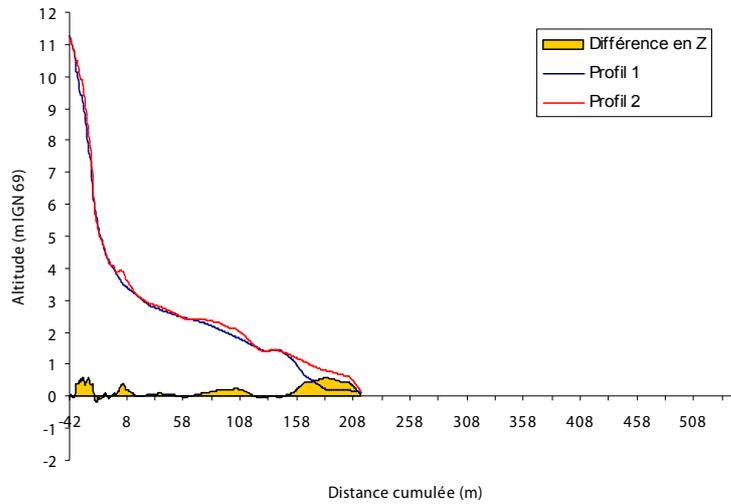


29.06.11 au 26.10.11



Bilan 01.04.10 au 26.10.11

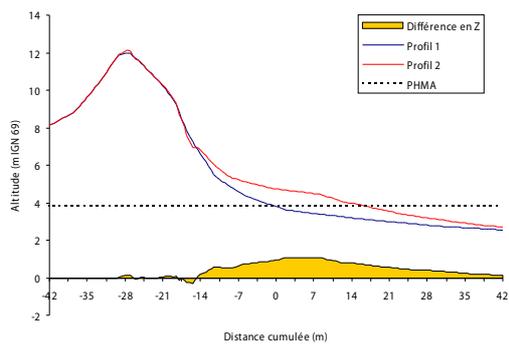
Annexe 3.10 : Profil C6 - Estran



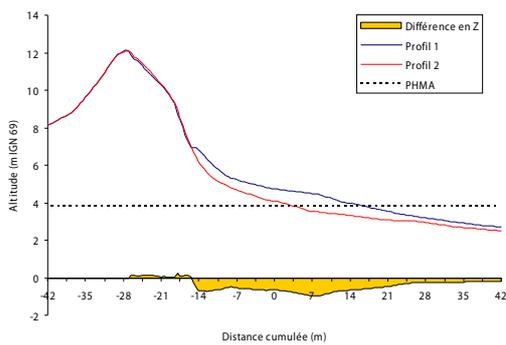
Annexe 3.11 : Profil S1 – Dune bordière et haut de plage

Tracé et comparaison des profils

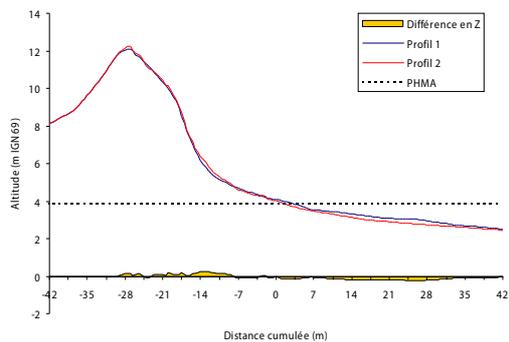
Tracé et comparaison des profils



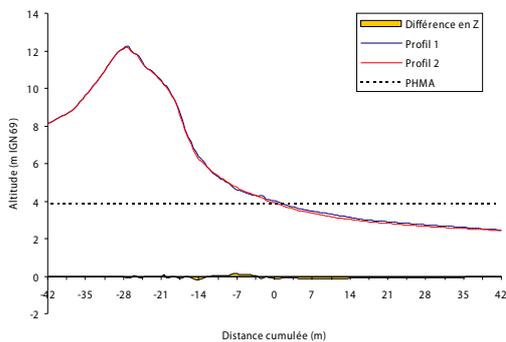
01.04.10 au 01.06.10



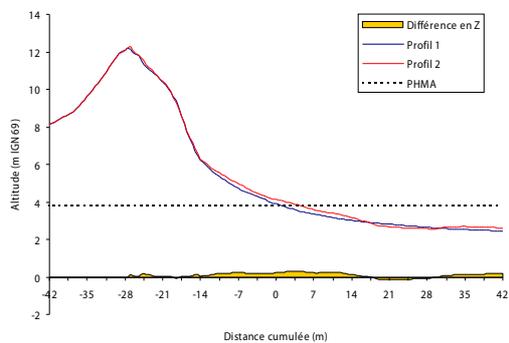
01.06.10 au 14.09.10



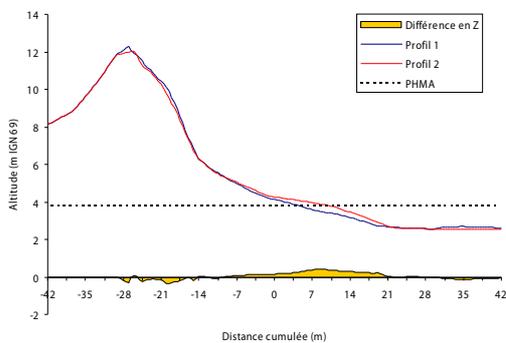
14.09.10 au 15.02.11



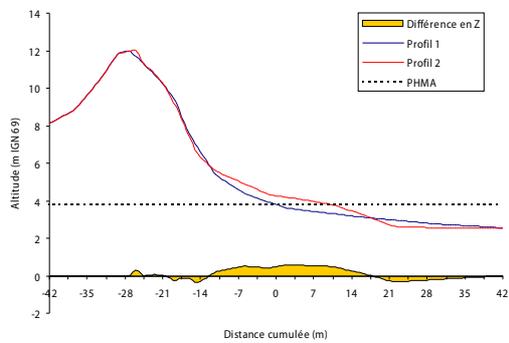
15.02.11 au 13.04.11



13.04.11 au 29.06.11

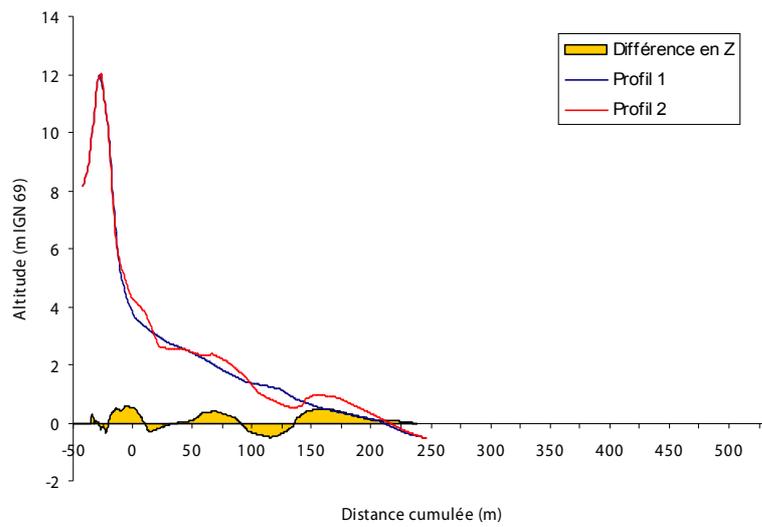
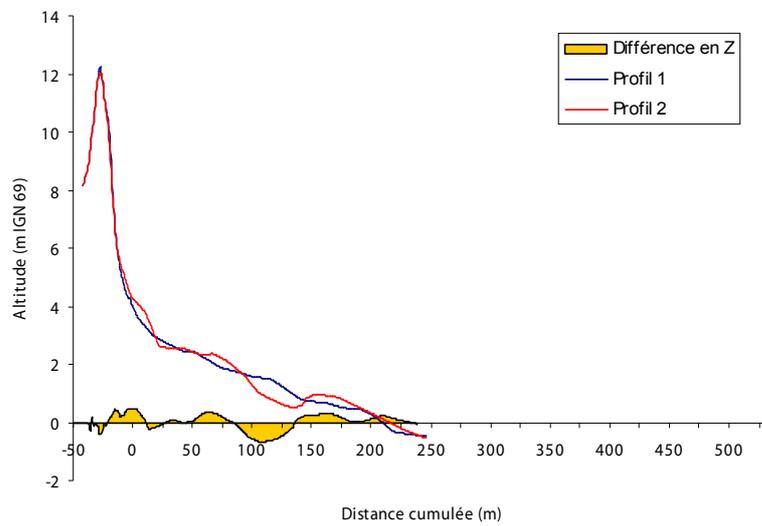
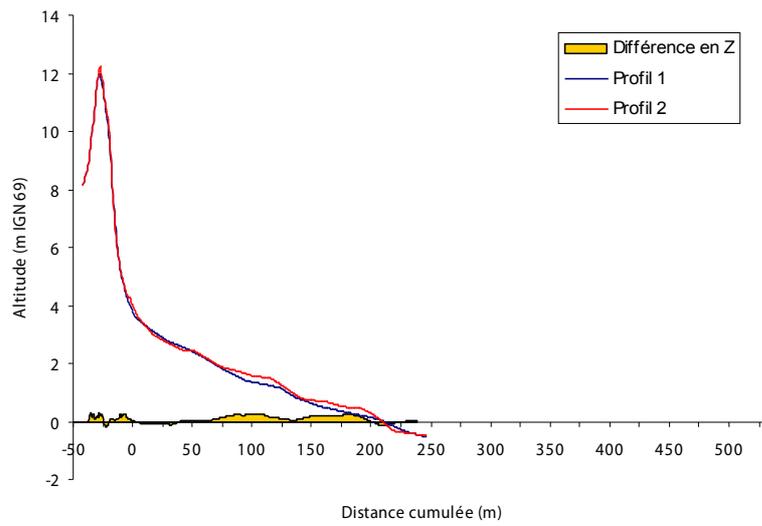


29.06.11 au 26.10.11



Bilan 01.04.10 au 26.10.11

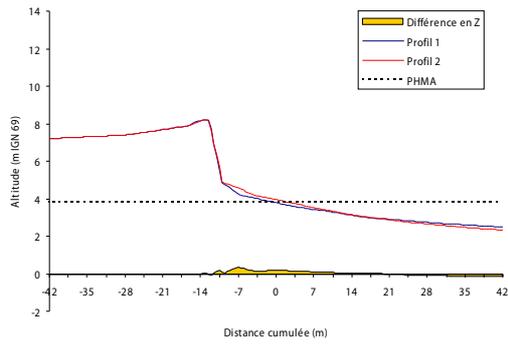
Annexe 3.12 : Profil S1 - Estran



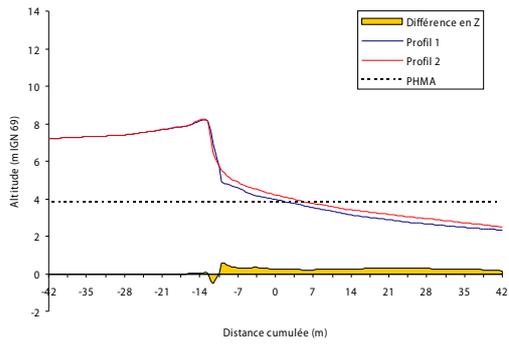
Annexe 3.13 : Profil S2 – Falaise sableuse et haut de plage

Tracé et comparaison des profils

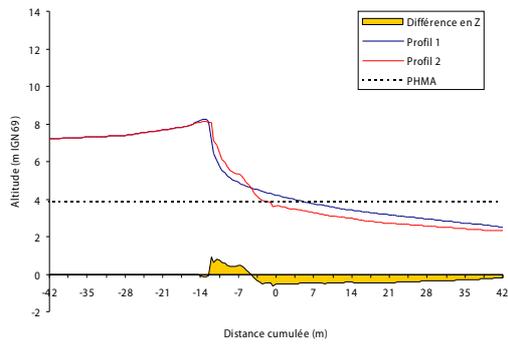
Tracé et comparaison des profils



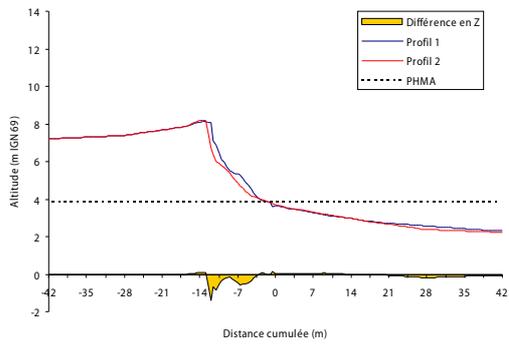
01.04.10 au 01.06.10



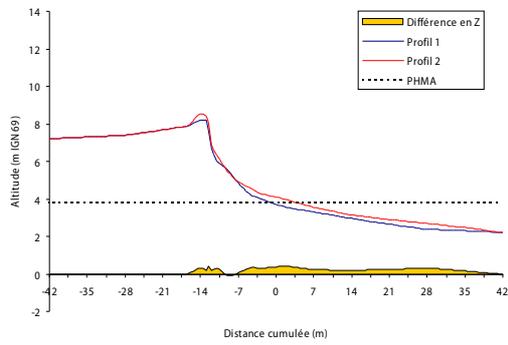
01.06.10 au 14.09.10



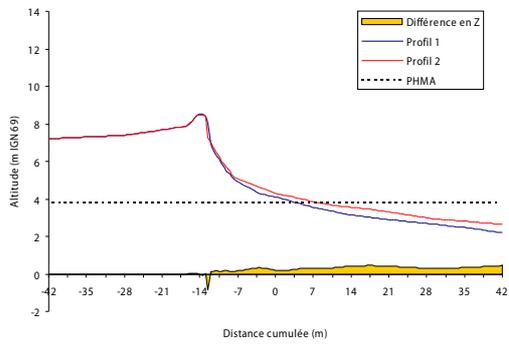
14.09.10 au 15.02.11



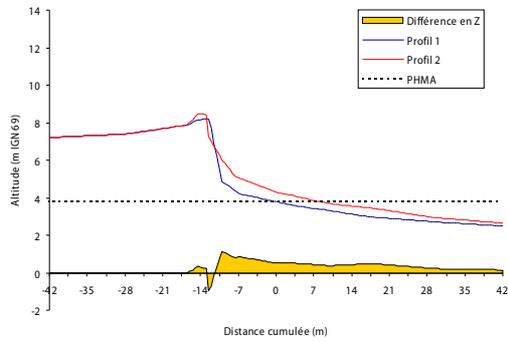
15.02.11 au 13.04.11



13.04.11 au 29.06.11

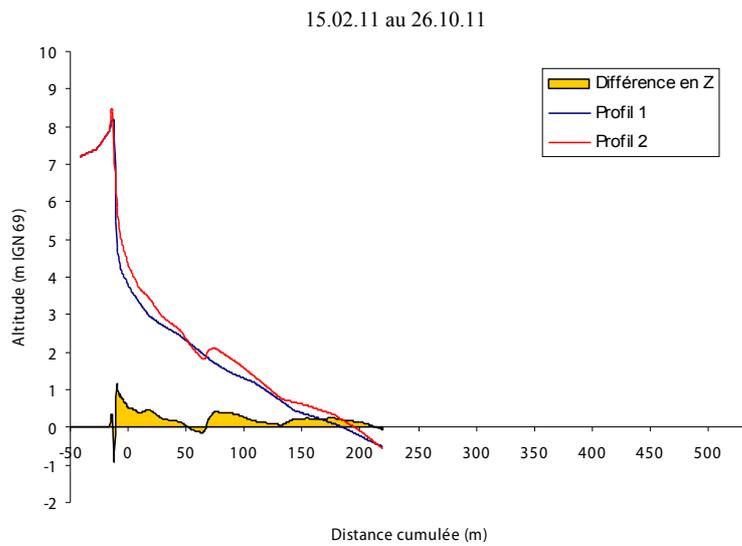
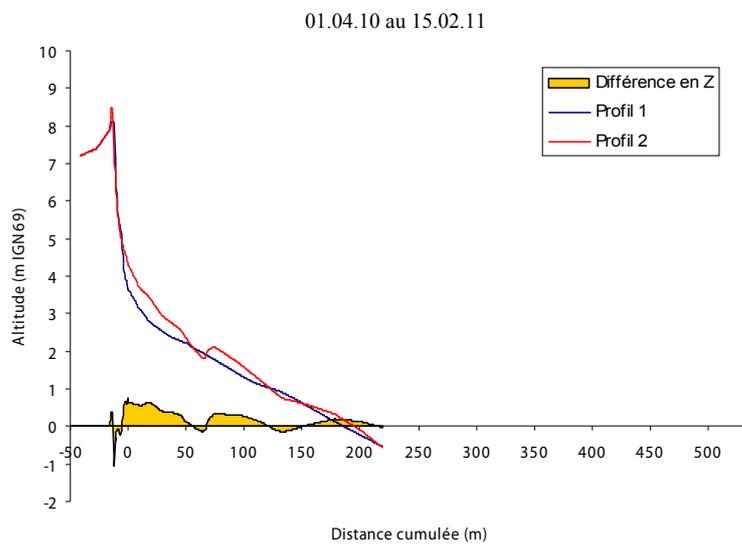
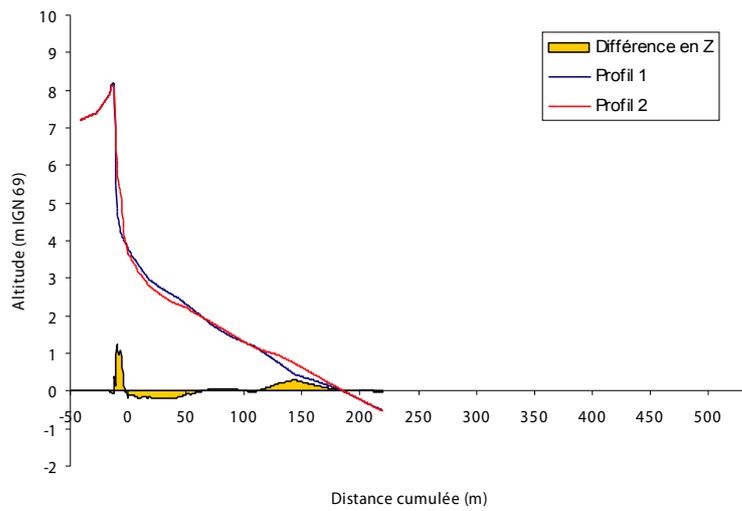


29.06.11 au 26.10.11



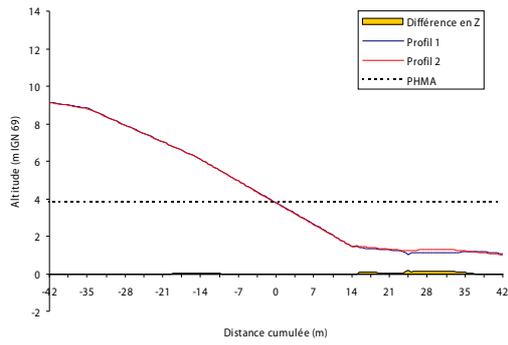
Bilan 01.04.10 au 26.10.11

Annexe 3.14 : Profil S2 - Estran

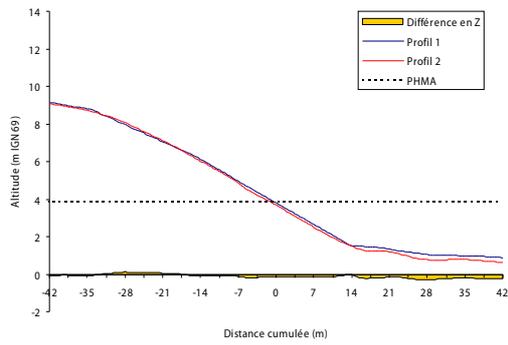


Annexe 3.15 : Profil D1 – Digue et haut de plage

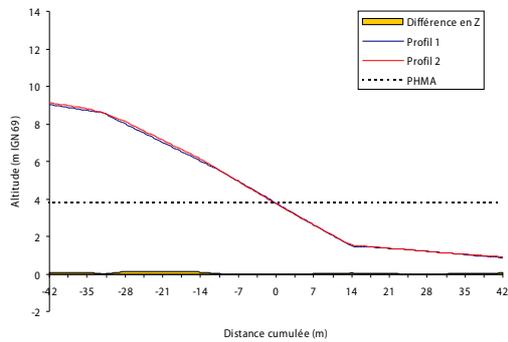
Tracé et comparaison des profils



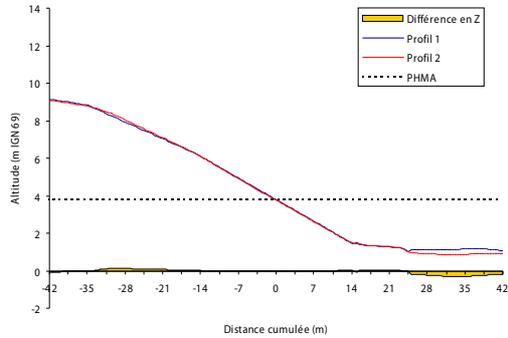
01.04.10 au 01.06.10



14.09.10 au 15.02.11

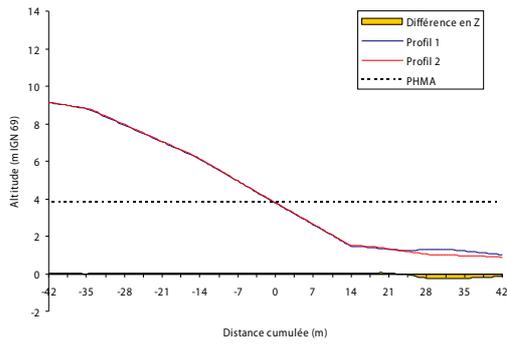


13.04.11 au 29.06.11

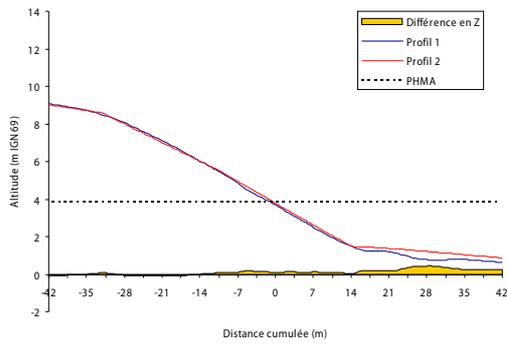


Bilan 01.04.10 au 26.10.11

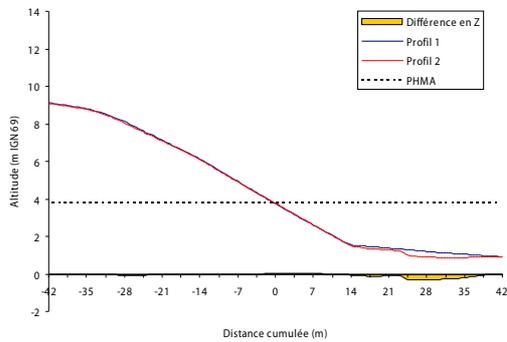
Tracé et comparaison des profils



01.06.10 au 14.09.10



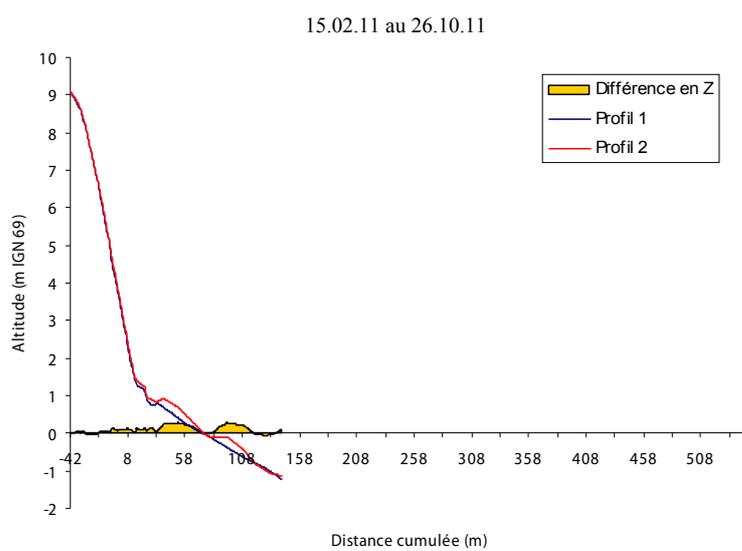
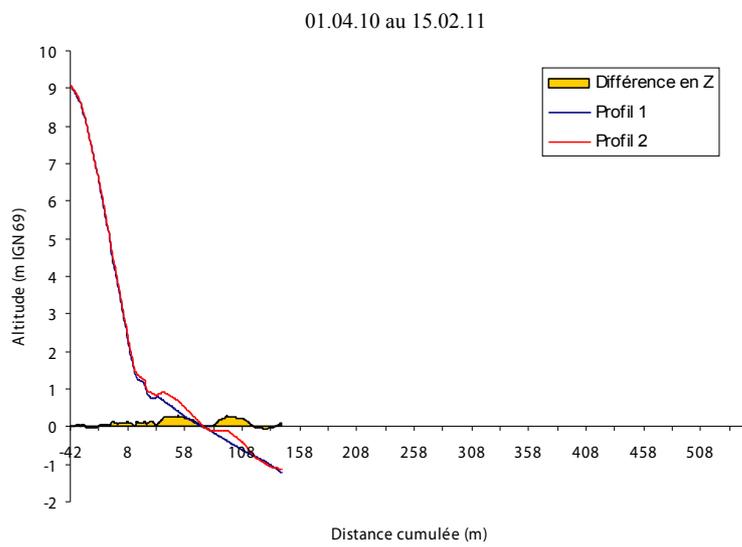
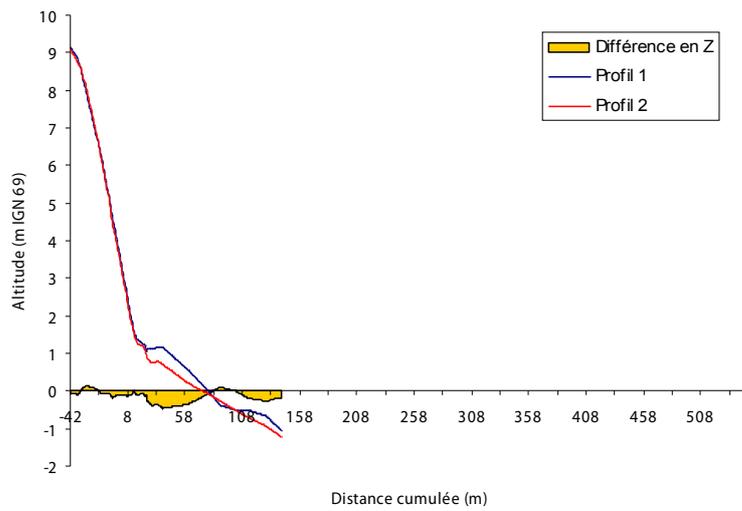
15.02.11 au 13.04.11



29.06.11 au 26.10.11

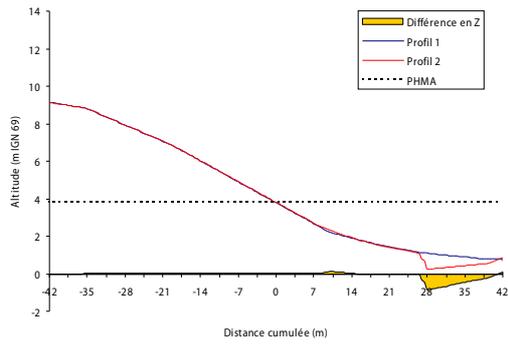


Annexe 3.16 : Profil D1 - Estran



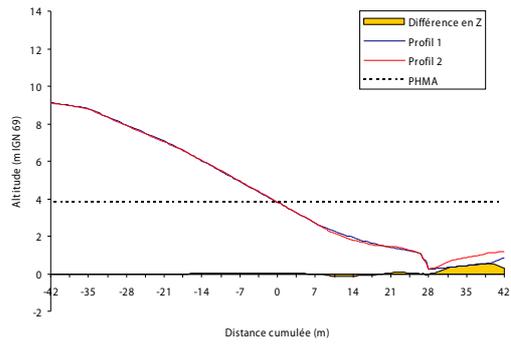
Annexe 3.17 : Profil D2 – Digue et haut de plage

Tracé et comparaison des profils

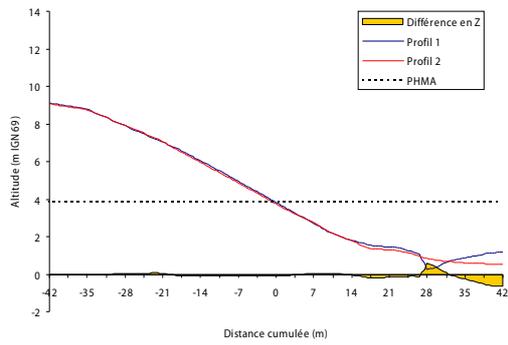


01.04.10 au 01.06.10

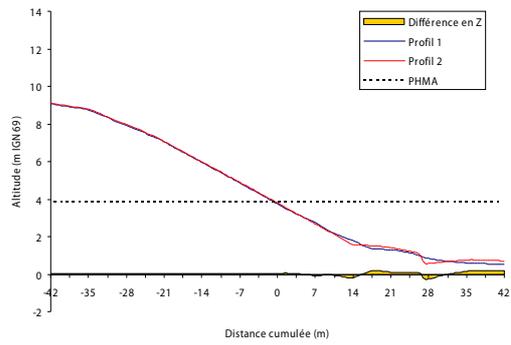
Tracé et comparaison des profils



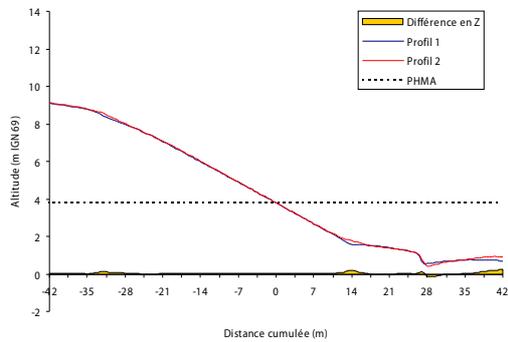
01.06.10 au 14.09.10



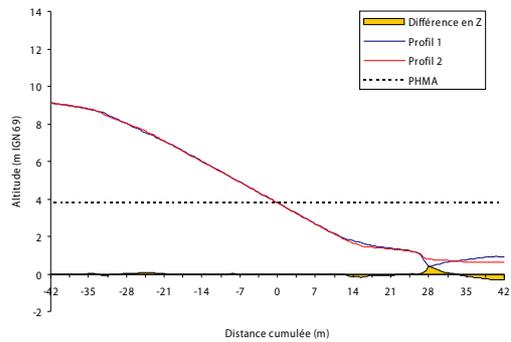
14.09.10 au 15.02.11



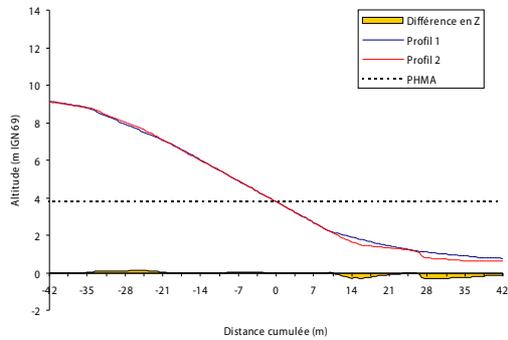
15.02.11 au 13.04.11



13.04.11 au 29.06.11

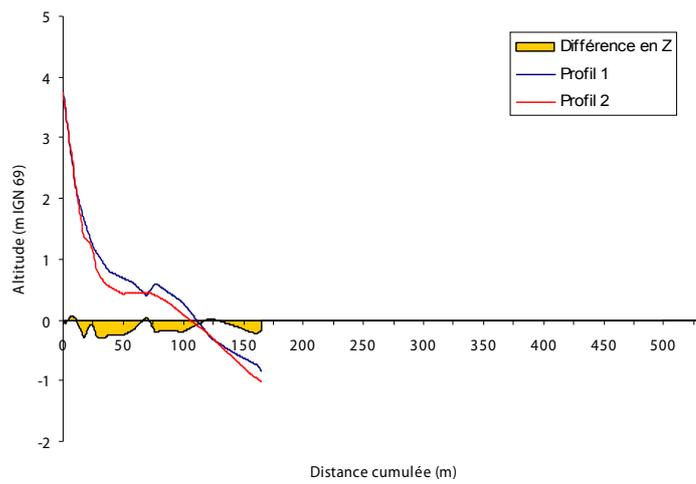


29.06.11 au 26.10.11

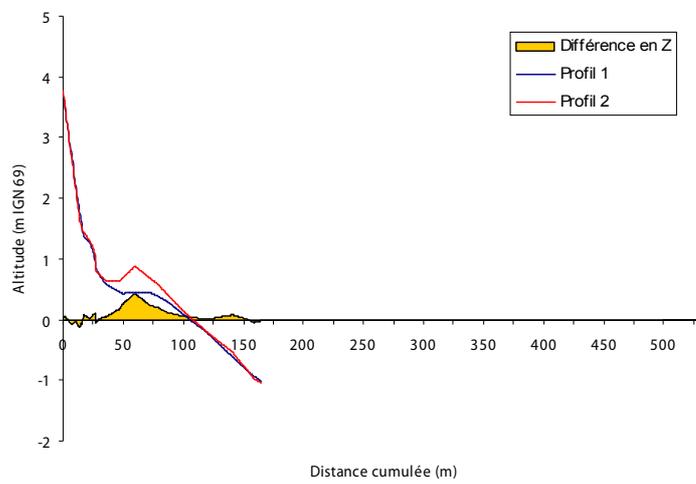


Bilan 01.04.10 au 26.10.11

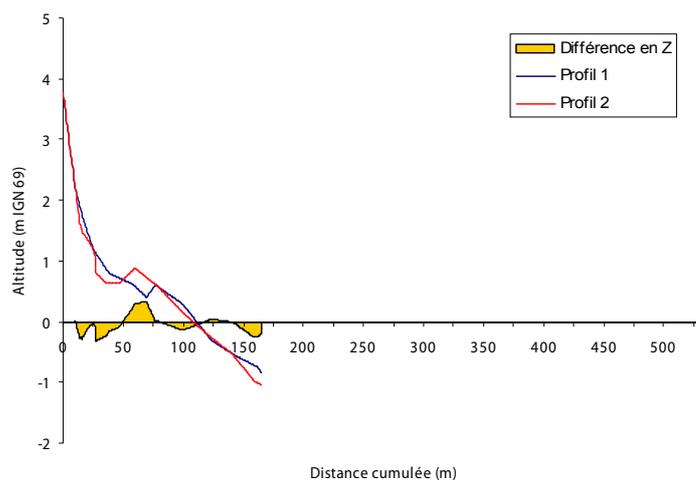
Annexe 3.18 : Profil D2 - Estran



01.04.10 au 15.02.11



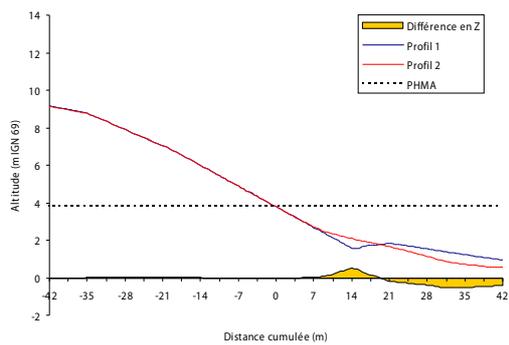
15.02.11 au 26.10.11



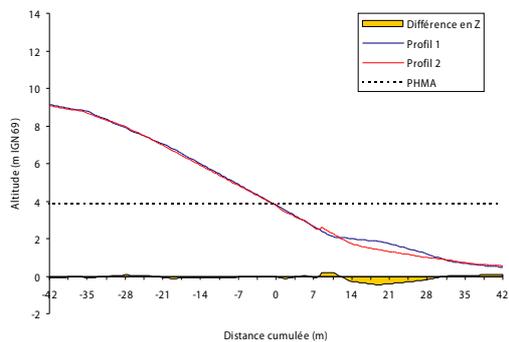
Bilan 01.04.10 au 26.10.11

Annexe 3.19 : Profil D3 – Digue et haut de plage

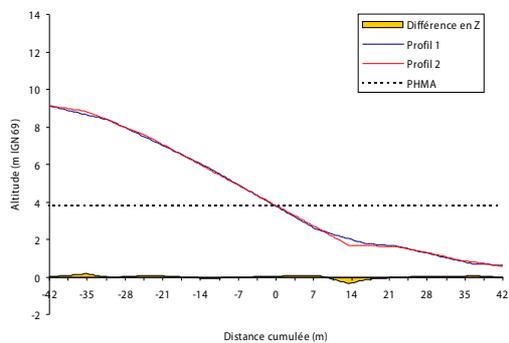
Tracé et comparaison des profils



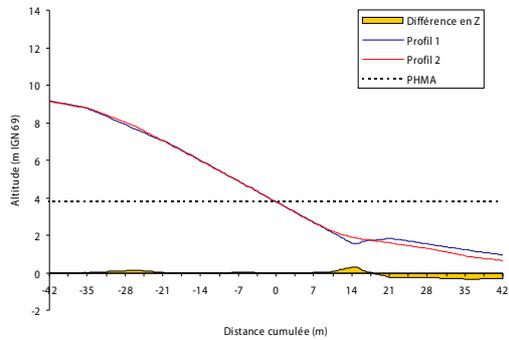
01.04.10 au 01.06.10



14.09.10 au 15.02.11

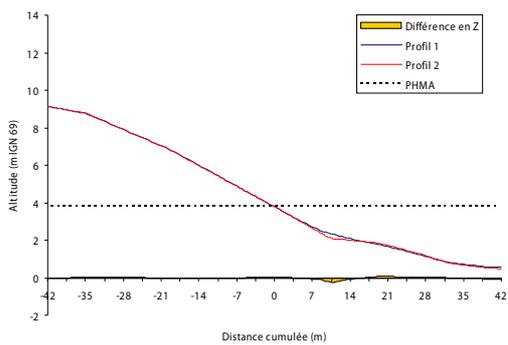


13.04.11 au 29.06.11

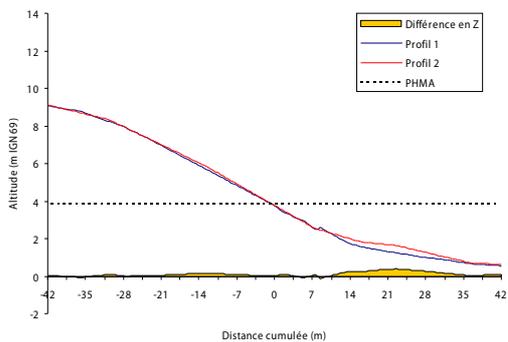


Bilan 01.04.10 au 26.10.11

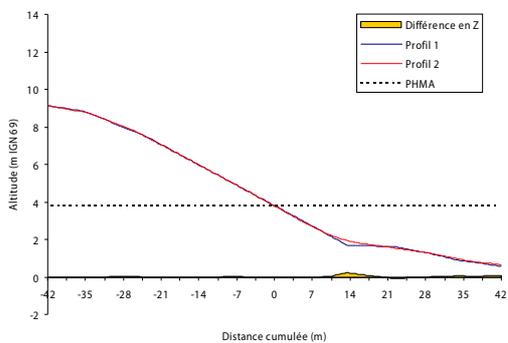
Tracé et comparaison des profils



01.06.10 au 14.09.10



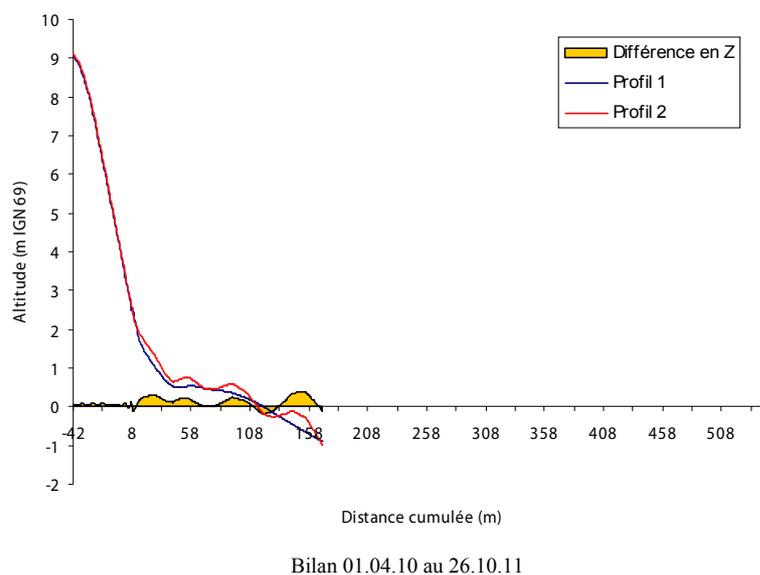
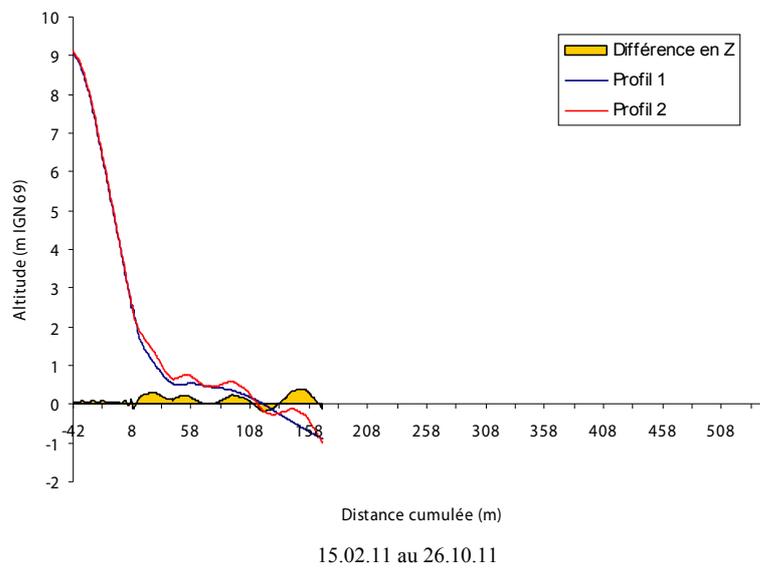
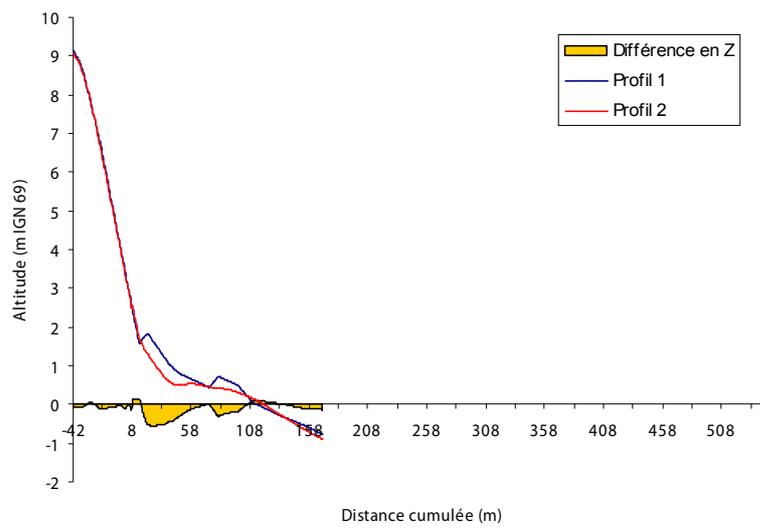
15.02.11 au 13.04.11



29.06.11 au 26.10.11

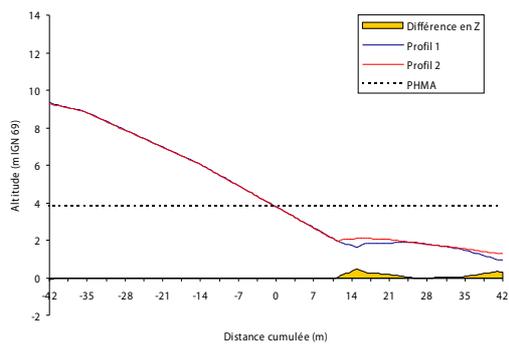


Annexe 3.20 : Profil D3 - Estran



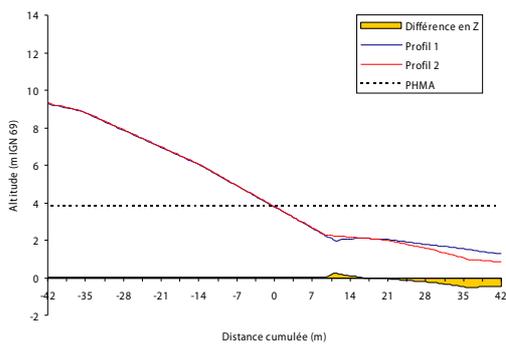
Annexe 3.21 : Profil D4 – Digue et haut de plage

Tracé et comparaison des profils

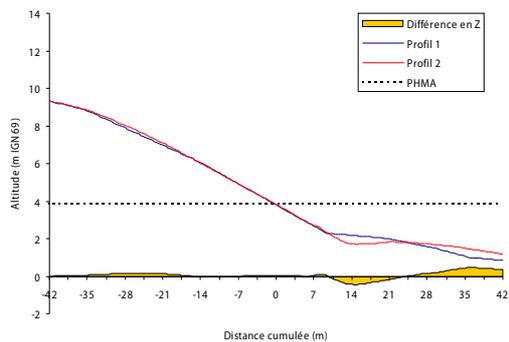


01.04.10 au 01.06.10

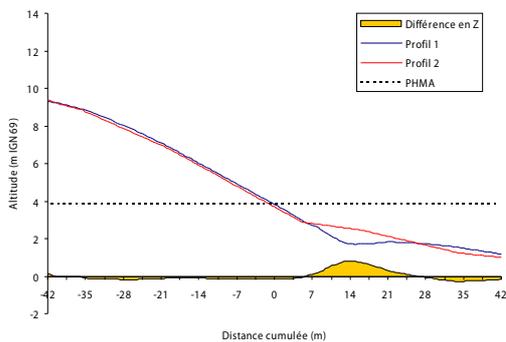
Tracé et comparaison des profils



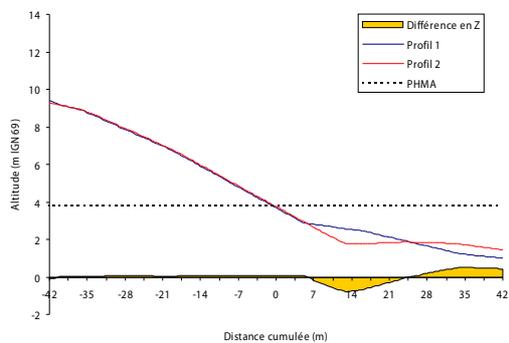
01.06.10 au 14.09.10



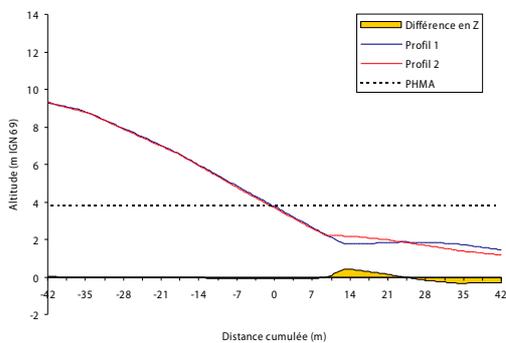
14.09.10 au 15.02.11



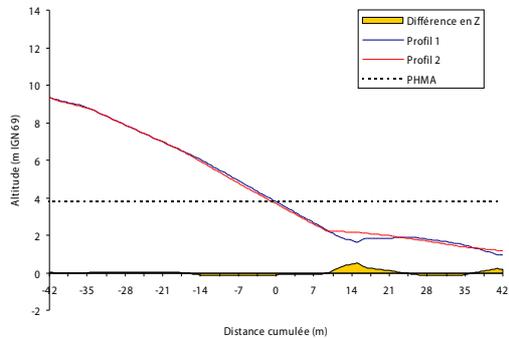
15.02.11 au 13.04.11



13.04.11 au 29.06.11

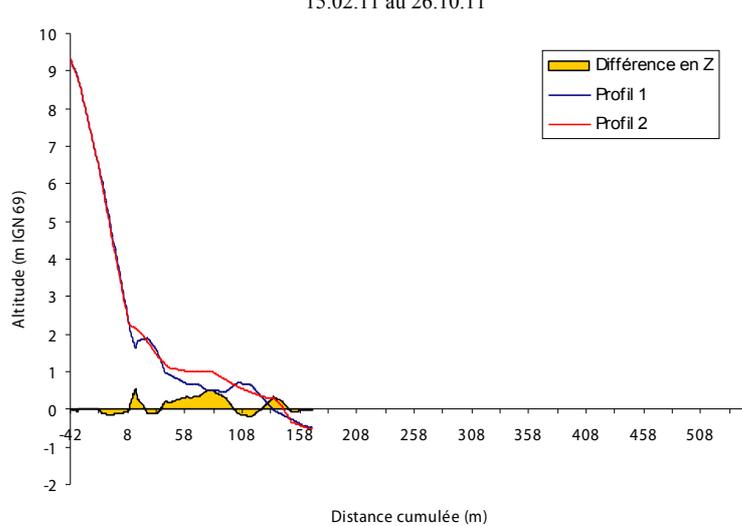
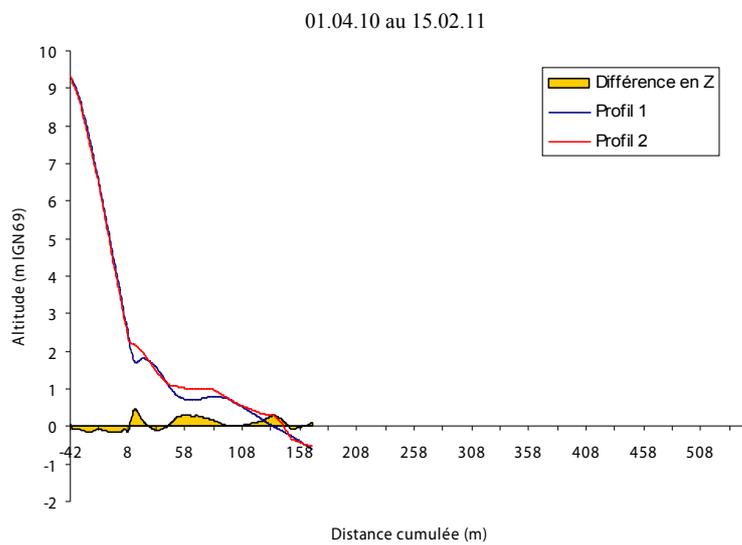
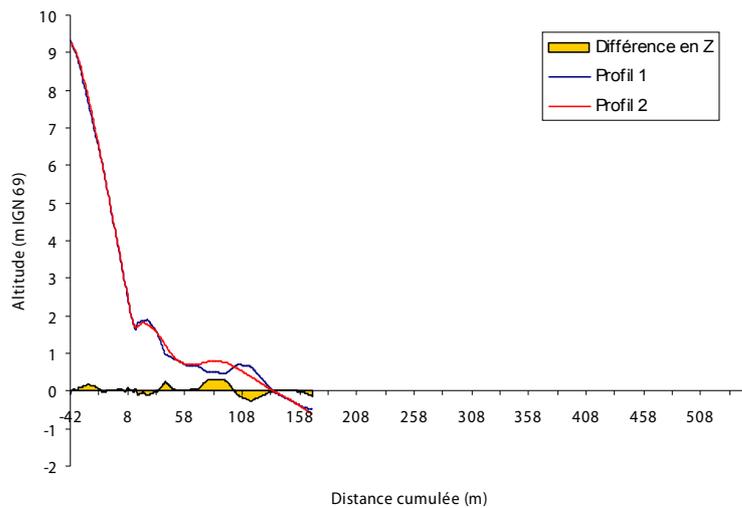


29.06.11 au 26.10.11



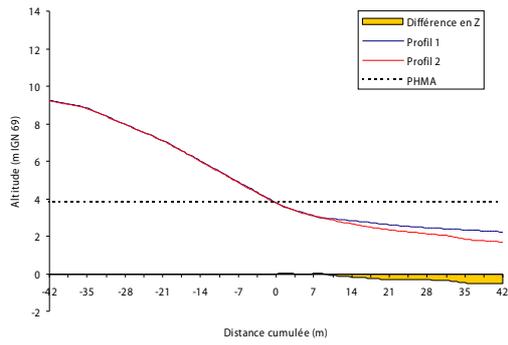
Bilan 01.04.10 au 26.10.11

Annexe 3.22 : Profil D4 - Estran



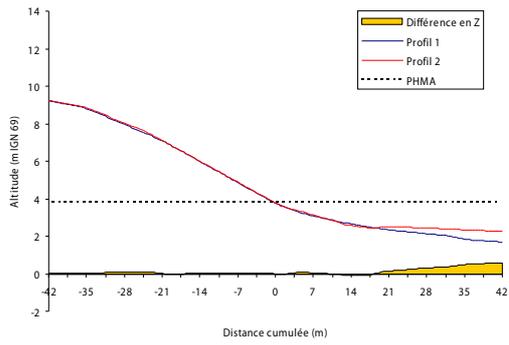
Annexe 3.23 : Profil D5 – Digue et haut de plage

Tracé et comparaison des profils

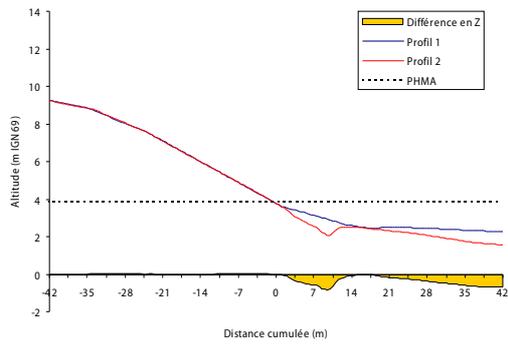


01.04.10 au 01.06.10

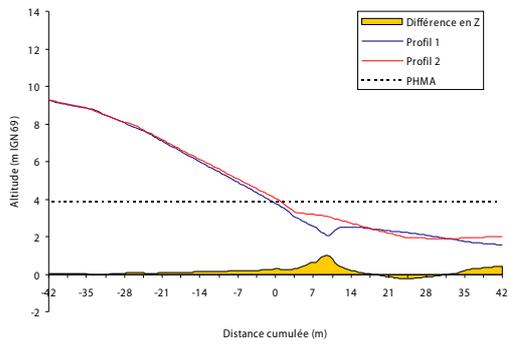
Tracé et comparaison des profils



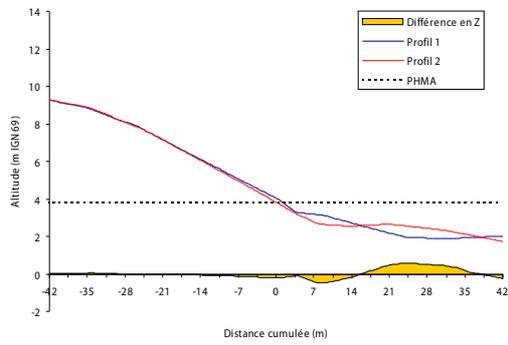
01.06.10 au 14.09.10



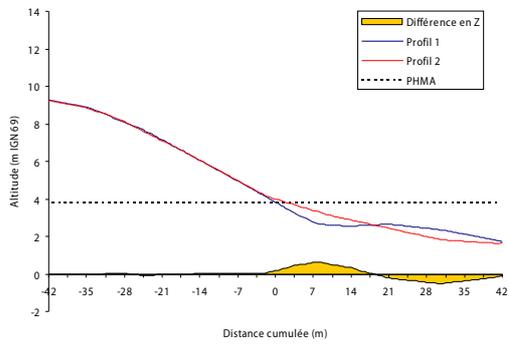
14.09.10 au 15.02.11



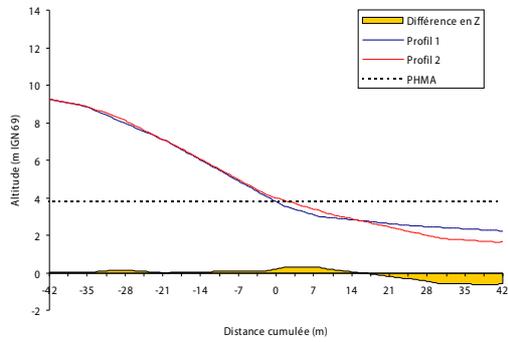
15.02.11 au 13.04.11



13.04.11 au 29.06.11

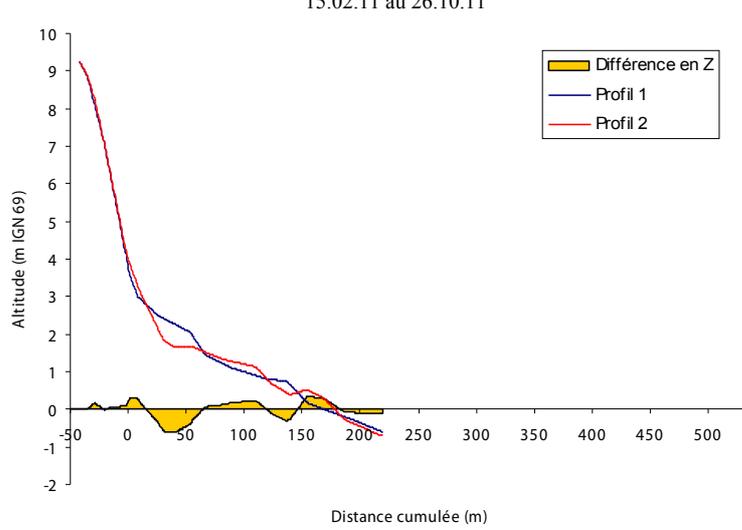
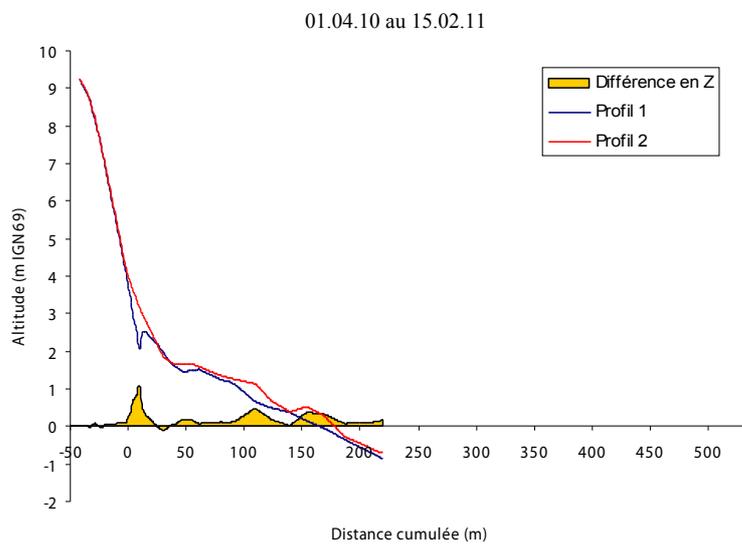
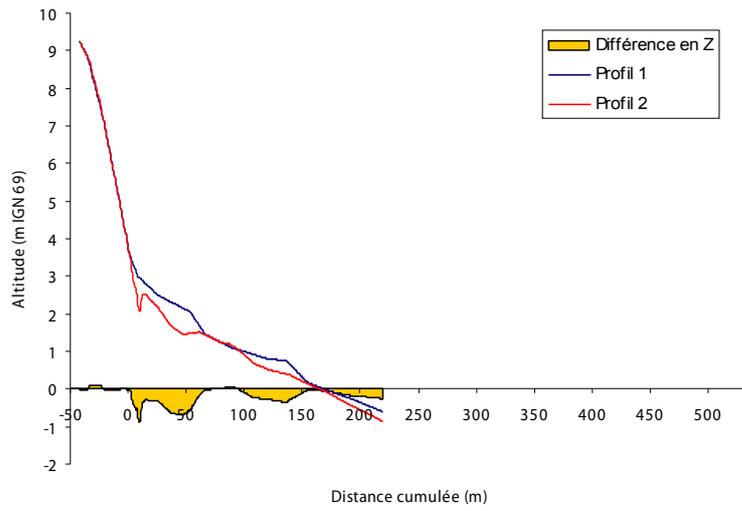


29.06.11 au 26.10.11



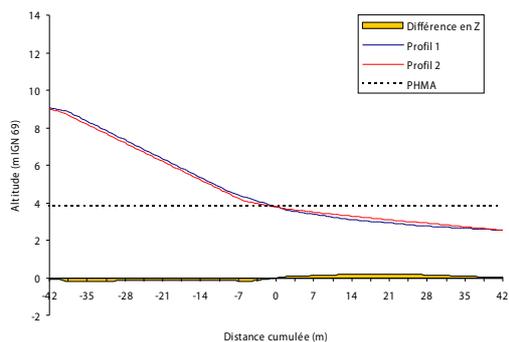
Bilan 01.04.10 au 26.10.11

Annexe 3.24 : Profil D5 - Estran



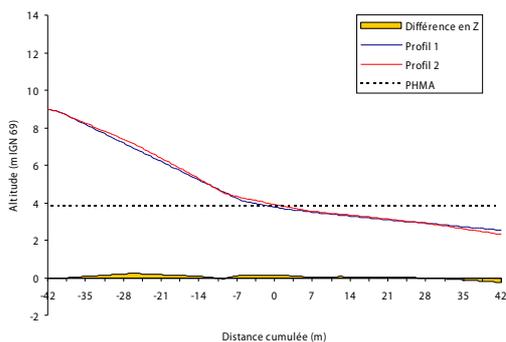
Annexe 3.25 : Profil D6 – Digue et haut de plage

Tracé et comparaison des profils

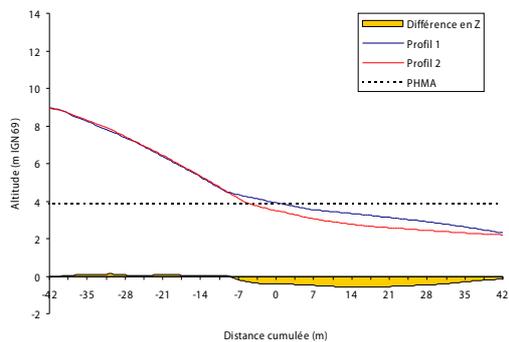


01.04.10 au 01.06.10

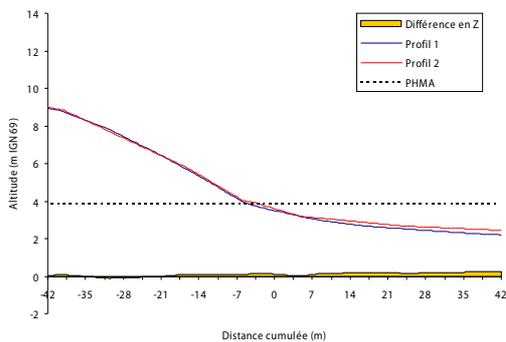
Tracé et comparaison des profils



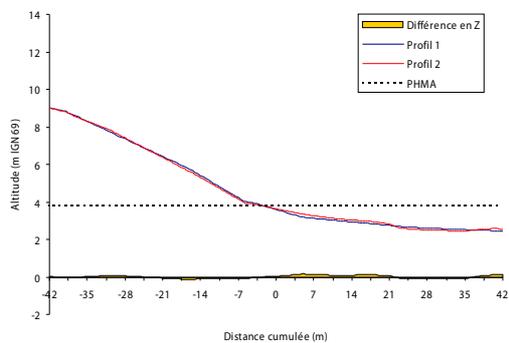
01.06.10 au 14.09.10



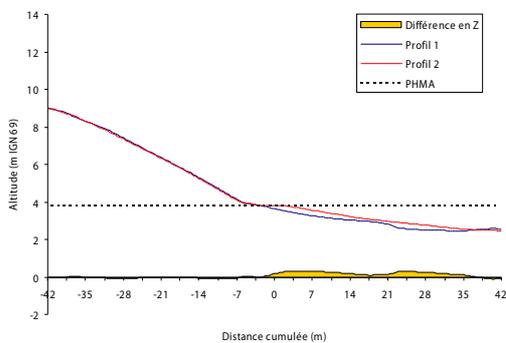
14.09.10 au 15.02.11



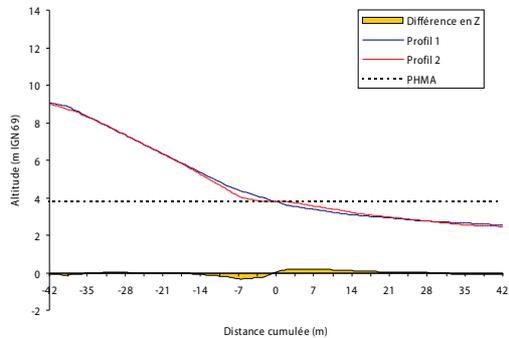
15.02.11 au 13.04.11



13.04.11 au 29.06.11

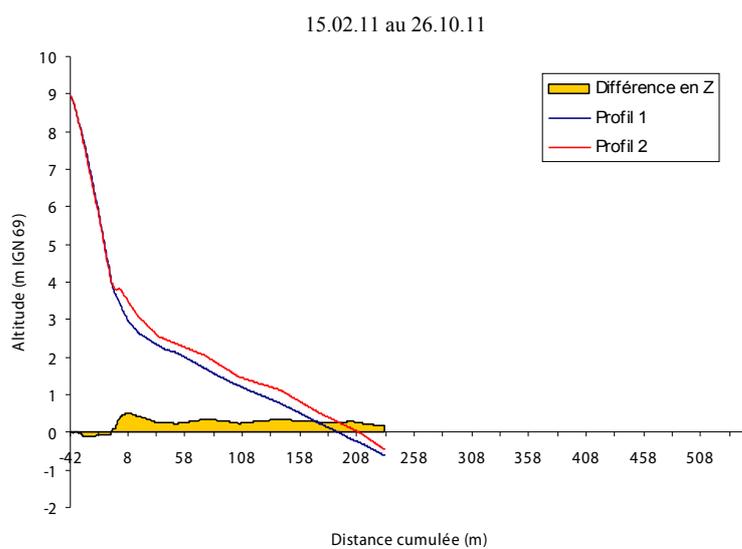
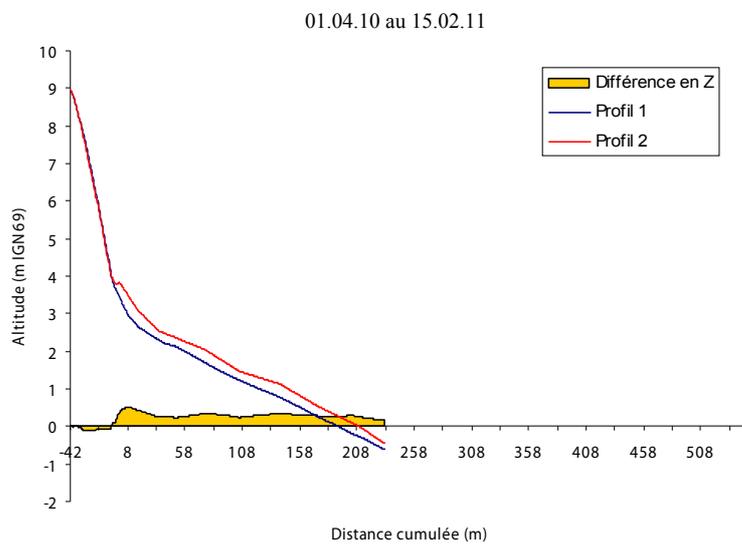
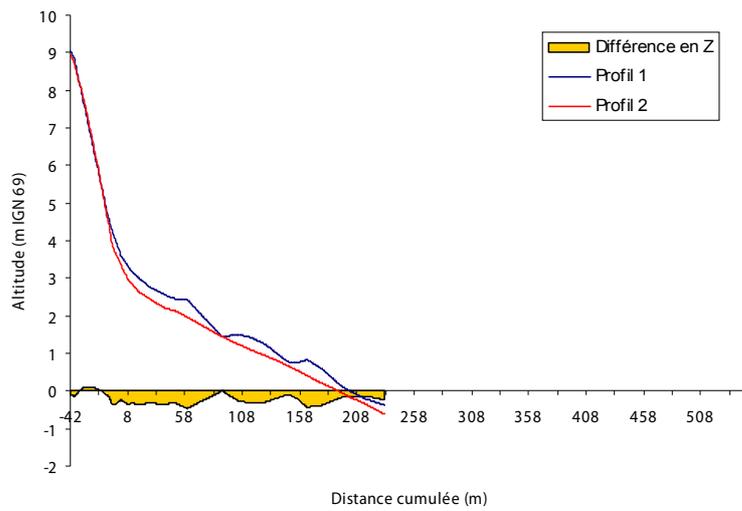


29.06.11 au 26.10.11



Bilan 01.04.10 au 26.10.11

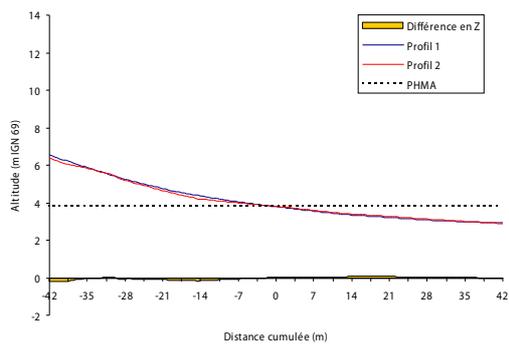
Annexe 3.26 : Profil D6 - Estran



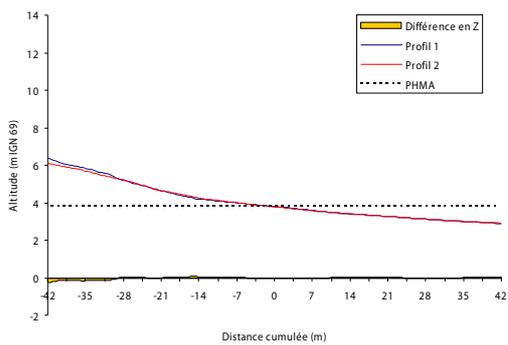
Annexe 3.27 : Profil D7 – Dunes de pied de digue et haut de plage

Tracé et comparaison des profils

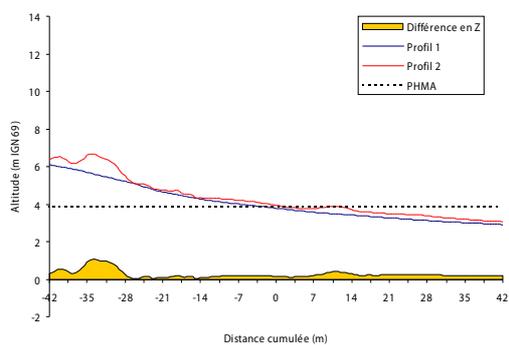
Tracé et comparaison des profils



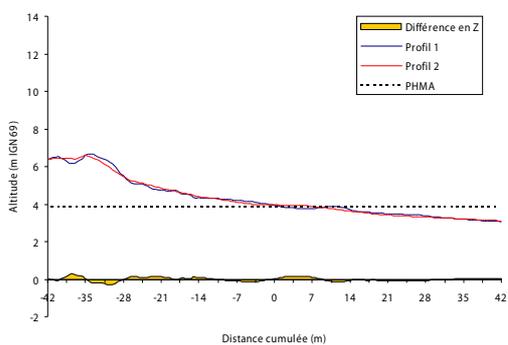
01.04.10 au 01.06.10



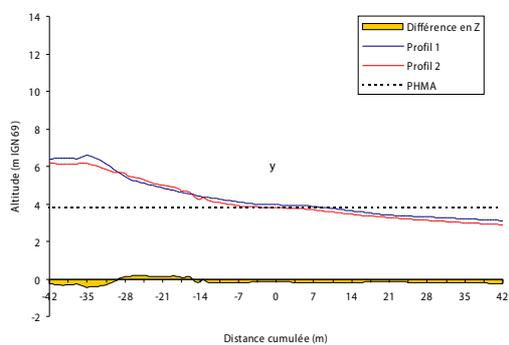
01.06.10 au 14.09.10



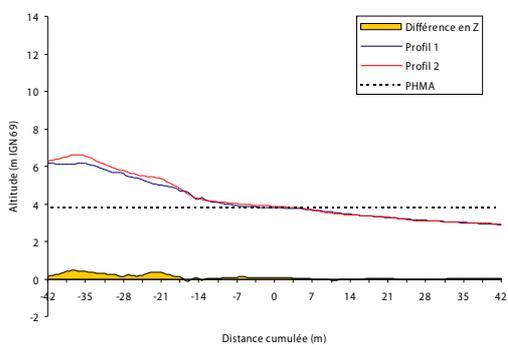
14.09.10 au 15.02.11



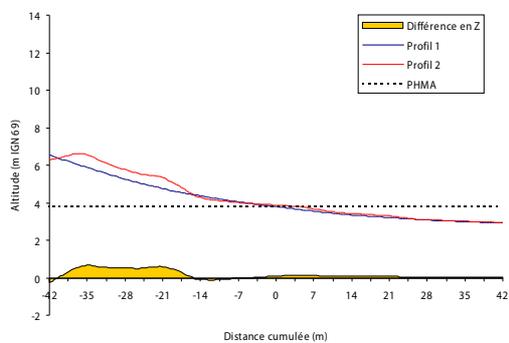
15.02.11 au 13.04.11



13.04.11 au 29.06.11

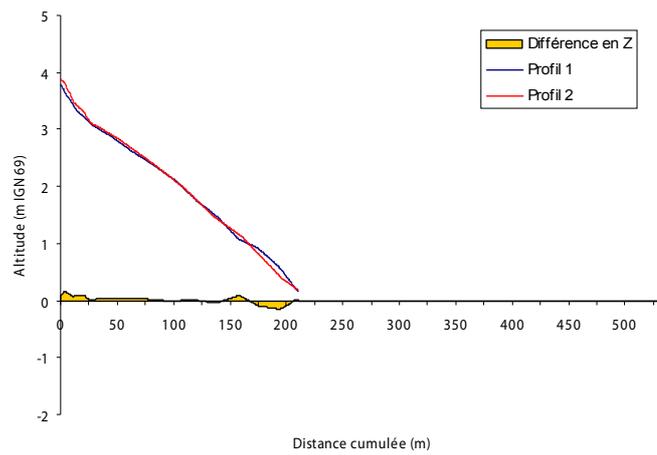
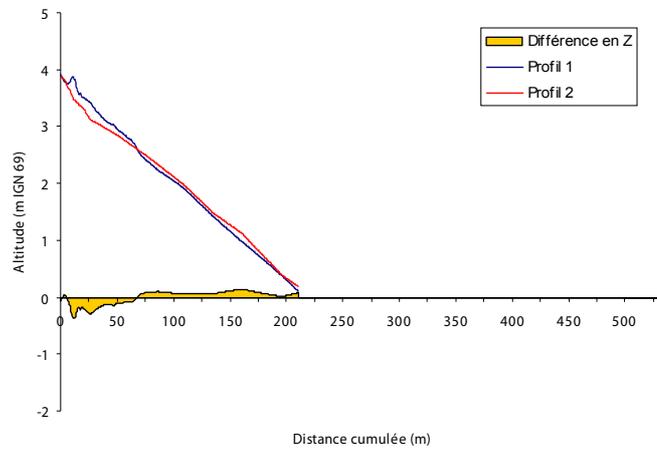
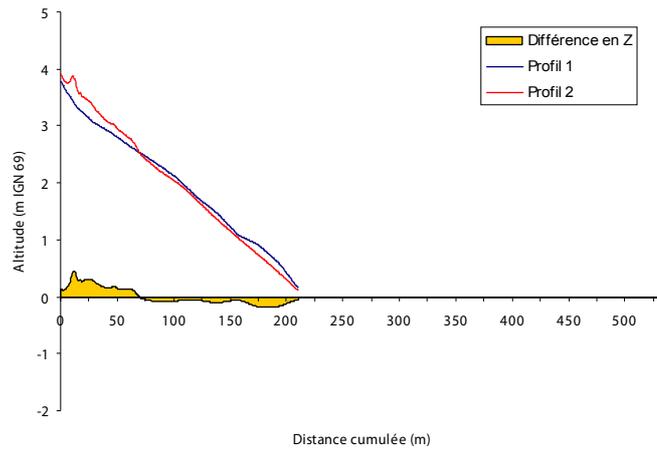


29.06.11 au 26.10.11



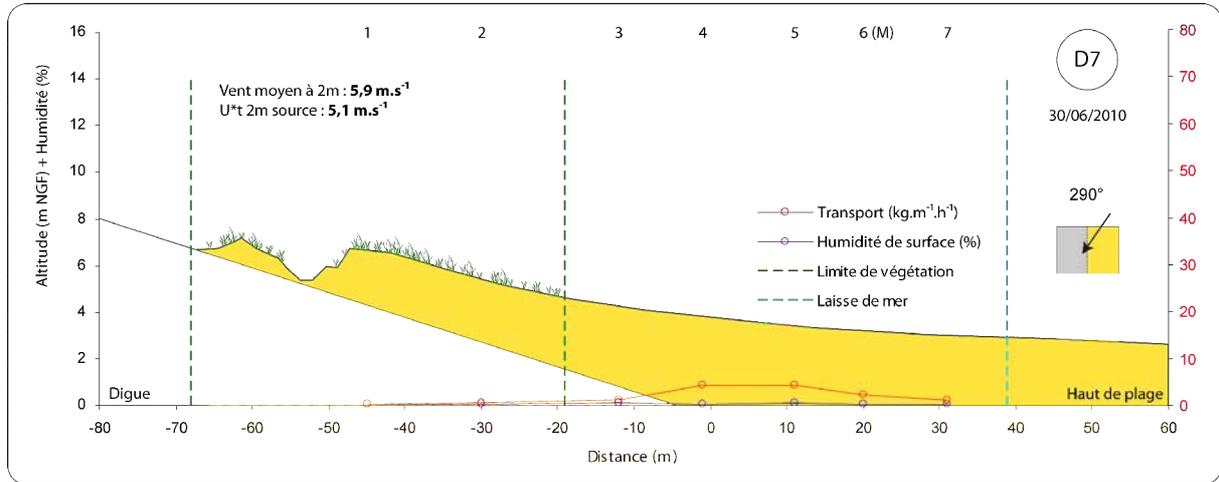
Bilan 01.04.10 au 26.10.11

Annexe 3.28 : Profil D7 - Estran

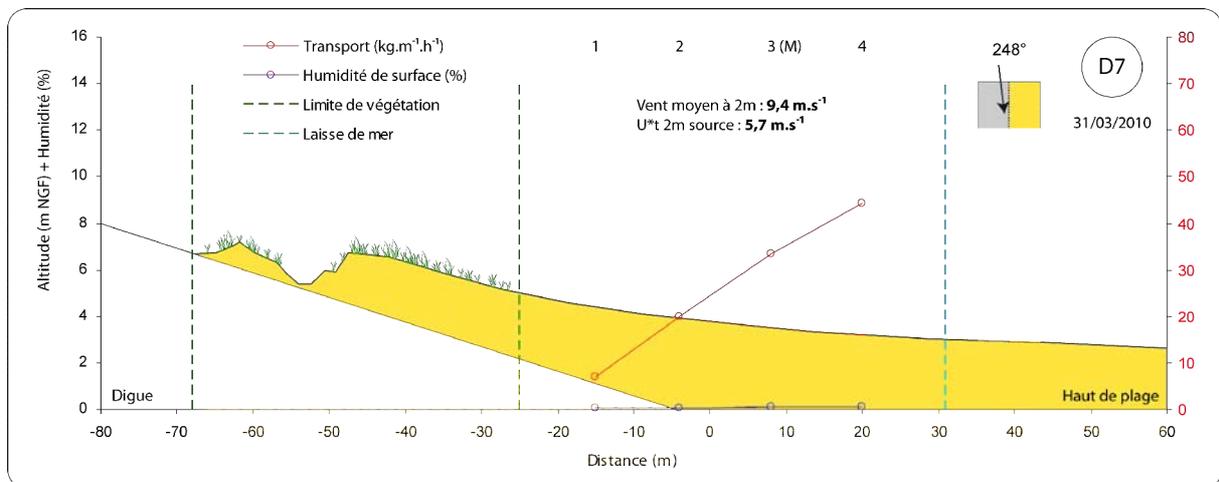
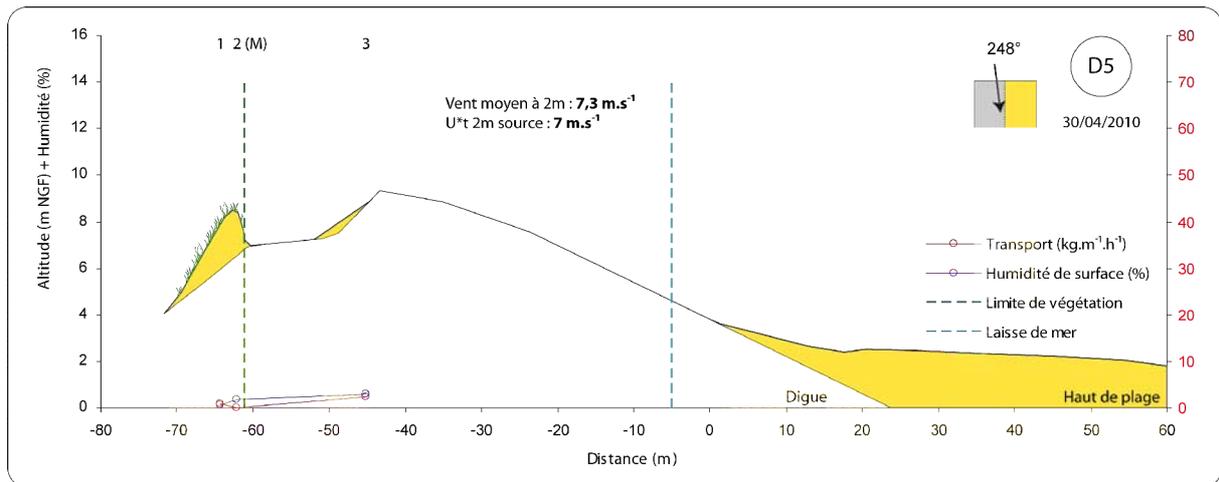


ANNEXE 4 : Piégeages du printemps 2010 au niveau de la digue du Braek à l'aide de pièges verticaux de type Leatherman

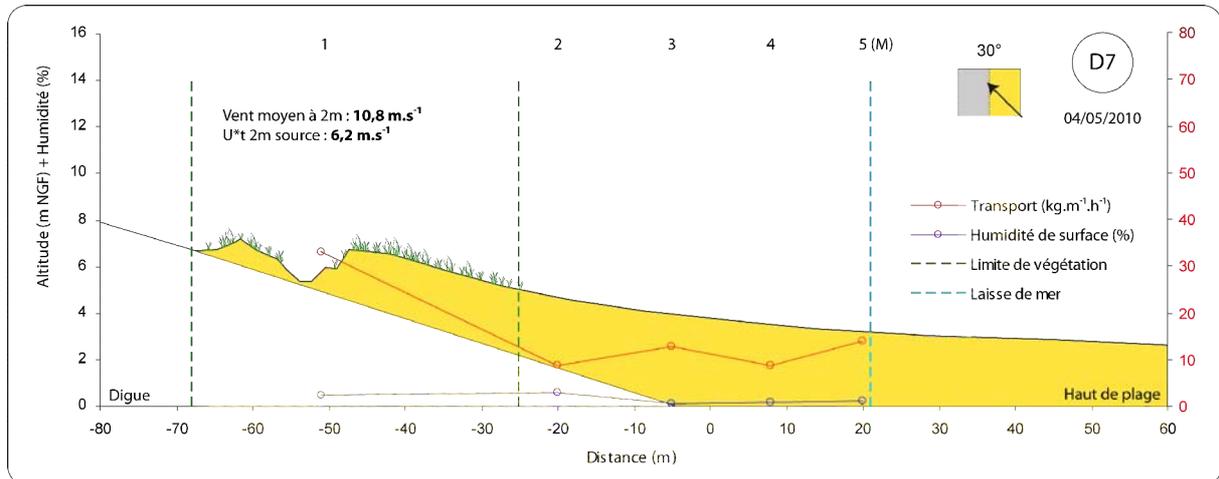
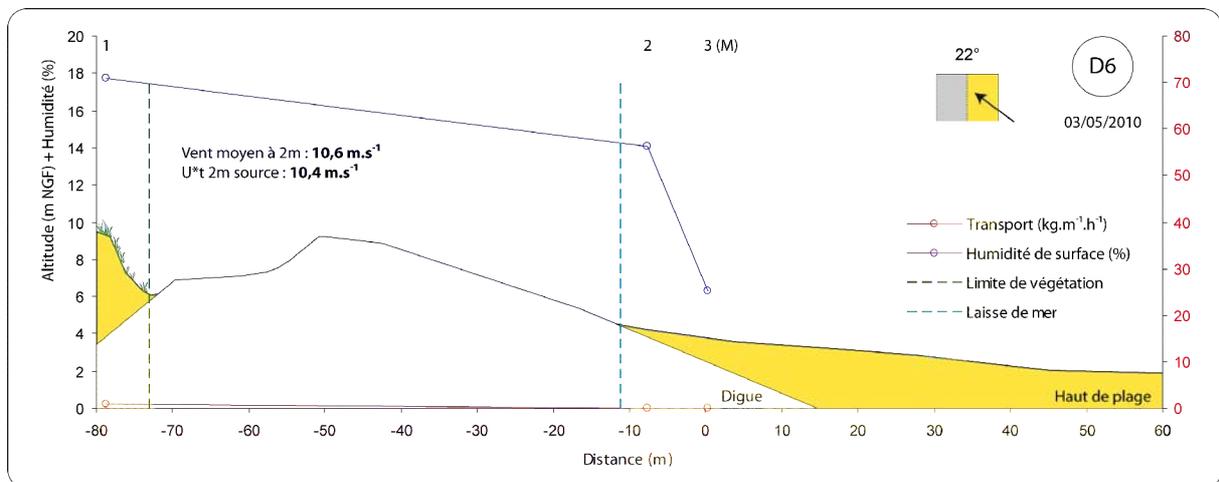
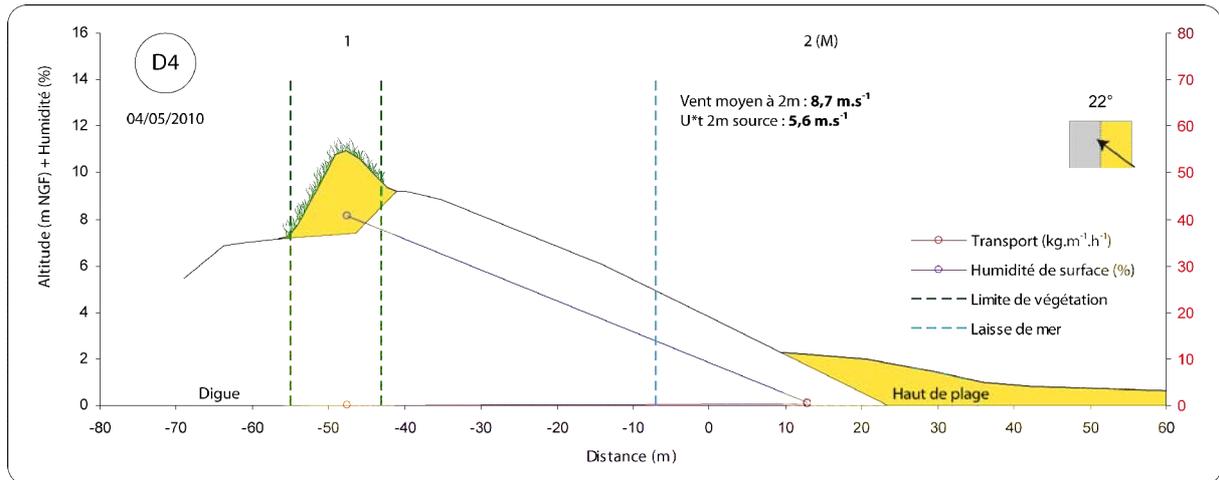
Annexe 4.1 : Vent longitudinal d'ONO



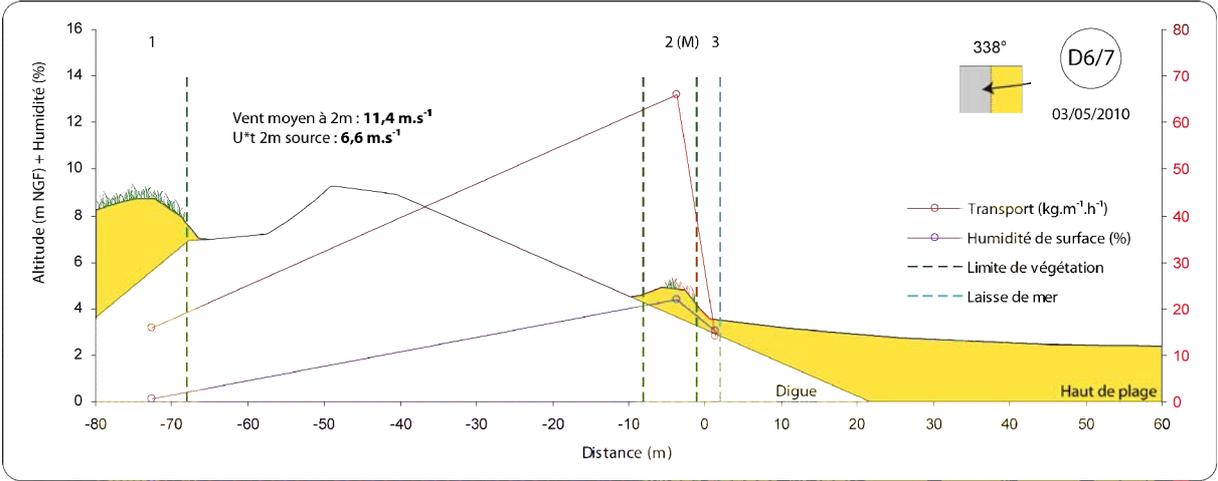
Annexe 4.2 : Vent longitudinal d'OSO



Annexe 4.3 : Vent frontal oblique de NNE

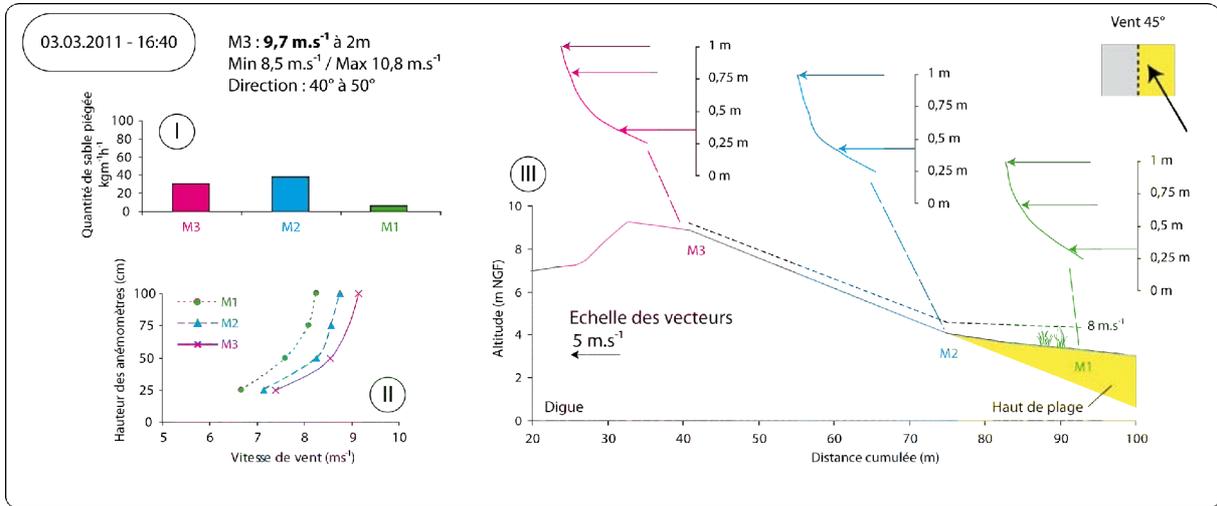


Annexe 4.4 : Vent frontal de NNO

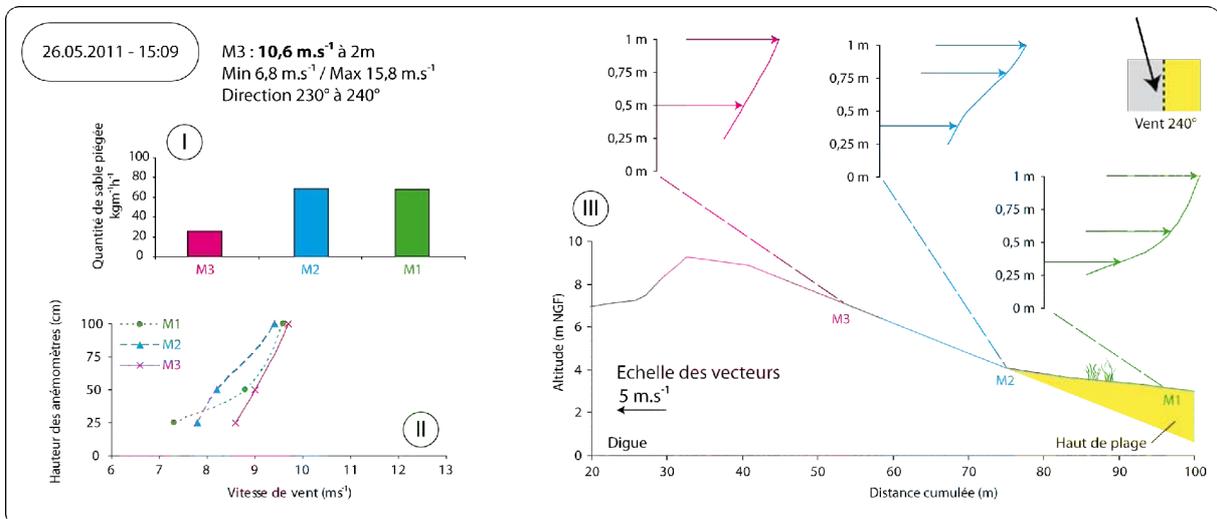
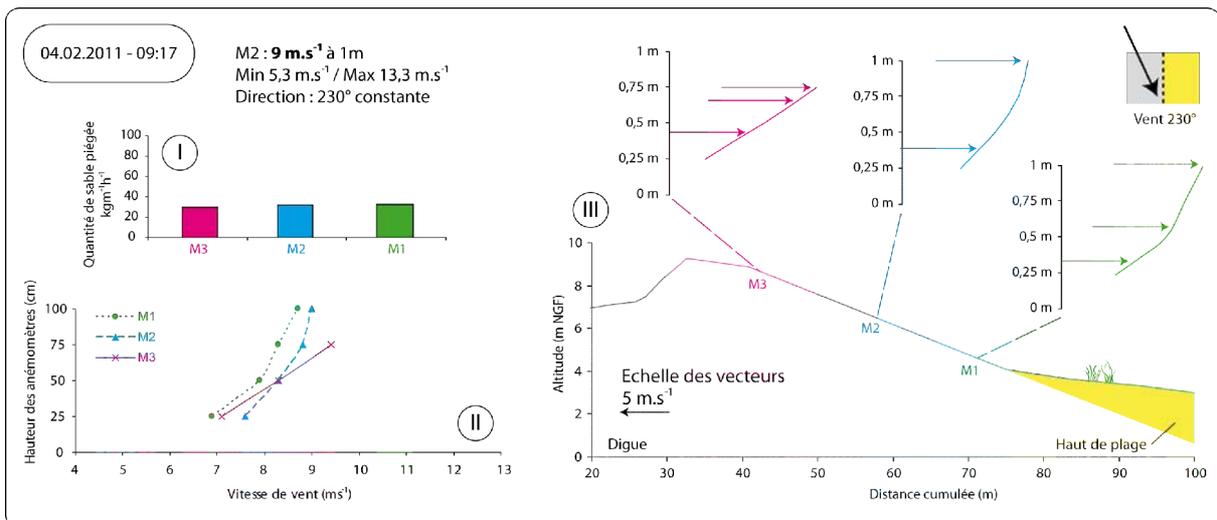


ANNEXE 5 : Piégeages complémentaires du printemps 2011 au niveau de la digue du Braek à l'aide de pièges verticaux triangulaires

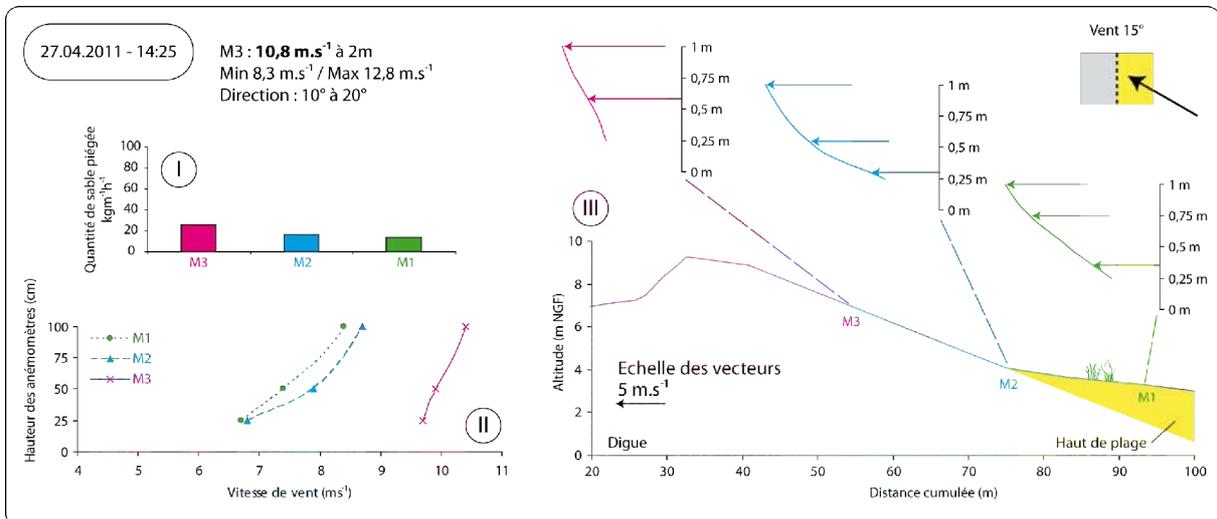
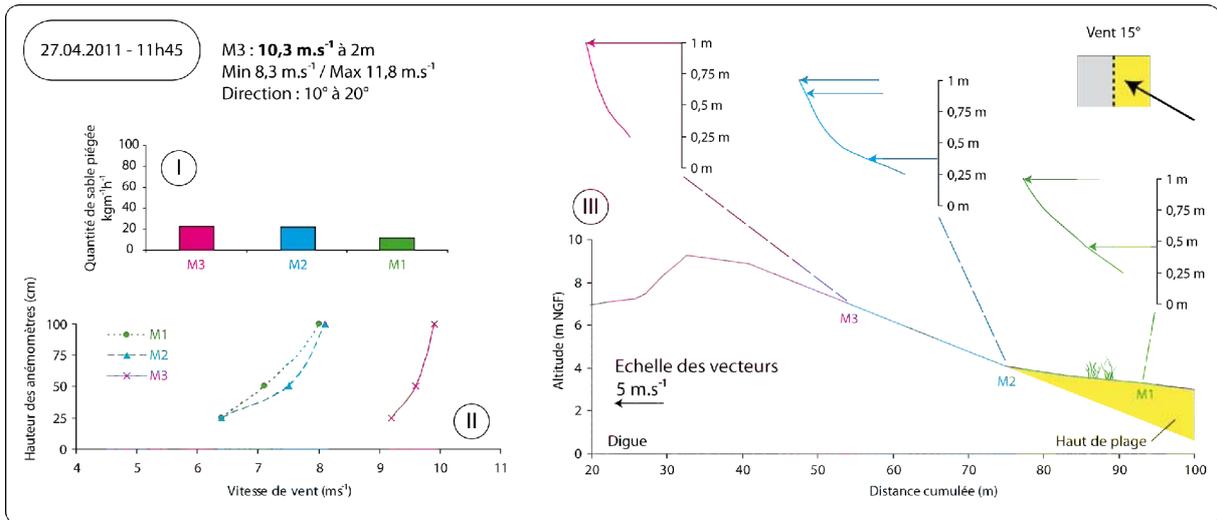
Annexe 5.1 : Versant externe de la digue par vent longitudinal à oblique de NE



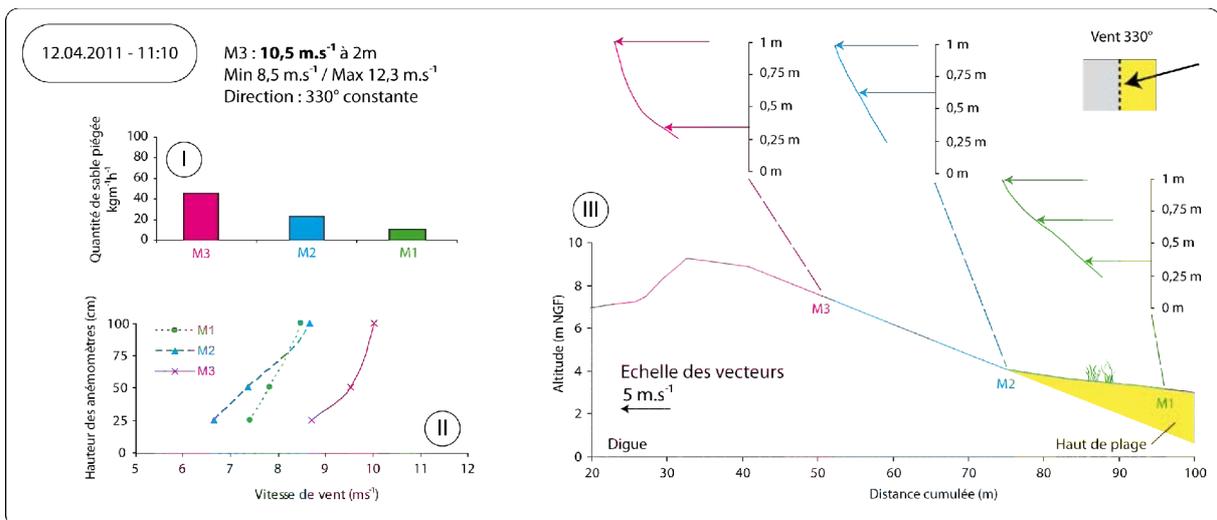
Annexe 5.2 : Versant externe de la digue par vent longitudinal d'OSO



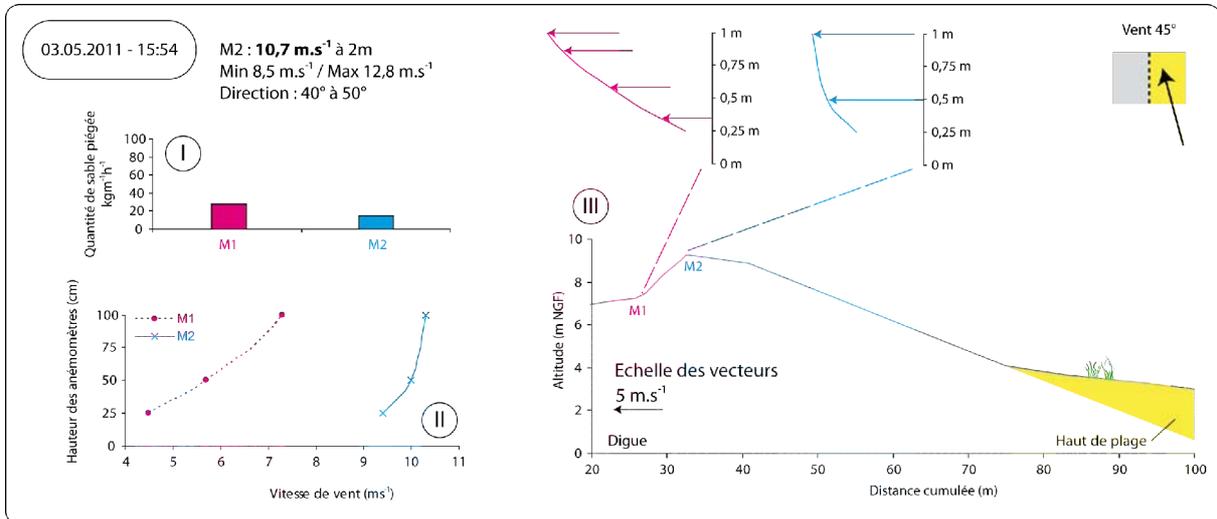
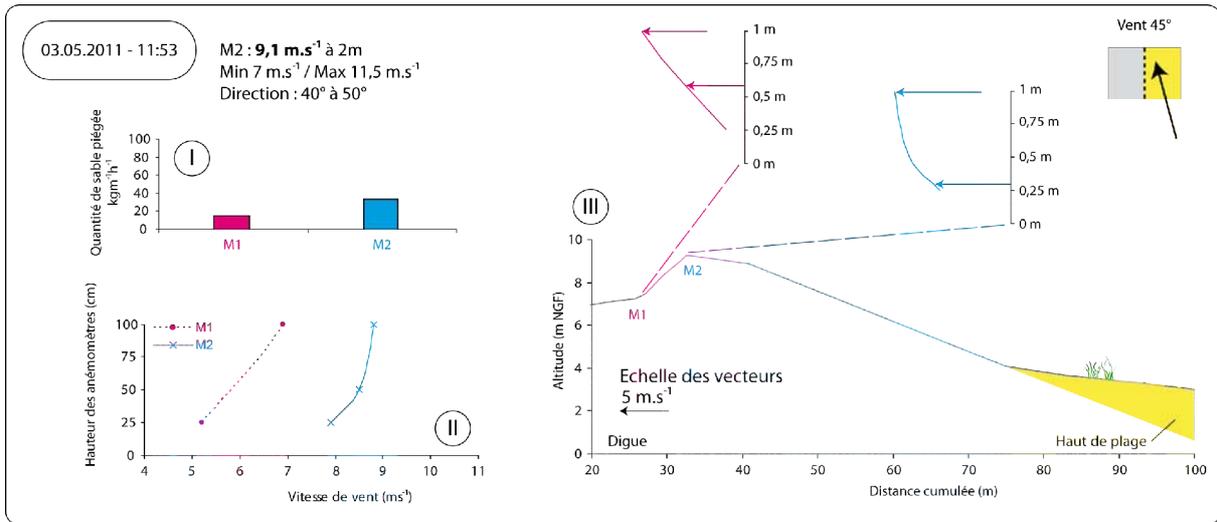
Annexe 5.3 : Versant externe de la digue par vent oblique de NNE



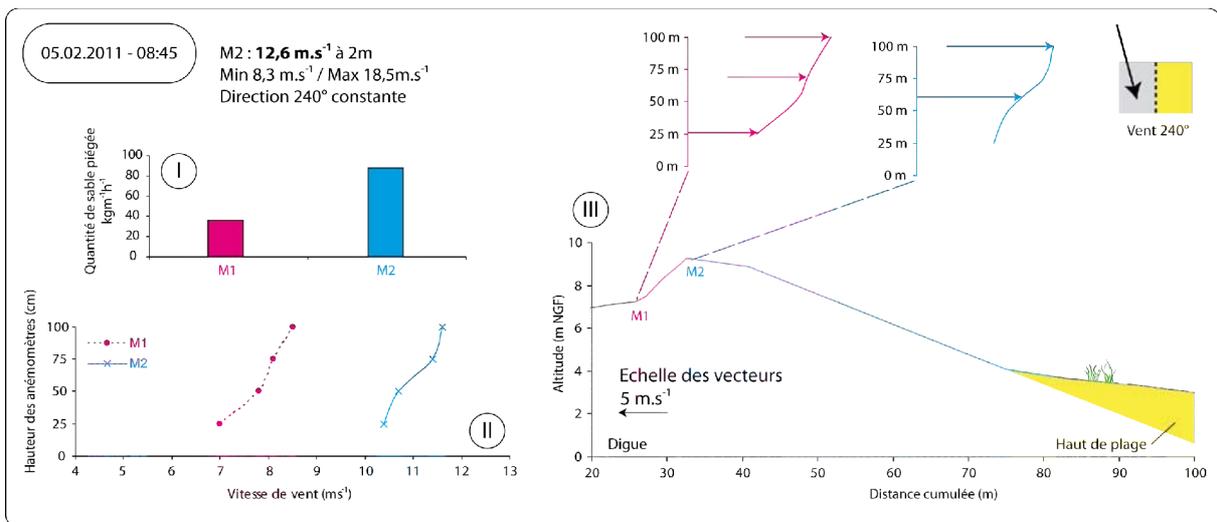
Annexe 5.4 : Versant externe de la digue par vent frontal de NNO



Annexe 5.5 : Versant interne de la digue par vent longitudinal de NE



Annexe 5.6 : Versant interne de la digue par vent longitudinal d'OSO



ANNEXE 6 : Tableau récapitulatif des volumes journaliers, conditions de vent, précipitations et niveaux d'eau pour les structures installées sur la plage du Clipon

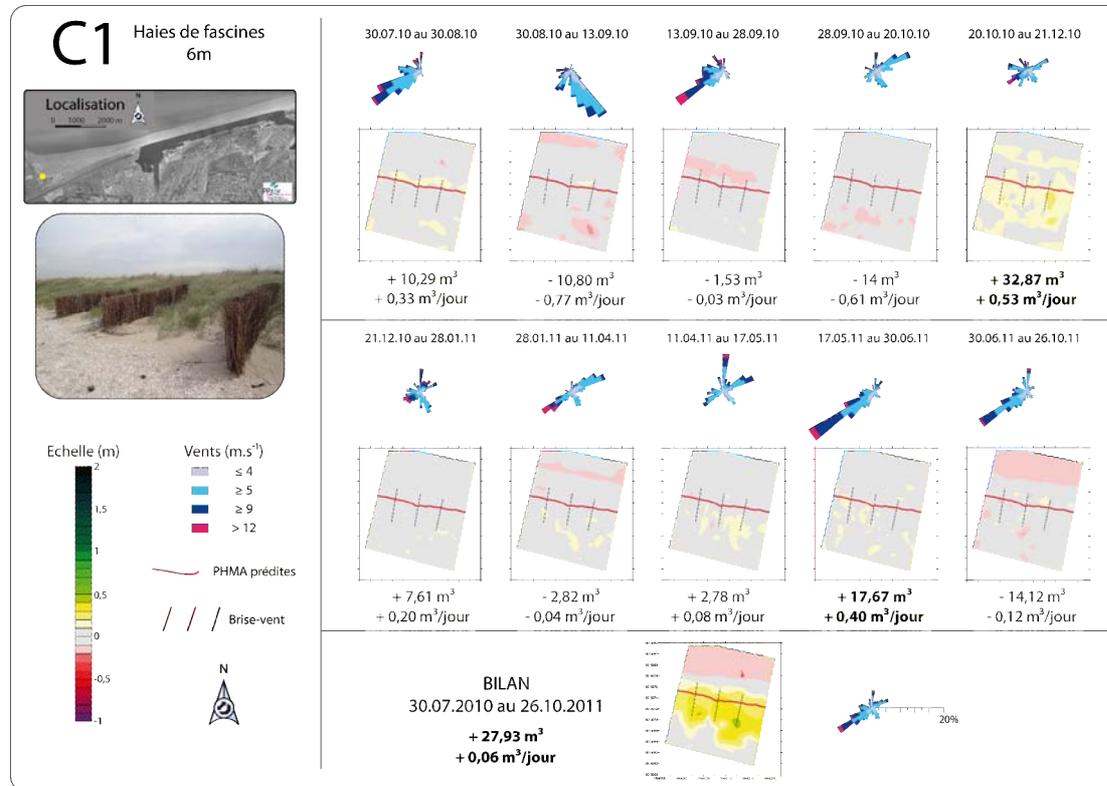
VOLUMES MOYENS PAR JOUR (m3)												
	30/07/10 au 30/08/10	30/08/10 au 13/09/10	13/09/10 au 28/09/10	28/09/10 au 20/10/10	20/10/10 au 21/12/10	21/12/10 au 28/01/11	28/01/11 au 11/04/11	11/04/11 au 17/05/11	17/05/11 au 30/06/11	30/06/11 au 26/10/11	30/07/10 au 26/10/11	
C1	0,34	-0,55	0,01	-0,34	0,39	0,11	0,05	0,12	0,27	-0,01	0,09	Dune
C2	0,18	0,19	-0,11	-0,06	0,55	0,29	0,32	0,53	0,42	0,24	0,28	
C3a	0,43	-0,27	-0,10	0,21	0,26	0,21	0,14	0,12	0,37	-0,05	0,12	
C3b	0,11	-0,10	-0,14	-0,07	0,05	0,00	-0,02	0,06	0,14	-0,07	-0,01	
C3c	0,44	0,40	-0,17	0,18	0,89	2,25	0,12	0,68	1,18	0,21	0,55	
C3d	0,25	-0,23	-0,12	0,07	0,20	0,42	-0,15	0,01	0,26	0,05	0,08	
C3e	0,14	-0,14	-0,05	0,17	0,17	0,49	-0,16	-0,12	0,21	-0,02	0,05	
C1	-0,01	-0,23	-0,04	-0,27	0,14	0,09	-0,08	-0,04	0,13	-0,11	-0,03	Plage
C2	-0,07	-0,17	-0,07	-0,34	0,21	-0,01	-0,02	-0,02	0,07	0,01	0,00	
C3a	-0,06	0,32	-0,20	-0,19	0,01	0,01	0,03	0,01	0,08	-0,03	-0,01	
C3b	-0,09	0,07	-0,08	-0,13	0,01	0,01	-0,01	0,01	0,04	-0,04	-0,02	
C3c	-0,42	0,15	-0,34	-0,65	0,20	-0,03	-0,05	0,28	0,33	0,01	-0,02	
C3d	-0,15	0,07	-0,18	-0,15	0,04	-0,03	0,01	0,07	-0,03	-0,01	-0,03	
C3e	-0,28	0,38	-0,22	-0,26	0,18	0,00	-0,05	0,04	0,03	-0,05	-0,03	
C1	0,33	-0,77	-0,03	-0,61	0,53	0,20	-0,04	0,08	0,40	-0,12	0,06	Total
C2	0,11	0,02	-0,18	-0,41	0,76	0,29	0,31	0,51	0,49	0,24	0,28	
C3a	0,38	0,05	-0,30	0,02	0,27	0,22	0,17	0,13	0,44	-0,07	0,11	
C3b	0,02	-0,04	-0,22	-0,20	0,05	0,01	-0,02	0,07	0,18	-0,11	-0,03	
C3c	0,02	0,55	-0,51	-0,47	1,09	2,21	0,07	0,97	1,51	0,22	0,54	
C3d	0,10	-0,16	-0,29	-0,08	0,25	0,39	-0,13	0,09	0,23	0,04	0,05	
C3e	-0,13	0,24	-0,27	-0,10	0,35	0,49	-0,21	-0,08	0,24	-0,07	0,02	
C1	0,10	0,03	-0,03	-0,03	0,11	0,02	0,01	0,04	0,06	0,01	0,03	Structure
C2	0,04	0,15	-0,05	-0,06	0,18	0,06	0,13	0,19	0,12	0,05	0,08	
C3a	0,14	-0,03	-0,04	0,05	0,09	0,04	0,07	-0,01	0,13	-0,05	0,03	
C3b												
C3c	0,16	0,12	-0,07	0,33	0,52	1,27	0,33	0,10	0,81	0,08	0,34	
C3d	0,07	-0,06	-0,05	0,01	0,10	0,14	-0,04	-0,06	0,10	0,00	0,02	
C3e	0,07	-0,02	-0,01	0,02	0,10	0,18	-0,05	-0,18	0,13	-0,01	0,02	
VENTS (Direction °)												
Frontaux	18,7	2,1	19,8	12,1	14,1	17,0	6,5	22,7	10,2	17,0	14,1	
Longitudinaux Ouest	68,5	33,3	61,9	23,8	39,0	32,5	32,4	28,5	64,0	56,3	45,0	
Longitudinaux Est	3,6	3,0	3,5	37,2	22,2	23,6	39,6	32,3	12,1	11,3	21,3	
Longitudinaux	72,1	36,2	65,4	61,0	61,2	56,0	72,0	60,7	76,1	67,5	66,3	
De terre	9,2	61,6	14,7	27,0	24,7	27,0	21,6	16,6	13,6	15,5	19,6	
VENTS (Vitesse m.s ⁻¹)												
<= 4m.s ⁻¹	26,3	34,7	34,1	38,6	28,8	26,5	34,4	38,8	29,0	34,1	31,6	
>4 et <= 8 m.s ⁻¹	49,7	55,4	34,7	50,2	48,9	45,8	49,5	44,9	47,6	49,8	49,2	
>8 et <= 12 m.s ⁻¹	18,1	9,3	22,0	10,5	17,5	22,1	11,1	14,8	20,4	14,1	15,6	
>12 m.s ⁻¹	6,0	0,6	9,2	0,7	4,8	5,6	5,0	1,5	3,0	2,1	3,6	
PRECIPITATIONS												
DRR (min)	6660	1284	1972	4037	12588	10204	8947	1171	3739	11676	62278	
RR (mm)	105,2	28,9	36,5	44,7	162,3	66,1	61,4	9,7	61,7	201,7	778,2	
DRR/jour (min)	214,8	91,7	123,3	183,5	206,4	268,5	122,6	32,5	87,0	98,9		
RR/jour (mm)	3,4	2,1	2,3	2,0	2,7	1,7	0,8	0,3	1,4	1,7		
NIVEAUX D'EAU (nombre)												
Port Est > PHMA 3,787 m NGF	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
REFMAR > PMVE 3,357 m NGF	24	20	9	21	34	14	19	14	8	56	219	
Port Ouest > PHMA 4,036 m NGF	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
GPMD > PMVE 3,556 m NGF	13	17	6	17	15	3	16	6	3	29	125	

ANNEXE 7 : Tableau récapitulatif des volumes journaliers, conditions de vent, précipitations et niveaux d'eau pour les structures installées sur la digue du Braeck

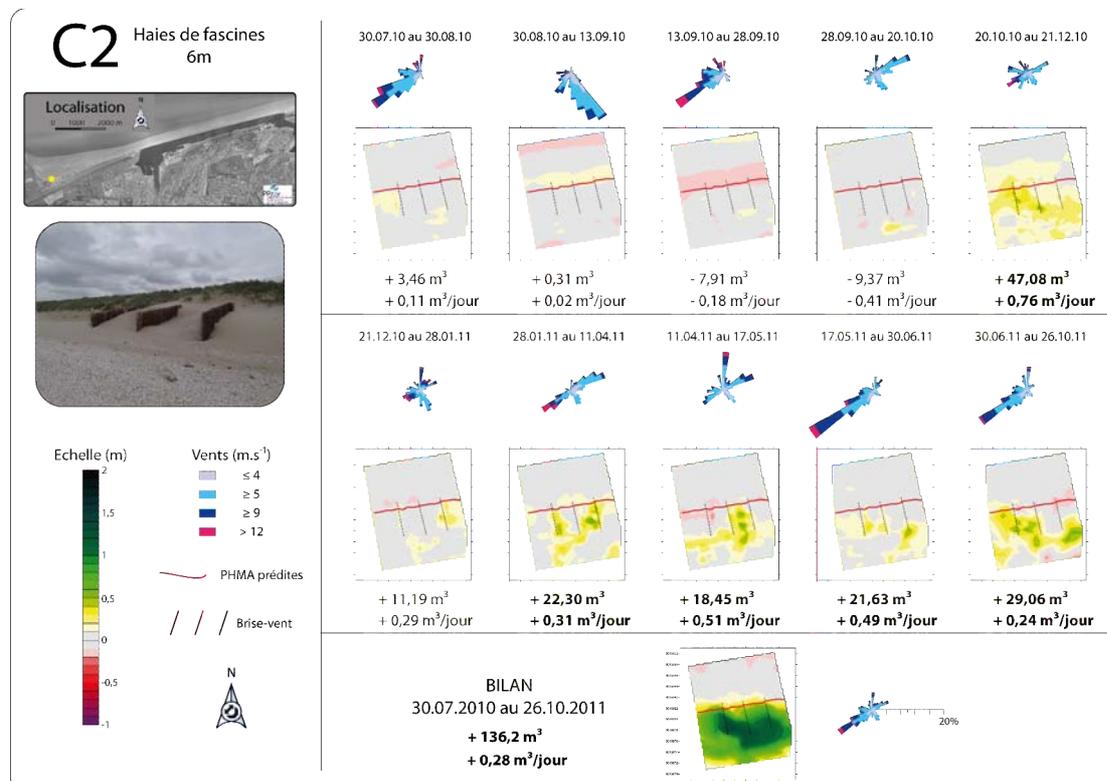
VOLUMES MOYENS PAR JOUR (m3)									
	14.02.11- 04.03.11	04.03.11- 11.04.11	11.04.11- 10.05.11	10.05.11- 14.06.11	14.06.11- 28.07.11	28.07.11- 15.09.11	15.09.11- 21.12.11	14.02.11- 21.12.11	
D1	0,97	0,26	0,16	0,24	0,01	0,03	0,59	0,32	Total
D2	0,08	0,13	0,20	0,39	-0,15	-0,13	0,17	0,09	
D3	-0,12	0,10	-0,05	0,15	0,00	0,14	0,05	0,06	
D4	-0,28	0,08	-0,17	0,13	-0,01	0,06	0,05	0,01	
D5	0,07	0,12	-0,01	0,25	0,13	0,03	0,00		
D6	-0,10	0,10	-0,12	0,05	-0,02	0,06	0,03	0,02	
D7			0,41	0,69	0,37	-0,33	-0,07		
D4a			-0,03						
D4b			-0,05	0,03	0,01				
D4c			0,01	-0,01					
D1	0,44	0,09	0,18	0,12	-0,05	-0,10	0,12	0,08	Structure
D2									
D3	0,07	0,00	0,02	0,07	0,02	0,03	0,02	0,03	
D4	0,02	-0,01	-0,04	0,03	0,01	0,02	0,03	0,01	
D5	0,08	0,03	-0,02	0,09	0,00	0,00			
D6	0,03	0,00	-0,04	0,02	0,00	0,02	0,02	0,01	
D7			0,08	0,07	0,07	-0,01	0,01		
D4a			-0,03						
D4b			-0,01	0,00	0,02				
D4c			-0,02	0,00					
VENTS (Direction °)									
Frontaux	4,34	9,07	25,25	11,12	22,98	11,04	6,44		
Longitudinaux Ouest	21,35	27,36	14,24	66,01	52,90	63,08	41,09		
Longitudinaux Est	40,76	47,00	40,46	13,32	8,79	12,52	9,41		
Longitudinaux	62,11	74,35	54,70	79,33	61,69	75,59	50,50		
De terre	33,55	16,58	20,05	9,55	15,33	13,37	43,05		
VENTS (Vitesse m.s ⁻¹)									
<= 4m.s ⁻¹	30,4	43,5	43,8	26,6	31,9	31,4	35,4		
>4 et <= 8 m.s ⁻¹	57,5	44,5	39,0	53,6	47,2	50,2	45,0		
>8 et <= 12 m.s ⁻¹	11,7	10,1	15,3	17,6	18,2	16,0	15,8		
>12 m.s ⁻¹	0,5	1,9	1,9	2,2	2,7	2,5	3,8		
PRECIPITATIONS									
DRR (min)	4630	1990	940	2902	4524	1579	7030	23595	
RR (mm)	35,7	18,9	9,7	25,6	100,2	22,9	180,8	393,8	
DRR/jour (min)	257,2	52,4	32,4	80,6	102,8	32,2	72,5	630,1	
RR/jour (mm)	2,0	0,5	0,3	0,7	2,3	0,5	1,9	8,1	
NIVEAUX D'EAU									
Port Est REFMAR	> PHMA 3,787 m	0	0	0	0	0	5	5	
	> PMVE 3,357 m	8	11	13	6	4	37	128	
Port Ouest GPMD	> PHMA 4,036 m	0	0	0	0	0	2	2	
	> PMVE 3,556 m	7	9	6	3	0	18	79	

ANNEXE 8 – Cartographie différentielle des MNT classés par type de structure au niveau des quadrats installés sur la plage du Clipon

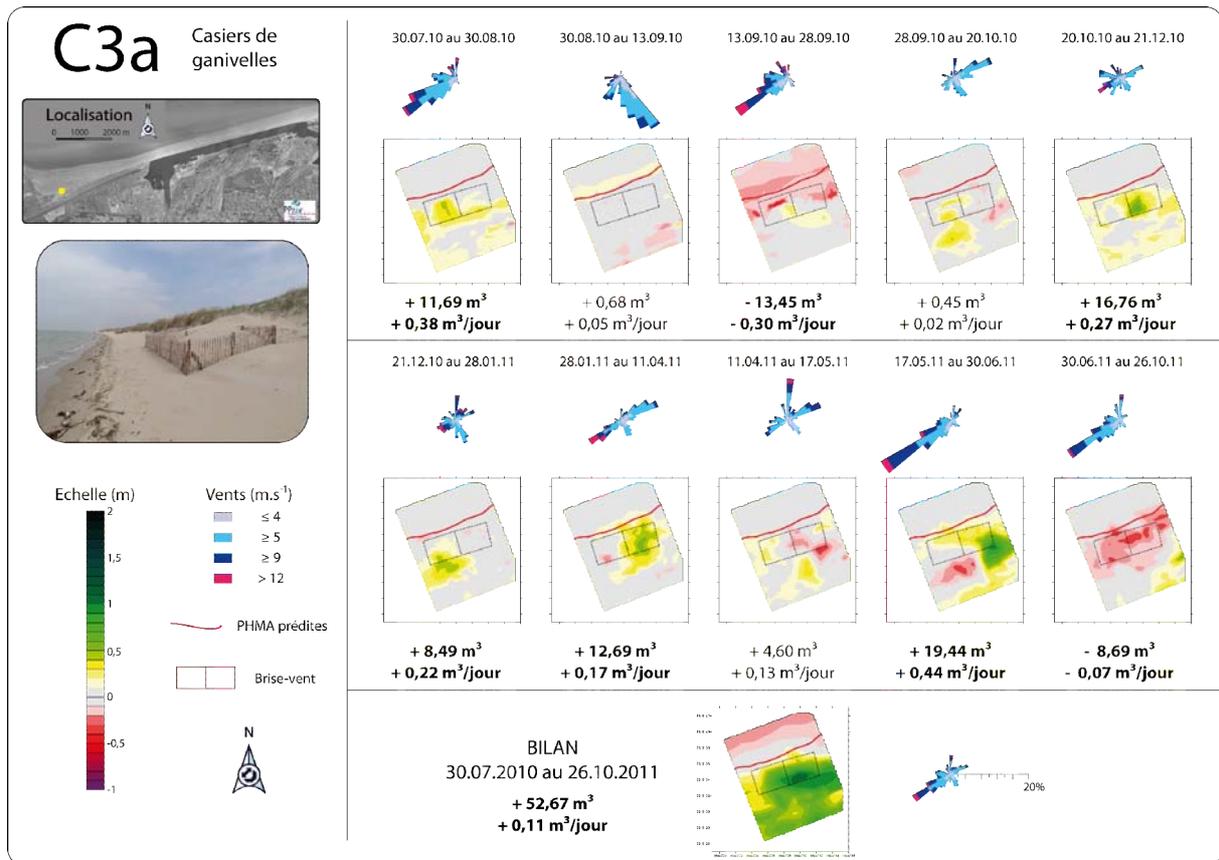
Annexe 8.1 : Structure C1



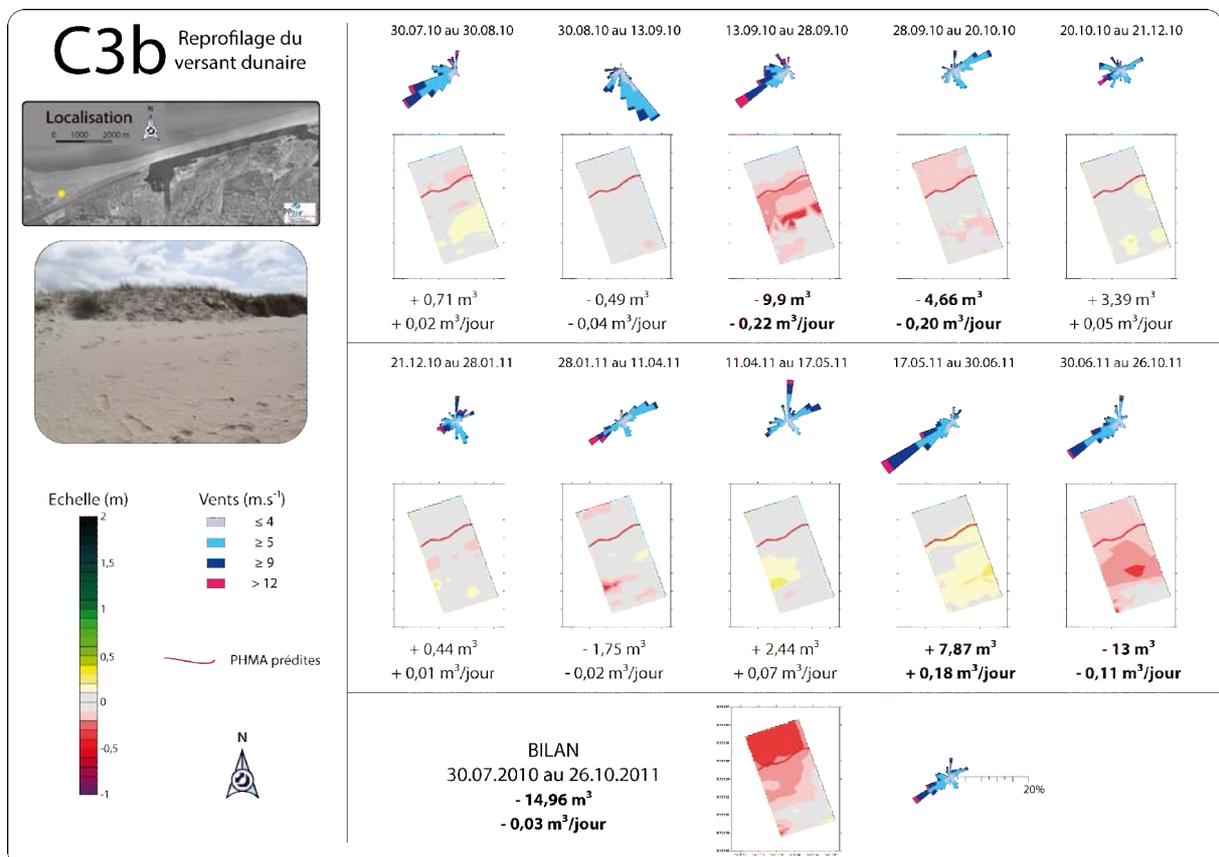
Annexe 8.2 : Structure C2



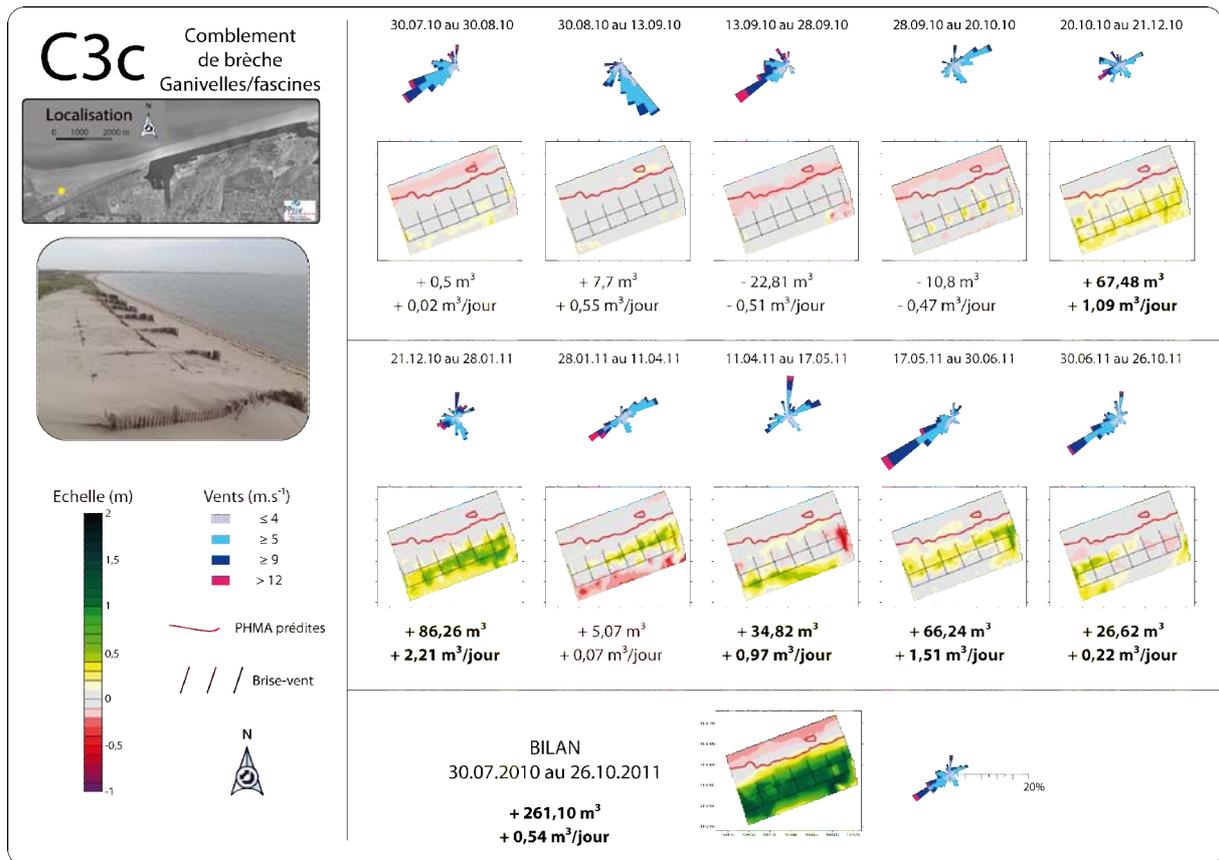
Annexe 8.3 : Structure C3a



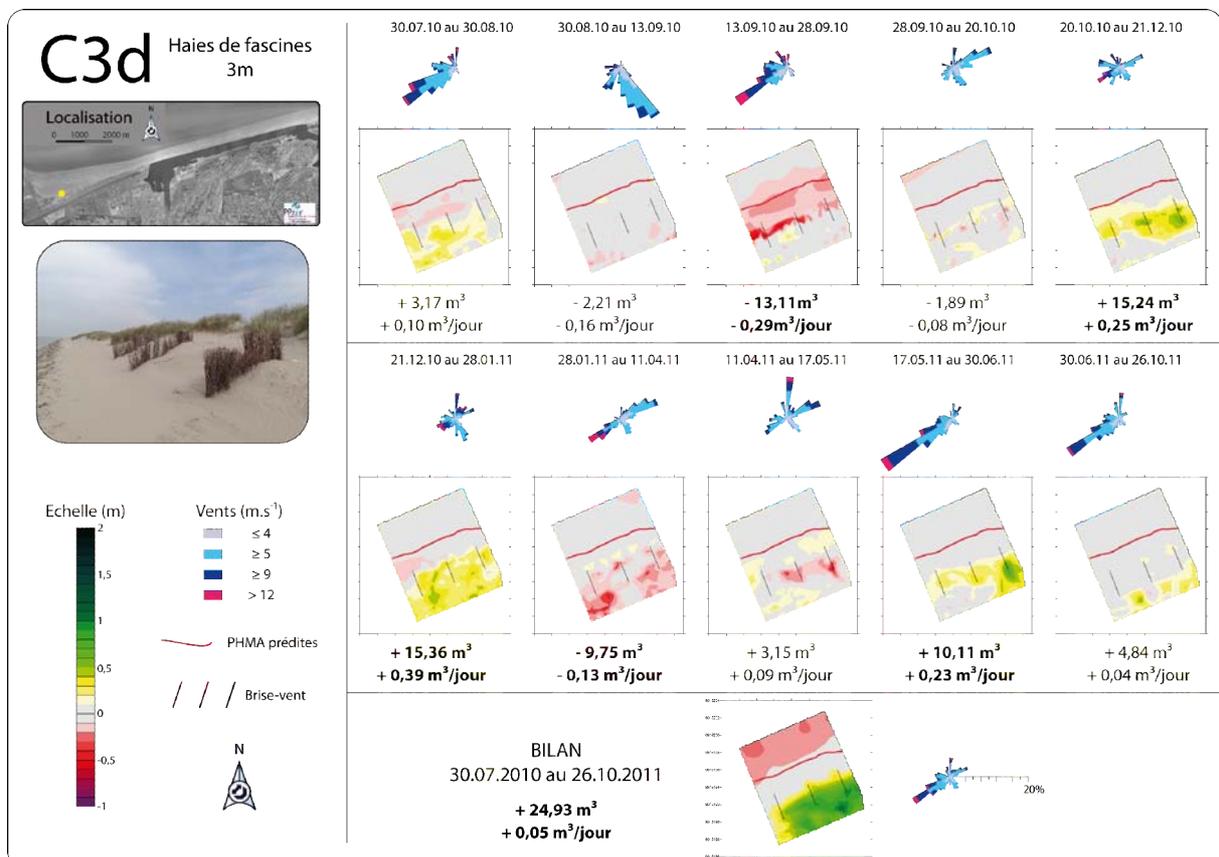
Annexe 8.4 : Structure C3b



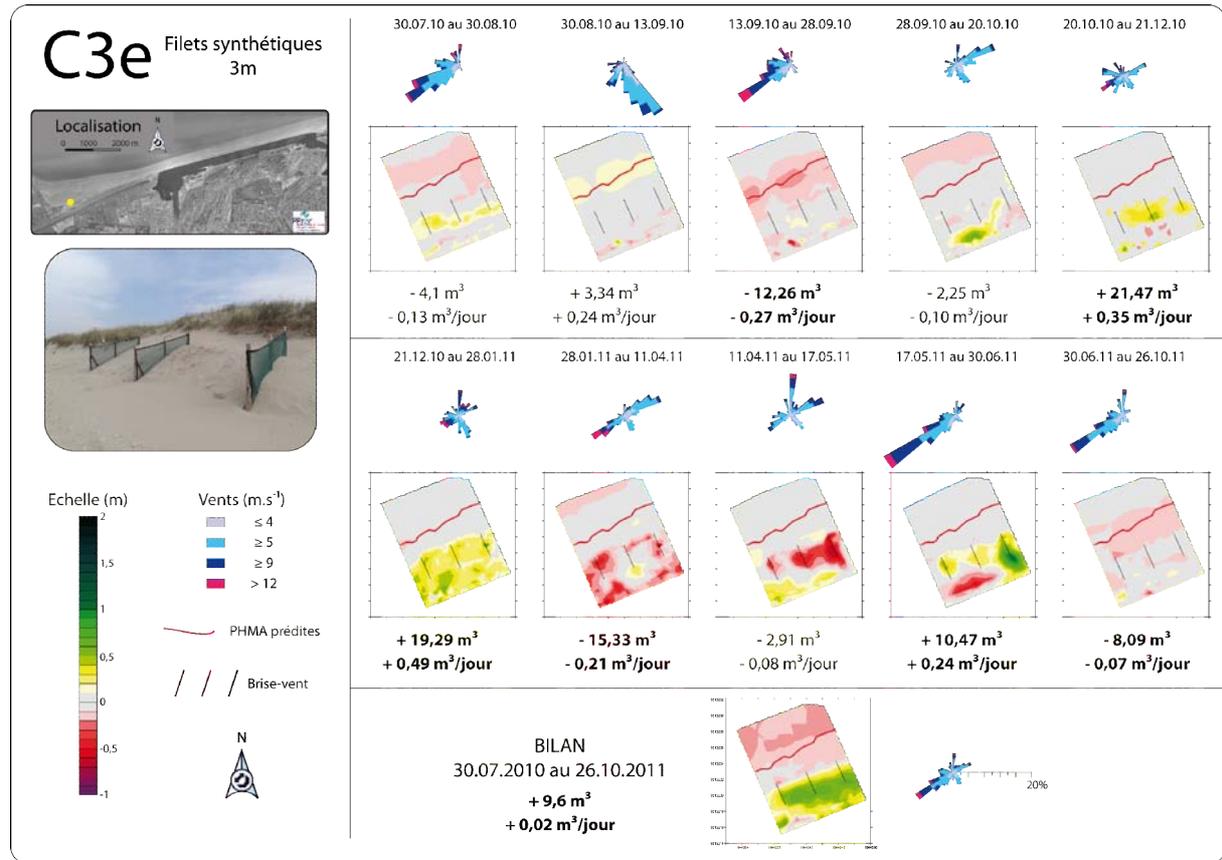
Annexe 8.5 : Structure C3c



Annexe 8.6 : Structure C3d

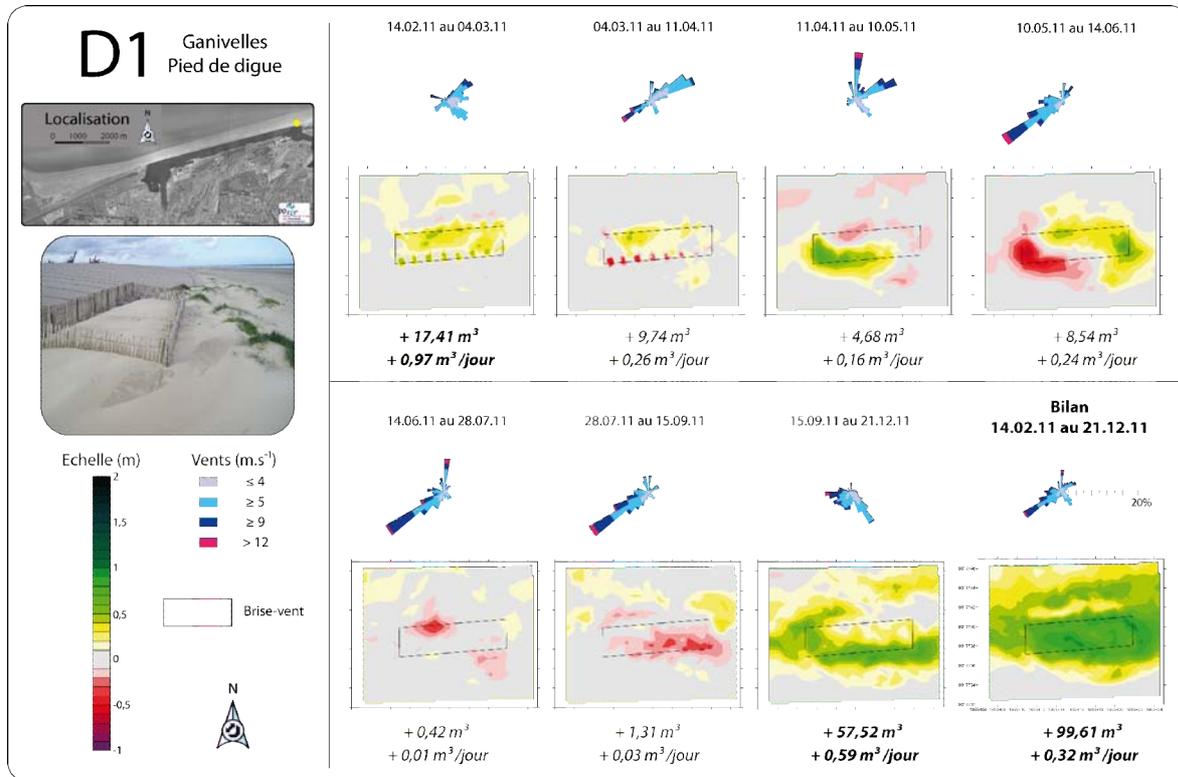


Annexe 8.7 : Structure C3e

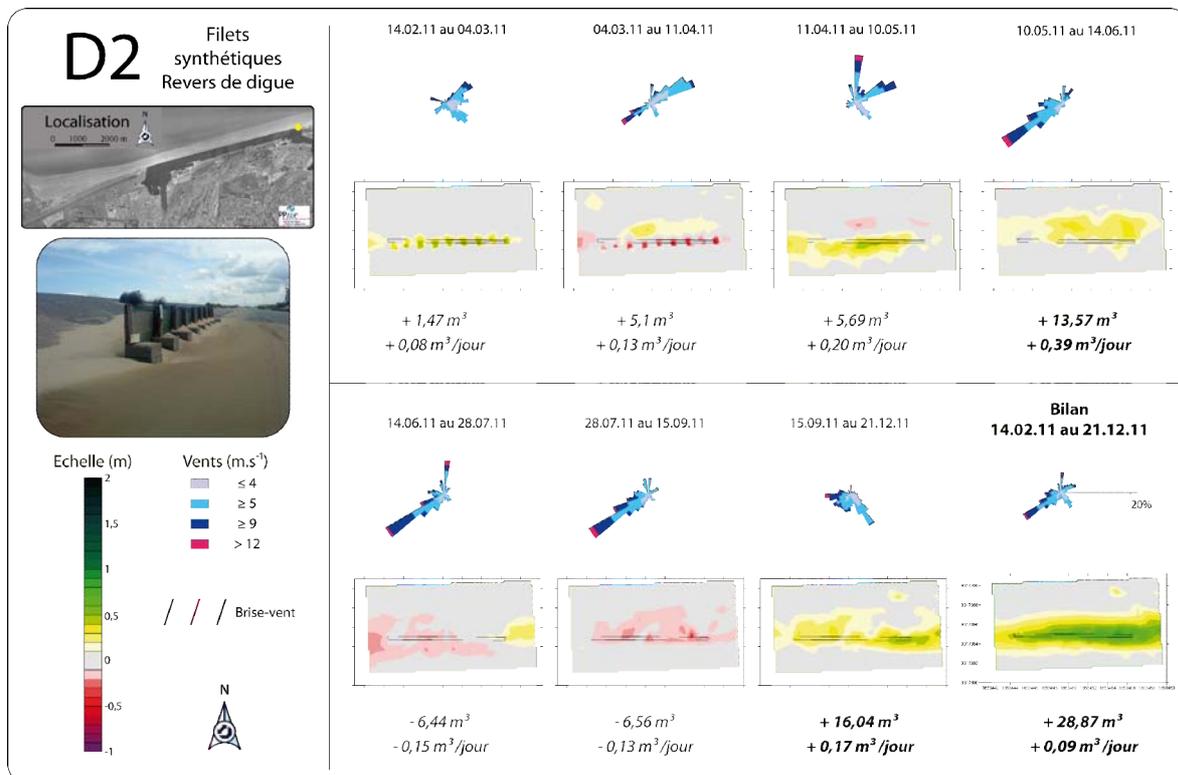


ANNEXE 9 – Cartographie différentielle des MNT classés par type de structure au niveau des quadrats installées sur la digue du Braek

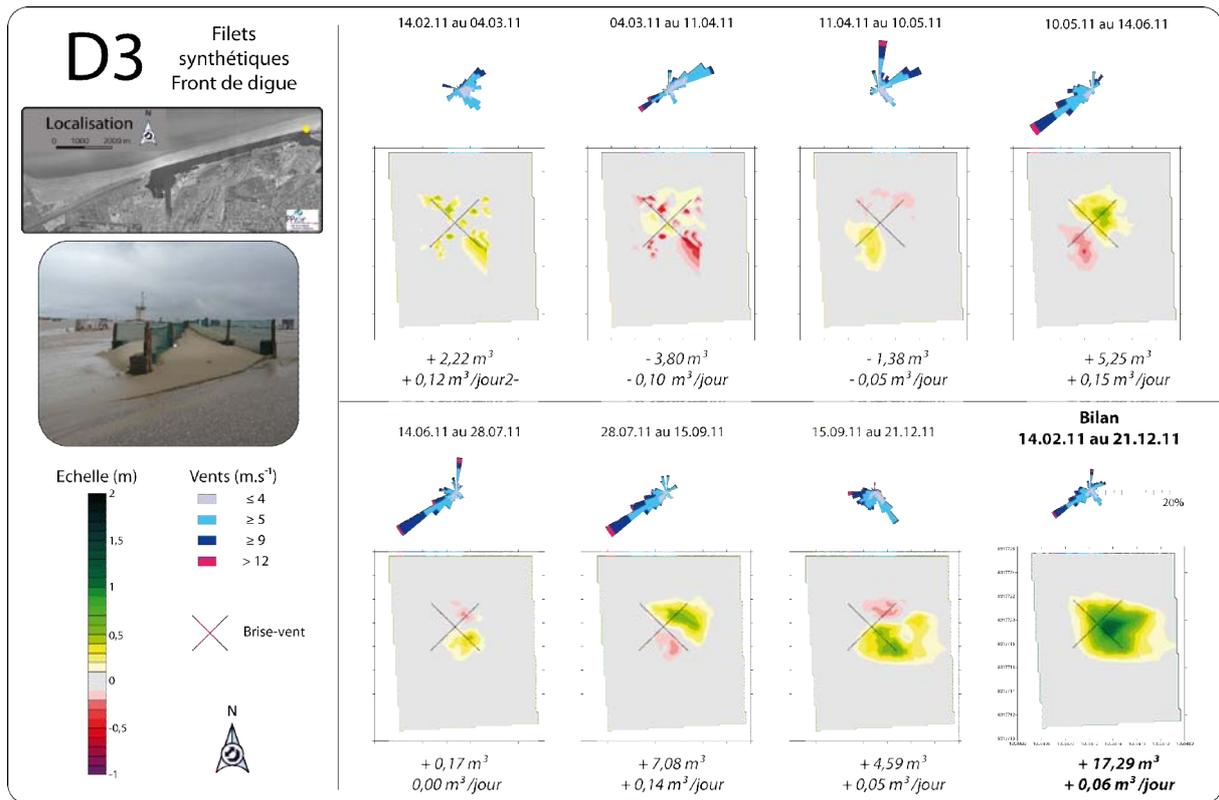
Annexe 9.1 : Structure D1



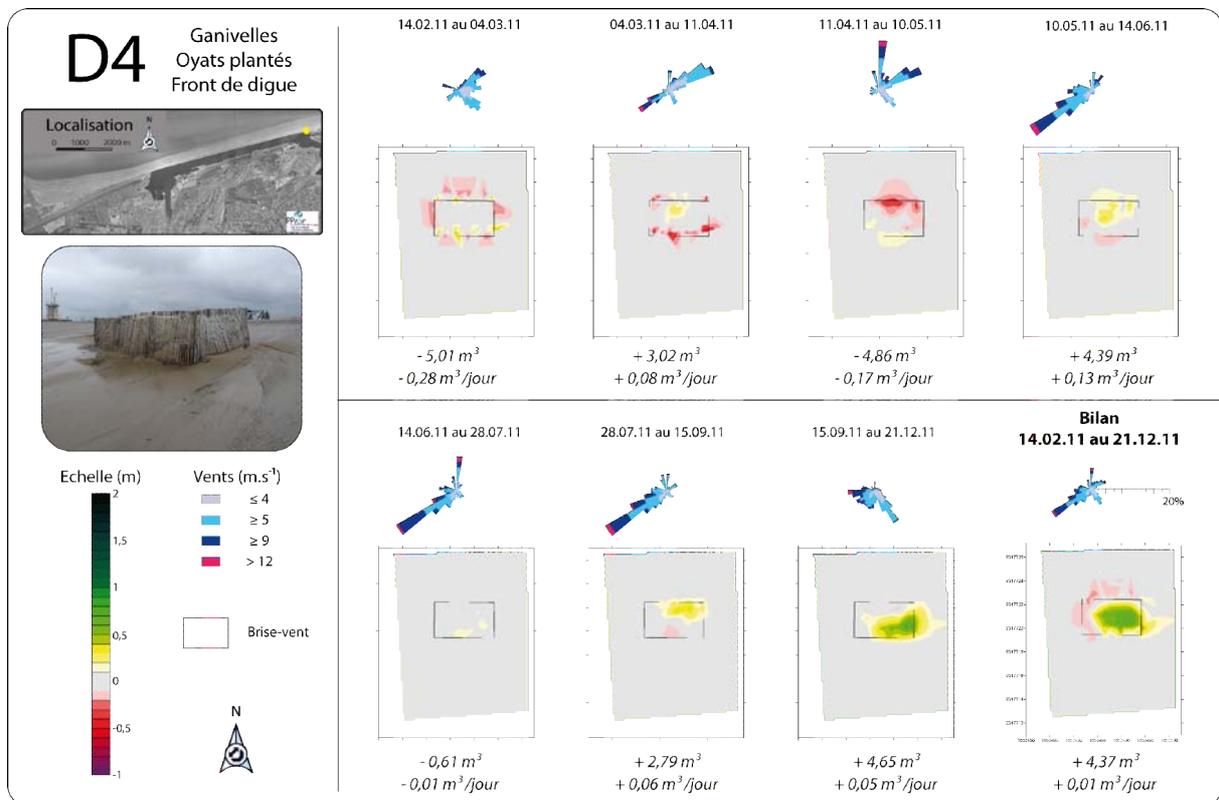
Annexe 9.2 : Structure D2



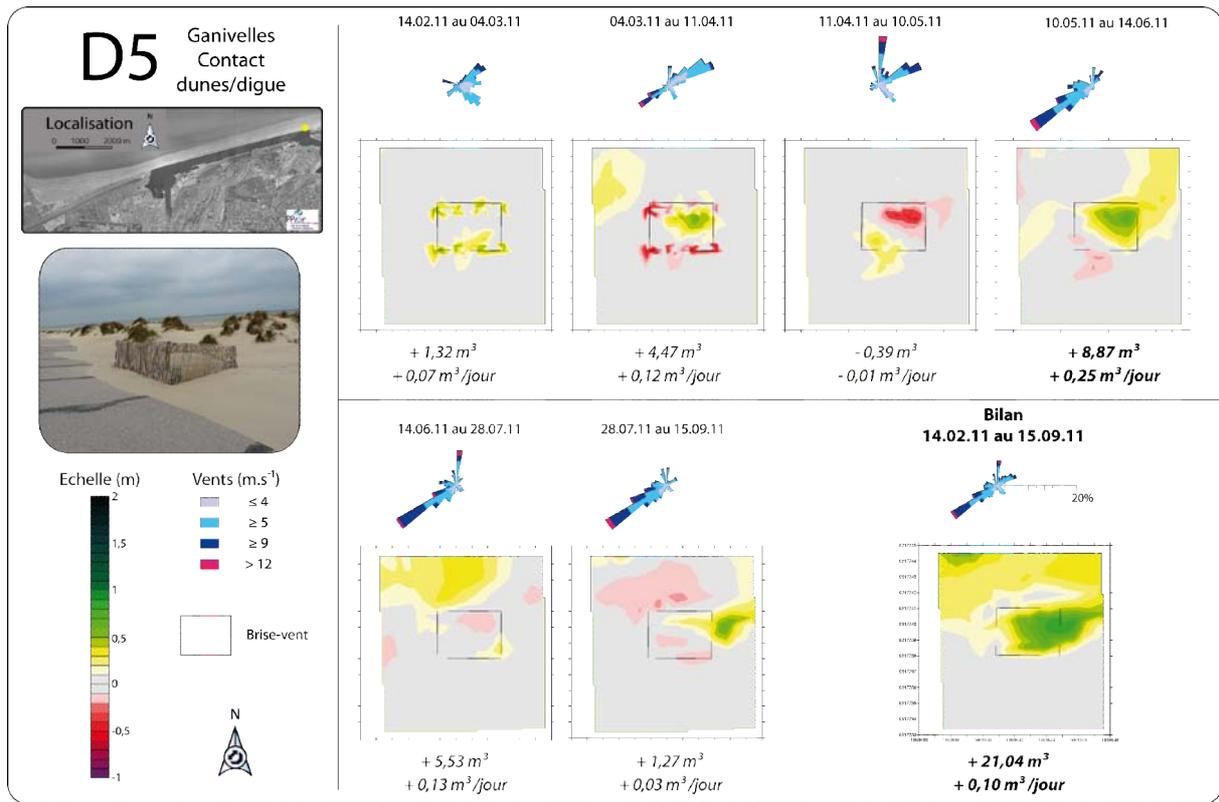
Annexe 9.3 : Structure D3



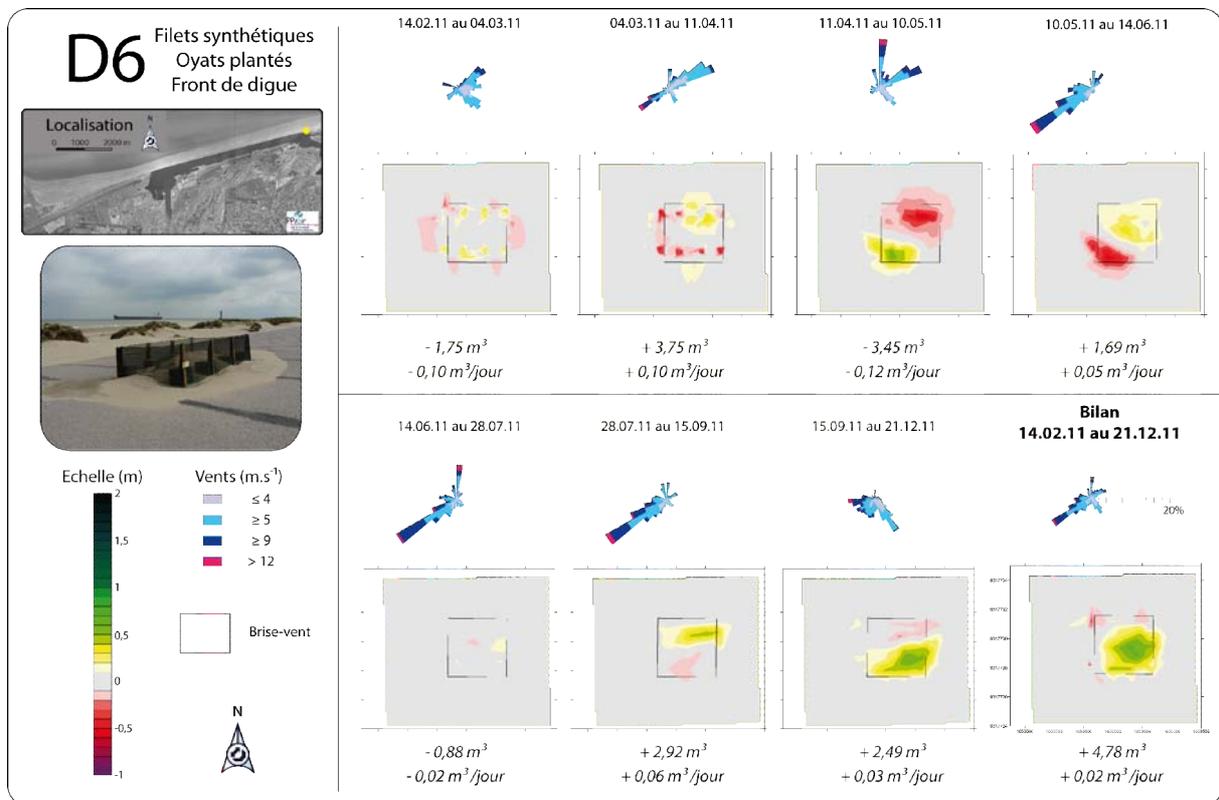
Annexe 9.4 : Structure D4



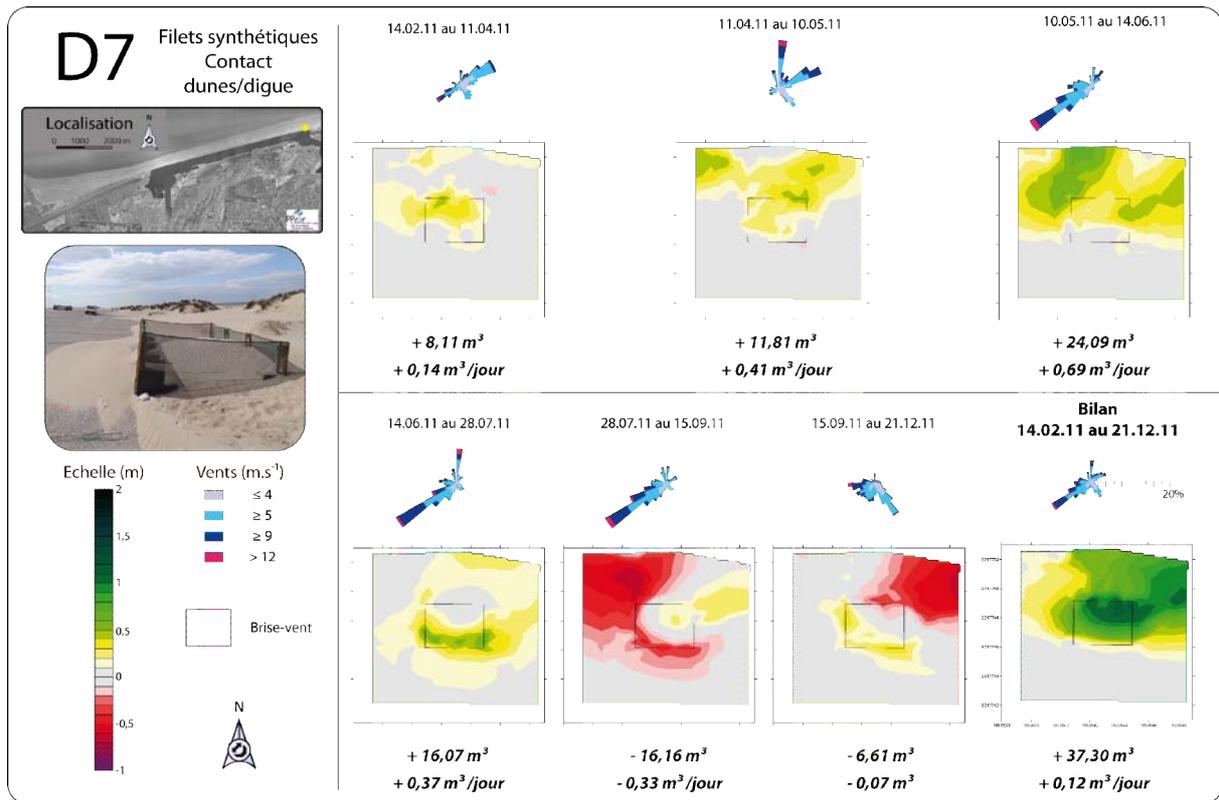
Annexe 9.5 : Structure D5



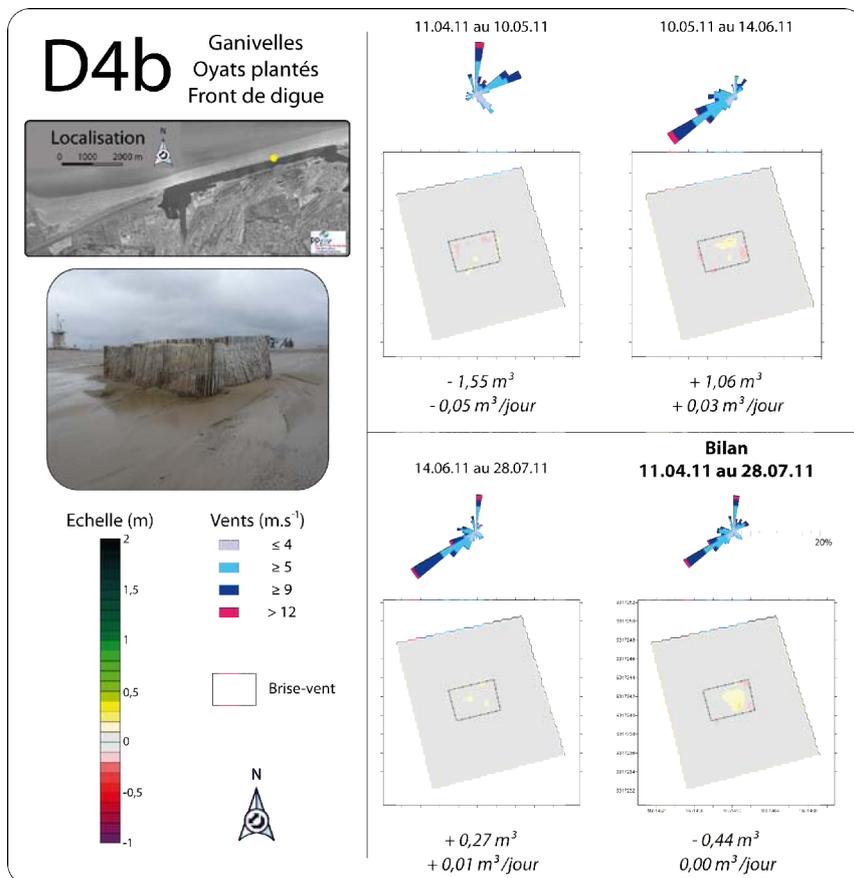
Annexe 9.6 : Structure D6



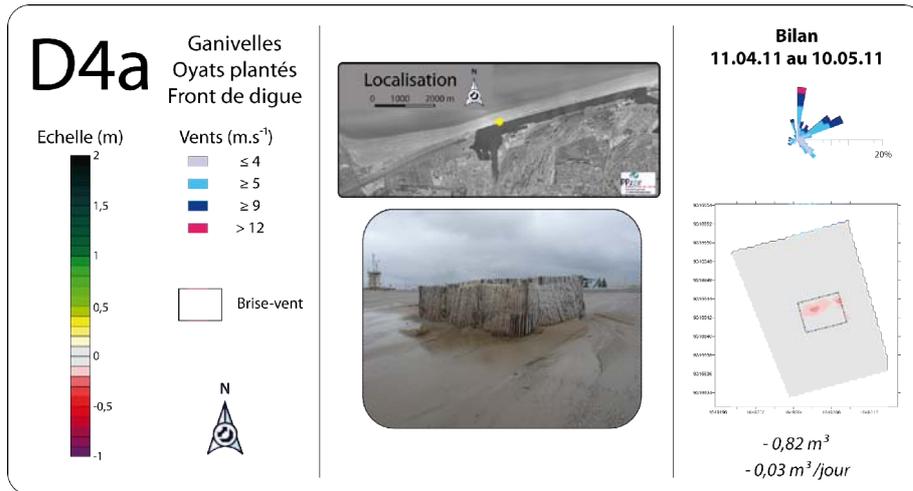
Annexe 9.7 : Structure D7



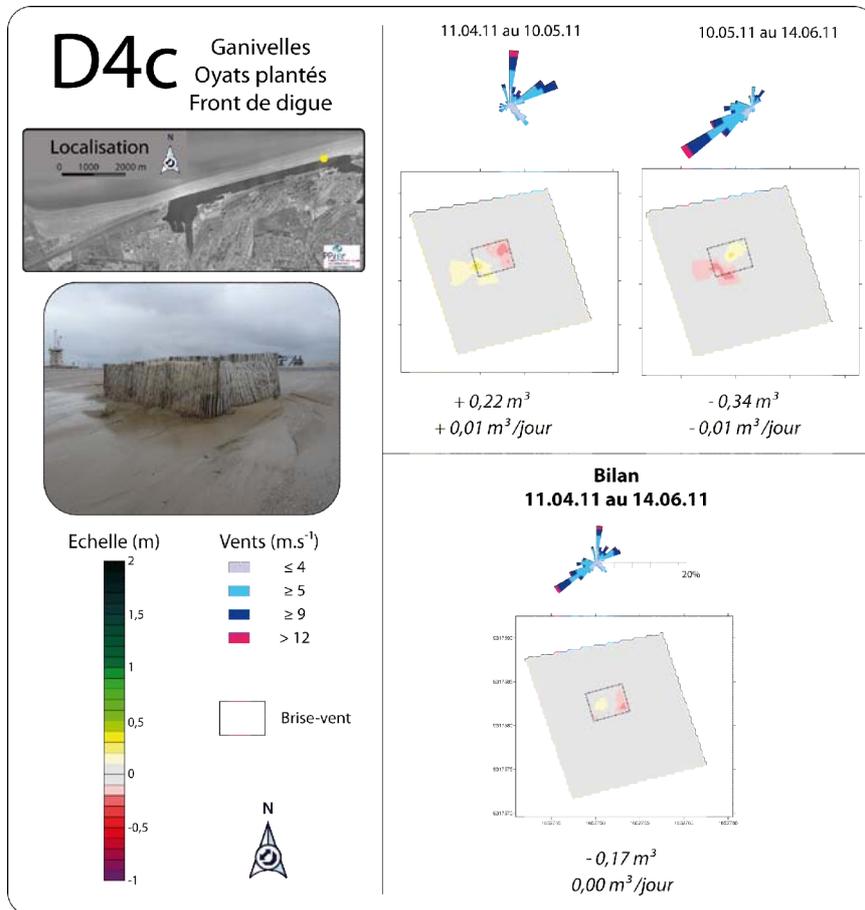
Annexe 9.8 : Structure D4b



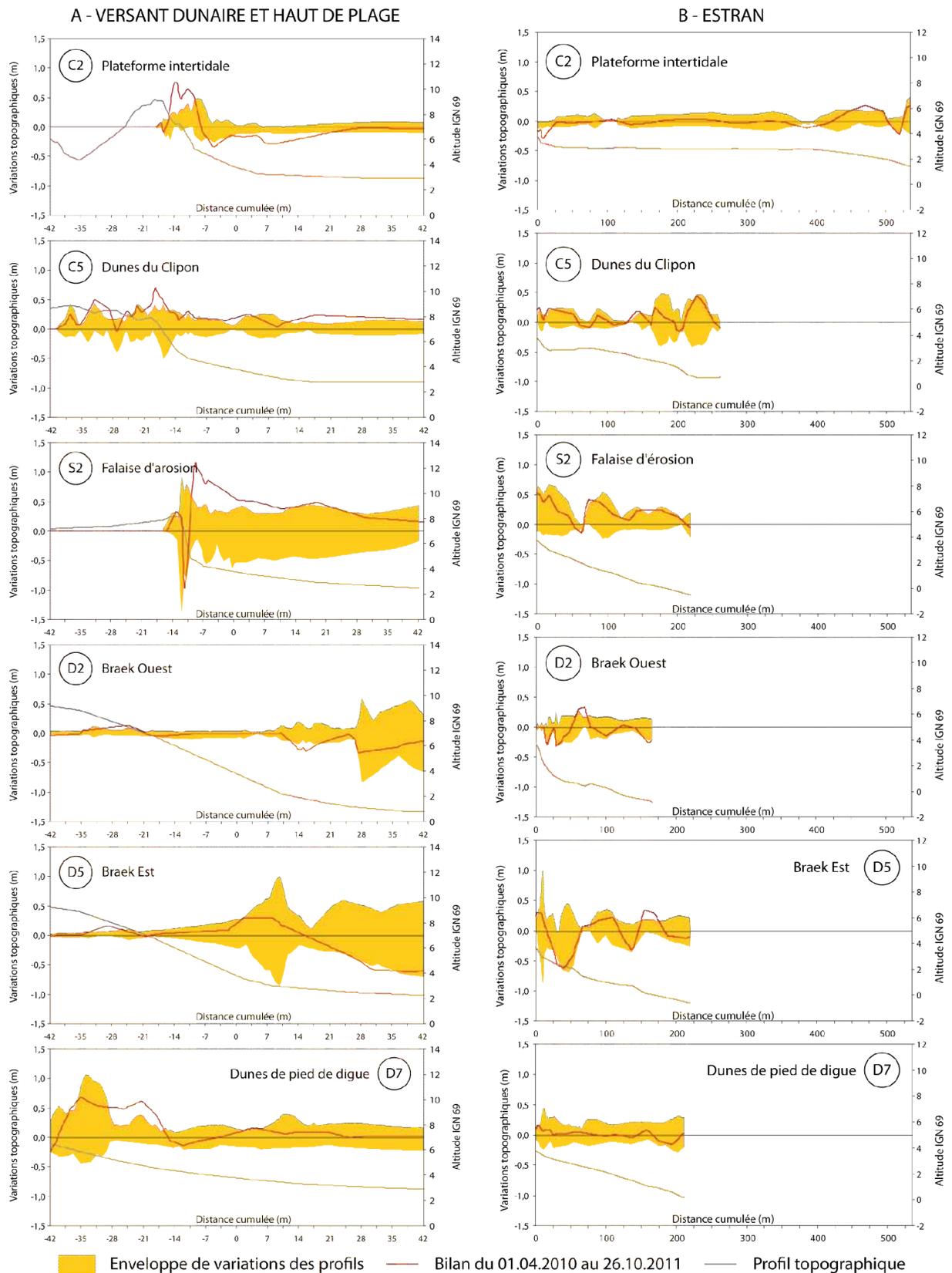
Annexe 9.9 : Structure D4a



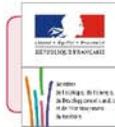
Annexe 9.10 : Structure D4c



ANNEXE 10 – Enveloppe des variations altitudinales au niveau des profils types, et bilan topographique entre le 01.04.10 et le 26.10.11



ANNEXE 11 – Données de vagues au large (bouée Vergoyer) pour les mois d'août, septembre et octobre 2011 (source CANDHIS © CETMEF)



CANDHIS

Centre d'Archivage National de Données de Houle In-Situ

Campagne : **06201 - Vergoyer**

Coordonnées : **050°39,550'N - 001°22,200'E**

Profondeur : **30.00 mètres**





CANDHIS

Centre d'Archivage National de Données de Houle In-Situ

Campagne : **06201 - Vergoyer**

Coordonnées : 050°39,550'N - 001°22,200'E

Profondeur : 30.00 mètres





Ministère de l'Énergie, de l'Équipement et de la Mer
Centre d'Archivage National de Données de Houle In-Situ

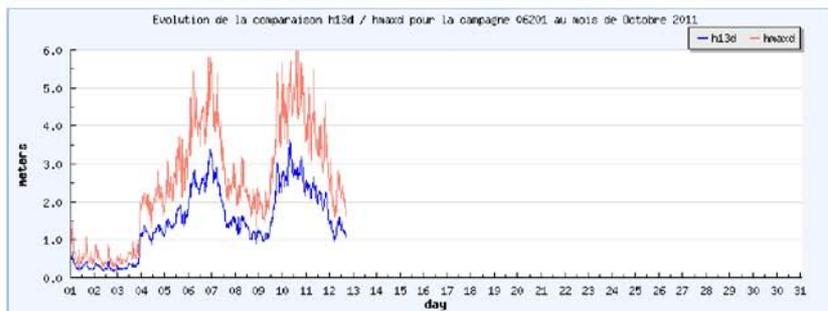
CANDHIS

Centre d'Archivage National de Données de Houle In-Situ

Campagne : **06201 - Vergoyer**

Coordonnées : **050°39,550'N - 001°22,200'E**

Profondeur : **30.00 mètres**



CONTROLE SOUPLE DE LA DYNAMIQUE EOLIENNE SUR UN LITTORAL ARTIFICIALISE ET PROPOSITIONS DE GESTION : LE CAS DE LA FACADE MARITIME DU GRAND PORT MARITIME DE DUNKERQUE

Résumé

La façade littorale du Grand Port Maritime de Dunkerque est une cellule sédimentaire quasi-fermée où les formes dunaires résultent de l'imbrication de facteurs humains et naturels. Ce littoral peut être divisé en deux parties : la partie Ouest est constituée d'un cordon bordier sur une longueur de 7 km (plage du Clipon) et le long de la partie Est, la plage est adossée à une digue en enrobé bitumineux de 6 km de long (digue du Braek) où des transferts sableux se produisent. L'objectif de cette étude est de (1) caractériser les formes dunaires et leur évolution sur un site artificiel, (2) quantifier le transport éolien sur le haut de plage, le versant externe de la dune bordière et la digue du Braek, et (3) proposer des mesures de gestion afin de remédier aux contraintes d'exploitation engendrées par les dépôts éoliens sur les infrastructures. A moyen terme (28 ans), l'analyse diachronique de photographies aériennes montre que les superficies dunaires ont fortement augmenté depuis 1983. A court terme (2 ans), des mesures topographiques révèlent que les dunes continuent de se développer aujourd'hui mais gardent la marque des interventions anthropiques passées. Sur la digue du Braek, des formes dunaires se sont naturellement constituées sur l'asphalte. Le sable a été colonisé par *Ammophila arenaria* qui s'est enraciné sous l'enrobé par l'intermédiaire de fissures. Une typologie de ces dunes de digue a été proposée. A l'Est, des dunes se développent en pied de digue en raison de l'interruption des transferts sédimentaires longitudinaux par une jetée. Des piégeages éoliens *in situ* ont montré que le transport éolien était essentiellement contrôlé par la vitesse du vent et la source de sable disponible. Par vents frontaux et obliques, les dunes de pied de digue constituent la principale source des envols, et le transport éolien est favorisé par une accélération du vent sur le versant exposé. Différents types de brise-vent ont été testés sur l'ensemble du site afin de trouver le meilleur mode de gestion souple de ces envols de sable. Ces analyses montrent que si la localisation des structures brise-vent a une grande influence sur leur efficacité, les systèmes habituellement utilisés sur les plages (ganivelles, filets synthétiques) peuvent aussi favoriser le développement de dunes sur une digue en asphalte. Les mesures de gestion envisagées sont la stabilisation des principales sources de sable en pied de digue ainsi que le renforcement de la dune bordière aux endroits les plus fragiles.

Mots clés : Dunes bordières ; Digue portuaire ; Transport éolien ; Brise-vent ; Nord de la France

AEOLIAN SAND TRANSPORT CONTROL AND MANAGEMENT MEASURES ON A HUMAN-ALTERED COAST: THE COASTLINE OF DUNKIRK SEAPORT, NORTHERN FRANCE

Abstract

The coastline of Dunkirk seaport is a sedimentary cell where dune morphology is the result of both natural processes and human intervention. This shoreline can be divided in two parts: a western part of 7 km long, where a macrotidal beach is backed by naturally developing coastal dunes, and an eastern part consisting of a 6 km long asphalt dike overtopped in places by low elevated aeolian dunes. This study aims at (1) describing aeolian dunes and their evolution on a human-altered coast, (2) quantifying aeolian sand transport on the upper beach, the seaward slope of the foredune and the asphalt dike, and (3) suggesting management measures in order to solve windblown sand accumulation problems on harbour infrastructures. On the middle term (28 years), diachronic analysis of aerial photographs shows rapid development of dunes area since 1983. On the short term (2 years), topographic surveys reveal that dune development is still ongoing, although dune morphology keeps the marks of passed human interventions. Dunes have naturally developed on asphalt and their formation is initiated by *Ammophila arenaria* colonisation of numerous perpendicular cracks in the dike. A typology of these dunes is proposed. Dike toe dunes have developed at the beach/dike contact in the most eastern part of the site, where a jetty is interrupting net sediment transport. *In situ* field measurements revealed that aeolian sand transport is mainly controlled by wind speed and the source of sand available. Under oblique to direct onshore winds, dike toe dunes are the main source of windblown sand on the dike, and aeolian transport is enhanced by a wind speed-up on the windward slope. Different kinds of windbreaks have been tested in order to solve uncontrolled aeolian sand transport problems on the dike, as well as to consolidate foredunes. It appeared from the topographic surveys carried out on the windbreaks that although their location seemed to play a major role on the amount of sand captured, fences and synthetic fabrics deployed on sandy surfaces were also able to trap windblown sand on a seaport dike. Management measures considered are a stabilisation of main sand sources at the dike toe and consolidation of foredunes with windbreaks.

Keywords : Foredunes ; Seaport dike ; Aeolian sand transport ; Windbreaks ; Northern France