



Interactions sédimentation-végétation. Exemple du Crambe sur le cordon de galets du Hourdel.



Ce rapport constitue la synthèse des résultats du projet « Dynamique du cordon de galets du Hourdel. Interactions sédimentation-végétation » financé par le ROLNP dans le cadre de son appel à projets 2012.

Le rapport est basé sur les travaux réalisés dans le cadre du stage de Bérengère DEJEANS (Dejeans, 2013), et a bénéficié de résultats provenant des études de Paul LECOINTRE (Lecointre, 2013) et du GEMEL (Meirland et Duponchelle, 2013).

Dans le cadre du projet, des discussions ont été amorcées avec le Syndicat Mixte Baie de Somme Grand Littoral Picard et le Conservatoire Botanique National (antenne de Bailleul) quant aux enjeux liés à la gestion de la flèche de galets.

Ce rapport doit être cité comme suit :

Le Bot S., Dejeans B., Forey E., Meirland A., Lafite R., Costa S., Langlois E. (2013). Interactions sédimentation-végétation. Exemple du Crambe sur le cordon de galets du Hourdel. Rapport d'étude, Appel à Projets 2012 du ROLNP. 59 pp. + annexes.

Sommaire

Introduction.....	5
I. Le cordon de galets de la Baie de Somme : caractéristiques du milieu et enjeux	7
I.1. Le cordon de galets	7
<i>I.1.1. Morphologie et mise en place.....</i>	<i>7</i>
<i>I.1.2. Composition sédimentaire</i>	<i>8</i>
<i>I.1.3. Dynamique du cordon</i>	<i>10</i>
I.2. La végétation associée.....	12
<i>I.2.1. Taxonomie.....</i>	<i>12</i>
<i>I.2.2. Description et caractéristiques morphologiques.....</i>	<i>12</i>
<i>I.2.3. Répartition.....</i>	<i>13</i>
<i>I.2.4. Biologie.....</i>	<i>14</i>
<i>I.2.5. Ecologie.....</i>	<i>15</i>
<i>I.2.6. Spécificités des populations du Hourdel.....</i>	<i>15</i>
I.3. Les enjeux liés au cordon	17
II. Matériel et méthodes	19
II.1. Stratégie d'étude.....	19
<i>II.1.1. Choix du site d'étude.....</i>	<i>19</i>
<i>II.1.2. Pas de temps.....</i>	<i>21</i>
<i>II.1.3. Stratégie de mesure</i>	<i>22</i>
II.2. Instrumentation : acquisition et traitement des données.....	22
<i>II.2.1. Topographie</i>	<i>22</i>
<i>II.2.2. Sédiments</i>	<i>23</i>
<i>II.2.3. Mesures sur la végétation</i>	<i>24</i>
III. Résultats et interprétation	26
III.1. Caractéristiques morphologiques, sédimentaires et de végétation.....	26
<i>III.1.1. Morphologie.....</i>	<i>26</i>
<i>III.1.2. Sédiment</i>	<i>30</i>
<i>III.1.3. Végétation</i>	<i>31</i>
III.2. Dynamique rapide du cordon	34
<i>III.2.1. Influence de la marée</i>	<i>36</i>
<i>III.2.1. Influence des vents.....</i>	<i>36</i>
III.3. Relations Crambe-sédimentation et Crambe-plante.....	40

III.3.1. Relations Crambe – sédimentation.....	40
III.3.2. Effet du Crambe sur les paramètres micro-environnementaux	44
III.3.3. Relations Crambe-richesse spécifique	46
IV. Discussion.....	48
IV.1. Méthodologie	48
IV.1.1. Amélioration du protocole de suivi des interactions Crambe-sédiment..	48
IV.1.2. Transposition à d'autres sites	49
IV.2. Confrontation dynamique pas de temps court et pas de temps long....	49
IV.3. Transfert opérationnel.....	50
IV.3.1. Gestion du risque de submersion.....	50
IV.3.2. Gestion des mesures conservatoires d'espèces végétales sensibles....	51
Conclusion.....	52
Bibliographie.....	54
Liste des figures et des tableaux	58
Annexes.....	60

Introduction

Les paysages et habitats côtiers offrent différents niveaux de protection à la population et constituent un réservoir de biodiversité important. Les flèches littorales constituent des barrières naturelles qui protègent les estuaires et leurs zones basses, colmatées (e.g. Robin et al., 2009), souvent poldérisées (e.g. Bas-Champs de la Baie de Somme), des risques de submersion marine (Costa et al., 2000, Orford & Anthony, 2011). La végétation associée à ces milieux peut rendre des services écosystémiques, de limitation du phénomène de submersion en particulier, en favorisant la stabilisation du substrat (augmentation de la résistance de la flèche) et en augmentant la rugosité (atténuation de la houle ; Koch et al., 2009).

Les cordons de galets, exemples rares de flèches littorales (généralement sableuses), constituent des écosystèmes singuliers. Ils abritent en effet une flore et une faune peu habituelles, constituant des habitats uniques, qui connaissent des processus de colonisation et de succession végétale qui s'y exercent (Fuller & Randall, 1988). Des politiques sont par conséquent mises en place afin de les protéger, et des études cherchent à comprendre leur dynamique. Les connaissances de ces environnements concernent principalement les pas de temps longs, comme c'est le cas pour le Sillon de Talbert en Bretagne (Stephan *et al.*, 2012), le cordon de Nova Scotia situé sur la côte atlantique du Canada (Orford & Carter, 1995), où la végétation fait généralement l'objet de mesures conservatoires (e.g. Crambe maritime). Le cordon de galets du Hourdel barre le Sud de la Baie de Somme et protège la zone des Bas-Champs, colmatée et poldérisée. Ce cordon s'étend sur près de 15 kilomètres et atteint une altitude maximale de +8 à +10 mètres NGF, qui le rend vulnérable à la submersion en contexte macrotidal associé à un régime important de houles. Le Crambe maritime est une espèce pionnière présente et protégée sur le cordon. Plusieurs études ont permis de caractériser et quantifier la dynamique séculaire à décennale du cordon de galets du Hourdel (Briquet, 1930 ; Dallery, 1955 ; Costa, 1997 ; Dolique, 1998 ; Costa et al., 2000 ; Bastide, 2011). Cependant, la dynamique rapide du cordon n'est pas encore bien connue, ni non plus les interactions Crambe-sédimentation.

L'objectif du présent projet est d'analyser les interactions végétation-sédimentation, à partir de l'exemple d'une espèce pionnière, le Crambe maritime, sur le cordon de galets de Hourdel en Baie de Somme, et sur des pas de temps courts (coup de vent, morte-eau/vive-eau), en répondant aux questions suivantes : quels sont les rythmes d'évolution du cordon, avec et sans végétation ? quels sont les effets réciproques des phénomènes d'érosion-sédimentation sur l'installation et le développement d'une espèce pionnière ? quels sont les apports de la compréhension des interactions végétation-sédimentation pour la gestion du risque de submersion, des aménagements et des mesures conservatoires de protection d'espèces végétales sensibles ?

Dans un premier temps, le cordon de galets du Hourdel est présenté, ainsi que les enjeux associés à la gestion de l'aménagement et des mesures conservatoires. La méthodologie d'étude de la topographie, de la sédimentation et de la végétation est ensuite présentée. Les résultats obtenus en matière de caractéristiques morphologiques, sédimentaires et de végétation du cordon, de dynamique rapide et de relations Crambe-sédimentation et Crambe-plante sont présentés. Enfin, une discussion est proposée sur la méthodologie de suivi de la dynamique rapide sur ces milieux, sur la comparaison entre dynamique rapide et dynamique à plus long-terme, et sur le transfert opérationnel potentiel des résultats de ce type d'étude.

I. Le cordon de galets de la Baie de Somme : caractéristiques du milieu et enjeux

I.1. Le cordon de galets

I.1.1. Morphologie et mise en place

Le cordon de galets est localisé sur la rive sud de la Baie de Somme. Il correspond à une flèche littorale constituée de galets de silex. Sa formation a débuté à Ault il y a 2 500 ans B.P. (Dupont, 1981), à partir des galets qui sont mobilisés le long du littoral vers l'E-NE sous l'effet de la dérive littorale (Julve & Imbert, 1993). Les galets accumulés sont des rognons de silex provenant de l'érosion des falaises crayeuses du Sénonien et du Turonien. Les marées les plus importantes, souvent associées à des événements de tempête, viennent battre les falaises de craie, à leur pied, les fragilisant. Ce phénomène associé aux agents météorologiques et aux discontinuités (diaclasses, fracturations,...) de la roche entraîne des effondrements de falaises plus ou moins volumineux, libérant des silex qui roulés par la mer deviennent galets. Ceux-ci sont ensuite transportés le long du littoral vers le Nord-Est sous l'action de la houle qui est majoritairement du Sud-ouest sur cette zone. Les galets sont ainsi accumulés sous forme d'une flèche qui continue de progresser vers le Nord-est (Dallery, 1955 ; Dolique, 1998 ; Costa et al., 2000).

Le cordon se détache des falaises de craie à partir de la ville d'Ault et s'étend sur près de 15 kilomètres jusqu'à la Pointe du Hourdel. Large de 100 à 700 mètres, il atteint une altitude maximale de +8 à +10 mètres NGF.

Entre le cordon de galets et la falaise morte de craie crétacé, les Bas-Champs constituent une plaine maritime de 40 km² de surface et d'altitude + 4m NGF (Clique et Lepetit, 1986), qui se comble progressivement par des vases et des sables, en même temps que le cordon progresse vers le Nord-Est et à la faveur des polders construits par l'Homme (Figure 1).

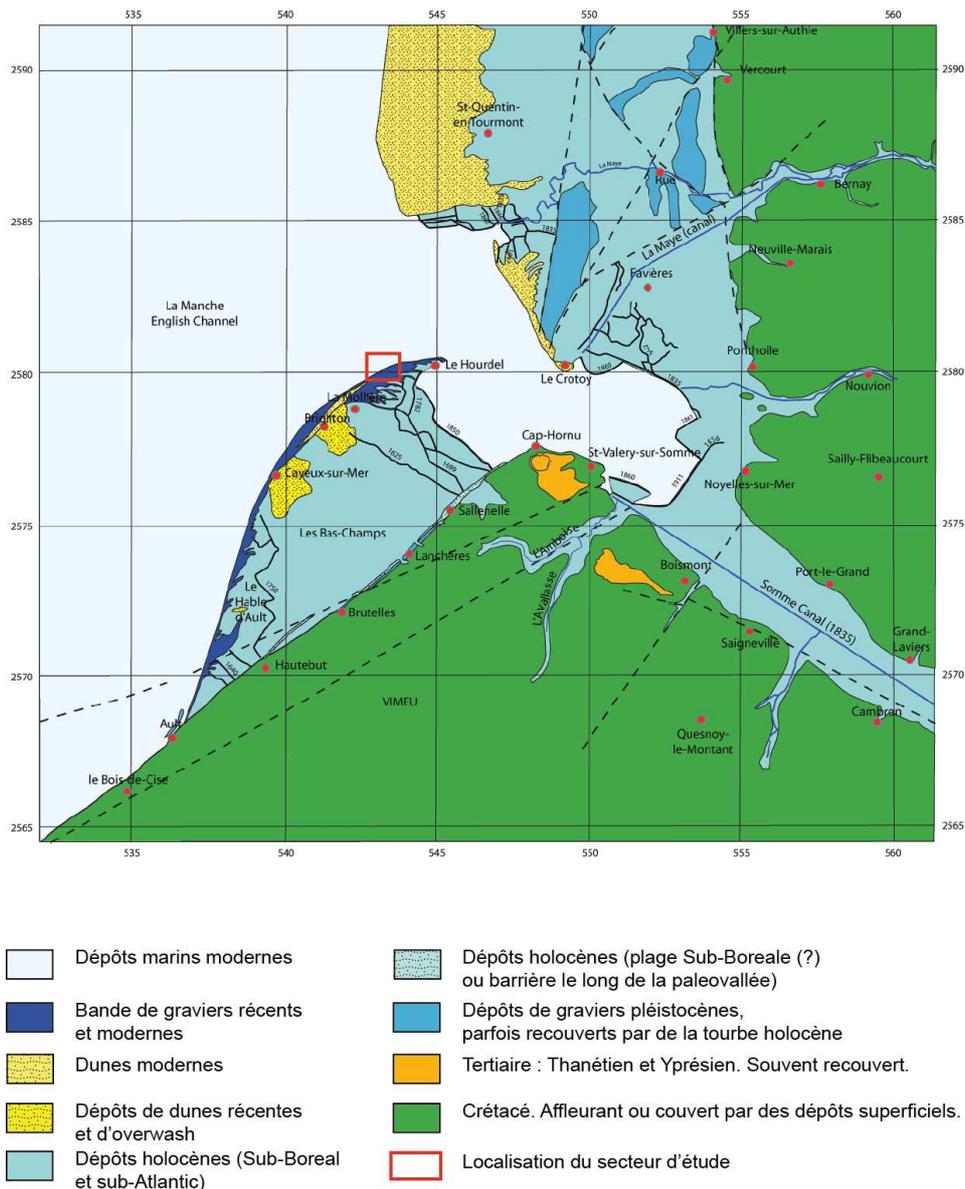


Figure 1 : Le cordon de galets du Hourdel : localisation et géologie. Rectangle rouge : localisation du site d'étude (BRGM, 1981 ; BRGM, 1985)

1.1.2. Composition sédimentaire

La flèche est composée d'environ 40 à 60 % de galets, le reste de la porosité étant comblé principalement par du sable (Augris et al., 2004 ; Duclos, 2007). La proportion de sable est plus importante vers le bas du cordon. La composition interne du cordon dégagée par Migniot et Bellessort (1974, Figure 2) met en évidence que le haut du cordon est essentiellement constitué de galets et que le sable apparaît vers 2-3 mètres de profondeur (MIGNIOT & BELLESSORT, 1974 ; DOLIQUE, 1998). D'autres dépôts sableux, temporaires, sont également observables, notamment après des épisodes de tempête. En effet, les événements de forte agitation climatique amènent une certaine quantité de sable à recouvrir partiellement le cordon, surtout vers le bas et le milieu. Cette fraction sableuse ne reste cependant

pas longtemps en place. Ces sables présents temporairement, tout comme ceux qui font partie du cordon de façon permanente, sont hétérogènes et mal classés, avec environ 50% de sables grossiers, 48% de sables moyens et 2% de sables fins. Ils sont composés de quartz, d'éclats siliceux, et de fragments de coquilles et de craie. Cette constitution est elle aussi variable : à Ault, les fragments de silex sont d'environ 40 à 50%, et seulement de 5 à 10% au Hourdel (Augris et al., 2004 ; Duclos, 2007).

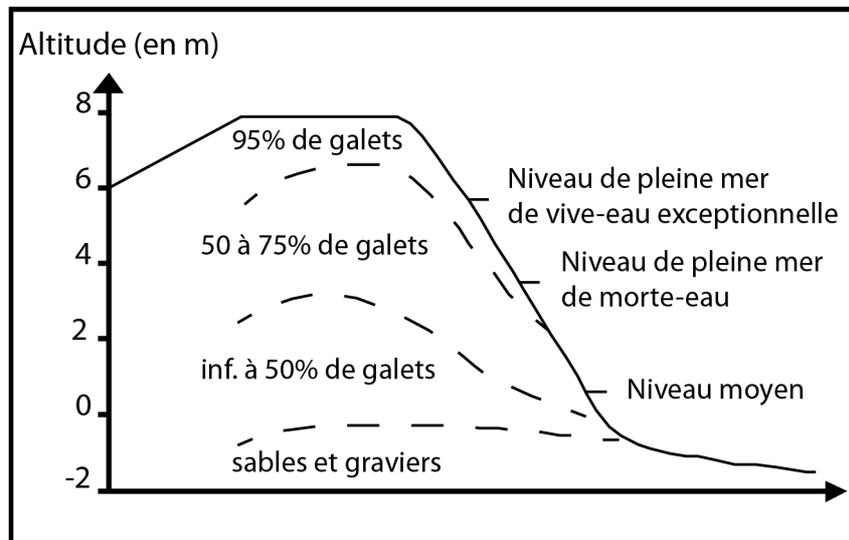


Figure 2 : Structure interne du cordon littoral des Bas-Champs (Migniot & Bellessort, 1974, dans AUGRIS et al., 2004)

A la Pointe du Hourdel, une étude granulométrique a été menée par Livet et Roue (2012), sur des galets pris en surface et jusqu'à 50 cm de profondeur. Elle a permis de déterminer que les galets ont des tailles variables, entre 2 et 15 cm. Ceux dont le diamètre est compris entre 20 et 40 mm présentent la meilleure sphéricité, et sont donc les plus intéressants du point de vue économique (Livet & Roue, 2012).

Livet et Roue (2012) ont aussi réalisé des colonnes lithostratigraphiques, à partir de sondages faits à 1,50 m de profondeur (Figure 3). Ils ont ainsi mis en évidence que le sable n'est pas présent de manière continue au sein du cordon mais qu'il se présente sous forme de « lentilles sableuses », qui sont plus ou moins épaisses et à des profondeurs différentes.

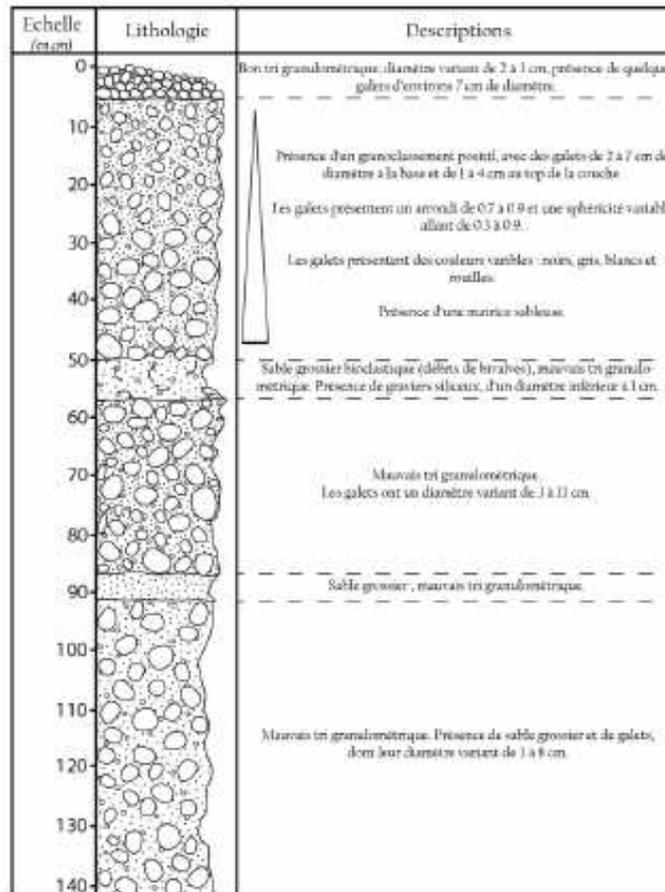


Figure 3 : Exemple de colonne lithostratigraphique du cordon du Hourdel (Livet & Roue, 2012)

1.1.3. Dynamique du cordon

Le cordon de galets du Hourdel est caractérisé par une dynamique longitudinale variée, en fonction de gradients de dérive littorale si caractéristiques de ces cordons ouverts en situation « d'alignement dérive » (Orford et al., 2002 ; Anthony, 2009).

Ce cordon est en réalité composé d'une succession de sous-cordons ¹ se terminant chacun par un crochon tourné vers le continent (Figure 4). L'extrémité des cordons finit en effet par être recourbée sous l'effet de la réfraction et de la diffraction de la houle à son extrémité (Carter , 1988). En effet, cette flèche littorale avance en formant successivement des cordons les uns devant les autres, par accumulation de galets. Lorsqu'un nouveau cordon se met en place, il constitue une « barrière » protégeant les cordons situés en arrière, plus vieux, contre les agents marins, ce qui aboutit à leur fossilisation (Dolique, 1998).

Plusieurs études ont permis de caractériser et quantifier la dynamique séculaire à décennale du cordon de galets du Hourdel (Briquet, 1930 ; Dallery, 1955 ; Costa,

¹ Dans la suite du texte, les sous-cordons seront appelés cordons. On distinguera le cordon proximal comme étant le plus proche de la mer et des cordons distaux, plus proches du continent.

1997 ; Dolique, 1998 ; Costa et al., 2000 ; Bastide, 2011). La migration du cordon est essentiellement due au développement de nouveaux sous-cordons tous les 2 à 11 ans (Bellessort & Migniot, 1986), se mettant en place à la faveur d'évènements de tempêtes extrêmes qui ont une influence importante sur les flux sédimentaires littoraux (Ferret, 2011).

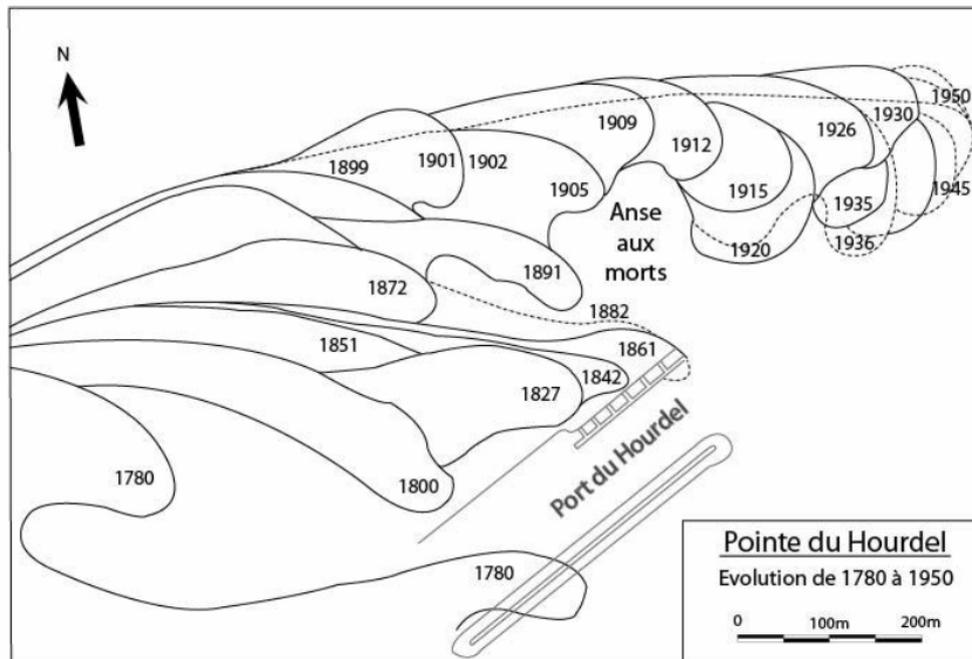


Figure 4 : Evolution de la pointe du Hourdel de 1780 à 1950, (Livet & Roue, 2012, modifiée d'après F. DALLERY, 1955)

Des évolutions dans la topographie du cordon sont observables entre deux saisons. Il présente ainsi des pentes plus abruptes en été, car les houles tendent à remonter les sédiments vers le sommet du cordon. En hiver, en revanche, les pentes du cordon sont plus faibles, puisque les houles érodent la flèche et transportent les sédiments vers la base sableuse (Dolique, 1998).

Des variations de morphologie du cordon ont été remarquées à l'échelle des cycles tidaux et lunaires, qui se manifestent sous forme de bermes, temporaires ou non. Il s'agit de bourrelets d'accumulation, formés par jet de rive/déferlement. Deux morphologies peuvent être distinguées : les bermes hautes bien délimitées, et les bermes en gradins. Les premières sont formées lorsque les hauteurs d'eau augmentent, ce qui les entraîne vers le sommet du cordon et les épaissit. Pour les secondes (bermes en gradins), les hauteurs d'eau, en diminuant, forment successivement de petites bermes, ce qui donne une forme de gradins au flanc du cordon (Dolique, 1998).

Il y a quelques années, près de 20 000 m³ de galets étaient transportés et alimentaient chaque année le cordon. Cependant, ces apports se sont nettement amenuisés ; et atteignaient par exemple 2 000-3 000 m³/an en 1999. Cette diminution peut notamment s'expliquer par les extractions de galets jusqu'en 1983 et

la mise en place de jetées portuaires à Fécamp, Saint-Valéry-en-Caux, Dieppe et le Tréport), qui font obstacle au cheminement des galets (LCHF, 1987 ; Dolique, 2004 ; SOGREAH, 1994 dans Duponchelle, 2011). La diminution de l'alimentation en galets, depuis deux siècles, a entraîné une érosion du cordon, que des aménagements (digues, épis) ont tenté de freiner.

Le cordon de galets présente trois secteurs à dynamique contrastée (Figure 1), depuis sa zone proximale, proche de la source de galets des falaises normanno-picardes jusqu'à sa zone distale à l'entrée de la Baie de Somme : (1) le secteur s'étendant d'Ault-Onival jusqu'au Sud de Cayeux-sur-Mer, marqué par l'implantation de 83 épis, construits pour piéger les galets, en réponse à une érosion importante (0,1 à 1,8 m/an sur la période 1800-1991 ; Dolique 1998), (2) le secteur de Cayeux-sur-Mer, en érosion, où des rechargements réguliers en galets sont effectués pour éviter la rupture du cordon aminci et permettre un transit (artificiel) de galets, et (3) le secteur Brighton-Le Hourdel, en progradation (taux d'accroissement de 150 m entre 1780 et 1930 ; Briquet, 1930), où des extractions de galets ont lieu (sociétés Silmer et Delarue). Le site d'étude retenu est le secteur La Mollière-Le Hourdel. A l'échelle de l'ensemble de l'édifice, il constitue le secteur distal, soumis à une dynamique de progradation, où le cordon se construit par crochons successifs.

Cependant, la dynamique rapide du cordon n'est pas encore bien connue, ni l'influence réciproque de la dynamique morpho-sédimentaire du cordon sur la végétation.

I.2. La végétation associée

I.2.1. Taxonomie

Le chou marin (*Crambe maritima* L.) appartient à la famille des Brassicaceae, aussi appelées Crucifères. Il a été décrit par le naturaliste Suédois Charles Linné en 1753. C'est l'un des 2 représentants européens du genre *Crambe*, l'autre étant *Crambe hispanica*.

I.2.2. Description et caractéristiques morphologiques.

Le *Crambe maritima* est une plante herbacée vivace, glabre, glauque, à souche épaisse et charnue. La tige est robuste, rameuse et touffue (Lacroix et Le Bail, 2006). Les feuilles sont ovales grandes, épaisses, avec des marges irrégulièrement dentées et ondulées (Claham et al., 1962). La souche munie d'un puissant et profond pivot, apparaît particulièrement bien adaptée pour coloniser les substrats graveleux ou de galets (Loquet, 2010).

Les fleurs sont hermaphrodites, blanches ou rosées, à 4 pétales et 4 sépales étalés et possédant 6 étamines (Figure 5). Elles sont regroupées en panicule corymbiforme, produisant de gros fruits secs indéhiscent et globuleux (silicules) (Lacroix et Le Bail, 2006). Le fruit est composé de deux articles : le premier article supérieur globuleux, le deuxième inférieur avorté. 1 à 2 graines sont comprises dans le fruit.



Figure 5 : Photo du Crambe maritime

1.2.3. Répartition

En France (Figure 6), l'espèce se répartit sur les côtes bretonnes et de la Manche (INPN, 2011). L'espèce est bien représentée dans le département de la Somme. Dans le Nord-Pas-de-Calais, il est présent dans le département du Pas-de-Calais, mais manque dans celui du Nord, de même qu'en Haute Normandie, il se trouve dans la Somme mais n'est pas connu en Seine-Maritime (Danton & Baffray, 1995). En Basse-Normandie, Provost (1993) indique qu'en dehors de quelques populations importantes et stables, l'espèce apparaît de façon fugace et sporadique tout au long de la côte.



Figure 6 : Répartition sur le territoire national du *Crambe maritima* L. (Loquet, 2010)

1.2.4. Biologie

Le chou marin est décrit comme une hémicryptophyte à rosette (plante herbacée dont les bourgeons hivernaux se situent au niveau du sol), Géhu et Géhu-Franck (1979) observent que cette plante se comporte plutôt comme une géophyte à rhizome. Les bourgeons sont protégés par une rosette d'écaïlle. Au printemps (Avril, Mai) les bourgeons produisent de nouvelles feuilles pourpres puis vertes. Le chou marin est susceptible de se multiplier de manière végétative à partir de fragments de racines, moyen de multiplication d'ailleurs utilisé pour sa culture (Lacroix et Le Bail, 2006). Il aurait des propriétés diurétiques et antiscorbutiques (Lacroix et Le Bail, 2006). Le chou marin utilise principalement la reproduction sexuée. Elle ne s'effectue qu'à partir de 3 ou 4 ans (Lacroix et Le Bail, 2006). La fécondation est assurée par les insectes (Diptères et Hyménoptères) permettant une fécondation croisée obligatoire pour cette espèce qui ne pourrait pas s'autoféconder (Duponchelle, 2011). La dispersion des graines à maturité s'effectue par barochorie, anémochorie, et principalement par hydrochorie (Duponchelle, 2011). Il a été montré qu'après six mois en mer, environ 50% des graines germaient (Cadée, 2005). Les graines sont porteuses d'un inhibiteur de germination, de plus le fruit possède une forte résistance mécanique. La germination nécessite un lessivage des fruits ainsi qu'une exposition au froid (2 mois à 4°C idéalement) (Duponchelle, 2011). Ces conditions sont

apportées par les sols graveleux, le milieu où se développe préférentiellement le chou marin (Lacroix et Le Bail, 2006).

1.2.5. Ecologie

Crambe maritima est une plante présente sur les côtes maritimes, notamment sur les cordons de galets, les plages de graviers et de sables grossiers. C'est une espèce pionnière qui croît sur des sols constitués de fragments de roches (lithosols) quasiment dépourvus d'éléments fins, hormis quelques traces d'humus issues de la décomposition des algues. Elle pousse isolément ou en petits groupes sur les hauts de grèves, à la limite supérieure du flot atteinte périodiquement par les marées de vives eaux et par les paquets de mer lors des tempêtes (Lacroix et Le Bail, 2006). En raison du lessivage important du substrat, Géhu et Géhu-Franck (1979) estiment que les quantités de sel ne sont pas très importantes. Le *Crambe maritima* est une espèce nitrophile et se développe sur les substrats plus ou moins enrichis en matières organiques et en composés azotés issus de la décomposition des laisses de mer en haut de plage (Loquet, 2010). Géhu et Géhu-Franck ont observé un épanouissement des racines au niveau des poches de matière organique qui s'intercalent en mille-feuilles entre les lits de graviers ou de galets.

1.2.6. Spécificités des populations du Hourdel

Sur le cordon de galets de la Baie de Somme, la végétation a fait l'objet de nombreux travaux notamment du fait de sa patrimonialité (Regrain *et al.*, 1979 ; Wattez & Gehu, 1988 ; Hauguel & Toussaint, 2010). L'intérêt dynamique a été étudié à des pas de temps longs, en appréhendant plus particulièrement la dynamique temporelle des communautés végétales sur les différents cordons datés grâce aux photographies aériennes historiques (Meirland *et al.*, 2012). Les suivis temporels à l'échelle annuelle ont été effectués notamment par le Conservatoire Botanique de Bailleul sur la base de transects dans le cadre du suivi de l'extraction de matériaux.

Une cartographie des habitats de végétation du cordon de galets a été établie par Meirland et Duponchelle (2013), et mise en relation avec l'âge estimé des cordons. Il a notamment été observé que le couvert végétal augmente avec l'âge des cordons, surtout les cinq premières années pendant lesquels il atteint 30% (Figure 7). L'évolution est ensuite moins rapide (environ 10% en 15 ans). La flèche est entièrement végétalisée au bout de 25 ans.

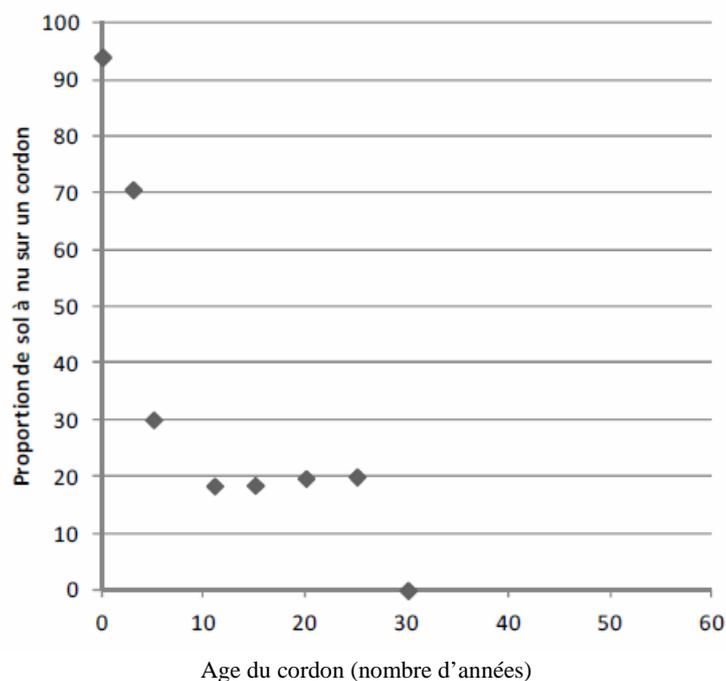


Figure 7 : Proportion de cordon dénué de végétation en fonction de son âge (Meirland et Duponchelle, 2013)

Ces données (recouvrement par date) ont fait l'objet d'un modèle polynomial, qui s'est avéré significatif pour le Crambe maritime.

Meirland et Duponchelle (2013) ont également établi mathématiquement que la plus grande densité d'individus de Crambe se trouverait sur un cordon de 23 ans, ce qui correspondrait à l'âge le plus propice au développement du chou (Figure 8).

Des résultats présentés par Duponchelle (2011) montrent que des caractères du Crambe maritime, à savoir le nombre de cœurs, la hauteur avec inflorescence et le diamètre de la tige de l'inflorescence, présentent des évolutions paraboliques en fonction de l'âge et atteignent leur maximum entre 1984 et 1988, ce qui tendrait à penser que le développement optimal du chou, en terme de morphologie, se ferait aux alentours de 25-30 ans.



Figure 8 : Photo du revers du T1 cordon B, le 11 juin

I.3. Les enjeux liés au cordon

Le système de cordons de galets de la Baie de Somme est remarquable à plusieurs titres.

Tout d'abord, il constitue une barrière naturelle contre les submersions par la mer pour une zone d'environ 4500 ha comportant de nombreuses zones habitées. L'érosion compromet la stabilité du cordon (e.g. Cayeux) (Costa, 1997 ; Costa et al., 2000) et peut entraîner sa rupture qui engendre des inondations dont la dernière s'est produite en février 1990, entraînant la submersion d'une part importante de cet espace (Bastide et al., 2005). Le système de cordons est aménagé pour éviter les intrusions marines depuis, au moins, le Moyen-Age, période à laquelle a été construit le Grand Barrement, isolant cette zone de la mer. Depuis les années 1990, une série d'épis a été construite au sud de Cayeux-sur-Mer pour éviter les ruptures de digues et ralentir le transit de galets. Actuellement, un projet de construction de 24 épis devant Cayeux-sur-Mer devrait permettre de sécuriser cette zone pour plusieurs décennies (EQS, 2011). Une réflexion est en cours sur la faisabilité d'une dépoldérisation partielle, éventuelle et maîtrisée dans l'objectif de rechercher une solution de protection pérenne pour le territoire des Bas-Champs (Bawedin, 2000).

Les cordons de galets littoraux sont rares à l'échelle européenne et abritent une faune et une flore spécifique. La zone des Bas Champs de Cayeux-sur-Mer est incluse, à ce titre, dans divers périmètres de protection : site Natura 2000, Arrêté de Protection de Biotope, Réserve de Chasse, site Ramsar,... De nombreux inventaires en ont montré la valeur floristique et faunistique (par exemple, les ZNIEFF

220004977 et 22004976). De nombreuses espèces et habitats sont protégés à différentes échelles (européenne, nationale, régionale), dont le Crambe maritime qui fait l'objet de la présente étude (Regrain et al., 1979 ; Wattez & Gehu, 1988 ; Hauguel & Toussaint, 2010, CBNBI, 2005 ; CBNBI, 2007) et le gravelot à collier interrompu présent sur le site d'étude (Figure 9).

Enfin, ce système de cordons constitue une ressource minérale importante exploitée par des carrières, aussi bien à l'intérieur des terres que sur le front de mer. Cette ressource, quasiment unique au monde de par son taux de silice très élevé (98% environ), est reconnue d'intérêt national dans le code minier (Caous & Mathon, 1978). Par ailleurs, le galet est aussi extrait sur certains secteurs en accrétion (ex : Les Mollières) pour recharger des secteurs en érosion (ex : Cayeux-sur-Mer).

La combinaison de ces trois enjeux (protection des populations, protection du patrimoine naturel et ressources minérales) fait des Bas Champs de Cayeux-sur-Mer, et du système de cordons de galets associés, une zone particulièrement sensible. L'accroissement de la connaissance et de la compréhension de la dynamique morphosédimentaire du système de cordons de galets, de l'évolution de la végétation associée et de leurs interactions peut participer à l'amélioration de la gestion de ce type de milieu, que ce soit en termes d'aménagement ou de conservation.

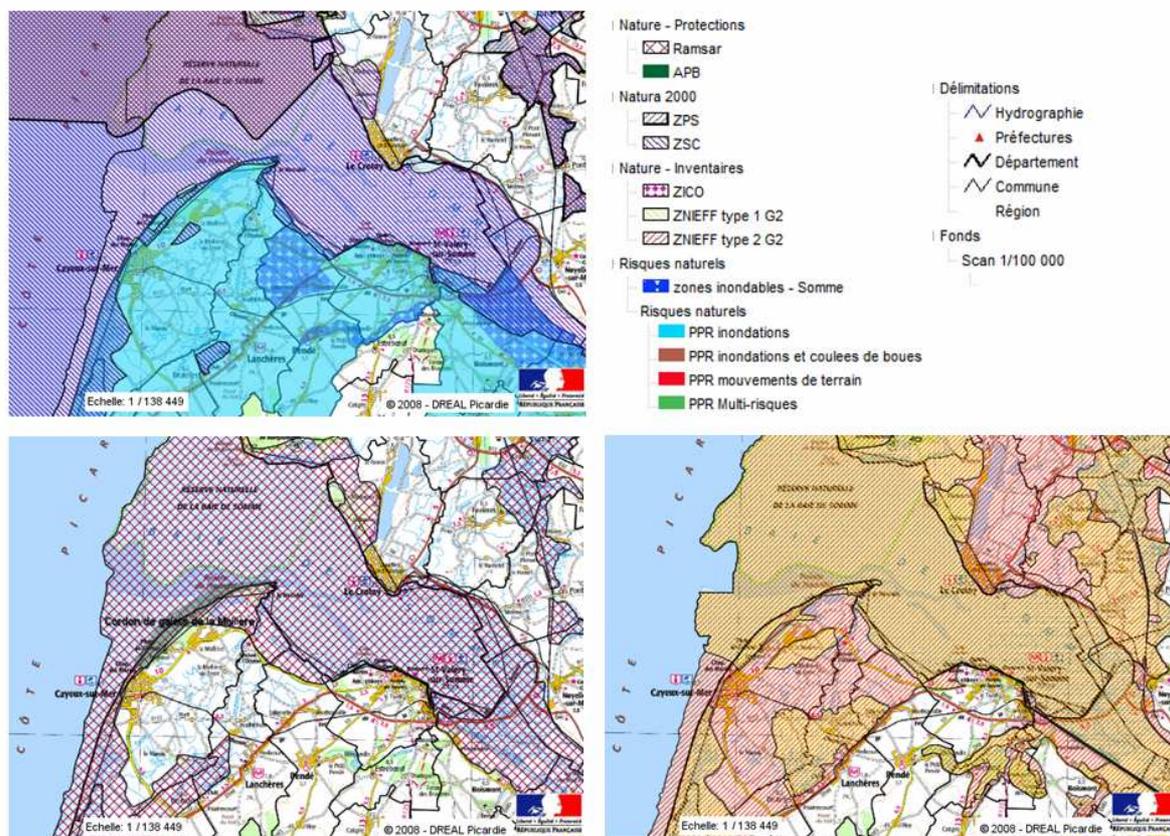


Figure 9 : Protections et inventaires du patrimoine naturel et paysager, risques naturels en Baie de Somme. Source de données : serveur cartographique CARMEN du Ministère en charge de l'écologie ; DREAL Picardie.

II. Matériel et méthodes

II.1. Stratégie d'étude

L'étude vise à analyser les interactions plante-sédimentation à partir de l'exemple d'une espèce pionnière (*Crambe maritime*) sur le cordon de galets du Hourdel (baie de Somme).

II.1.1. Choix du site d'étude

Le site d'étude a été sélectionné sur la base des critères suivants : (i) présence de cordons d'âges différents, (ii) absence d'activité de rechargement/extraction de galets, (iii) unicité de la réponse morphodynamique du cordon (accrétion ou érosion), (iv) présence et absence du *Crambe*.

Le site d'étude retenu se situe sur le secteur La Mollière-Le Hourdel. A l'échelle de l'ensemble de l'édifice, il constitue le secteur distal, soumis à une dynamique de progradation (Figure 10), où le cordon se construit par crochons successifs. Par ailleurs, ce secteur présente le fonctionnement le plus naturel car protégé par un Arrêté Biotope de Protection, le moins soumis à l'influence des aménagements (pas d'aménagements construits, loin de la zone sous forte influence des épis) et des activités humaines (extraction de galets en arrière de la dune de haut de plage). Dans ce secteur, de nos jours, l'avancée du poulier est estimée à 2 m par an, et la quantité de galets parvenant à l'extrémité du poulier est évaluée à environ 4.000 m³ par an (Bastide, 2011).

Deux transects, appelés T1 et T2, espacés d'environ 500 m, ont été choisis de manière à couvrir des cordons d'âges différents, formés entre 2000 et 2011 sur le transect T1 et entre 1996 et 2008 sur le transect T2 (Figure 11)

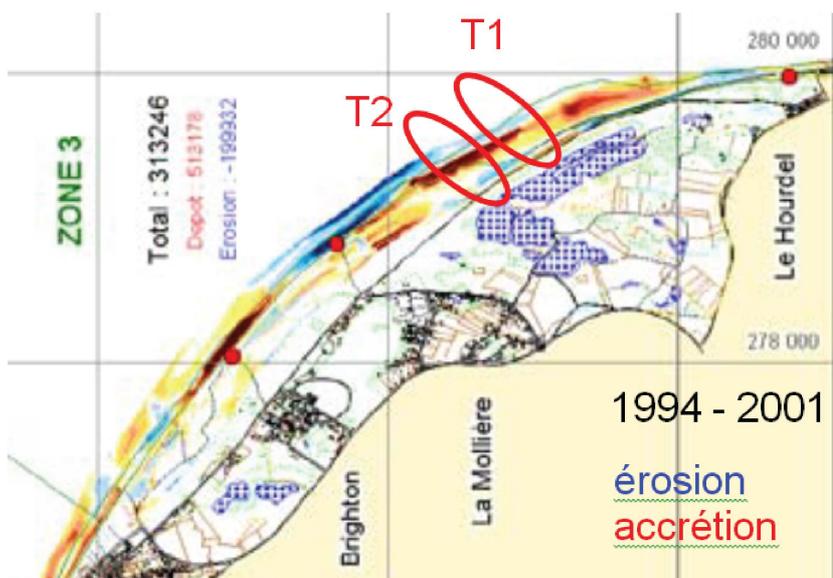


Figure 10 : Evolution dynamique et bilan volumétrique du cordon de galets entre Cayeux-sur-Mer et Le Hourdel sur la période 1994-2001 (Bastide, 2011)

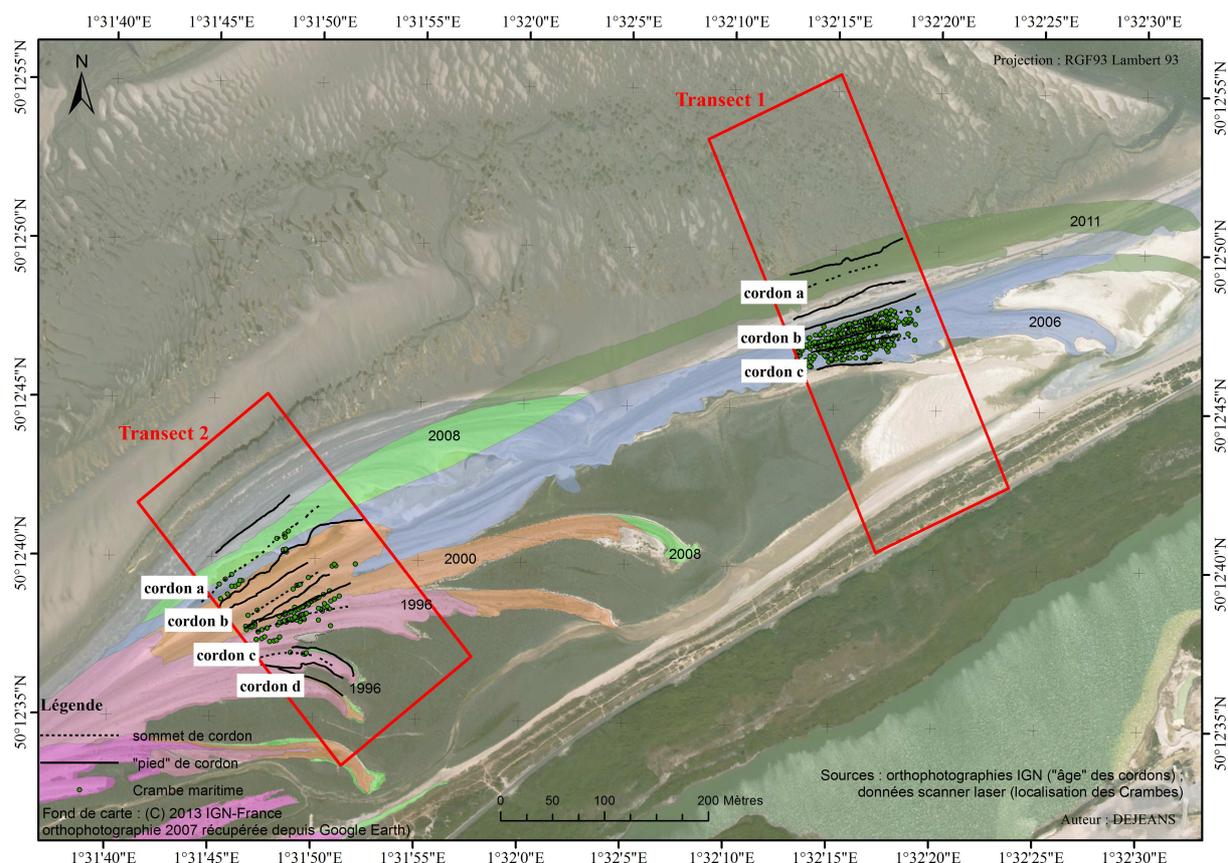


Figure 11 : Le site d'étude : « âge » des cordons (Duponchelle, 2011), localisation des transects (rectangles rouges) et répartition des pieds de Crambe sur les transects (points verts). L'identification de la position des cordons a été faite à partir de l'interprétation des orthophotos de l'IGN réalisées entre 1991 et 2011 sur ce secteur. L'année indiquée sur les cordons correspond à l'âge approximatif (+/- 2-3 ans) de formation de ces cordons.

II.1.2. Pas de temps

L'objectif du présent projet est d'analyser la dynamique rapide ainsi que l'évolution morphologique et sédimentaire du cordon de galets du Hourdel en relation avec la végétation.

Les pas de temps retenus sont fonction des forçages météo-marins, à savoir la marée et le vent, qui peut lever des vagues et également transporter directement du sable sur les zones émergées. Trois conditions-types de forçages ont été étudiées : la morte-eau, l'épisode de vent et la vive-eau associée à un épisode de vent.

Le calendrier de réalisation des levés de terrain est présenté sur la figure 12. Il concerne la période du 15 avril au 11 juin, pour laquelle une AOT a été demandée et obtenue ².

Les résultats obtenus sur les pas de temps courts (morte-eau/vive-eau, épisode de vent) seront confrontés aux schémas connus de la dynamique à plus long terme du cordon et de la végétation associée.

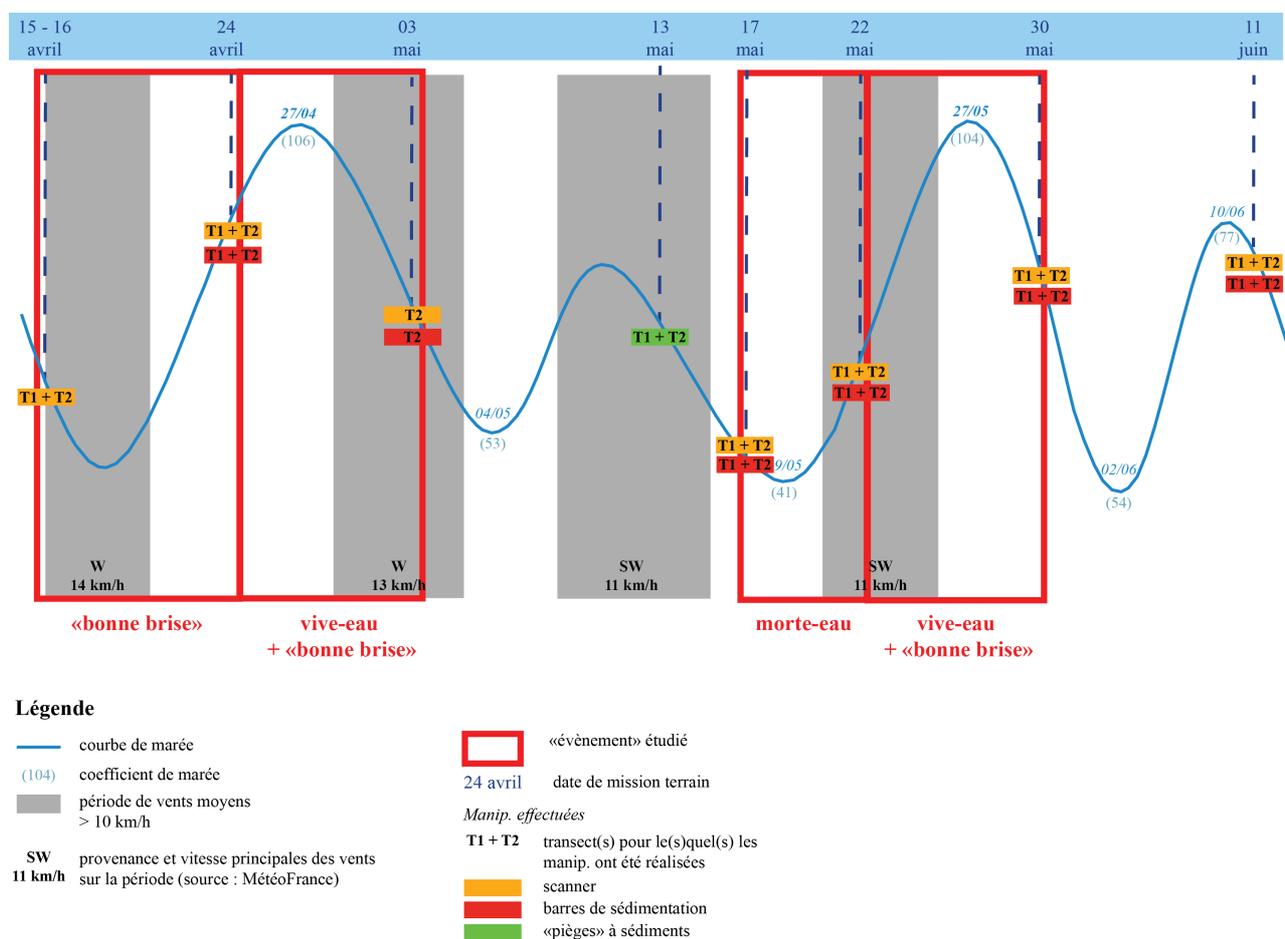


Figure 12 : Calendrier des levés de terrain en fonction des forçages météo-marins (marée, vents) et types de mesures réalisées.

² « Arrêté autorisant le Laboratoire de Morphodynamique Continentale et Côtière de l'Université de Rouen à implanter des dispositifs de mesure dans le cadre d'un projet d'étude scientifique sur le cordon de galets, Lieu-dit Les Galets du Hourdel » (2013_04_18_Université de Rouen_ROLNP_Le Hourdel).

II.1.3. Stratégie de mesure

La stratégie repose sur :

(1) le suivi de l'évolution morphologique et sédimentaire du cordon, en relation avec les conditions de forçages météo-marins (coups de vent, vives-eaux), à l'échelle de la portion de cordon (transects T1 et T2 espacés de 500 m entre la Mollière et le Hourdel) et à l'échelle du pied de Crambe. Des données topographiques (scanner laser terrestre et dispositifs de barres de sédimentation) et sédimentaires (photographies et piégeage éolien) ont été acquises,

(2) le suivi des populations de Crambe maritime (cartographie via les données scanner laser). Parallèlement, une étude des paramètres abiotiques (e.g. température, humidité mesurées via des micro-capteurs) et biotiques (inventaire des autres espèces au sein de quadrats) a été réalisée.

II.2. Instrumentation : acquisition et traitement des données

II.2.1. Topographie

Un suivi de la topographie du cordon a été entrepris de manière à disposer de mesures pour analyser la morphologie du cordon ainsi que son évolution morphodynamique rapide à différents pas de temps courts. Le suivi a été mené selon deux échelles spatiales: l'échelle de la portion de cordon avec le scanner laser terrestre et l'échelle du pied de Crambe avec les barres de sédimentation.

II.2.1.1. Le scanner laser terrestre

Le scanner utilisé est un Leica ScanStation C10. C'est un outil muni d'un miroir à rotation émettant un faisceau laser pulsé, de couleur verte (532 nm de longueur d'onde), ce qui permet de balayer l'espace sur 360° horizontalement et sur 270° verticalement maximum (angles de scans pouvant être fixés par l'utilisateur). La fréquence instantanée maximale est de 50 000 points par seconde. Qualifié d'HDS (High Definition Scanning, pour Relevé Haute Définition), cet instrument donne un nuage de points exhaustif de la zone scannée, selon une portée maximum de 300 m. La précision de cet appareil est de 6 millimètres à 50 mètres, et sa résolution peut être choisie. Elle peut être au maximum de 2 cm à 100 m de distance du scanner. Pour l'étude, la résolution choisie est de 10 cm à 100 m.

Les données ont été traitées (assemblage des nuages de points, « nettoyage ») sous le logiciel Cyclone REGISTER®. A l'aide d'un GPS centimétrique ayant fait

l'objet d'un post-traitement, les données topographiques ont été recalées dans le système Lambert 93.

II.2.1.2. Les barres de sédimentation

La topographie va aussi être étudiée à l'échelle de plusieurs individus de Crambes. Sur le cordon externe A, trois stations ont été mises en place sur le transect 1 et six sur le transect 2. Sur les cordons B et C, six stations ont été établies sur chacun des deux transects et trois ont été implantées sur le cordon D (transect T2).

Le principe de la mesure est basé sur la Sedimentation-Erosion Table (Table de Sédimentation-Erosion) utilisée par Roelof M.J. Boumans et John W. Day Jr. en 1993. Deux piquets sont disposés sur chaque station, espacés de 2 mètres l'un de l'autre (Figure 13). A chaque évènement, une règle graduée, trouée tous les 10 centimètres, est posée sur les piquets. Une tige de 98 centimètres de haut est ensuite insérée successivement dans chacun des trous, et la longueur du bout de tige dépassant de la règle est mesurée. Cette lecture, répétée le long de la règle graduée, donne la topographie relative entre les deux piquets.

Les mesures de topographie relative obtenues à l'échelle du Crambe, comparées à celles des stations sans plante, permettent de déterminer la quantité de sédiments piégés par cette espèce.

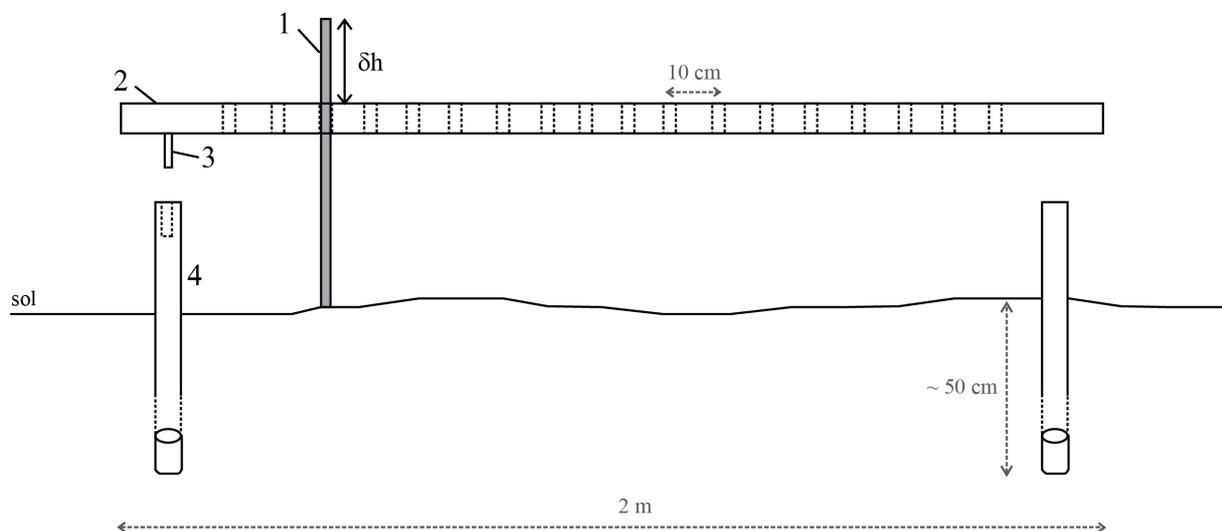


Figure 13 : Dispositif permettant de mesurer les évènements de sédimentation et d'érosion.

II.2.2. Sédiments

II.2.2.1. Photographies

Des photographies ont été prises sur la zone d'étude, pour permettre une analyse qualitative de la répartition des faciès sédimentaires. La présence de dépôts

sableux à la surface du cordon, mêmes temporaires, sera particulièrement recherchée, puisqu'ils peuvent faciliter le développement de certaines espèces végétales. Des panoramas ont été assemblés de manière à disposer de vues complètes des revers de cordons sur les transects T1 et T2.

II.2.2.2. « Pièges » à sédiments

Afin de disposer d'éléments quantifiés de la dynamique éolienne sur le cordon de galets, des mesures de flux ont été effectuées. Pour cela, des pots de 23,5 cm de diamètre ont été disposés en surface du cordon, afin de piéger les sédiments en traction et saltation. Un morceau de tissu a été collé sur le fond, troué, des pots afin de filtrer l'eau issue des précipitations et/ou éventuellement l'eau de mer.

Quinze pièges ont été disposés le 13 juin à 10h30 et leur contenu a été récupéré à 14h30. Ils ont été localisés au sommet et sur les revers externe et interne des cordons a et b à raison de 6 sur le transect 1 et 9 sur le transect 2, comme indiqué sur la figure 14.

Les sédiments piégés ont été séchés à l'étuve (à 60°C, pendant 2 jours) puis pesés, et ont fait l'objet d'une granulométrie laser.

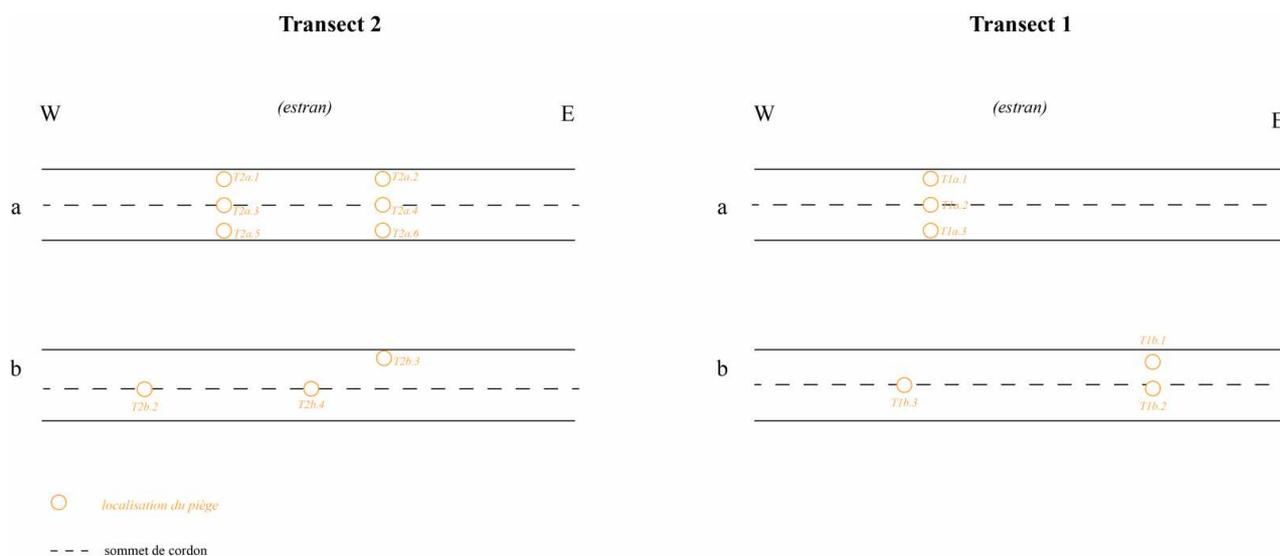


Figure 14 : Localisation des pièges sédimentaires sur les transects T1 et T2

II.2.3. Mesures sur la végétation

II.2.3.1. Mesures morphologiques des populations de Crambe

Afin de comparer les traits morphologiques du Crambe en fonction de l'âge des cordons, 5 quadrats de 4m² ont été disposés sur les différents cordons sélectionnés pour les mesures de sédimentation, soit 35 quadrats (15 sur T1 et 20 sur T2). Chacun des quadrats est sous-divisé en 4 quadrats de 1m² (soit 140 quadrats) afin de localiser au GPS tous les pieds de Crambe présents (Figure 15).

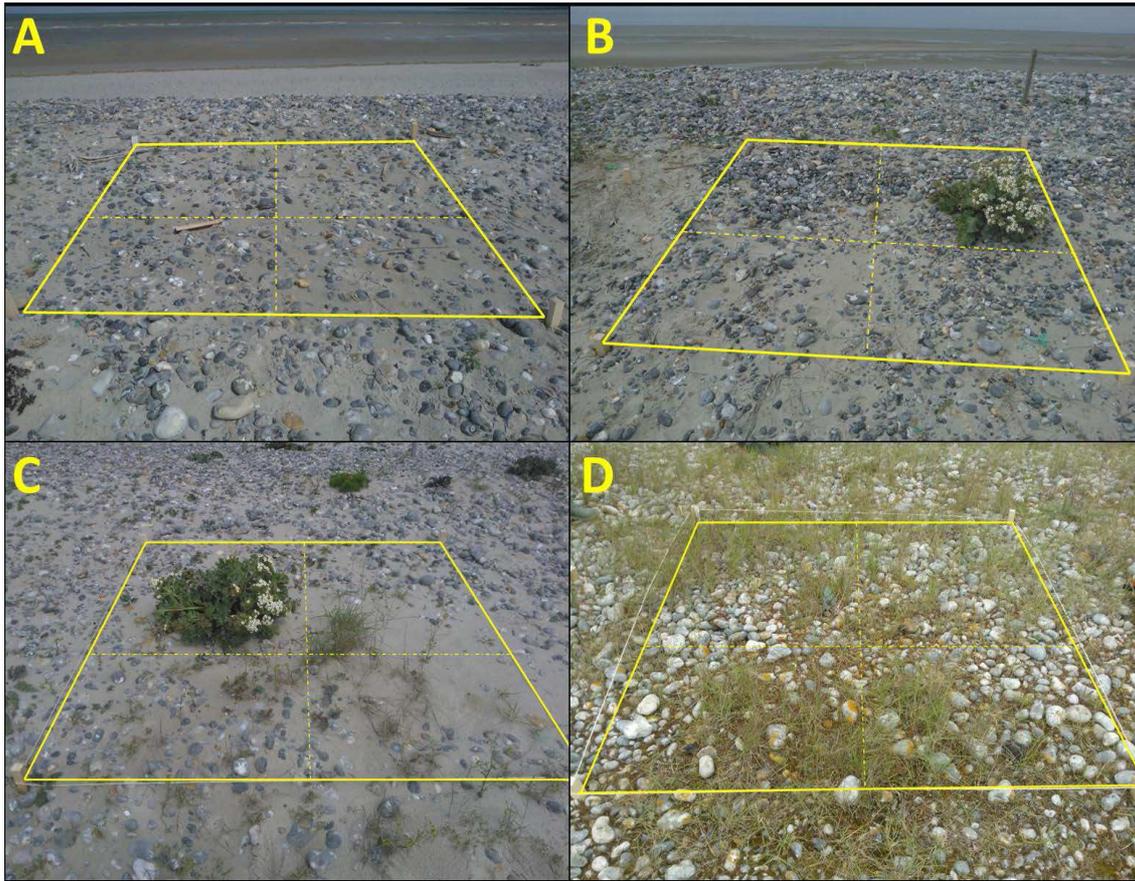


Figure 15 : exemples de quadrats de 4m² subdivisés en 4 surfaces de 1m² ayant permis de caractériser les traits morphologiques du *Crambe maritime*.
 A : T1 cordon A ; B : T2 cordon A ; C : T1 cordon C ; D : T2 cordon D

Les mesures morphologiques ont été réalisées à deux dates : fin mai et mi-juin. Les paramètres mesurés étaient la hauteur, la largeur, la longueur, le diamètre du pivot, le nombre de ramifications du pivot, la présence de fleurs.

II.2.3.2. Caractérisation de la végétation autour des Crambes

Au sein de chaque quadrat de 1m², deux inventaires floristiques ont été effectués (fin mai et mi-juin) selon la méthode de Braun Blanquet. Cette méthode est basée sur l'estimation des coefficients d'abondance/dominance pour chaque espèce identifiée. Parallèlement, le recouvrement de la végétation totale ainsi que celle du sable ont été notés. Les espèces ont été identifiées à l'aide de la flore de Provost (1993).

II.2.3.3. Caractérisation des paramètres abiotiques

Au niveau des dispositifs de barres de sédimentation (avec et sans crambe), des enregistrements de température, d'humidité du sol ont été réalisés sur 24h, les 18 et 19 juin 2013 afin d'estimer l'effet tampon de la plante.

III. Résultats et interprétation

III.1. Caractéristiques morphologiques, sédimentaires et de végétation

III.1.1. Morphologie

Le système étudié est constitué de plusieurs cordons : un cordon proximal (cordon A), actif, et plusieurs cordons reliques (cordons B, C et D sur les transects T1 et T2). Leur topographie est représentée sur la figure 16.

Le cordon présente une courbure. Il est orienté N20° à Ault (extrémité SO) et N90° au Hourdel (extrémité NE). Plus particulièrement, sur la zone étudiée, les valeurs sont de N55° sur le transect T2 et N70° sur le transect T1. La largeur des sous-cordons ou crochons est de l'ordre de 15-45 m sur T2 et de 20-40 m sur T1. Le cordon proximal (cordon A) semble présenter la plus grande largeur. La hauteur de la flèche varie entre 0,7 m au niveau du cordon C du transect 1 et 3,2 m sur le cordon B transect 2 (Tableau 1).

En général, les pentes les plus fortes sont observées sur les revers externes où elles sont d'environ 20-25° voire 30° à certains endroits. De plus, les pentes diminuent avec l'augmentation de l'âge des cordons, et la zone plane (pente < 10°) au sommet est plus large (environ 5 à 7 m) sur le cordon C que sur les cordons A et B (1, 5-2 m). Les cordons semblent ainsi correspondre à des formes résiduelles des barres de galets formées par la marée et/ou la houle lorsque ceux-ci étaient en position proximale. Avec le temps, ces structures se fossilisent, d'où un effet de lissage de leur morphologie, par gravité et par érosion.

Tableau 1 : Paramètres morphologiques des cordons sur les transects T1 et T2.

	T1			T2					
	A	B	C	A	B		C		D
					Externe	Interne	Externe	Interne	
« Age »	2011	2006	2006	2008	2000		1996		1996
Orientation	N70	N70	N75	N55	N60		N65		N110- N130
Largeur (m)	30-40	20	20-25	40-45	20		25-30		15
Hauteur (m)	2,3	2,9	0,7	2	3,2		2		1,3
Pente (°)	20-25	20-25		20-25	20-30	15-25	15-20	nd	nd

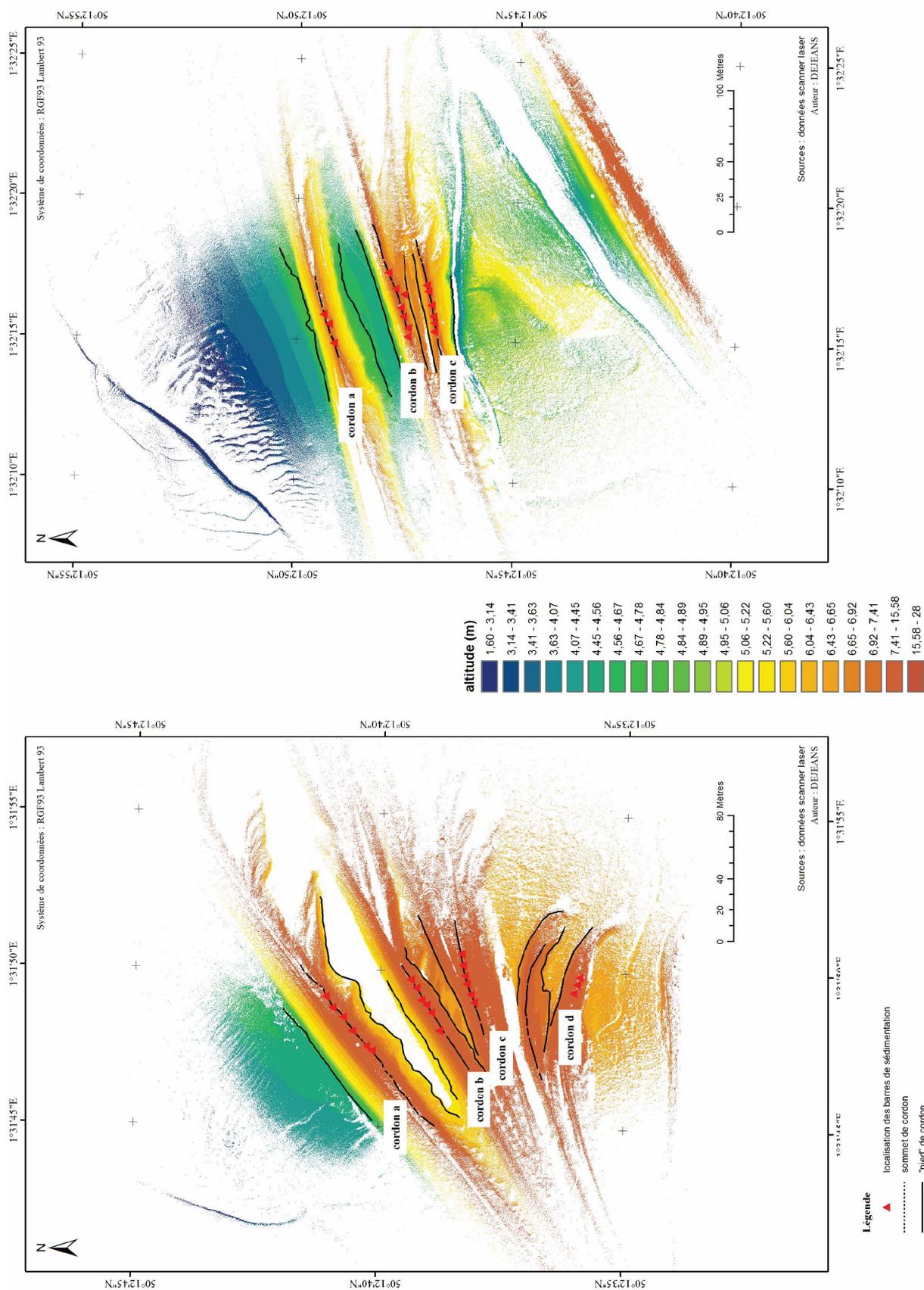


Figure 16 : Topographie des transects étudiés et localisation des barres de sédimentation (triangles rouges). A gauche : T2 ; à droite : T1.

Les données de niveaux d'eau caractéristiques pour le secteur de Cayeux-sur-Mer (Tableau 2) ont été reportées sur la topographie des transects T1 et T2 (Figure 17). Ces cartes permettent de constater que la mer n'atteint les cordons que lors de vives-eaux moyennes et des marées de plus forts coefficients. Les mortes-eaux n'ont donc aucun effet sur les cordons.

Tableau 2 : Niveaux de marées caractéristiques à Cayeux-sur-Mer (EPSHOM, 2001)

	Coeff.	Hauteur (IGN69)
Plus haute mer astronomique	-	5.58
Pleine mer de vive-eau moyenne	95	4.88
Pleine mer de morte-eau moyenne	45	3.03
Niveau d'eau moyen	-	0.52
Basse mer de morte-eau moyenne	45	-2.02
Basse mer de vive-eau moyenne	95	-3.77
Plus basse mer astronomique	-	-4.52

Une différence est aussi à noter entre les deux transects. Une plus grande proportion du cordon T1 est touchée par les marées comparativement au cordon T2. Plus précisément, près des 2/3 du cordon sont émergés en permanence sur le transect T1 contre environ 7/8 sur le transect T2. La marée s'engouffre entre les cordons A et B en « contournant » le cordon proximal (cordon A) et peut au maximum recouvrir 1/3 du cordon B sur le transect T1, mais ne l'atteint jamais sur le transect T2. Le cordon C est quant à lui toujours au-dessus du niveau d'eau, tout comme le cordon D sur le transect T2. (Figure 17).

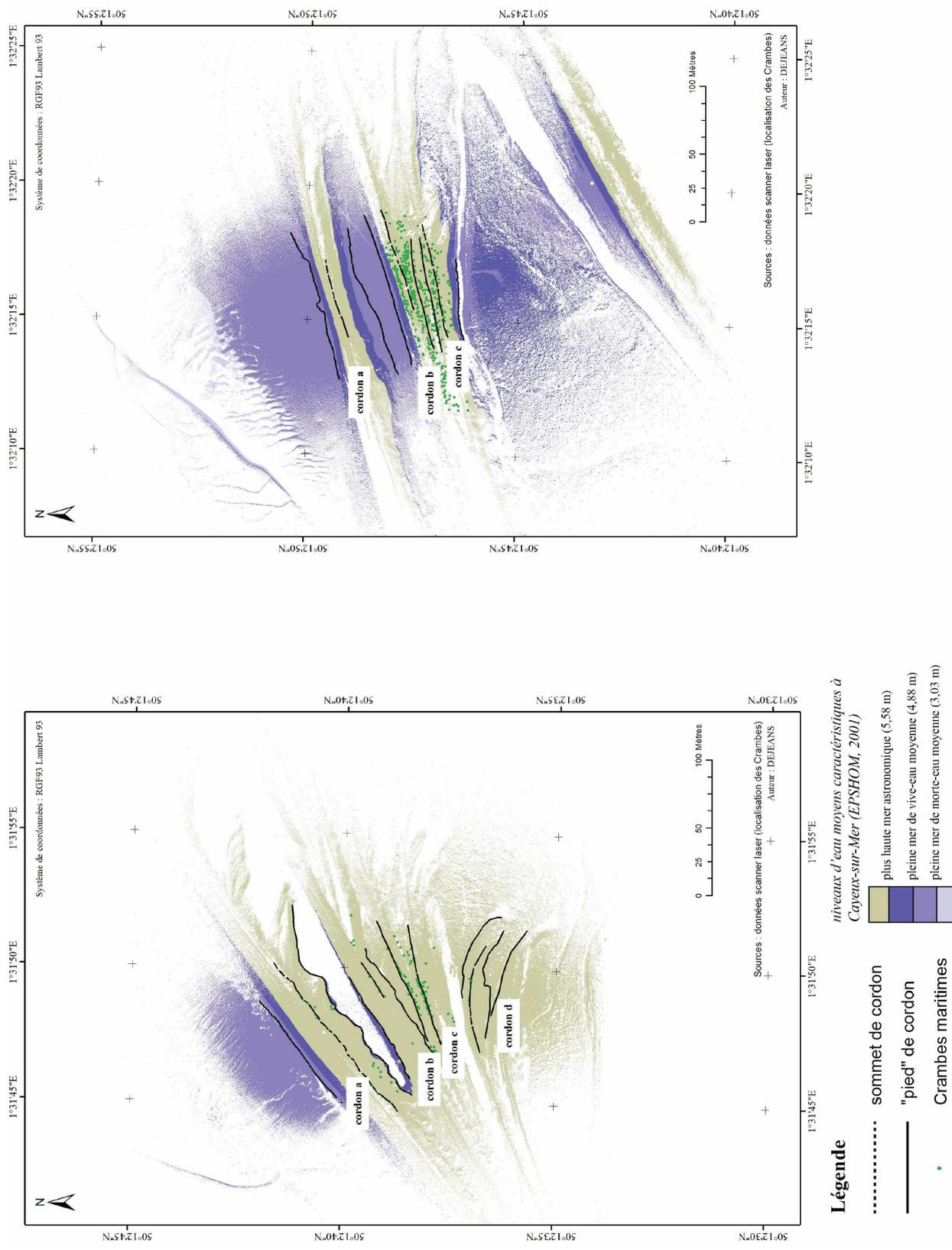


Figure 17 : Distribution des zones atteintes par la marée et des individus de Crambe (points verts) sur les transects 1 et 2.

III.1.2. Sédiment

Les galets qui constituent la flèche du Hourdel ont une taille allant de 2 à 15 cm (Livet & Roue, 2012). Des sables moyens à grossiers (Augris *et al.*, 2004) comblent en partie la porosité.

Les panoramas des cordons ont permis de mettre en évidence des taux d'ensablement différents en fonction des revers (internes ou externes) et des cordons eux-mêmes.

De manière générale, pendant toute la période d'étude, les cordons du transect T1 présentent un ensablement plus marqué que ceux du transect T2, peut-être parce qu'ils sont moins hauts et donc plus accessibles par les sables apportés par la marée et par les vents. Les revers externes (tournés vers l'estran) présentent moins de sable en surface que les revers internes, surtout en ce qui concerne les cordons A (Figure 18) et B. Le revers interne du cordon A présente parfois des structures rythmiques typiques des processus de déflation éolienne (Figure 18).



Transect 2, cordon a externe



Transect 1, cordon a externe



Transect 2, cordon a interne



Transect 1, cordon a interne

Figure 18 : Photos du cordon A le 11 juin 2013.

III.1.3. Végétation

III.1.3.1. Répartition des pieds de Crambe

Les individus de Crambe étaient observables sur les scans obtenus le 11 juin 2013 grâce au scanner laser terrestre, étant donné leur diamètre d'une cinquantaine de centimètres, à l'exception des plus petits individus dans les secteurs à forte densité de pieds. Ils ont ainsi pu être identifiés et localisés individuellement (Figure 17).

Sur les transects T1 et T2, de largeur respective 145 et 160 m, 384 et 115 individus de Crambes maritimes ont été respectivement repérés sur les 2 transects de cordon T1 et T2 (Tableau 3).

Plus précisément, le cordon A, le plus jeune, ne présente aucun individu au niveau du transect T1 alors que quelques-uns sont observables sur le transect T2 (à raison de 0,01 ind/m²). Cette différence semble indiquer que le développement de cette espèce ne se fait pas sur les cordons les plus récemment formés, mais commence sur ceux ayant déjà quelques années (cf « âge » des cordons ; Figure 11). Ce résultat est cohérent avec les observations faites par Meirland et Duponchelle (2013) qui montrent que le couvert végétal sur le cordon atteint 30% en cinq ans. Le cordon B, le plus riche en Crambes sur les deux transects, abrite plus d'individus sur T1 que sur T2, avec une densité maximale respective de 0,15 ind/m² et 0,06 ind/m². Sur le cordon C, la densité maximale de choux est de 0,12 ind/m² (transect T1).

Tableau 3 : Densité des pieds de Crambe sur les transects T1 et T2.

	T1			T2			
	A	B	C	A	B	C	D
Largeur du cordon (m)	30-35	20-25	20-25	40-45	20	25	15
Largeur transect (m)	145			160			
Nb Crambes	364			115			
Densité max (ind/m²)	0	0,15	0,12	0,01	0,06	nd	nd

D'autre part, il est à noter que les Crambes sont situés au-dessus du niveau de plus haute mer astronomique et ne sont par conséquent jamais immergés, sauf peut-être lors d'évènements exceptionnels (Figure 17). Cela concorde avec ce qui a été observé par Lacroix et Lebaill (2006) qui précisent que les Crambes se développent au-dessus des niveaux de vive-eau.

Sur le transect T1, la distribution des choux s'étend sur toute la zone supratidale (à l'exception du cordon A où aucun individu ne s'est développé), alors qu'ils ont poussé uniquement dans la partie la plus haute des cordons sur T2. Ainsi, sur le transect 2, les choux ont altitude de 6 m ou plus, alors que certains individus du transect T1, notamment sur le cordon C, sont situés vers 4 m d'altitude.

En outre, la cartographie des choux et surtout les photos prises sur terrain permettent de mettre en évidence que les Crambes sont surtout situés sur les sommets et les revers internes des cordons. Exception faite du cordon C, aucun Crambe n'est observable sur les revers externes. Cela peut être mis en relation avec les pentes, qui sont plus faibles sur le cordon C externe, allant au maximum jusqu'à 20°, alors qu'elles dépassent 30° pour les cordons plus proches de la mer.

III.1.3.2. Morphologie des pieds de Crambe en fonction de l'âge des cordons.

Les mesures des traits morphologiques effectuées sur les quadrats permanents montrent que la hauteur et la longueur des individus sont fortement corrélées (figure 19 ; $r^2 = 0,657$). La mesure de la hauteur seule pourra suffire pour mettre en évidence la relation entre l'âge du cordon et le développement de la plante.

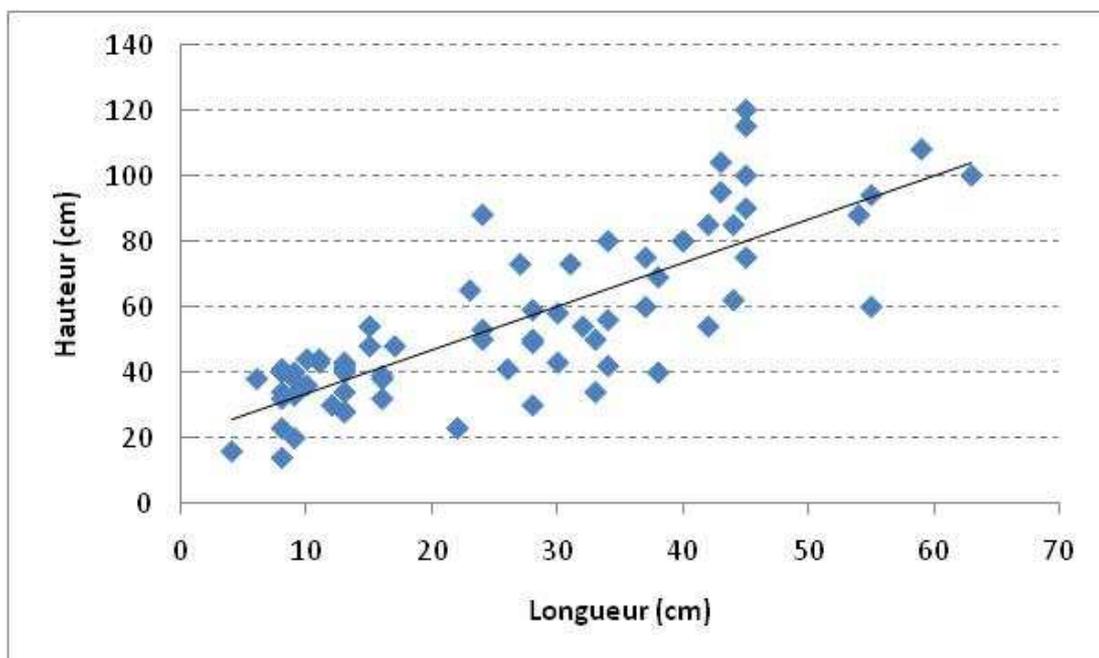


Figure 19 : Relation entre les variables hauteur et longueur des pieds de Crambe maritime pour l'ensemble des cordons suivis au cours de l'étude. La courbe de tendance met en évidence une relation linéaire très forte entre les deux paramètres ($r^2 = 0,657$).

Les valeurs des 5 traits morphologiques mesurés sur les pieds de crambe (hauteur, largeur, longueur, épaisseur du pivot et nombre de ramifications du pivot) augmentent avec l'âge des cordons de galets (Tableau 1) sur le cordon 2, à l'exception du cordon D. Sur ce dernier, les pieds de crambe ont une taille significativement plus petite ($p < 0,05$). La hauteur varie de 16,6 à 36,56 cm, la longueur de 42,6 à 73,4 cm et la largeur de 31,4 à 59,33 cm. L'épaisseur du pivot passe de 1,38 à 2,23 cm et le nombre de ramifications de 1,4 à 3,44 en moyenne.

Sur le transect 1, les valeurs de ces mêmes traits sont comparables entre les pieds pour les cordons A, B et C. Les populations de Crambe installées sur le transect 2 semblent donc illustrer une colonisation progressive des cordons qui le composent. Les populations du cordon A seraient les plus récentes et les populations du cordon C, les plus anciennes. Les individus du cordon D semblent ne

pas trouver les conditions optimales à son développement : la densité de la population diminue et leur développement est limité. Globalement, les populations de Crambe présentes sur les Transects 1 et 2 sont comparables morphologiquement. (Tableau 4).

Tableau 4 : Valeurs morphologiques moyennes des pieds de Crambe en fonction de l'âge des cordons pour les transects 1 et 2.

	Epaisseur pivot (cm) +/- erreur standard		Hauteur (cm) +/- erreur standard		Longueur (cm) +/- erreur standard		Largeur (cm) +/- erreur standard		Nbr de ramifications du pivot +/- erreur standard	
T1	1,74	0,11	26,95	2,24	55,16	3,24	43,89	2,99	1,50	0,13
CA	0,40		28,00		59,00		54,00		1,00	
CB	1,73	0,12	27,58	2,50	51,76	3,28	39,94	2,79	1,39	0,14
CC	2,23	0,16	24,80	5,67	66,00	8,79	55,90	8,58	1,90	0,35
T2	1,81	0,15	25,71	3,09	55,86	5,80	45,75	5,77	2,61	0,39
CA	1,38	0,29	16,60	5,94	42,60	9,87	31,40	8,55	1,40	0,40
CB	2,00	0,28	26,50	5,89	65,63	10,45	54,88	11,79	3,00	0,53
CC	2,23	0,26	36,56	5,53	73,44	10,29	59,33	11,50	3,44	1,03
CD	1,27	0,15	16,00	3,17	27,50	4,21	25,17	4,01	1,83	0,31
Total général	1,77	0,09	26,47	1,81	55,43	2,98	44,61	2,87	1,93	0,18

La répartition du nombre de Crambe, en fonction de leur hauteur (Figure 20) et des cordons, montre que les densités d'individus les plus élevées se situent sur le cordon B du transect 1. Les densités les plus faibles se rencontrent sur les cordons A des deux transects.

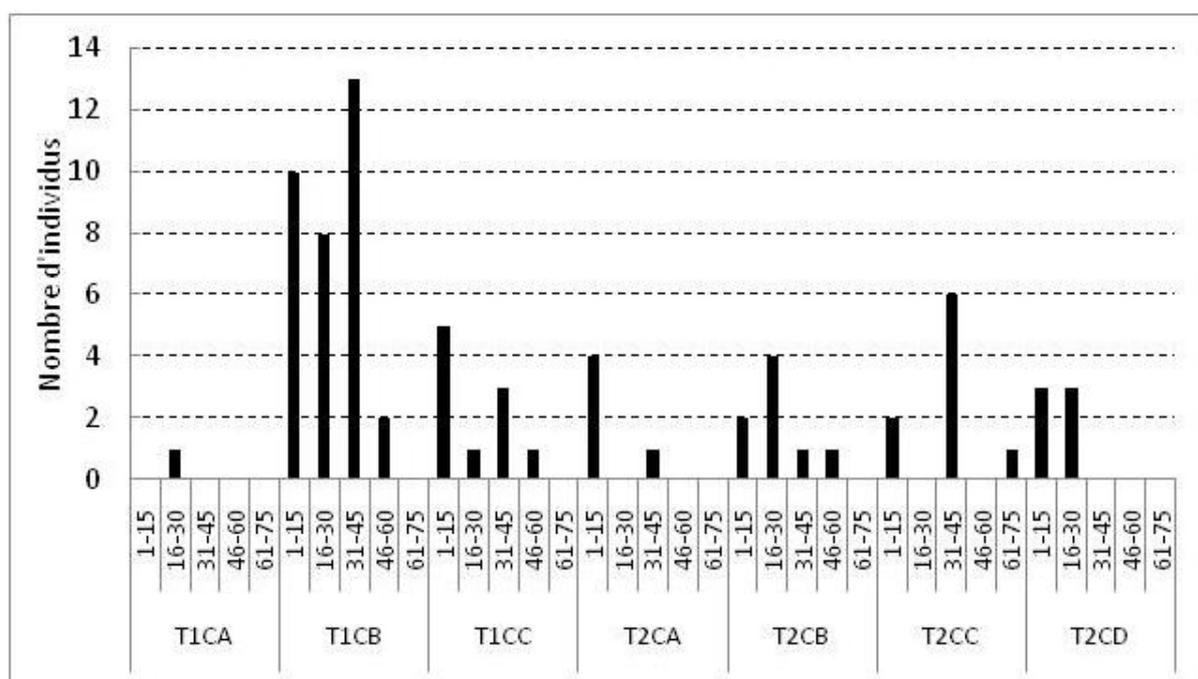


Figure 20: Distribution des hauteurs de Crambe en fonction de l'âge des cordons des deux transects étudiés. Les hauteurs sont réparties en catégories : 1 à 15 cm, 16 à 30 cm, 31 à 45 cm, 46 à 60 cm et 61 à 75 cm.

III.1.3.3. Capacité de reproduction du Crambe

La figure 21 montre que les individus capables de fleurir ont une taille supérieure à 20 cm de hauteur.

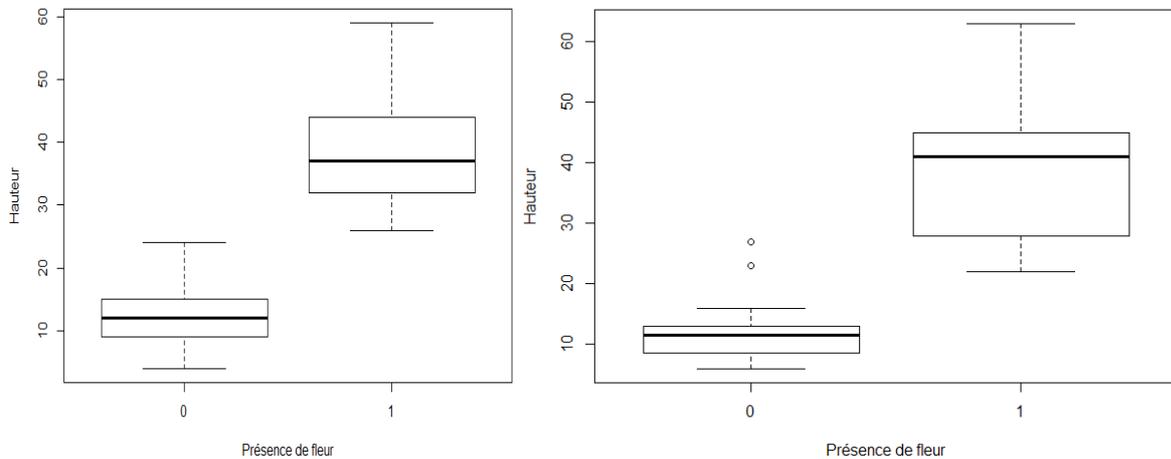


Figure 21 : Relation entre la production de fleurs et la hauteur des individus de Crambe maritime pour le T1 (à gauche) et T2 (à droite).

III.2. Dynamique rapide du cordon

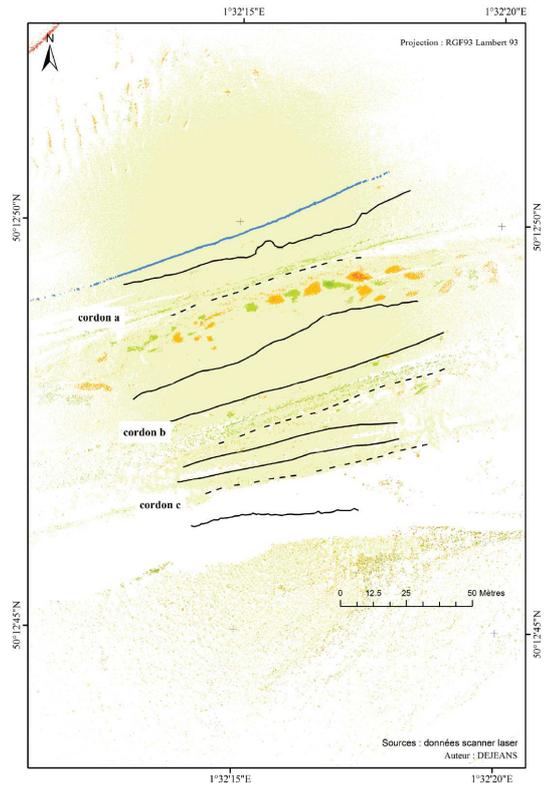
Des données topographiques ont été acquises à l'aide d'un scanner laser terrestre (cf paragraphe II.2.1.1) entre le 15 avril et le 11 juin 2013 (Figure 12), sur les transects T1 et T2 du cordon de galets. Par soustraction, deux à deux, des modèles numériques de terrain obtenus, il est possible d'analyser l'évolution diachronique des transects de cordons sur différentes périodes de courtes durées (de l'ordre de plusieurs jours). Plusieurs scénarios correspondant à différentes conditions de forçages (épisode de vent, morte-eau, vive-eau) peuvent être analysés (Figure 22).

La plus forte mobilité est observée sur le cordon proximal (cordon A), en particulier sur son revers externe, qui est le plus exposé aux fortes conditions énergétiques induites par la marée et les houles. En général, un gradient de diminution de la mobilité est observé du cordon proximal jusqu'au cordon le plus distal (cordon C ou D respectivement pour le transect T1 et T2), consistant avec une diminution des apports sableux éoliens, conséquents en provenance de l'estran.

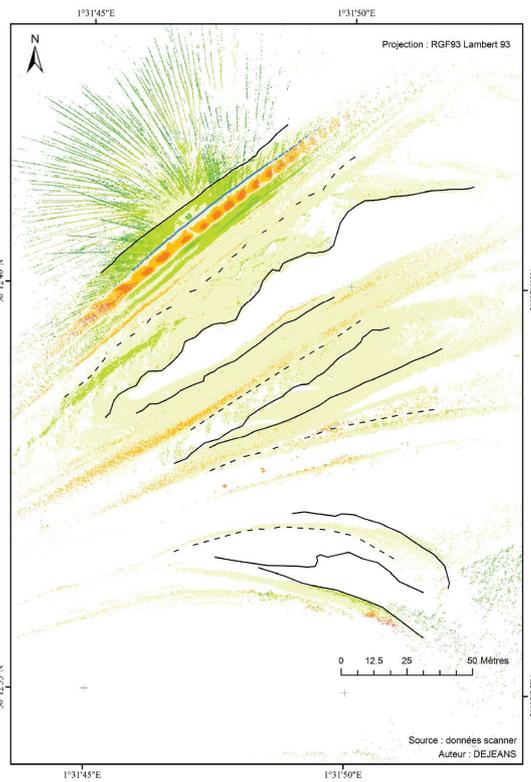
Légende

- sommet de cordon
- "pied" de cordon
- hauteur d'eau max.

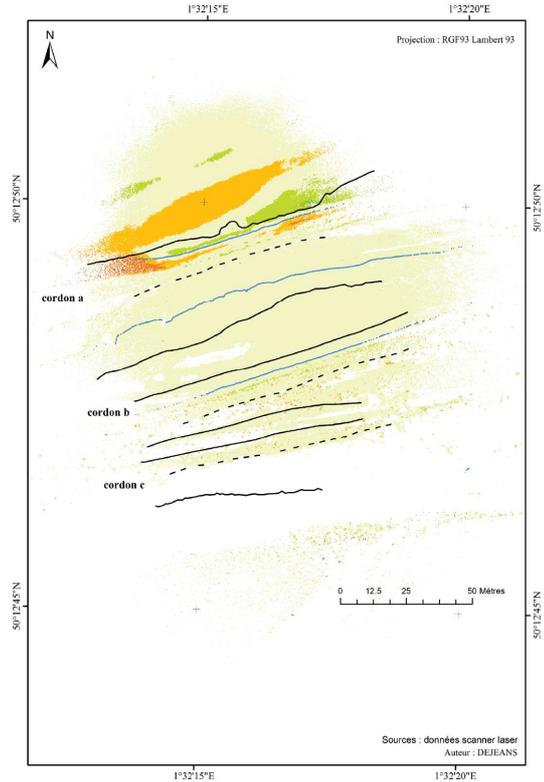
différence d'altitude (m)	
	-0.08 - 0.08
	< -0.8
	-0.8 - -0.4
	-0.4 - -0.2
	-0.2 - -0.08
	0.08 - 0.2
	0.2 - 0.4
	0.4 - 0.8
	> 0.8



Transect 1 du 15 au 24 avril



Transect 1 du 24 avril au 03 mai



Transect 1 du 22 au 30 mai

Figure 22 : Exemples d'évolution de la topographie des cordons pour différentes conditions de marées et de vents.

En haut à gauche : épisode de vent sur le transect T1 ; en bas : période de vive-eau associée à un épisode de vent sur le transect T2 (à gauche) et T1 (à droite). Les évolutions comprises entre -8 et +8 cm sont considérées comme nulles (précision des données scanner après assemblage).

III.2.1. Influence de la marée

Seules les marées de vives-eaux atteignent le cordon et sont susceptibles de le modifier (Figure 22, cartes B et C). Plus précisément, la base des cordons A et B (altitude NGF d'environ 4,45 m) est atteinte pour des coefficients de marée de 85 et plus (Figure 17).

Sur le revers externe du cordon proximal (cordon A), deux phénomènes notables sont systématiquement observés pendant les périodes de vives-eaux. La base du cordon, située sous le niveau d'eau maximum atteint par la marée, subit une érosion. Cette érosion peut correspondre : (i) au départ de sables apportés par les vents ou les marées précédentes, et/ou (ii) au départ de galets, en particulier si l'agitation par la houle est importante. Juste au-dessus du niveau d'eau atteint par la marée, un engraissement sur une bande de 5 m de large environ est observé. Il pourrait correspondre à une berme de galets formée par le jet de rive/déferlement, provenant probablement de l'érosion basale du cordon. Lorsque les coefficients de marée diminuent, des bermes en gradins sont observées (cas de la période du 24 avril au 3 mai sur T2 ; Figure 22, carte b), conformément aux observations de Dolique (1998).

Par ailleurs, des modifications importantes peuvent être observées sur l'estran, juste devant le cordon A. Entre le 24 avril et le 3 mai, l'ensemble de l'estran est en érosion au niveau du transect T2 (Figure 22, carte B). Entre le 22 et le 30 mai 2013, des alternances de bandes en érosion et en accrétion semblent indiquer la migration de barres sableuses sur le haut de l'estran au niveau du transect T1 (Figure 22, carte C).

La base des autres revers de cordons atteints par la marée (revers interne du cordon A et externe du cordon B sur les 2 transects, et revers interne du cordon C sur le transect T1) ne présente aucune modification. Dans ces secteurs, la marée, qui arrive par le Nord-Est après avoir contourné le cordon proximal (cordon A), induit une montée du niveau d'eau sur le cordon qui n'est pas associée à une agitation de la tranche d'eau et ne permet donc pas de mobiliser les sédiments présents en surface du cordon, qu'il s'agisse des galets ou des sables (ou tout du moins sur des épaisseurs inférieures à 8 cm, qui correspond à la précision des modèles numériques de terrain).

III.2.1. Influence des vents

Le vent est un facteur important de la dynamique sédimentaire en milieu littoral, en particulier sur les littoraux de la Manche Est (Anthony et al., 2009).

Une caractérisation des granulométries et des flux sédimentaires éoliens a été réalisée à partir de quantités de sédiment piégées dans des pots disposés sur les cordons A et B des transects T1 et T2 (cf paragraphe II.2.2.2 ??). Les mesures ont eu lieu dans la journée du 13 mai 2013 lors d'un épisode de vent de 6 à 7,5 m.s⁻¹ (vitesse moyenne à 4 m de hauteur) en provenance N250°(Ouest).

Les sédiments transportés par le vent correspondent à des sables bien triés, présentant un mode granulométrique et une médiane de 250 µm. Les flux sableux

transportés par le vent sont compris entre 2.10^{-3} et $4 \text{ kg.m}^{-2}.\text{h}^{-1}$ (Tableau 5). Les flux sont plus élevés sur les zones situées au vent : (i) sur les revers externes et au sommet des cordons, et (ii) sur le cordon proximal (cordon A), plus proche de la source en sables (estran) (Figure 23).

Tableau 5: Flux totaux sableux transportés par les vents sur les transects T1 et T2.

Piège	Transect	Cordon	Localisation sur cordon	Qté récupérée (g)	Flux (kg.m-2.h-1)
t1a.1	t1	a	pente externe (W)	336.33	1.94
t1a.2			sommet	111.66	0.64
t1a.3			revers interne (W)	97.48	0.56
t1b.1		b	pente externe (E)	307.47	1.77
t1b.2			sommet (E)	9.43	0.05
t1b.3			sommet (W)	169.12	0.98
t2a.1	t2	a	pente externe (W)	266.39	1.54
t2a.2			pente externe (E)	21.75	0.13
t2a.3			sommet (W)	722.40	4.17
t2a.4			sommet (E)	36.33	0.21
t2a.5		b	revers interne (W)	202.65	1.17
t2a.6			revers interne (E)	88.54	0.51
t2b.2			sommet (W)	0.84	0.00
t2b.3			pente externe (E)	21.81	0.13
t2b.4		sommet (E)	0.45	0.00	

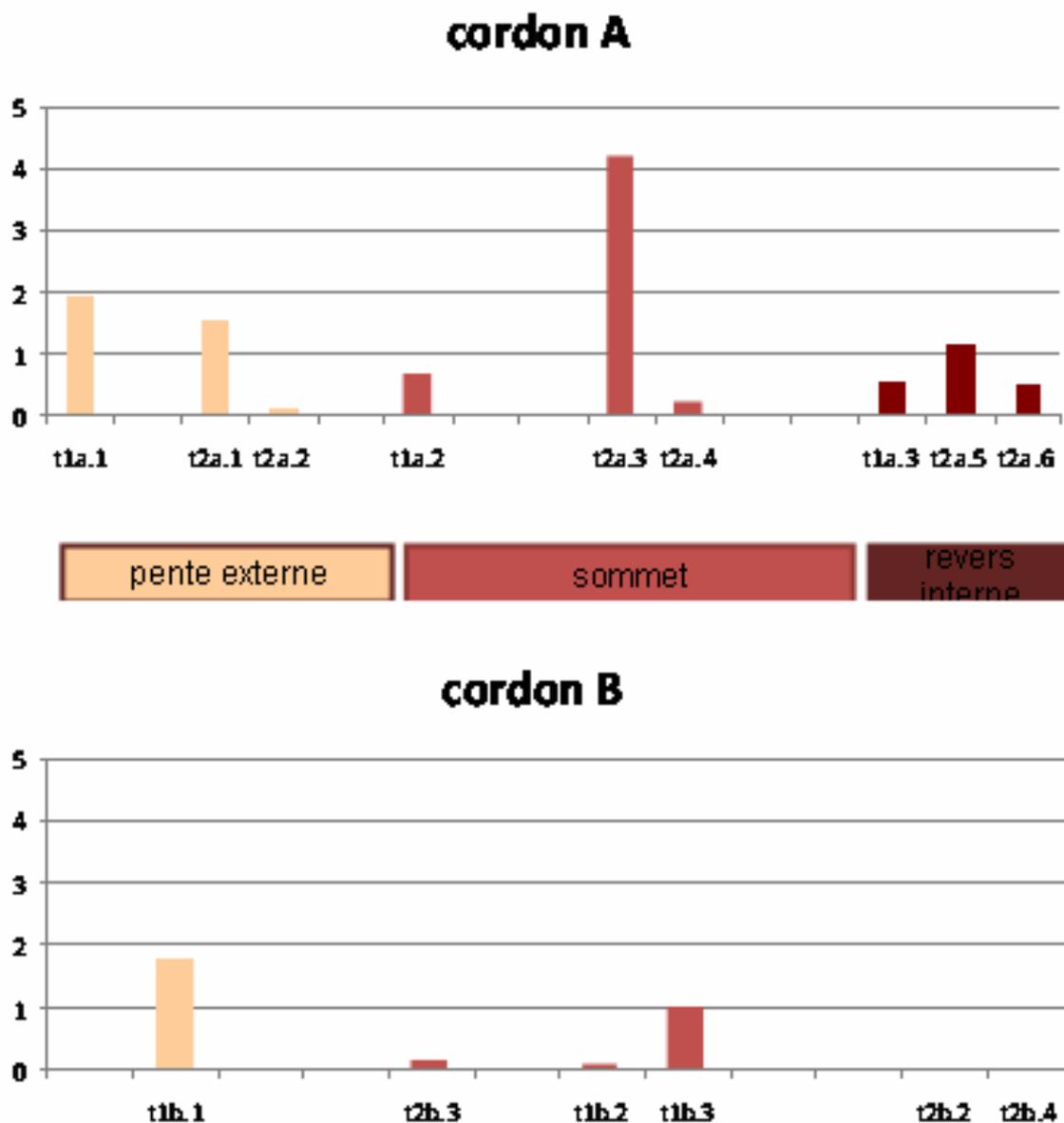


Figure 23 : Flux éoliens en fonction de la position sur les cordons.

Pendant les épisodes de vent, des modifications de la morphologie du cordon sont observées, essentiellement en partie haute du cordon : une érosion sur l'un des revers du cordon et une accrétion sur l'autre revers. Sous l'effet des vents dominants d'Ouest à Sud-Ouest, le revers externe est érodé et du sable se dépose sur le revers interne (Figure 22, cartes A et C), mais ce schéma peut être inversé pour d'autres directions de provenance de vents (exemple d'une période de vents de N-NE ; Figure 22, carte B).

Le revers interne du cordon proximal (cordon A) présente : (i) une évolution selon un motif rythmique (tous les 15 m environ) qui pourrait indiquer la migration de structures sableuses, typiques du processus de déflation éolienne (Figure 22, carte A, Figure 24), et (ii) une stabilité en conditions de vive-eau, qui pourrait être

expliquée par le fait que la source de sable (l'estran) est humide la majeure partie du temps rendant le sable cohésif et plus difficilement mobilisable par les vents.

En conditions de morte-eau, lorsque le vent provient de l'estran sableux (cas du transect T2 sur la période du 16 au 24 avril), la base du flanc externe du cordon proximal (cordon A) présente une importante accrétion, pouvant indiquer une alimentation par les sables de l'estran transportés par les vents, non nettoyés par la marée qui n'atteint pas le cordon.



Figure 24 : Photo des motifs rythmiques de déflation éolienne. Exemple du cordon A sur le transect 2.

III.3. Relations Crambe-sédimentation et Crambe-plante

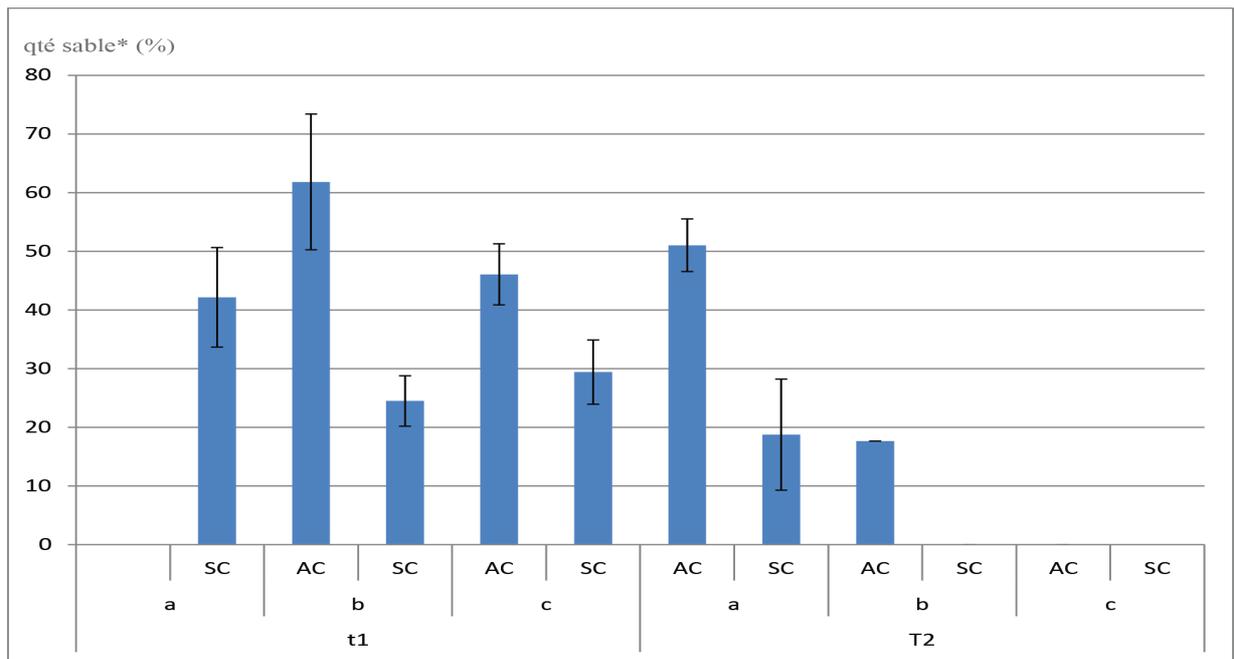
III.3.1. Relations Crambe – sédimentation

Les résultats des mesures sur les barres de sédimentation ont permis de quantifier l'évolution topographique locale (à l'échelle du pied de chou) et la quantité de sable présente sur chaque dispositif. Les moyennes de cette quantité au 11 juin 2013 ont été calculées sur chaque cordon en distinguant les dispositifs avec Crambe et sans Crambe (Tableau 6 et Figure 25).

Le graphe permet de constater que, sur chaque cordon de chaque transect, lorsqu'il y a un Crambe, il y a plus de sable : 45 à 65% (respectivement 15 à 50%) de sable pour les dispositifs avec Crambe, contre 25 à 40% (respectivement 0 à 20%) pour ceux sans Crambe sur T1 (respectivement T2). Cette tendance, à savoir que la proportion de sable est plus importante sur les dispositifs avec Crambe, est observable à toutes les dates de mesures, entre le 24 avril et le 11 juin sur le transect T2 (Figure 26).

Tableau 6 : Quantité (% surfacique) de sable pour les dispositifs avec Crambe (AC) et ceux sans Crambe (SC), par cordon et pour la date du 11 juin 2013.

Sable					
Transect	Cordon		%	Ecart-type	Erreur standard
T1	a	-	-	-	-
		SC	42.17	22.51	13.00
	b	AC	61.83	14.70	8.49
		SC	24.50	20.04	11.57
	c	AC	46.07	7.45	4.30
		SC	29.43	9.01	5.20
T2	a	AC	51.03	9.47	5.47
		SC	18.77	7.79	4.50
	b	AC	17.67	16.40	9.47
		SC	0.00	0.00	0.00
	c	AC	0.00	0.00	0.00
		SC	0.00	0.00	0.00



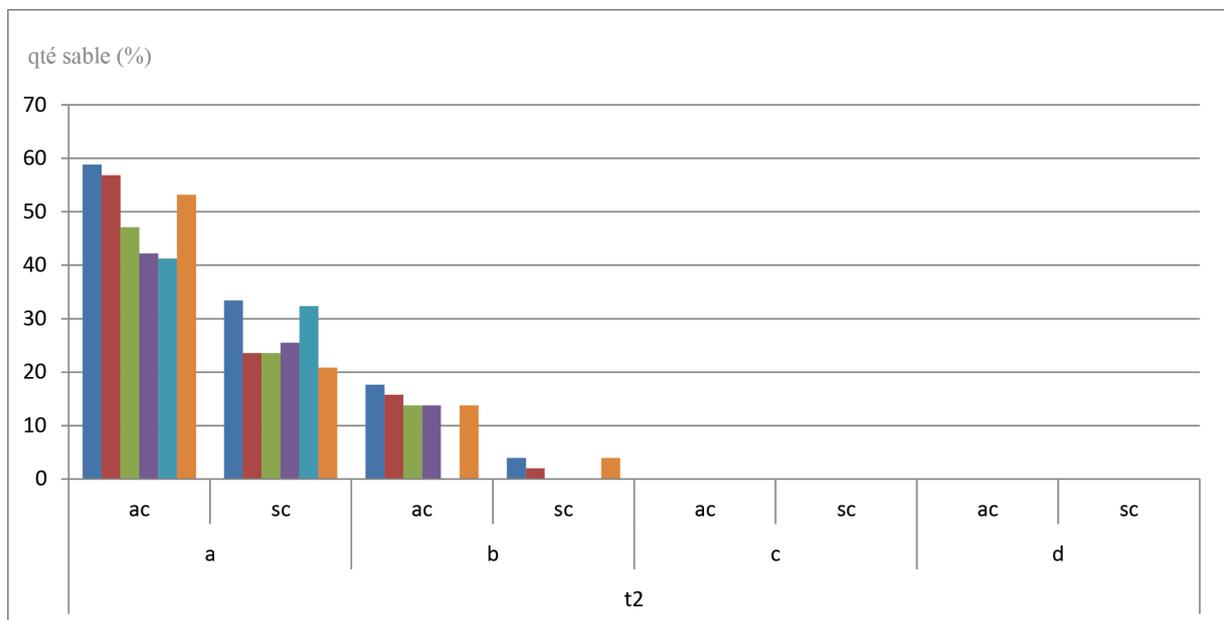
Légende

sable

erreur standard

** quantités observées le 11 juin*

Figure 25 : Représentation de la quantité (% surfacique) de sable pour les dispositifs avec Crambe (AC) et ceux sans Crambe (SC), par cordon et pour la date du 11 juin 2013.



Légende

24 avril

03 mai

17 mai

22 mai

30 mai

11 juin

Figure 26 : Quantité (% surfacique) de sable par date et par cordon, pour les dispositifs avec Crambe (AC) et ceux sans Crambe (SC).

Les résultats des variations de « topographie locale » obtenues à partir des barres de sédimentation montrent que la mobilité est plus importante sur les dispositifs avec Crambe que les autres, avec des variations de l'ordre de 1 à 3 cm (³), contre moins d'1,5 cm au maximum pour les barres où aucun chou n'est présent (Figure 27).

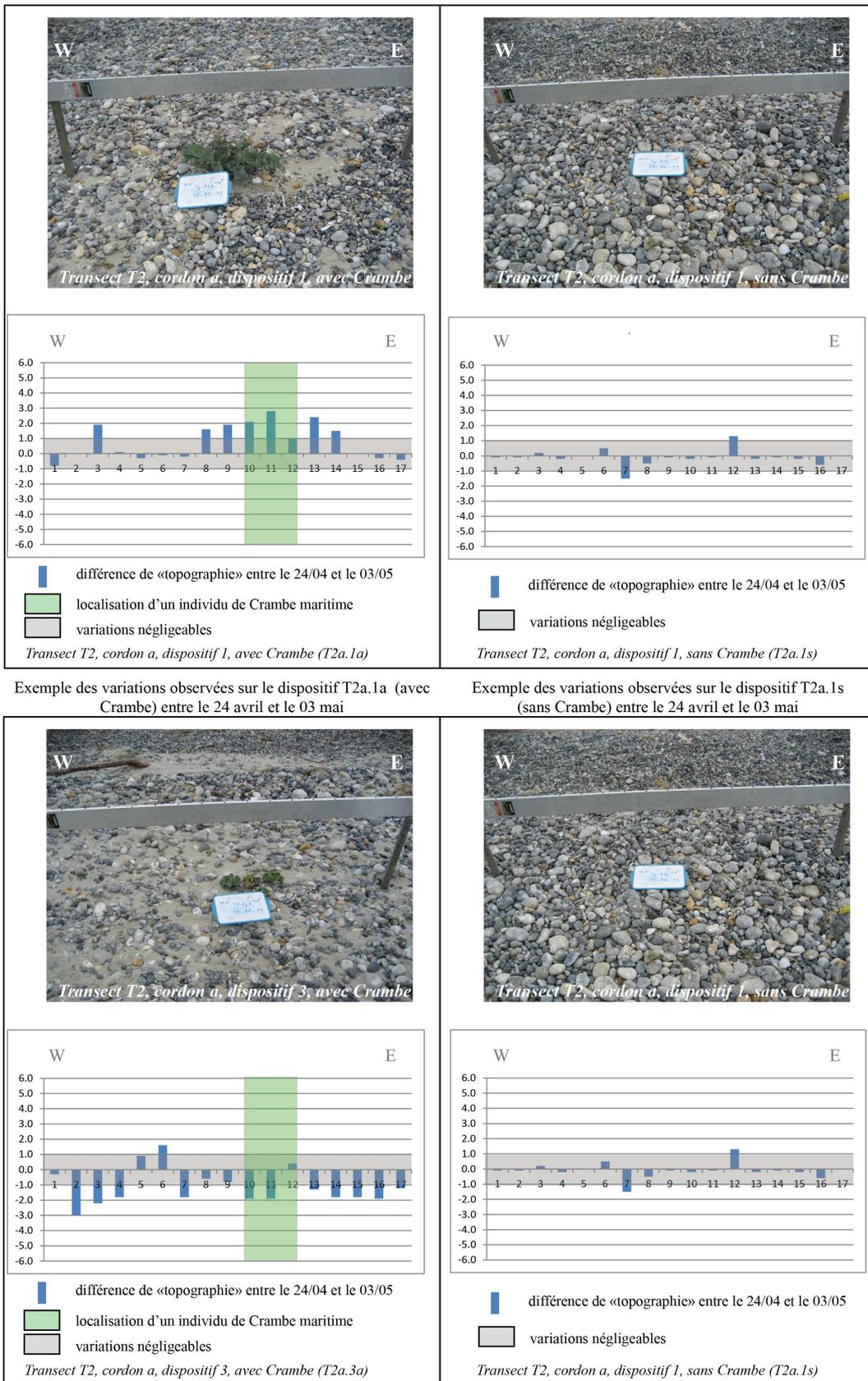
Les évolutions autour des pieds de Crambe sont positives ou négatives en fonction de la période d'observation et du dispositif. Ainsi, les dispositifs avec Crambe peuvent être globalement en accrétion (Figure 27, en haut à gauche) ou globalement en érosion (Figure 27, en bas à gauche). Les analyses statistiques réalisées ne montrent pas de tendance significative à érosion ou à l'accrétion en présence de Crambe, mais une tendance claire à la mobilité sédimentaire est observée.

Cette évolution, à savoir que le sol est plus mobile lorsqu'il y a un Crambe, semble indiquer un effet important de piégeage du sable par le Crambe, qui est clairement visible sur la photo de la figure 28. En effet, le chou stocke le sable, qui transite par transport éolien, ce qui explique l'accrétion. Le sable étant beaucoup plus mobile que les galets, il est plus facilement repris par le vent, d'où l'érosion à certaines périodes.

Les graphiques des Figures 24 et 25 montrent aussi un gradient depuis l'océan vers le continent, en termes de quantité de sable. En effet, la proportion de sable en surface est d'autant plus importante que le cordon est proche de l'estran. Le cordon A possède plus de sable en surface que le cordon B, tandis que les surfaces des cordons C et D ne sont constituées que de galets (Figures 25 et 26).

Il a été tenté d'établir des corrélations entre les caractéristiques morphologiques du Crambe et la proportion de sable observée sur chaque dispositif. Cependant, d'après le test statistique de Kruskal-Wallis, la hauteur, et donc la longueur, de Crambe n'auraient pas d'influence sur la quantité de sable piégé ($F = 1,25$; $p = 0,4830$).

³ Les « variations négligeables » sont les variations d'1 cm ou moins. Elles sont considérées comme négligeables, car correspondent à la marge d'erreur de la mesure.



Exemple des variations observées sur le dispositif T2a.1a (avec Crambe) entre le 24 avril et le 03 mai

Exemple des variations observées sur le dispositif T2a.1s (sans Crambe) entre le 24 avril et le 03 mai

Exemple des variations observées sur le dispositif T2a.3a (avec Crambe) entre le 24 avril et le 03 mai

Exemple des variations observées sur le dispositif T2a.1s (sans Crambe) entre le 24 avril et le 03 mai

Figure 27 : Evolution de la topographie à l'échelle des individus de Crambe. Exemples de mesures sur des barres de sédimentation implantées sur le cordon A du transect T2.



Figure 28 : Photo montrant le phénomène de piégeage de sable par le Crambe, prise le 11 juin 2013.

III.3.2. Effet du Crambe sur les paramètres micro-environnementaux

III.3.2.1. Effet sur la température du sol :

Les mesures de température du sol (0-5 cm de profondeur) montrent des tendances différentes sous les crambes et en dehors des crambes, sur une amplitude de 24h. Les mesures prises à J1 (18 juin) dans les périodes les plus chaudes de la journée (10h30-16h30), montrent que la température du sol mesurée sous la canopée des crambes est toujours inférieure à celle prise en dehors des crambes. Cet écart de température atteint un maximum de - 7.4 °C à 13h sous les crambes. A partir de la fin de l'après midi (16h30) jusqu'au matin J2 (19 juin), la température du sol avec ou sans crambe diminue progressivement. Les températures pendant cette période sont légèrement plus fortes sous crambes que sans crambe (en moyenne +1.5°C sous crambe). Les tendances pour la matinée de J2 sont différentes de celle de J1 en raison des conditions météorologiques contrastées rencontrées le 18 juin (soleil) vs le 19 juin (journée pluvieuse et orageuse). Il est à noter qu'en absence d'ensoleillement (J2), il n'y a pas de différentiel important de température dans des situations avec ou sans crambe (figure 29).

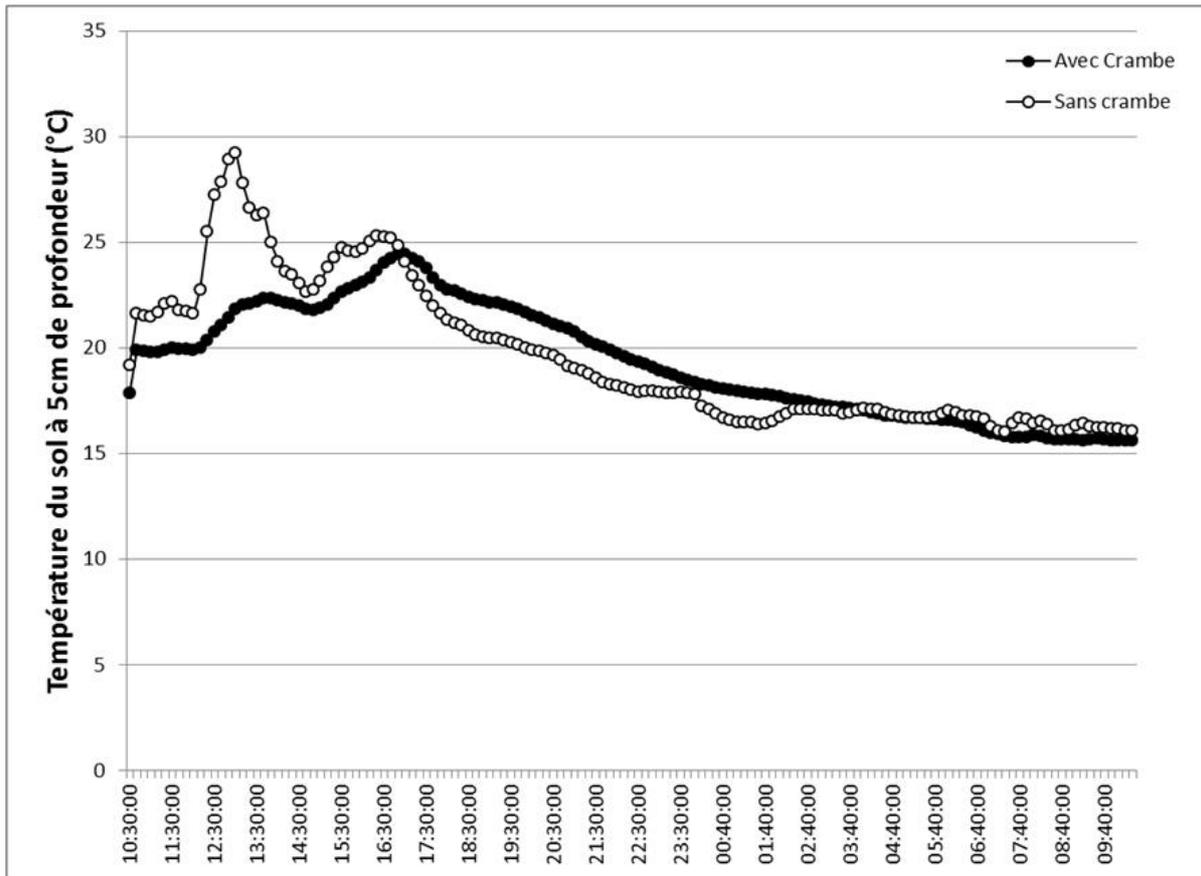


Figure 29 : Température du sol de 0-5 cm de profondeur (°C) pendant 24h (18 et 19 juin 2013) sous et en dehors des pieds de crambes. Les mesures ont été réalisées sur le transect 2 au sein des cordons A, B et C.

III.3.2.2. Effet sur l'humidité du sol

Les mesures d'humidité du sol (%) prises sur les 5 premiers centimètres de profondeur montrent des valeurs d'humidité très faibles. Les sondes utilisées sont conçues pour mesurer des humidités dans des sols homogènes où la surface du capteur dans le sol est en contact direct avec le substrat. Ici, la présence de nombreuses poches d'air dans les galets est sans doute responsable des faibles valeurs acquises. Néanmoins, ces valeurs relatives donnent des informations utiles sur l'effet du crambe au niveau de la rétention d'eau sous sa canopée.

Les mesures prises à J1 (18 juin) dans les périodes les plus chaudes de la journée (10h30-16h30), montrent que l'humidité du sol (0-5cm) sous la canopée des crambes est toujours supérieure à celle en dehors des crambes. Il y a 2 fois plus d'humidité sous les crambes qu'en dehors des crambes. Cette humidité est constante tout au long de cette période dans chacun des 2 traitements.

A partir de la fin de l'après midi (16h30) jusqu'au matin J2 (19 juin), l'humidité du sol avec ou sans crambe diminue fortement. Au matin de J2, et en raison des conditions pluvieuses, l'humidité devient plus forte en dehors des crambes que sous les crambes en raison d'un fort effet abris des crambes. (Figure 30).

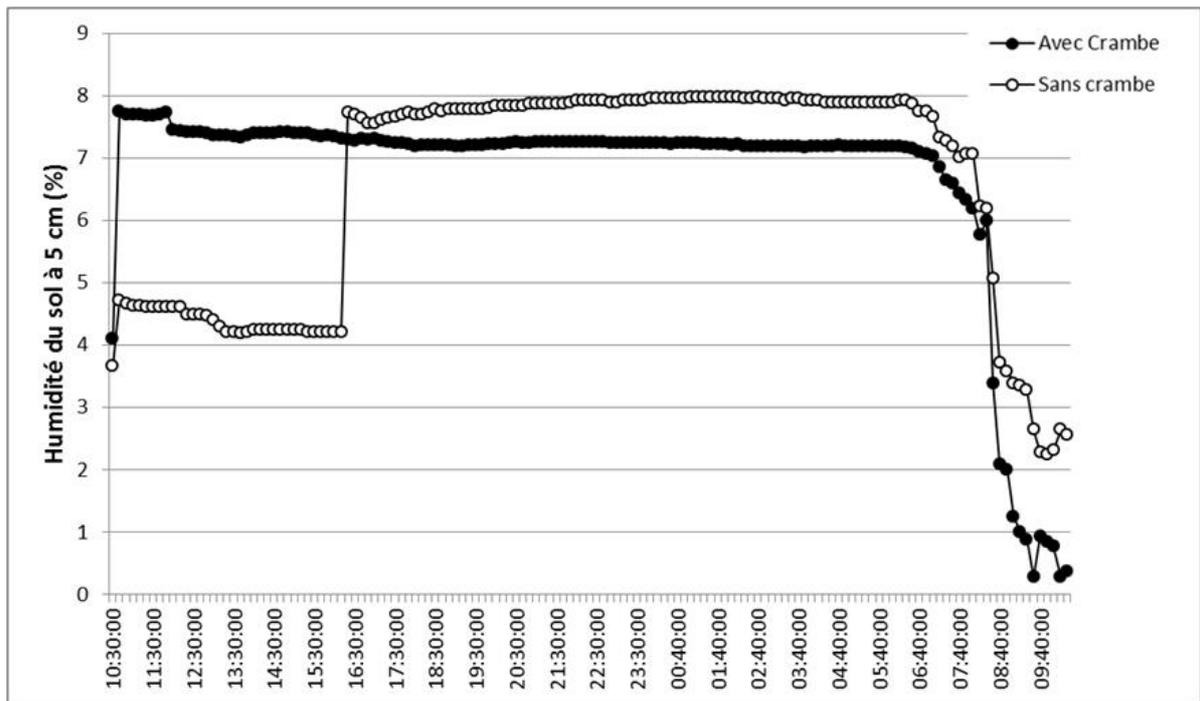


Figure 30 : Humidité du sol de 0-5 cm de profondeur (%) pendant 24h (18 et 19 juin 2013) sous et en dehors des pieds de crambes. Les mesures ont été réalisées sur le transect 2 au sein des cordons A, B et C.

III.3.3. Relations Crambe-richesse spécifique

Les richesses floristiques obtenues sur les cordons sont relativement faibles. La richesse maximale est de 8 espèces sur le cordon D du transect 2. Sur le transect 1, la richesse maximale culmine à 5 espèces (Tableau 7). Ces résultats devront être confortés à de nouveaux relevés floristiques au cours de la saison estivale. En terme de composition floristique, les espèces sont relativement similaires entre les cordons C et D des deux transects (Tableau 7).

Tableau 7 : Composition floristique et richesse totale sur les cordons des transects T1 et T2.

T1		
Cordon A	Cordon B	Cordon C
<i>Atriplex laciniata</i>		<i>Cerastium semidecandrum</i> <i>Elytrigia juncea</i> <i>Phleum arenarium</i> <i>Sedum acre</i> <i>Senecio vulgaris</i>
richesse totale = 1	richesse totale = 0	richesse totale = 5

T2			
Cordon A	Cordon B	Cordon C	Cordon D
<i>Atriplex laciniata</i>		<i>Beta vulgaris</i> <i>Cerastium semidecandrum</i> <i>Elytrigia juncea</i> <i>Galium odoratum</i> <i>Senecio vulgaris</i> , <i>Solanum dulcamara</i> <i>Vulpia fasciculata</i>	<i>Beta vulgaris</i> <i>Cerastium semidecandrum</i> <i>Elytrigia juncea</i> <i>Galium odoratum</i> <i>Rosa sp</i> <i>Sedum acre</i> <i>Senecio vulgaris</i> <i>Vulpia fasciculata</i>
richesse totale = 1	richesse totale = 0	richesse totale = 7	richesse totale = 8

La richesse floristique moyenne varie entre 0 et 3,5 espèces par m² sur l'ensemble des cordons prospectés. Les richesses les plus faibles sont mesurées sur les cordons A et B du transect 1 et sur les cordons A, B et C du transect 2 (Tableau 8). Les richesses maximales sont mesurées sur les cordons C et D des transects 1 et 2 respectivement. Le nombre d'espèces s'implantant sur les cordons augmente avec l'âge des ces derniers.

Tableau 8 : Nombre moyen de *Crambe* et richesse floristique moyenne par m² (+/- erreur standard) en fonction des transects T1 et T2 et des cordons.

	Moyenne du nombre de <i>Crambe</i> /m ²	Moyenne du nombre d'espèces / m ²
T1		
CA	0,05+/-0,22	0,05+/-0,01
CB	1,71+/-1,45	0+/-0
CC	0,55+/-0,76	2,16+/-0,48
T2		
CA	0,3+/-0,57	0,9+/-0,2
CB	0,45+/-0,69	0+/-0
CC	0,65+/-1,23	0,8+/-0,18
CD	0,35+/-0,59	3,5+/-0,78

Les relevés floristiques réalisés sur les placettes permanentes colonisées par les pieds de *Crambe maritime* ne montrent, en revanche, aucun effet de la plante sur l'implantation de nouvelles espèces ($r^2 = 0,006$).

IV. Discussion

IV.1. Méthodologie

IV.1.1. Amélioration du protocole de suivi des interactions Crambe-sédiment

Peu d'expérimentations ont jusqu'alors été menées sur les interactions végétation-sédimentation sur les cordons de galets à l'échelle de pas de temps courts. Aussi les méthodes mises en place à l'occasion de ce projet l'ont été à titre exploratoire et ont montré quelques limites. Certains ajustements sont cependant facilement envisageables, aux vues des observations faites lors des différents levés de terrain et suite au traitement des données.

Tout d'abord, afin d'augmenter la précision des mesures faites à l'aide des barres de sédimentation, il serait préférable de placer une vis de fixation de chaque côté de la règle contre une seule dans cette étude. Cela assurerait que l'axe de mesure soit bien le même d'une mesure à l'autre. Le deuxième point à améliorer concerne la période pendant laquelle les mesures ont été réalisées. En effet, les barres de sédimentation ont été disposées en avril, sur les sommets des cordons. Or, à cette période les pieds de *Crambe maritime* sont peu développés et il n'est pas aisé de définir la zone où ils seront les plus denses (donc de fait de définir où se feront les interactions les plus fortes). Les suivis réalisés montrent que les pieds se développent plutôt à partir de mai et sont plutôt localisés sur les revers internes des cordons où la quantité de sable y est plus importante. Ces constats nous amènent à préconiser l'installation des dispositifs de suivis plutôt sur les revers internes des cordons. Cette remarque est corroborée par l'analyse statistique des données qui ne met en évidence aucun effet significatif de la plante sur le piégeage du sable. Or, certains pieds de Crambe, localisés à proximité des dispositifs, présentent des amas de sable conséquents (Figure 28). Ces résultats s'expliquent certainement par la position des pieds de Crambe choisis, localisés sur le sommet du cordon, là où les flux de sables sont importants mais les quantités déposées plutôt faibles. Afin de compléter les jeux de données acquis, il serait nécessaire de regarder finement ce qu'il se passe au niveau du revers interne du cordon, là où les quantités de sables déposés semblent plus importantes.

En ce qui concerne le scanner laser terrestre, à chaque fois, un scan a été fait au sommet des cordons A et B et un autre sur l'estran. Il pourrait être intéressant de faire deux scans, de plus faible résolution chacun, sur chaque sommet de cordon (un à chaque extrémité), afin d'améliorer la couverture en données topographiques et donc la description des variations de topographie. Cela pourrait éventuellement permettre d'améliorer la cartographie des pieds de Crambes, qui seraient plus facilement identifiables.

Les pièges sédimentaires semblent avoir montré une bonne capacité à mesurer les flux sédimentaires éoliens, qui semblent maximum sur le sommet des cordons. Il s'agirait de reproduire ces mesures pour différentes conditions de vent.

Enfin, des photos pourraient être faites systématiquement à chaque mission terrain, notamment pour cartographier l'ensablement (position et étendue des plaquages sableux) d'un levé à l'autre. Ces photos pourraient aussi être géoréférencées et permettre de cartographier les choux plus facilement qu'avec les scans.

IV.1.2. Transposition à d'autres sites

Ce projet est à vocation de transposition interrégionale. La méthodologie d'étude développée pour l'analyse des relations Crambe-sable sur le cordon de galets du Hourdel pourrait être appliquée à d'autres cordons littoraux, y compris sableux, fréquemment observés sur les littoraux de la Manche. De nombreuses études réalisées sur les interactions plantes-sédiments ont été réalisées en contexte dunaire et estuarien (Gray, 1992 ; Maun, 1996 ; Bakker et al., 1997 ; Brown, 1998). En effet, bien que les relations avec la végétation ne soient pas encore très bien connues, les flèches sableuses font l'objet d'un certain nombre d'études, et notamment celles présentent le long des havres du Cotentin, entre autres dans des perspectives d'aménagement (Lafond, 1986). Ces flèches sableuses ont surtout été décrites morphologiquement sur des pas de temps longs, mais des évolutions ont aussi été observées sur des pas de temps courts, à l'échelle de la marée par exemple (Robin *et al.*, 2009).

IV.2. Confrontation dynamique pas de temps court et pas de temps long

La migration du cordon est essentiellement due au développement de nouveaux sous-cordons tous les 2 à 11 ans (Bellessort et Migniot, 1986), se mettant en place à la faveur d'évènements de tempêtes extrêmes. Sur des pas de temps plus courts, les modifications observées sur le cordon concerne essentiellement le revers externe du cordon proximal (cordon A) : modification des pentes à l'échelle de la saison et des nombres de bermes à l'échelle du cycle semi-lunaire (Dolique, 1998), érosion, pendant les vives-eaux, de la base du cordon, située sous le niveau d'eau maximum atteint par la marée et correspondant soit au départ de sables apportés par les vents ou les marées précédentes, et/ou au départ de galets, en particulier si l'agitation par la houle est importante (cette étude), formation d'une berme au-dessus du niveau d'eau maximum atteint par la marée sous l'effet du jet de rive (Dolique, 1998 et cette étude).

L'apparition du Crambe se produit sur des cordons formés déjà depuis quelques années (minimum 2-3 ans sur les transects étudiés), y compris s'ils sont en position proximale (cf « âge » des cordons ; Figure 11). L'absence de pieds de Crambe sur les cordons les plus récents pourrait s'expliquer par l'altitude plus faible qui induit des submersions marines plus fréquentes, et une exposition plus forte aux embruns et au vent.

Les caractéristiques topographiques des cordons semblent stables depuis les années 1960, avec des altitudes toujours dans la même gamme de valeurs (Meirland

et Duponchelle, 2013). Cette stabilité d'altitude doit assurer la pérennité de la population de Crambe et son développement, en limitant les variations de la frontière entre milieux inter- et supratidal, et donc les variations de salinité (y compris par remontée de nappes). L'optimum de développement (densité) du chou, attesté par l'étude de Meirland et Duponchelle (2013), est observé sur un cordon âgé de 23 ans, sa présence étant théoriquement possible jusqu'à un âge de cordon de 48 ans. Par ailleurs, la maturité sexuelle du chou (donc la production de graine) est atteinte pour une hauteur de 20 cm minimum (à savoir sur les cordons B et C des transects 1 et 2 respectivement).

Selon Meirland et Duponchelle (2013), l'ensablement est l'un des facteurs affectant l'environnement du Crambe à l'échelle de quelques décennies et des communautés, bien qu'il n'y ait pas d'effet direct de l'âge, du recouvrement ou des sédiments sur les communautés (Meirland et Duponchelle, 2013). Toutefois, sur les pas de temps courts (cette étude), on note que les Crambes facilitent le piégeage de sable en surface des cordons. On peut supposer qu'ils facilitent le maintien de sables sur les cordons et leur incorporation progressive au sein du cordon, comme en témoignent les travaux de Bellessort et Migniot (1986) et Livet et Roue (2012). Plus localement, nous avons montré que les Crambes ont un effet tampon sur les paramètres micro-environnementaux (température et humidité du sol) en limitant leur variation. À terme, ils peuvent faciliter l'implantation de nouvelles espèces, qui, à leur tour, pourraient favoriser l'ensablement du cordon.

À plus long terme, des études complémentaires pourraient être envisagées pour mieux comprendre la dynamique de maintien du Crambe sur les cordons.

IV.3. Transfert opérationnel

De nombreuses études ont mis en évidence le rôle structurant des interactions entre dynamiques sédimentaire et de colonisation de la végétation sur la morphologie des milieux littoraux (e.g. dunes, marais salés).

La présente étude montre que des interactions existent entre le Crambe maritime et la sédimentation sur le cordon de galets. En particulier, le Crambe joue le rôle de piège vis-à-vis du sable transporté par les vents et modifie ainsi la topographie et l'ensablement du cordon, de manière temporaire en surface et définitive en profondeur au bout de quelques années.

La question peut être posée quant au transfert opérationnel des résultats de cette étude, en matière de gestion des risques de submersion et des mesures conservatoires de protection d'espèces végétales sensibles par exemple.

IV.3.1. Gestion du risque de submersion

Le cordon subit un ensablement progressif au cours du temps (Bellessort et Migniot, 1986 ; Meirland et Duponchelle, 2013), auquel le Crambe semble participer par un effet piégeage pendant son cycle végétatif (printemps-été). Le Crambe

semble donc ici accélérer le phénomène d'ensablement du cordon, et ainsi améliorer la stabilisation du cordon et sa résistance face aux agents dynamiques. Par son rôle d'espèce « ingénieur », le Crambe pourrait constituer un bon indicateur de consolidation du cordon. Lors de niveaux d'eau extrêmes (e.g. marée de vive-eau combinée à une surcote et à de la houle), le franchissement du cordon par la mer ne sera pas empêché si le Crambe est présent, mais la résistance du cordon à la rupture sera vraisemblablement accrue.

IV.3.2. Gestion des mesures conservatoires d'espèces végétales sensibles.

Le nombre d'espèces patrimoniales (Crambe exclu), d'espèces rares et d'espèces en danger est optimal pour un cordon d'une trentaine d'années (Meirland et Duponchelle, 2013). L'apparition d'espèces à valeur patrimoniale pourrait être facilitée par la présence du Crambe, dont le développement est maximum autour de 25 ans.

Dans le cadre de l'implantation de 24 épis sur la plage de Cayeux sur mer dans le cadre du programme de confortement des zones urbanisées du Vimeu sur la commune de CAYEUX SUR MER, un plan de gestion est en cours de rédaction. Il prévoit la mise en oeuvre sur ces sites d'une gestion conservatoire qui favorise l'implantation du Crambe et des autres espèces impactées par le projet. En particulier, il est prévu un relevé topographique annuel, une cartographie complète de la végétation tous les 5 ans et du Crambe tous les 2 à 3 ans. Les résultats de la présente étude sur le piégeage de sables suggèrent que les relevés soient effectués systématiquement à la même période de l'année, lors du développement optimal du Crambe (juin-juillet) aussi bien pour les relevés de végétation que pour la topographie. Dans ce cas, la topographie est susceptible de présenter une tendance à l'accrétion et une plus forte variabilité locale du fait de l'effet piégeage du Crambe. Cette variabilité de la topographie est à prendre en compte dans l'interprétation des variations interannuelles.

Conclusion

Les paysages et habitats côtiers offrent différents niveaux de protection aux populations et constituent un réservoir de biodiversité important. Les cordons de galets, exemples rares de flèches littorales (généralement sableuses), constituent des écosystèmes singuliers (Fuller et Randall, 1988 ; Stephan et al., 2012), où la végétation fait généralement l'objet de mesures conservatoires. En Baie de Somme, le Crambe maritime est une espèce pionnière protégée sur le cordon de galets du Hourdel, barrière naturelle de protection des Bas-Champs. Cependant, la dynamique rapide du cordon n'est pas encore bien connue ni non plus l'influence réciproque de la dynamique morpho-sédimentaire du cordon sur la végétation.

Au cours des vives-eaux, les modifications observées sur le cordon concernent essentiellement le revers externe du cordon proximal : érosion de la base du cordon située sous le niveau d'eau maximum atteint par la marée et correspondant soit au départ de sables apportés par les vents ou les marées précédentes, et/ou au départ de galets, formation d'une berme de galets au-dessus du niveau d'eau maximum atteint par la marée sous l'effet du jet de rive comme observé par Dolique (1998).

Les sédiments transportés par le vent correspondent à des sables bien triés, de mode granulométrique 250 μm . Les flux sableux transportés par le vent sont compris entre $2 \cdot 10^{-3}$ et $4 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$. Les flux sont plus élevés sur les zones situées au vent : (i) sur les revers externes et au sommet des cordons, et (ii) sur le cordon faisant face à la mer, plus proche de la source en sables (estran).

Le Crambe apparaît sur des cordons formés depuis quelques années, au-dessus du niveau des plus hautes mers astronomiques. Sur les pas de temps courts, on note que les Crambes facilitent le piégeage de sable (plusieurs centimètres déposés autour des pieds de Crambe) et on peut supposer qu'ils facilitent le maintien de sables sur les cordons et leur incorporation progressive en leur sein. A terme, ils pourraient participer à l'ensablement du cordon et faciliter l'implantation de nouvelles espèces, enclenchant la dynamique naturelle de succession végétale.

Toutefois, des améliorations méthodologiques peuvent être apportées pour l'étude des interactions végétation-sédimentation. En particulier, il serait préférable de suivre les Crambes maritimes situés sur les revers internes des cordons, où la quantité de sable et l'effet piégeage sont plus importants. Des études sont à envisager sur des périodes plus longues (l'année à minima), de manière à analyser l'effet piégeage moyen annuel et à comparer le phénomène de piégeage de sables en période plutôt agitée (hiver) lorsque le cordon est dépourvu de Crambe et en période plus calme (printemps) lors du développement du Crambe. Par ailleurs, la méthodologie mise en œuvre pourrait être transposée à l'étude d'autres flèches littorales, y compris sableuses sur le littoral de la Manche.

Par son rôle d'espèce « ingénieur », le Crambe pourrait constituer un bon indicateur de consolidation du cordon, et, de fait, de résistance face au risque d'inondation par éventrement du cordon. Dans le cadre des projets d'aménagement du cordon (e.g. implantation de 24 épis sur la plage de Cayeux-sur-Mer), il est suggéré que les relevés topographiques et de végétation, demandés selon un pas de temps annuel à pluriannuel, soient effectués pendant la même période de l'année, lors de l'optimum de développement de l'appareil végétatif du Crambe (juillet), qui coïncide avec une période de piégeage des sables en surface du cordon.

Plus globalement, les résultats acquis sur le cordon de galets constituent un socle de connaissance pour toute étude s'intéressant au fonctionnement à pas de temps courts de la cellule sédimentaire (petits fonds subtidaux, estran sableux, cordon, dune de haut de plage), et plus particulièrement de la Baie de Somme.

Bibliographie

- Anthony, E.J., 2009. Shore Processes and their Palaeoenvironmental Applications. Developments in Marine Geology - Volume 4. Elsevier Science, Amsterdam, 519 pp.
- Anthony, E.J., Ruz, M.H., Vanhée, S., 2009. Aeolian sand transport over complex intertidal bar-trough beach topography. *Geomorphology, Special Issue*, 36, 8-15.
- Augris, C., Clabaut, P., Costa, S., Gourmelon, F., Latteux, B., 2004. – Évolution morpho-sédimentaire du domaine littoral et marin de la Seine-Maritime (France), édition Ifremer/Conseil Général de la Seine-Maritime/EDF, 158 p.
- Bakker, J. D., Christian, J., Wilson, S. D., Waddington, J., 1997. Seeding blue grama in old crested wheatgrass fields in southwestern Saskatchewan. *Journal of Range Management*, 50, 156–159.
- Bastide, J., Anthony, E., Dolique, F., 2005. Le littoral des Bas-Champs (Picardie, France) soumis aux risques perpétuels d'inondation. The Fourth Inter-Celtic Colloquium on Hydrology and Management of Water Resources, Guimaraes, Portugal, July 11-14 2005.
- Bastide, J., 2011. Morphodynamique et enjeux d'aménagement des franges littorales d'un estuaire macrotidal tempéré : La Baie de Somme, Picardie, France. Thèse de Doctorat, Université du Littoral-Côte d'Opale, 331 pp.
- Bawedin V., 2000, Les Bas-Champs de Cayeux / Mer (Somme) : enjeux et conséquences d'une éventuelle dépoldérisation, mémoire de maîtrise de géographie, Université de Picardie Jules Verne, 151 p.
- Bawedin, V., Hoeblich, J.-M., 2006. Les Bas-Champs de Cayeux (Somme, France) : vers une gestion intégrée ? Enjeux et perspectives de l'ouverture à la mer d'un espace jusque là protégé. *Vertigo*, 17 (3), 1-11.
- Boumans ; R.M.J. and Day, Jr., 1993. High-precision measurements of sediment elevation in shallow coastal areas using a sedimentation erosion tab. *Estuaries*, 16 (2), 375-380.
- Braun-Blanquet, J., 1965. *Plant Sociology. The study of plant communities*, Hafner Publis. Company. New York. 439 p.
- Brown, S. L., 1998. Sedimentation on a Humber saltmarsh. In: Black, K S, Paterson, D. M, and Cramp, A, (Eds), *Sedimentary processes in the intertidal zone*. Geological Society of London Special Publications, 139, 69-83.
- Broquet, P., Auffret, J.-P., Beun, N., Dupuis, C., Monliardini, C., and Agache R., 1985. St-Valery-sur-Somme/Eu. Carte géologique de la France au 1/50 000. N°31-32. 70x60 cm, 38 pp. BRGM, Orléans.
- Briquet, A., 1930. *Le littoral du Nord de la France et son évolution morphologique*. Armand Colin, Paris, 440 pp.
- Cadée, G., 2005. Drifting branches of *Crambe maritima* L. with fruits. *Cah. Biol. Mar* 46 :217-219.
- Caous, J.-Y., Mathon, C., 1978. Inventaire des gisements exploitables de galets, sables et graviers marins des Bas-Champs de Cayeux sur Mer (Département de la Somme). Amiens (France), BRGM \ Ministère de l'Industrie \ Ministère de l'Équipement.
- Claham, A.R., Tutin, T.G., Warburg, E.F., 1962. *Crambe*. In: *Flora of the British isles*, Cambridge University Press, Cambridge, p. 135.

- Clique, P.M., Lepetit, J.P., 1986. Catalogue sédimentologique des côtes françaises : Côtes de la Mer du Nord et de la Manche, Collection de la Direction des Etudes et Recherches d'Electricité de France ; Secrétariat d'Etat auprès du Ministre de l'Urbanisme, du Logement et des Transports, chargé de la mer, Direction des Ports et de la Navigation Maritimes, Service Technique Central. Eyrolles, Paris, 404 p.
- Conservatoire Botanique National de Bailleul (2005). Suivi phytocoenotique des cordons de galets de "La Mollière" au nord de Cayeux sur Mer (Somme). Suivi 2004., SMACOPI: 58.
- Conservatoire Botanique National de Bailleul (2007). Suivi phytocoenotique des cordons de galets de "La Mollière" au nord de Cayeux sur Mer (Somme). Suivi 2006., SMACOPI: 94.
- Costa, S., 1997. Dynamique littorale et risques naturels : l'impact des aménagements, des variations du niveau marin et des modifications climatiques entre la baie de Seine et la baie de la Somme (Haute-Normandie, Picardie, France). Thèse de doctorat, Université Paris 1, 351 pp.
- Costa, S., Di Nocera, L., Freiré Diaz, S., 2000. Réactualisation des connaissances et mise en place d'une méthode de suivi de la dynamique du littoral haut-normand et picard. Rapport final, Préfecture de Picardie, Contrat de Plan Interrégional du Bassin de Paris (CPIBP), 103 p.
- Dallery, F., 1955. Les rivages de la Somme, autrefois, aujourd'hui et demain. Mémoires de la société d'émulation historique et littéraire d'Abbeville, Paris, 307 p.
- Danton, P., Baffray, M. 1995 - Inventaire des plantes protégées en France. Nathan, 293p.
- Dolique, F., 1991. L'évolution du littoral entre Dieppe et le Hourdel, 1939-1989. Mém. Maîtrise de géographie, Univ. Picardie, Amiens, 143 p.
- Dolique, F., 1998. Dynamique morphosédimentaire et aménagements induits du littoral picard au sud de la Baie de Somme. Thèse de Doctorat, Université du Littoral - Dunkerque, 417 pp. + annexes.
- Dolique F., 2004. Dynamique morphosédimentaire du littoral picard au sud de la Baie de Somme : quelques mises au point. Les Bas champs picards enjeux entre terre et mer, actes de colloque. Pour le Littoral Picard et la Baie de Somme – UPJV ; (15-23). 8p.
- Duclos, P.A., 2007. Synthèse sur l'état des connaissances du littoral picard. Rapport LaSalle Beauvais, 34 p. + 9 p. d'annexes
- Duponchelle G. 2011 - Facteurs historiques et environnementaux contrôlant la dynamique de la diversité des communautés végétales des cordons de galets de la baie de Somme. Rapport GEMEL, p. 38.
- Dupont, J.P., 1981. Relations entre bios et phénomènes sédimentaires intertidaux : le modèle de la Baie de Somme. Thèse 3^{ème} cycle, Université de Rouen, 310 p.
- EQS, 2011. Etude d'incidence Natura 2000 relative à l'implantation d'ouvrage de défense contre la mer sur la Côte Picarde. Construction d'épis maçonnés sur la plage de Cayeux sur Mer. Rapport provisoire. , SMBSGLP: 80.
- Ferret, Y., 2011. Morphodynamique de dunes sous-marines en contexte de plateforme mégatidale (Manche orientale) – Approche multi-échelles spatio-temporelles, Thèse de doctorat en sédimentologie marine, Université de Rouen, 324 p.

- Fuller, R.M., Randall, R.E, 1988. The Orford Shingles, Suffolk, UK—Classic conflicts in coastline management, *Biological Conservation*, Volume 46, Issue 2, p. 95-114
- Gehu, J.-M., Géhu-Franck, J., 1979 - Sur les végétations Nord atlantiques et Baltiques à *Crambe maritima*. *Phytocoenologia*, 6 : 209-229.
- Gray, A.J., 1992. Saltmarsh plant ecology: zonation and succession revisited. In: Allen JR, Pye K (Eds), *Saltmarshes: morphodynamics, conservation and engineering significance*. Cambridge, Cambridge University Press, 63–79.
- Hauguel, J.C., Toussaint, B., 2010. Les cordons de galets de Cayeux-sur-Mer (Somme, France) : évolution récente de la flore et de la végétation. *Acta Botanica Gallica*, 157: 151-169.
- Julve, P.H., Imbert. T., 1993. Etude écologique et sédimentaire du site *d'extraction de Cayeux-sur-Mer (SOMME)*. Rapport Etude Recherches Environnement (E.R.E).
- Koch *et. al*, 2009. Non-linearity in ecosystem services: temporal and spatial variability in coastal protection. *Ecol. Environment*, 7: 29-37.
- Lafond, L. R., 1986. Les havres du Cotentin (Etude morphologique de la zone intertidale), Rapport Ifremer, 127 p.
- Lacroix. P. et Le Bail. J. 2006 - Plan de conservation en faveur du chou marin (*Crambe maritima* L.) en région Pays de Loire. Conservatoire Botanique National de Brest.
- Livet, Roue, 2012. Etude de la cellule sédimentaire du Hourdel et estimation du volume de galets mis en place (80, Somme). Mémoire d'Ingénieur Recherche LaSalle Beauvais n°594, 73 p. + annexes.
- Loquet N. 2010 - Cartographie de la population de Chou marin *Crambe maritima* L. (espèce protégée au niveau national) sur le littoral de Woignarue au Hourdel. Conseil général de la Somme.
- Maun, M.A., 1996. The effects of burial by sand on survival and growth of *Calamovilfa longifolia*. *Ecoscience*, 13, 93–100.
- Meirland, A., Duponchelle, G., Rybarczyk, H., Dubois, F., Chabrierie, O., 2012. Dynamiques des communautés végétales des cordons de galets de la Baie de Somme (Picardie, France). Présentation orale au Colloque ECOVEG 8 de Nancy, 28 au 30 mars 2012.
- Meirland, A., Duponchelle, G., 2013. Etude de l'évolution des cordons de galets végétalisés et des forçages responsables. Rapport du GEMEL n°13-010, 25 juin 2013, 57 p.
- Menessier, G., Lefevre, P., Monliardini, C., Auffret, J.-P., and Agache R., 1981. Rue. Carte géologique de la France au 1/50 000. N°23. 70 x60 cm. 14 pp., BRGM, Orléans.
- Migniot C., Bellessort B., 1974. Protection de la côte des Bas-Champs. LCHF, rapport général, 43 p.
- Orford, J.D., Carter, R.W.G., 1995. Examination of mesoscale forcing of a swash-aligned gravel barrier from Nova Scotia. *Marine Geology*, Volume 126, Issues 1-4, p. 201-211.
- Orford, J.D., Forbes, D.L., Jennings, S.C., 2002. Organisational controls, typologies and time scales of paraglacial gravel-dominated coastal systems. *Geomorphology*, 48, 51-85.
- Orford, J.D., Anthony, E.J., 2011. Extreme events and the morphodynamics of gravel-dominated coastal barriers: Strengthening uncertain ground, *Marine Geology*, Volume 290, Issues 1–4, p. 41-45

- Provost M. 1993 - Atlas de répartition des plantes vasculaires de Basse-Normandie., Caen, 237p.
- Regrain, R., Vignon, F., Wattez, J.-R., 1979. Un secteur cotier d'intérêt scientifique particulier. Les bas-champs de Cayeux (Somme). In : Les côtes atlantiques d'Europe, évolution, aménagement, protection, Brest, France, Edited by CNEXO, 9, 165-176.
- Robin, N., Levoy, F., Monfort, O., 2009. Short term morphodynamics of an intertidal bar on megatidal ebb delta, Marine Geology, Volume 260, Issues 1–4, p. 102-120.
- SOGREAH, 1994. Etudes complémentaires du littoral des Bas Champs. Fascicule 1 : étude régionale. Association Syndicale Autorisée des Bas-Champs, Service Maritime Direction Départementale de l'Équipement de la Somme. 40 p.
- Stephan, P., Suanez, S., Fichaut, B., 2012. Long-term morphodynamic evolution of the Sillon de Talbert gravel barrier (Brittany, France), Shore & Beach, vol. 80, n°1, p. 19-36.
- Wattez, J.-R., Gehu, J.M., 1988. Compte-rendu détaillé de l'excursion des 19 et 20 septembre 1987 sur le littoral picard. Bulletin de la Société Linnéenne du Nord de la France, VI, 50-68.

Liste des figures et des tableaux

Liste des figures :

Figure 1 : Le cordon de galets du Hourdel : localisation et géologie. Rectangle rouge : localisation du site d'étude (BRGM, 1981 ; BRGM, 1985).....	8
Figure 2 : Structure interne du cordon littoral des Bas-Champs (Migniot & Bellessort, 1974, dans AUGRIS et al., 2004)	9
Figure 3 : Exemple de colonne lithostratigraphique du cordon du Hourdel (Livet & Roue, 2012).....	10
Figure 4 : Evolution de la pointe du Hourdel de 1780 à 1950, (Livet & Roue, 2012, modifiée d'après F. DALLERY, 1955)	11
Figure 5 : Photo du Crambe maritime.....	13
Figure 6 : Répartition sur le territoire national du Crambe maritima L. (Loquet, 2010)	14
Figure 7 : Proportion de cordon dénué de végétation en fonction de son âge (Meirland, Duponchelle, 2013)	16
Figure 8 : Photo du revers du T1 cordon B, le 11 juin	17
Figure 9 : Protections et inventaires du patrimoine naturel et paysager, risques naturels en Baie de Somme. Source de données : serveur cartographique CARMEN du Ministère en charge de l'écologie ; DREAL Picardie.....	18
Figure 10 : Evolution dynamique et bilan volumétrique du cordon de galets entre Cayeux-sur-Mer et Le Hourdel sur la période 1994-2001 (Bastide, 2011)	20
Figure 11 : Le site d'étude : « âge » des cordons (Duponchelle, 2011), localisation des transects (rectangles rouges) et répartition des pieds de Crambe sur les transects (points verts). L'identification de la position des cordons a été faite à partir de l'interprétation des orthophotos de l'IGN réalisées entre 1991 et 2011 sur ce secteur. L'année indiquée sur les cordons correspond à l'âge approximatif (+/- 2-3 ans) de formation de ces cordons.	20
Figure 12 : Calendrier des levés de terrain en fonction des forçages météo-marins (marée, vents) et types de mesures réalisées.....	21
Figure 13 : Dispositif permettant de mesurer les évènements de sédimentation et d'érosion.....	23
Figure 14 : Localisation des pièges sédimentaires sur les transects T1 et T2.....	24
Figure 15 : exemples de quadrats de 4m ² subdivisés en 4 surfaces de 1m ² ayant permis de caractériser les traits morphologiques du Crambe maritime. A : T1 cordon A ; B : T2 cordon A ; C : T1 cordon C ; D : T2 cordon D.....	25
Figure 16 : Topographie des transects étudiés et localisation des barres de sédimentation (triangles rouges). A gauche : T2 ; à droite : T1.....	27
Figure 17 : Distribution des zones atteintes par la marée et des individus de Crambe (points verts) sur les transects 1 et 2.....	29
Figure 18 : Photos du cordon A le 11 juin 2013.....	30
Figure 19 : Relation entre les variables hauteur et longueur des pieds de Crambe maritime pour l'ensemble des cordons suivis au cours de l'étude. La courbe de tendance met en évidence une relation linéaire très forte entre les deux paramètres ($r^2 = 0,657$).	32
Figure 20: Distribution des hauteurs de Crambe en fonction de l'âge des cordons des deux transects étudiés. Les hauteurs sont réparties en catégories : 1 à 15 cm, 16 à 30 cm, 31 à 45 cm, 46 à 60 cm et 61 à 75 cm.....	33

Figure 21 : Relation entre la production de fleurs et la hauteur des individus de Crambe maritime pour le T1 (à gauche) et T2 (à droite).	34
Figure 22 : Exemples d'évolution de la topographie des cordons pour différentes conditions de marées et de vents.....	35
Figure 23 : Flux éoliens en fonction de la position sur les cordons.....	38
Figure 24 : Photo des motifs rythmiques de déflation éolienne. Exemple du cordon A sur le transect 2.....	39
Figure 25 : Représentation de la quantité (% surfacique) de sable pour les dispositifs avec Crambe (AC) et ceux sans Crambe (SC), par cordon et pour la date du 11 juin 2013.....	41
Figure 26 : Quantité (% surfacique) de sable par date et par cordon, pour les dispositifs avec Crambe (AC) et ceux sans Crambe (SC).....	41
Figure 27 : Evolution de la topographie à l'échelle des individus de Crambe. Exemples de mesures sur des barres de sédimentation implantées sur le cordon A du transect T2.	43
Figure 28 : Photo montrant le phénomène de piégeage de sable par le Crambe, prise le 11 juin.....	44
Figure 29 : Température du sol de 0-5 cm de profondeur (°C) pendant 24h (18 et 19 juin 2013) sous et en dehors des pieds de crambes. Les mesures ont été réalisées sur le transect 2 au sein des cordons A, B et C.....	45
Figure 30 : Humidité du sol de 0-5 cm de profondeur (%) pendant 24h (18 et 19 juin 2013) sous et en dehors des pieds de crambes. Les mesures ont été réalisées sur le transect 2 au sein des cordons A, B et C.....	46

Liste des tableaux :

Tableau 1 : Paramètres morphologiques des cordons sur les transects T1 et T2....	26
Tableau 2 : Niveaux de marées caractéristiques à Cayeux-sur-Mer (EPSHOM, 2001)	28
Tableau 3 : Densité des pieds de Crambe sur les transects T1 et T2.	31
Tableau 4 : Valeurs morphologiques moyennes des pieds de Crambe en fonction de l'âge des cordons pour les transects 1 et 2.....	33
Tableau 5: Flux totaux sableux transportés par les vents sur les transects T1 et T2.	37
Tableau 6 : Quantité (% surfacique) de sable pour les dispositifs avec Crambe (AC) et ceux sans Crambe (SC), par cordon et pour la date du 11 juin 2013.....	40
Tableau 7 : Composition floristique et richesse totale sur les cordons des transects T1 et T2.....	47
Tableau 8 : Nombre moyen de Crambe et richesse floristique moyenne par m ² (+/- erreur standard) en fonction des transects T1 et T2 et des cordons.	47

Annexes

Annexe 1 :

**Le projet « Dynamique du cordon de galets du Hourdel.
Interactions sédimentation-végétation »**

Annexe 2 :

Rapport d'Antoine Meirland et Gaëtan Duponchelle du GEMEL Picardie :

(Meirland, A. et Duponchelle, G., 2013. Etude de l'évolution des cordons de galets végétalisés et des forçages responsables. Rapport du GEMEL n°13-010, 25 juin 2013, 57 pp.)

Annexe 3 :

**Rapport de Paul Lecointre,
stagiaire de Licence 3ème année EBO de l'Université de Rouen :**

(Lecointre, P., 2013. Succès d'implantation du *Crambe maritime* dans un contexte écologique contraignant et effet de l'espèce sur la structuration des communautés végétales : exemple de la Baie de Somme. Mémoire de Licence 3^{ème} année EBO, Université de Rouen, 26 pp. + annexes)

Annexe 1 :
**Le projet « Dynamique du cordon de galets du Hourdel.
Interactions sédimentation-végétation »**

- Intérêt scientifique par rapport à l'appel à projet du ROLNP et aspects novateurs.

Le projet proposé s'inscrit dans un objectif d'accroissement de la connaissance et de la compréhension de la dynamique des cordons littoraux en relation avec la végétation. Le projet s'inscrit dans les trois thèmes retenus par le ROLNP (dynamique côtière, risques naturels en milieu littoral, biodiversité comme marqueur de la dynamique des milieux littoraux). L'exemple retenu est celui du cordon de galets qui s'étend de Ault au Hourdel, dont la progression contribue à la fermeture de la Baie de Somme. Ce cordon constitue une protection naturelle contre le risque de submersion pour les polders des Bas-Champs, dont il a par ailleurs permis la mise en place, mais aussi une menace en certains endroits où l'érosion compromet la stabilité du cordon (e.g. Cayeux) (Costa, 1997 ; Costa et al., 2000).

Ce projet d'étude des interactions entre sédimentation et végétation est de fait pluridisciplinaire (sédimentologie, écologie végétale) et rassemble plusieurs acteurs (trois laboratoires de recherche réparties sur deux universités, une association). Ce projet est à vocation interrégionale : (1) la dynamique de la flèche de galets est soumise, entre autres, à l'influence d'actions anthropiques (obstacles-jetées) se situant en Haute-Normandie, et (2) la méthodologie d'étude des relations sédimentation-végétation pourra être appliquée pour d'autres cordons littoraux, y compris sableux, fréquemment observés sur les littoraux de la Manche.

- Partenaires du projet.

UMR 6143 M2C (Université de Rouen) :

Sophie LE BOT (MCU, coordinatrice du projet), Robert LAFITE (PU), Michel SIMON (technicien)

Bérengère DEJEANS (étudiante de 5^{ème} année de l'Institut Lasalle-Beauvais et stagiaire au laboratoire M2C sur financement du projet)

EA 1293 ECODIV (Université de Rouen) :

Estelle FOREY (MCU), Estelle LANGLOIS (MCU)

Paul LECOINTRE (étudiant stagiaire de Licence 3^{ème} année).

Association GEMEL :

Antoine MEIRLAND et Gaëtan DUPONCHELLE.

UMR 6554 LETG – GEOPHEN (Université de Caen Basse-Normandie) :

Stéphane COSTA (PU).

- Structures associées à la discussion :

Syndicat Mixte Baie de Somme – Grand Littoral Picard

Conservatoire Botanique National

Annexe 2 :

Rapport d'Antoine Meirland et Gaëtan Duponchelle du GEMEL Picardie :

(Meirland, A. et Duponchelle, G., 2013. Etude de l'évolution des cordons de galets végétalisés et des forçages responsables. Rapport du GEMEL n°13-010, 25 juin 2013, 57 pp.)

Joint séparément

Annexe 3 :

**Rapport de Paul Lecointre,
stagiaire de Licence 3ème année EBO de l'Université de Rouen :**

(Lecointre, P., 2013. Succès d'implantation du *Crambe maritime* dans un contexte écologique contraignant et effet de l'espèce sur la structuration des communautés végétales : exemple de la Baie de Somme. Mémoire de Licence 3^{ème} année EBO, Université de Rouen, 26 pp. + annexes)

Joint séparément