

PROGRAMME LITEAU II



MINISTERE DE L'ÉCOLOGIE ET DU DÉVELOPPEMENT DURABLE

—

**MISE AU POINT D'UN MODELE PREVISIONNEL D'ÉVOLUTION D'UNE
PLAGE MACROTIDALE SOUS L'EFFET D'UN PROCÉDE DE DRAINAGE
RAPPORT FINAL**

—

SEPTEMBRE 2007

UMR 6143
Morphodynamique Continentale et Côtière

Université de Caen

Esplanade de la Paix
14000 CAEN Cedex

Groupe de Recherche sur les
Environnements Sédimentaires
Aménagés et les Risques Côtiers

Université de Caen

Station Marine
54, rue du Docteur Charcot
14530 LUC-SUR-MER
Tel. 02.31.36.22.22 Fax. 02.31.36.22.20

SOMMAIRE

I. Introduction	2
II. Le concept de drainage de plage	2
II.1. Historique de la technique de drainage de plage	2
II.2. Description technique du procédé de drainage de plage	3
II.2.1. Objectif de cette Technique	3
II.2.2. Description du dispositif	3
II.2.3. Principe de fonctionnement	4
II.3. Impacts sur les sites équipés avant Villers-sur-Mer	4
II.3.1. Site d'Hirtshalls-ouest (Danemark)	4
II.3.2. Site d'Hirtshalls-est (Danemark)	5
II.3.3. Site de Thorsminde (Danemark)	5
II.3.4. Site de Sailfish Point (Floride, USA)	6
II.3.5. Site des Sables d'Olonne	7
II.3.6. Conclusion	8
III. Résultats du suivi scientifique de l'évolution de la plage de Villers-sur-Mer sous l'impact d'un procédé de drainage	10
III.1. Observation et photo-interprétation	10
III.2. Les conditions hydro-météorologiques sur la période de suivi	11
III.2.1. Données météorologiques	11
III.2.2. Caractéristiques de l'agitation mesurée entre le 15 mai 2003 et le 10 mai 2006	13
III.3. Synthèse de l'évolution de la granulométrie des sédiments de la plage Mermoz à Villers-sur-Mer	14
III.4. Evolution altimétrique de la plage Mermoz à Villers-sur-Mer	14
III.4.1. Evolution de trois profils topographiques suivis depuis novembre 1998	16
III.4.1.1 Evolution altimétrique de la plage le long de trois profils suivis depuis novembre 1998	16
III.4.2.1 Evolution du volume de la plage le long de trois profils suivis depuis novembre 1998	16
III.4.2. Evolution de la plage Mermoz entre mai 2003 et avril 2007, entre l'épi n°1 à l'Est et la cale-épi n°4 à l'Ouest	17
III.4.1.2 Evolution altimétrique de la plage Mermoz entre mai 2003 et avril 2007	17
III.4.2.2 Evolution des volumes de plage entre mai 2003 et avril 2007	17
III.5. Conclusion sur l'impact du procédé de drainage en nature	20
III.6. Echanges sur les résultats du suivi scientifique	20
IV. Modélisation physique du procédé de drainage	22
V. Conclusion	24
VI. Bibliographie	25

I. INTRODUCTION

En préalable aux résultats scientifiques de l'étude, le présent document revient sur le concept de drainage de plage et sur l'état des connaissances. Les retours d'expérience liée à l'implantation de cette technique en différents points du globe sont ainsi exposés et discutés afin de recadrer le programme dans un contexte global, conformément aux souhaits du Comité Scientifique (C.S.).

La suite du document regroupe principalement les informations liées au suivi de l'évolution de la plage de Villers-sur-Mer sous l'impact du procédé de drainage. Les résultats scientifiques, concernant notamment l'évolution morphologique du site en nature, sont particulièrement mis en avant afin de permettre au lecteur de se faire une opinion quant à l'efficacité de cette solution technique. Les points de vue du maître d'ouvrage (entretien avec la mairie de Villers-sur-Mer) et de spécialistes en aménagement littoral (échange avec SOGREAH consultants) ont également été intégrés à ce rapport afin d'étayer la réflexion sur l'intérêt du système de drainage de plage en terme de défense contre la mer.

Afin de tenir compte des remarques du Comité Scientifique (C.S.) qui a évalué le programme à mi-parcours, une description succincte des problèmes mis en évidence lors des travaux de modélisation est ensuite proposée. Face aux difficultés techniques rencontrées et compte tenu des nouveaux objectifs, le détail des expérimentations (décrit dans le rapport intermédiaire) n'est pas rediscuté à ce stade.

II. LE CONCEPT DE DRAINAGE DE PLAGE

II.1. HISTORIQUE DE LA TECHNIQUE DE DRAINAGE DE PLAGE

Les premiers tests expérimentaux sur les effets d'un système filtrant ont été conduits en canal à houle par Machemehl *et al.* en 1975. L'expérience consistait à placer un tuyau en PVC sous la plage, perpendiculairement au rivage, en couvrant la zone de jet de rive et de déferlement. Les résultats dans la zone de swash (ou jet de rive) se sont révélés positifs et se caractérisaient par un engraissement. En 1979, une expérimentation en nature, menée par Chapel *et al.* sur les côtes d'Australie, a conduit à la mise en place d'une ligne de puits placés parallèlement au rivage. Un dépôt de sable a alors été constaté dans la zone désaturée par le pompage.

La conception du procédé de drainage, tel qu'il existe actuellement, est due à une découverte accidentelle en 1981 par l'Institut Danois de Géotechnique (D.G.I.). A la demande d'un centre de recherche danois, qui souhaitait obtenir une importante quantité d'eau marine filtrée afin d'alimenter des aquariums, le D.G.I. mît en place un dispositif de drains enfouis sous la plage. Le système était disposé parallèlement au rivage ; l'ensemble étant relié à une station de pompage permettant de récupérer l'eau ainsi filtrée par la couche de sable. Le dispositif fut opérationnel fin Septembre 1981. Cependant, tout au long de l'hiver, la quantité d'eau ne cessa de diminuer pour ne représenter en Mars 1982 que 40 % de la valeur initiale. Une inspection du dispositif ne révéla aucun dysfonctionnement, mais un dépôt de sable important fut observé au devant du drain augmentant ainsi la largeur de la plage d'une vingtaine de mètres et expliquant la diminution de la quantité d'eau drainée. Le procédé a par la suite été optimisé avant d'être testé sur les sites côtiers de Hirtshalls et Thorsminde au Danemark afin de confirmer son impact sur la sédimentation en haute plage.

II.2. DESCRIPTION TECHNIQUE DU PROCEDE DE DRAINAGE DE PLAGE

II.2.1. Objectif de cette Technique

Le procédé a pour but d'assurer la stabilité, voire de permettre une accrétion, des plages afin de lutter contre l'érosion due aux tempêtes. L'accumulation de sable sur la plage permet un meilleur amortissement des houles et limite ainsi les processus d'érosion de la plage et de recul du trait de côte. Cette technique de défense contre la mer présente également l'avantage de conserver un paysage littoral très proche d'un site naturel en raison de son mode d'installation.

II.2.2. Description du dispositif

Le dispositif de drainage, dimensionné de façon spécifique pour chaque site, comprend en général une série de canalisations entourées d'un système filtrant, un puits collecteur, une station de pompage et une canalisation de refoulement des eaux drainées (figure 1).

Le système drainant peut comporter un ou plusieurs drains situés en arrière du niveau moyen des mers à une distance approximative de 10 mètres et enfouis à une profondeur de 2 mètres. L'eau filtrée par la plage et drainée par les conduits faiblement inclinés (pente de 3 ‰) s'écoule par effet gravitaire vers le puits collecteur pour alimenter ensuite la station de pompage. Les pompes connectées à la canalisation de refoulement évacuent l'eau en direction de l'océan. Cette eau cependant peut être réutilisée en amont tel que l'a montré l'expérience à Hirtshalls (Danemark). Des structures du type station marine, centre de thalassothérapie, centre aquacole..., pourraient tirer parti de cette eau filtrée.

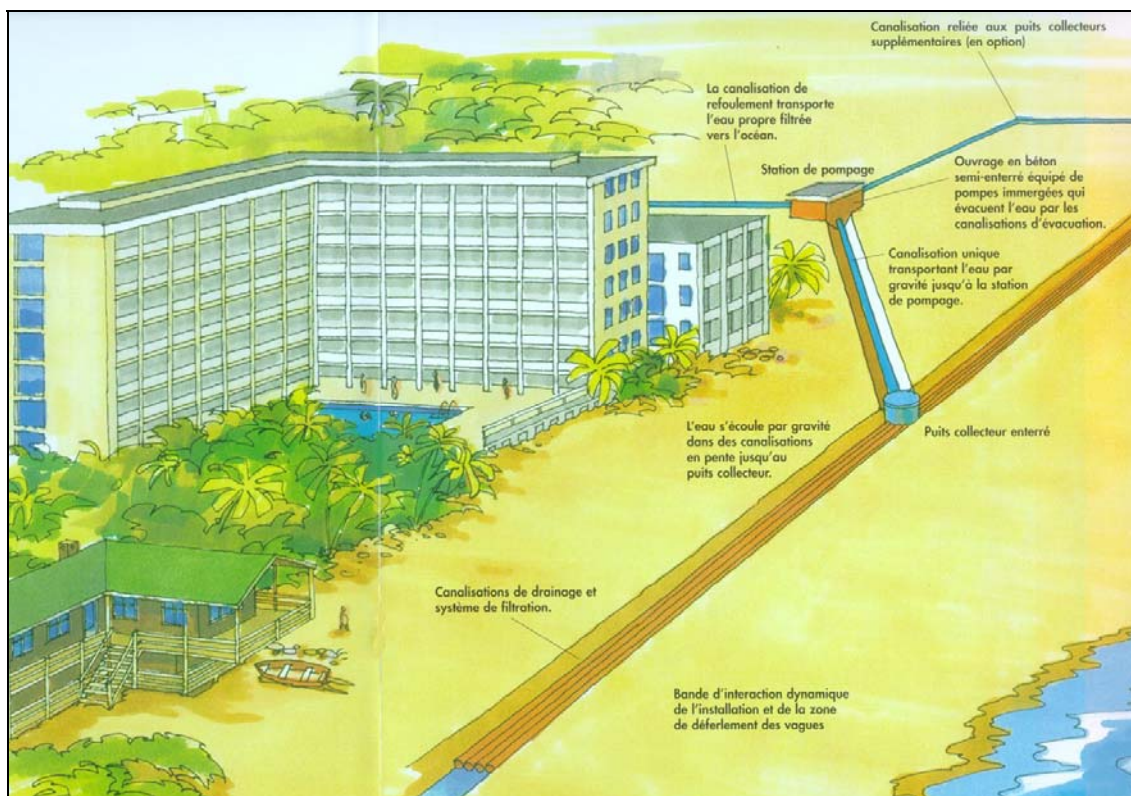


Figure 1 : schéma descriptif du procédé de drainage de plage

II.2.3. Principe de fonctionnement

Cette nouvelle méthode de contrôle de l'érosion des plages fonctionne sur le principe physique de l'infiltration de l'eau dans une couche poreuse non saturée telle que le sable du rivage (figure 2). Le drain a trois effets fondamentaux :

- le drain enfoui à une profondeur de deux mètres environ crée un cône de dépression en rabattant artificiellement la nappe aux abords de la zone de jet de rive ;
- cette zone désaturée (cône de rabattement) permet l'infiltration de la lame montante et descendante due au déferlement et procure ainsi des conditions favorables au dépôt des particules en suspension sur le front de plage ;
- le flux d'eau en direction du drain stabilise les particules de sable en les réorientant, ce qui diminue l'indice des vides et augmente l'effet de compaction.

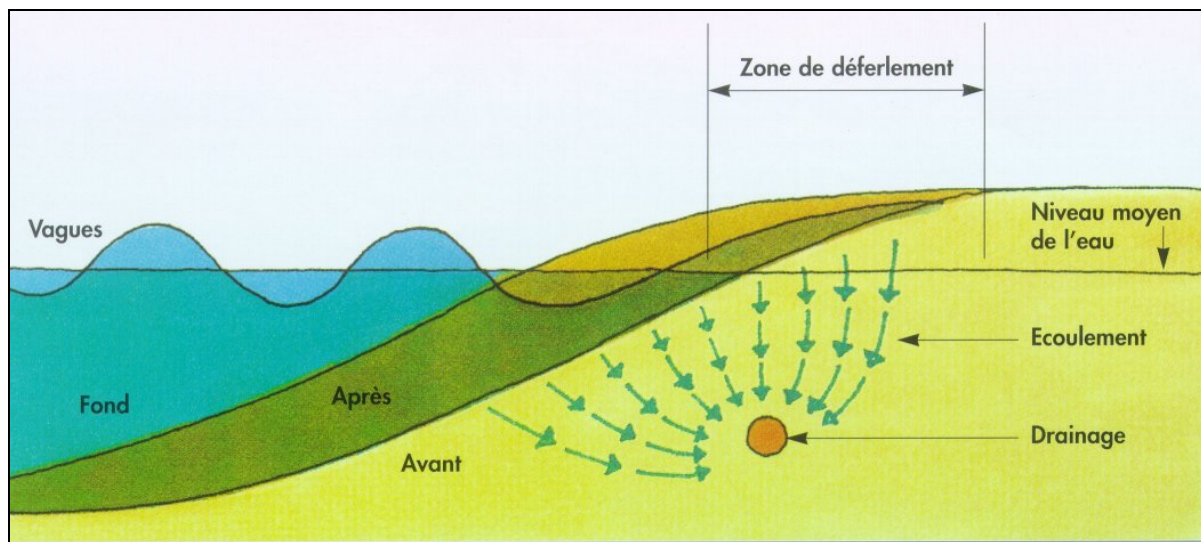


Figure 2 : principe de fonctionnement du système de drainage de plage

II.3. IMPACTS SUR LES SITES EQUIPES AVANT VILLERS-SUR-MER

Les résultats obtenus par le procédé de drainage de plage sont présentés à travers cinq exemples, trois au Danemark, un en Floride et un en France. A l'exception du site français des Sables d'Olonnes, pour lequel le marnage atteint six mètres, ce sont exclusivement des environnements microtidaux (marnage inférieur à deux mètres).

II.3.1. Site d'Hirtshalls-ouest (Danemark)

Les informations concernant les conditions océanographiques de ce site n'ont pas été communiquées. Cependant, le trait de côte est considéré comme relativement stable, les plages évoluant selon les variations saisonnières dont la résultante sur plusieurs années est un taux d'érosion nul. Suite aux résultats de l'implantation du système de drainage destiné à fournir un centre de recherche en eau marine, la décision d'étendre le système sur une

longueur de 200 mètres a été prise, pour confirmer les résultats déjà observés. Le nouveau dispositif de drains a été placé à une dizaine de mètres du rivage.

Le suivi de l'évolution de la plage a été réalisé sur une courte période de cinq mois, entre Décembre 1982 et Avril 1983. Il comprend une série de cinq profils espacés de 75 mètres couvrant la zone d'étude. Trois profils sont répartis sur la zone du drain, les deux autres sur les zones de référence plus au Sud. L'impact du procédé est très net sur ce site. Une importante accréation de sable apparaît de part et d'autre du drain, représentant une épaisseur d'environ 1,5 mètre alors que la zone de référence est soumise à l'érosion. Devant le stock sédimentaire accumulé, les autorités ont décidé d'extraire 25000 m³ de sable pour recharger des sites en érosion. Par ailleurs, un important départ de sable, lié au transport éolien, a été mis en évidence sur le secteur drainé. Des observations à plus long terme confirment la stabilité du rivage dans la zone soumise au procédé. Il convient cependant d'émettre une remarque concernant ces résultats car le site est à l'abri d'un ouvrage portuaire. L'impact de cet ouvrage sur la dynamique sédimentaire de cette zone doit donc être pris en compte. En effet, il est probable que la dérive littorale contribue à l'accumulation du sable contre la digue portuaire et contribue ainsi à l'engraissement la plage équipée du système de drainage.

II.3.2. Site d'Hirtshalls-est (Danemark)

Le site de Hirtshalls-est est soumis à des conditions d'agitations plus fortes qu'à Hirtshalls-ouest. Il a donc été choisi pour tester les capacités du procédé de drainage en conditions agitées. De plus, le trait de côte subit de fortes variations saisonnières et un taux d'érosion résiduel de 7 mètres par an a été mesuré par le DGI.

Le suivi de l'évolution des profils de plage s'est déroulé sur une période de huit mois entre Février et Septembre 1983. Il prend en compte deux zones de référence de part et d'autre de la zone équipée du système de drainage. L'analyse des profils met en évidence, sur le levé du mois d'Avril, un dépôt de sable au niveau de la zone drainée alors que les zones de référence montrent une tendance à l'érosion. L'efficacité du procédé n'a toutefois pas pu être démontrée sur ce site en condition de tempête, le système de pompage étant momentanément inopérant pour des raisons techniques. Après la nouvelle activation du système, selon des observations visuelles réalisées deux mois plus tard en Novembre 1983, la ligne de rivage s'est de nouveau stabilisée. L'Institut Danois de Géotechnique n'a donc pas considéré ce test comme un véritable succès. Un troisième test de grande ampleur a alors été prévu sur la côte ouest du Danemark à Thorsminde.

II.3.3. Site de Thorsminde (Danemark)

L'expérimentation à Thorsminde correspond au test officiel du procédé de drainage. L'implantation a eu lieu début 1985.

La côte est ouverte sur la Mer du Nord et se trouve exposée à une forte agitation avec des hauteurs extrêmes de vagues comprises entre 5 et 8 mètres pour des profondeurs de 20 mètres. La dérive littorale à Thorsminde est orientée au Sud. La vitesse de déplacement des matériaux est estimée à 300 mètres par an, ce qui est relativement faible. La ligne de rivage forme des oscillations de 200 à 2000 mètres de longueur d'onde et de 30 à 40 mètres d'amplitude. Ce système d'ondulation migre vers le Sud en fonction de l'intensité de la dérive littorale.

Une méthodologie identique aux autres sites est appliquée à Thorsminde pour mettre en évidence l'effet du procédé. Les levés topographiques sont réalisés le long de zones de référence en amont et en aval-derive du secteur traité par le système. Les résultats à court terme (une année) et à long terme (six années) sont interprétés sous forme de cubature et d'évolution de la ligne de rivage pour révéler les capacités du procédé à contrôler l'érosion.

Pendant la période d'installation, le rivage s'est modifié sous l'effet de la migration des ondulations sableuses. La partie nord du drain s'est retrouvée à plus de trente mètres du rivage et la partie sud, encore en construction, a été repositionnée à une quinzaine de mètres en avant du rivage.

L'analyse à court terme des cubatures a montré que :

- la zone de référence nord a subi des fluctuations liées aux variations saisonnières, considérées comme habituelles ;
- la partie nord de la zone drainée s'est érodée pendant les cinq premiers mois puis s'est engraisée et stabilisée à une distance approximative de vingt mètres en avant du drain ;
- la partie sud de la zone traitée a montré une accrétion progressive qui pourrait être liée à l'impact de la dérive littorale conjugué à l'érosion de la partie nord, puis une stabilité s'est établi à vingt-cinq mètres du drain.

La zone de référence sud, à l'aval-dérive, montre une certaine stabilité, cependant l'évolution des cubatures indique que cette zone est globalement en légère érosion (contrairement à ce qu'indique le rapport du DGI). La zone traitée par le procédé de drainage semblerait induire des effets négatifs sur les plages en aval dans un contexte de dérive littorale. Cependant, les mois d'octobre, novembre et décembre montrent une tendance d'évolution positive. Il est donc difficile de se prononcer sur les effets négatifs induits par le système dans un contexte où le rivage se modifie sous forme d'oscillations de taille variable en fonction de l'influence des conditions hydrodynamiques.

Les résultats sur le suivi à long terme montrent également une tendance à l'accrétion du stock sédimentaire malgré l'apparition de quelques fluctuations liées à des conditions d'agitations plus fortes. Dans le but de distinguer les effets du système de ceux du transit littoral, le drainage a été arrêté pendant une année en 1988. Cette interruption a provoqué une érosion telle que le rivage est revenu à sa position d'origine et a même reculé. La remise en fonction du système de pompage a permis un nouvel engraissement de la plage. La campagne de mesures s'est terminée en 1991, en considérant les résultats obtenus comme un succès. Le procédé de drainage s'affiche à partir de cette date comme une nouvelle technologie de défense contre la mer "contrôlant" l'érosion des plages de sable.

II.3.4. Site de Sailfish Point (Floride, USA)

L'implantation du procédé de drainage (« Stabeach System » aux USA) à Sailfish Point est le premier essai commercial. L'opération s'est déroulée sur deux mois, d'août à septembre 1988. Le drain est placé à une vingtaine de mètres en avant du niveau des pleines mers.

La présence d'une barrière de corail au large du site crée une dynamique particulière. Pendant la période estivale, quand les vagues se propagent du Sud-Ouest, le transport sédimentaire se fait vers le Nord et les matériaux sont bloqués par le récif et la côte, une large plage se développe. Pendant l'hiver, les houles proviennent du Nord-Est, le transit s'inverse et s'effectue vers le Sud. A ces mouvements parallèles à la côte, s'ajoutent des déplacements dans le profil. La dérive littorale est estimée à 1,5 kilomètre par an. Cette dynamique particulière provoque la formation d'ondulations sableuses (sand wave).

Leur migration modifie la ligne de rivage et crée successivement des zones d'érosion et d'engraissement. Ces fluctuations induisent des variations de la ligne de rivage de plus ou moins quinze mètres. L'agitation est faible, le creux significatif étant en général bien inférieur au mètre.

L'analyse des résultats après deux ans de suivi, réalisée par R.G. Dean, permet de dégager une tendance à la stabilité de la ligne de rivage et des cubatures pour la zone traitée par le procédé de drainage.

Les zones de référence nord et sud ont montré des variations beaucoup plus importantes. Le recul dans la zone du drain est de l'ordre de quinze mètres, ce qui signifie que le procédé n'arrête pas totalement l'érosion. Les zones de référence accusent un recul d'environ trente mètres. Les mêmes constatations peuvent être faites concernant les cubatures. La zone traitée apparaît systématiquement plus stable au cours de la période d'étude.

L'interprétation de l'évolution de la ligne de rivage entre Juillet 1988 (début du suivi) et Avril 1989 est délicate car la période de comparaison varie d'un secteur à l'autre.

L'évolution des cubatures montre que la zone testée est en engraissement. L'érosion de la zone nord est plus marquée que celle de la zone sud. La zone nord pourrait être en sous alimentation, en raison de la captation du sable sur la zone drainée. L'inversion de la dérive littorale au cours d'une même année rend difficile l'estimation de l'impact du procédé de drainage sur les secteurs situés en amont et en aval-dérive.

II.3.5. Site des Sables d'Olonne

Ce site a été équipé du procédé de drainage en 1999 afin de réduire l'érosion constatée sur cette plage très touristique. C'est la première plage française où cette technique a été utilisée. Les caractéristiques du site sont d'une part son exposition aux houles atlantiques venues du large et son marnage atteignant 6 mètres en vives-eaux exceptionnelles. Il est également important de noter l'impact des hauts fonds au large de la plage qui limitent les échanges sédimentaires avec l'avant côte. Finalement, la plage fonctionne quasiment comme une cellule hydrosédimentaire fermée.

L'analyse des résultats, après six années de suivi de la morphodynamique de la plage, a permis de mettre en évidence une relative stabilité de la plage soumise au drainage. Par ailleurs, la rupture de pente entre la haute et la moyenne plage s'est déplacée d'une dizaine de mètres vers la mer, provoquant ainsi un élargissement de la partie sèche de la plage. Ces résultats sont toutefois à modérer en raison des conditions météorologiques particulièrement favorables (absence de tempêtes érosives) observées depuis 2003.

II.3.6. Conclusion

D'après les documents fournis par l'Institut Danois de Géotechnique, les résultats obtenus sur les sites d'Hirtshalls (est et ouest), de Thorsminde au Danemark et de Sailfish Point en Floride révèlent que le procédé de drainage développe certaines capacités à contrôler l'érosion des plages de sable en sites microtidaux. Les résultats à Hirtshalls montrent que le système est même capable de produire un engraissement de la plage en quelques mois. Le test officiel de Thorsminde semble également prouver les effets à long terme du système contre l'érosion. Les capacités restent cependant réduites face à de fortes tempêtes au cours desquelles le rivage subit un recul momentané. Toutefois, l'action du procédé permet apparemment une reconstitution plus rapide des zones érodées lors des tempêtes.

Sur le site des Sables d'Olonne, en domaine méso à macrotidal, l'impact du procédé est moins net en terme d'accrétion sur la plage. En effet, en dehors de l'assèchement mis en évidence, l'impact du drainage n'est pas clairement identifiable puisque la stabilité observée sur le site traité peut découler des conditions climatiques relativement clémentes des dernières années.

A ce stade des connaissances, l'étude du site de Villers-sur-Mer présente plusieurs intérêts liés notamment au caractère macrotidal de la plage (marnage dépassant 8 mètres en vives-eaux exceptionnelles) et à la particularité du dispositif mis en place (figures 3 à 5). En effet, afin de tenir compte des particularités du site deux drains parallèles ont été implantés. Cette adaptation de la technique a pour objectif d'augmenter le temps de fonctionnement du procédé et ainsi d'augmenter son impact sur la dynamique sédimentaire.

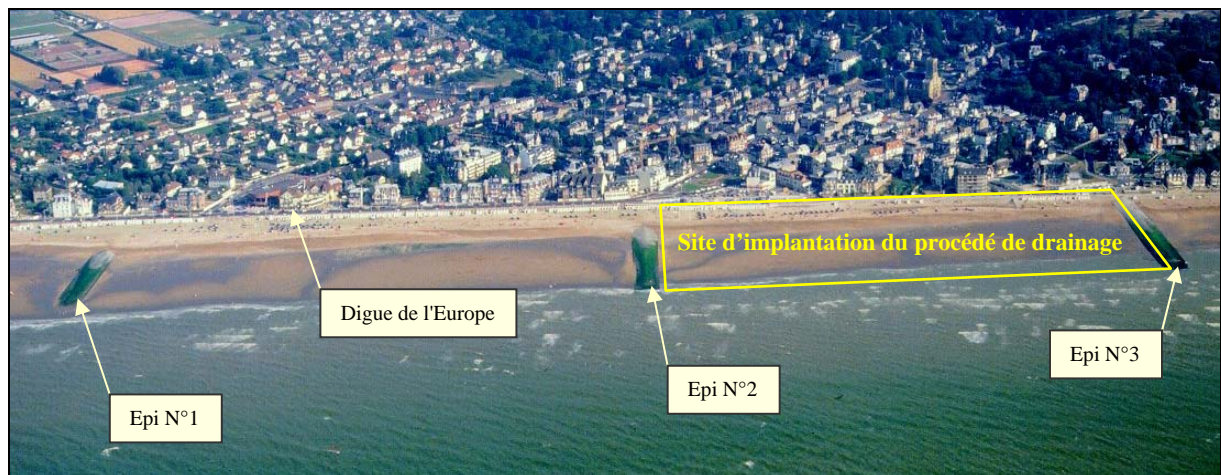


Figure 3 : photographie du site retenu (la plage Mermoz) pour l'implantation du procédé de drainage à Villers-sur-Mer (cliché : DIREN, 1998)

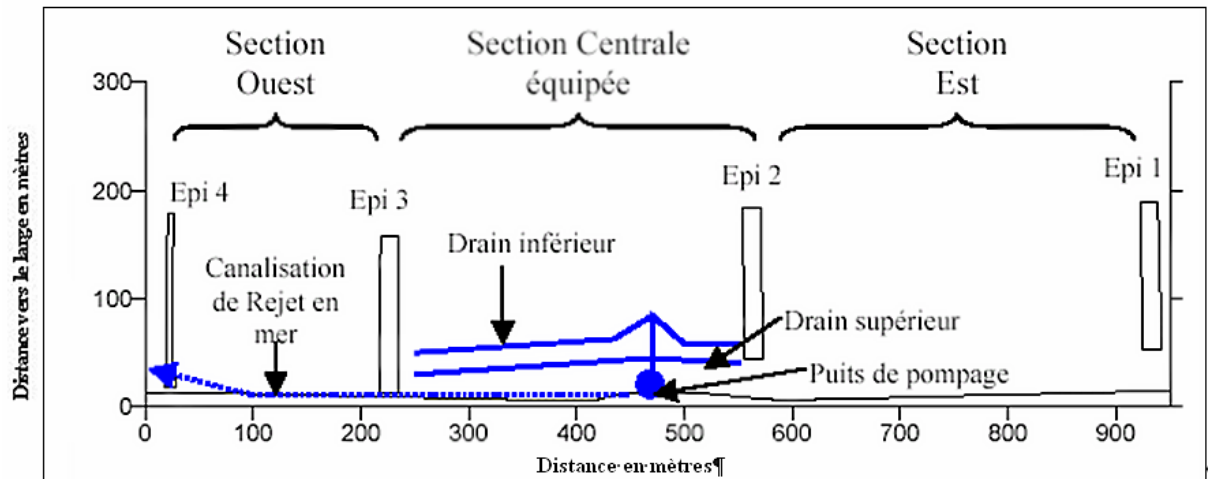


Figure 4 : vue en plan du système de drains installé à Villers-sur-Mer et extension de la zone de suivi topographique (source : J.M. COUTON)

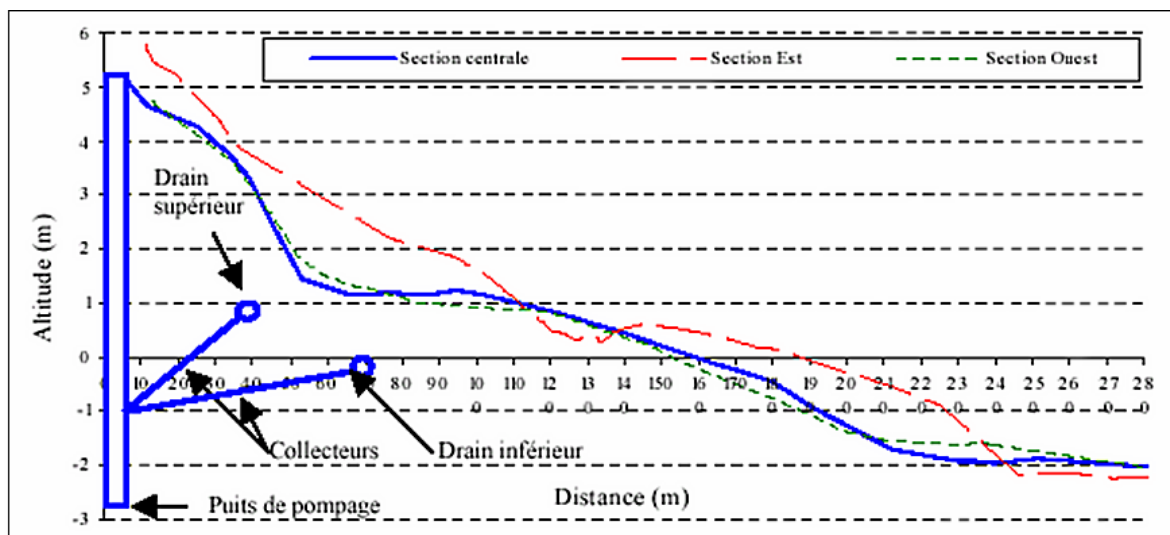


Figure 5 : vue en coupe des installations du dispositif de drainage de plage et profils moyens des sections ouest, est et centrale (source : J.M. COUTON)

III. RESULTATS DU SUIVI SCIENTIFIQUE DE L'EVOLUTION DE LA PLAGE DE VILLERS-SUR-MER SOUS L'IMPACT D'UN PROCEDE DE DRAINAGE

III.1. OBSERVATION ET PHOTO-INTERPRETATION

Les déplacements réguliers sur le site, le suivi photographique (webcam et drone) et les différents clichés aériens disponibles sur le secteur ont permis de mettre en évidence les évolutions de la surface de la plage équipée du système de drainage.

L'ensemble des observations et la photo-interprétation confirment l'influence du pompage sur la position de la résurgence de la nappe phréatique sur la plage, donc sur les écoulements affectant la moyenne plage. Les clichés réalisés préalablement à la mise en fonction du dispositif témoignent de l'importance de ces écoulements sur la plage de Villers-sur-Mer et de la saturation des sables par l'eau de la nappe. Sur le cliché de 1998 (figure 6), les principaux écoulements se répartissent le long des épis et au centre de la zone d'étude.



Figure 6 : photographie oblique de la zone d'étude avant l'implantation des drains (DIREN, 1998)

A l'inverse, sous l'effet du drainage, un assèchement notable de la haute plage a été constaté sur les clichés pris après mai 2003 (date de la mise en fonction du drainage de plage). La photographie aérienne réalisée par drone en juin 2004, rend particulièrement compte de l'action du procédé car la zone asséchée suit le tracé du drain implanté sur la moyenne plage (figure 7).



Figure 7 : photographie de la plage de Villers-sur-Mer réalisée lors d'un vol du drone, un an après l'implantation du procédé de drainage (M2C, juin 2004)

Les différents déplacements sur site ont confirmé ces interprétations et il ne fait donc aucun doute que **le drainage influence très efficacement la position des résurgences de la nappe phréatique sur la plage, provoquant progressivement son assèchement dès que la mer baisse.**

Cet assèchement est un point positif à la fois sur le plan technique et d'un point de vue socio-économique.

Sur le plan technique, l'assèchement permet une meilleure infiltration du swash (ou jet de rive) et doit ainsi favoriser la sédimentation des particules transportées par le jet de rive.

D'un point de vue socio-économique, l'assèchement de la plage favorise l'augmentation de sa capacité d'accueil à basse mer sur la surface comprise entre les épis n°2 et n°3. Sur cet aspect, l'impact du procédé de drainage est indéniable.

Les pouvoirs publics à l'origine de l'implantation du procédé (Mairie de Villers-sur-Mer notamment) peuvent se satisfaire de cet assèchement efficace.

III.2. LES CONDITIONS HYDRO-METEOROLOGIQUES SUR LA PERIODE DE SUIVI

Le suivi visant à mettre en évidence l'impact du procédé de drainage s'est déroulé en deux phases. Dans un premier temps, l'évolution altimétrique de la plage a été étudiée préalablement à la mise en place du système de drainage, entre 1998 et 2002. Dans un second temps, le suivi s'est poursuivi pendant la période de fonctionnement du procédé entre 2003 et 2007. La comparaison des données collectées au cours des deux périodes doit permettre de discerner l'influence de cette technique de drainage de plage.

Afin de suivre et d'étudier l'impact du procédé de drainage, le GRESARC a mis en place, à partir de janvier 2003, des instruments permettant de mesurer les conditions hydrodynamiques sur la plage de Villers-sur-Mer. Le suivi hydrodynamique, réalisé pendant le fonctionnement du système de drainage, avait pour finalité de mettre en parallèle les informations concernant le forçage météo-marin d'une part et les évolutions morphologiques de la plage d'autre part. En l'absence de données comparables sur la période de suivi précédente (pas de mesures hydrodynamiques à Villers-sur-Mer entre 1998 et 2002), une corrélation a été effectuée entre les données de vents disponibles à Bernières-sur-Mer et les houles mesurées à Villers-sur-Mer. Ainsi, les variations des conditions hydro-météorologiques entre les périodes 1998 – 2002 et 2003 – 2006 ont pu être abordées au travers de l'étude du régime des vents.

III.2.1. Données météorologiques

Les données disponibles pour les stations de Luc-sur-Mer (de 1998 à 2001) et de Bernières-sur-Mer (de 2002 à 2006) ont permis de mettre en évidence la variabilité des conditions météorologiques.

Ainsi, il est nécessaire de souligner les différences observées entre la période de suivi préalable à la mise en fonction du système de drainage et la période 2003 – 2006 au cours de laquelle le procédé de drainage était opérationnel.

Mise au point d'un modèle prévisionnel d'évolution d'une plage macrotidale sous l'effet d'un procédé de drainage

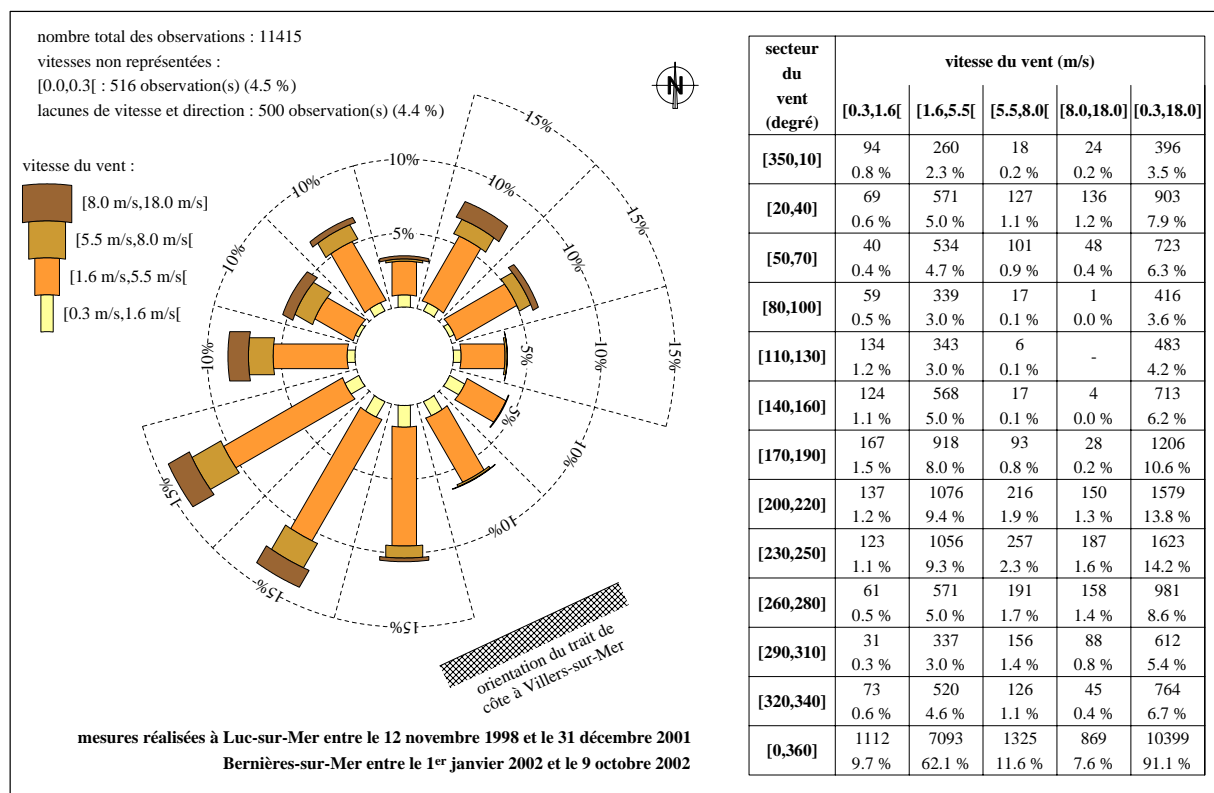


Figure 8 : répartition des vents à Luc-sur-Mer et Bernières-sur-Mer entre le 12 novembre 1998 et le 9 octobre 2002 (source : Météofrance)

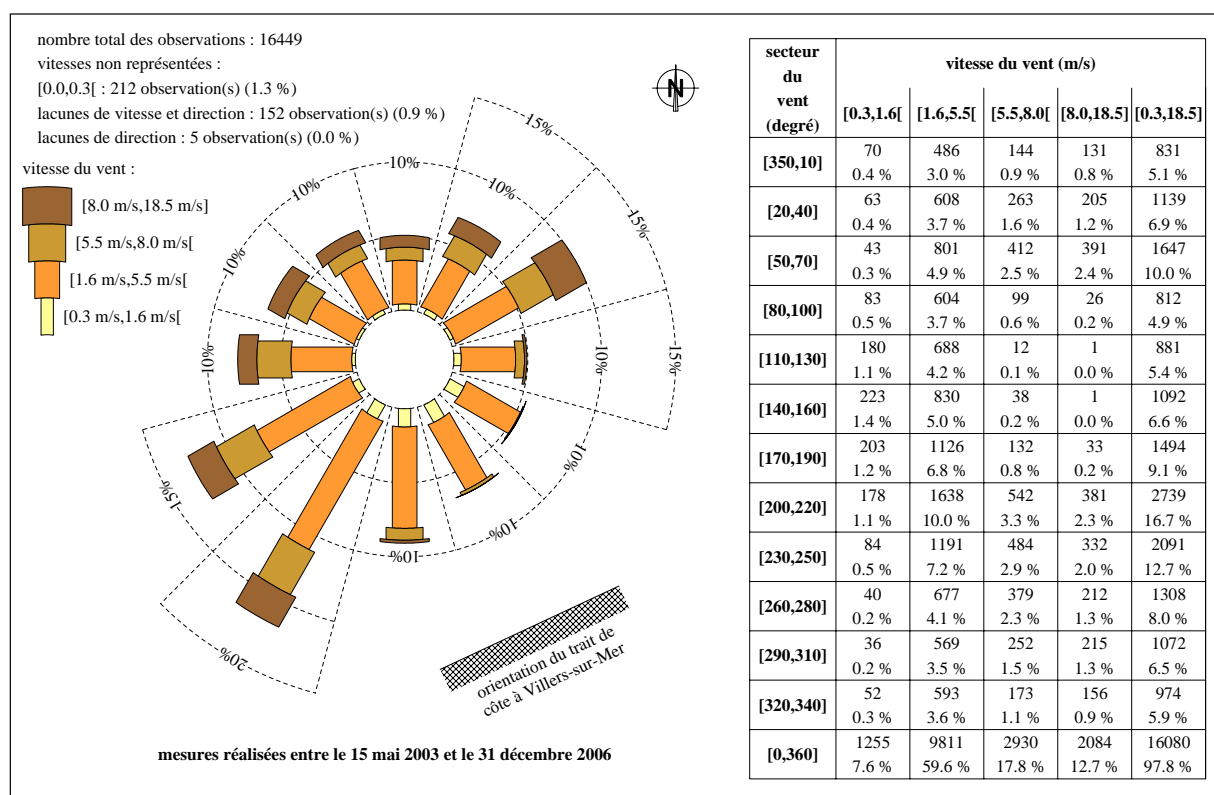


Figure 9 : répartition des vents à Bernières-sur-Mer entre le 15 mai 2003 et le 31 décembre 2006 (source : Météofrance)

La comparaison des roses des vents souligne une modification sensible de la fréquence des directions des vents dominants. La prédominance des vents de Sud-Ouest reste globalement inchangée de 1998 à 2006, mais les vents de secteur Sud [170°, 190°] tendent à s'atténuer entre 2003 et 2006 au profit des vents d'Est-Nord-Est [50°, 70°]. Ce changement dans les directions s'est également accompagné d'une nette augmentation de la fréquence des vents de vitesse supérieure à 5,5 m/s (31,2 % des observations entre 2003 et 2006 contre 21,1% de 1998 à 2002).

Cette variation du régime des vents influence les caractéristiques de l'agitation sur la plage de Villers-sur-Mer dominée par une agitation de courte période. La plage drainée est donc soumise à des conditions plus difficiles par rapport aux quatre années précédant l'installation avec probablement un renforcement notable de l'agitation.

III.2.2. Caractéristiques de l'agitation mesurée entre le 15 mai 2003 et le 10 mai 2006

Les résultats obtenus au cours des trois années de mesures hydrodynamiques sur le site de Villers-sur-Mer (figure 10) sont typiques d'une mer fermée peu profonde, caractérisée par une agitation de "mers de vent" largement dominante associée parfois à des houles résiduelles, longues et faiblement cambrées. La dynamique sédimentaire des sables sur la plage de Villers-sur-Mer sera orientée de manière résiduelle vers l'embouchure de la Seine (vers l'Est) du fait de la dominance des agitations de nord-ouest. Cependant, les débits seront nécessairement faibles, compte tenu de leurs faibles incidences par rapport au rivage et de la fréquence élevée des agitations normales à la côte.

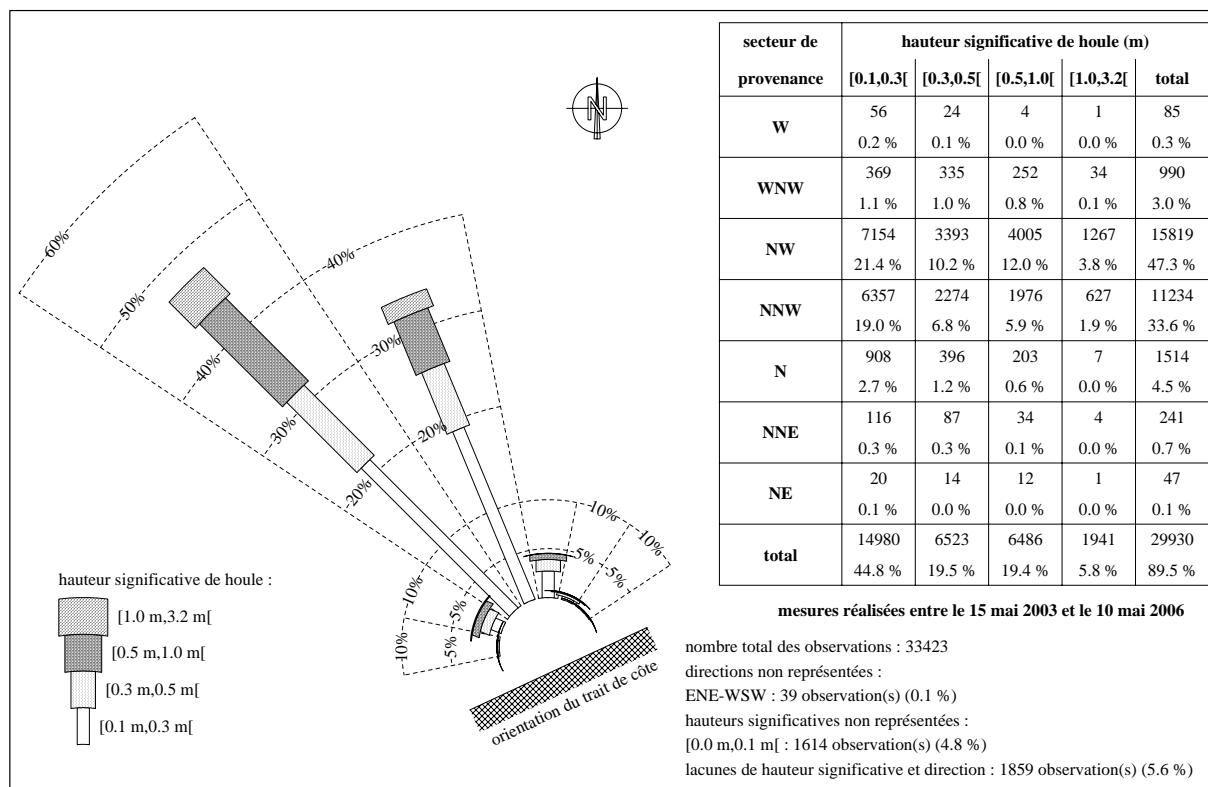


Figure 10 : rose des houles à Villers-sur-Mer entre le 15 mai 2003 et le 10 mai 2006

III.3. SYNTHÈSE DE L'ÉVOLUTION DE LA GRANULOMÉTRIE DES SÉDIMENTS DE LA PLAGE MERMOZ A VILLERS-SUR-MER

Sous l'influence du drainage de plage, il a été initialement supposé que la granulométrie des sédiments superficiels pouvait évoluer au cours du temps. Ainsi, des prélèvements ont été régulièrement effectués pour appréhender l'impact du dispositif sur les sédiments de la plage de Villers-sur-Mer.

Sur le secteur drainé, une tendance à l'augmentation des médianes a été mise en évidence au niveau de la position des drains en haute plage et à la jonction haute plage / moyenne plage. En revanche, les sédiments se sont affinés sur la moyenne plage de ce secteur. Une influence du procédé de drainage n'est donc pas exclue. Cependant, les évolutions mesurées sur les secteurs non traités sont relativement comparables et la composition des sédiments a finalement peu varié entre février 2003 et avril 2007. En terme de classes granulométriques, la moyenne plage est toujours composée de sables moyens tandis que la haute plage et la jonction haute plage / moyenne plage présentent des sables moyens à grossiers en 2003 comme en 2007.

Il est donc particulièrement difficile de mettre en évidence une action spécifique du système de drainage en terme d'évolution de la granulométrie des sables à Villers-sur-Mer. Les impacts des coups de vent et du nettoyage répété de la plage sont vraisemblablement très importants sur la partie supérieure de la plage et peuvent expliquer la plus grande variabilité observée à ce niveau par rapport au bas de plage.

III.4. ÉVOLUTION ALTIMÉTRIQUE DE LA PLAGE MERMOZ A VILLERS-SUR-MER

La plage Mermoz est caractérisée par la présence de barres sableuses et de bâches situées sur la moyenne et la basse plage. Les barres sableuses ne sont pas précisément parallèles à la digue de l'Europe, orientée WSW-ENE, mais s'étendent selon un axe plus nettement SW-NE. Elles tendent à migrer dans le profil, en se déplaçant en fonction des conditions hydrodynamiques.

A partir de novembre 1998, le GRESARC a suivi l'évolution de la plage Mermoz par le biais de levés topométriques réalisés deux à trois fois par an au droit de trois stations de mesures implantées entre les épis n^{os} 2 et 3 (profils P01 à P03, d'Ouest en Est), à l'emplacement de l'actuel dispositif de drainage de plage (figure 11). L'analyse des données acquises durant huit ans et demi permet de préciser les fluctuations du profil de plage entre novembre 1998 et octobre 2002, avant le début des travaux en janvier 2003 d'une part, et après la mise en fonction du procédé de drainage entre mai 2003 et avril 2007 d'autre part. Par ailleurs, au cours de la période de fonctionnement du procédé, le suivi a été étendu aux secteurs adjacents non traités. La comparaison entre l'évolution de la zone équipée et celles des zones non traitées est donc possible pour les quatre dernières années.

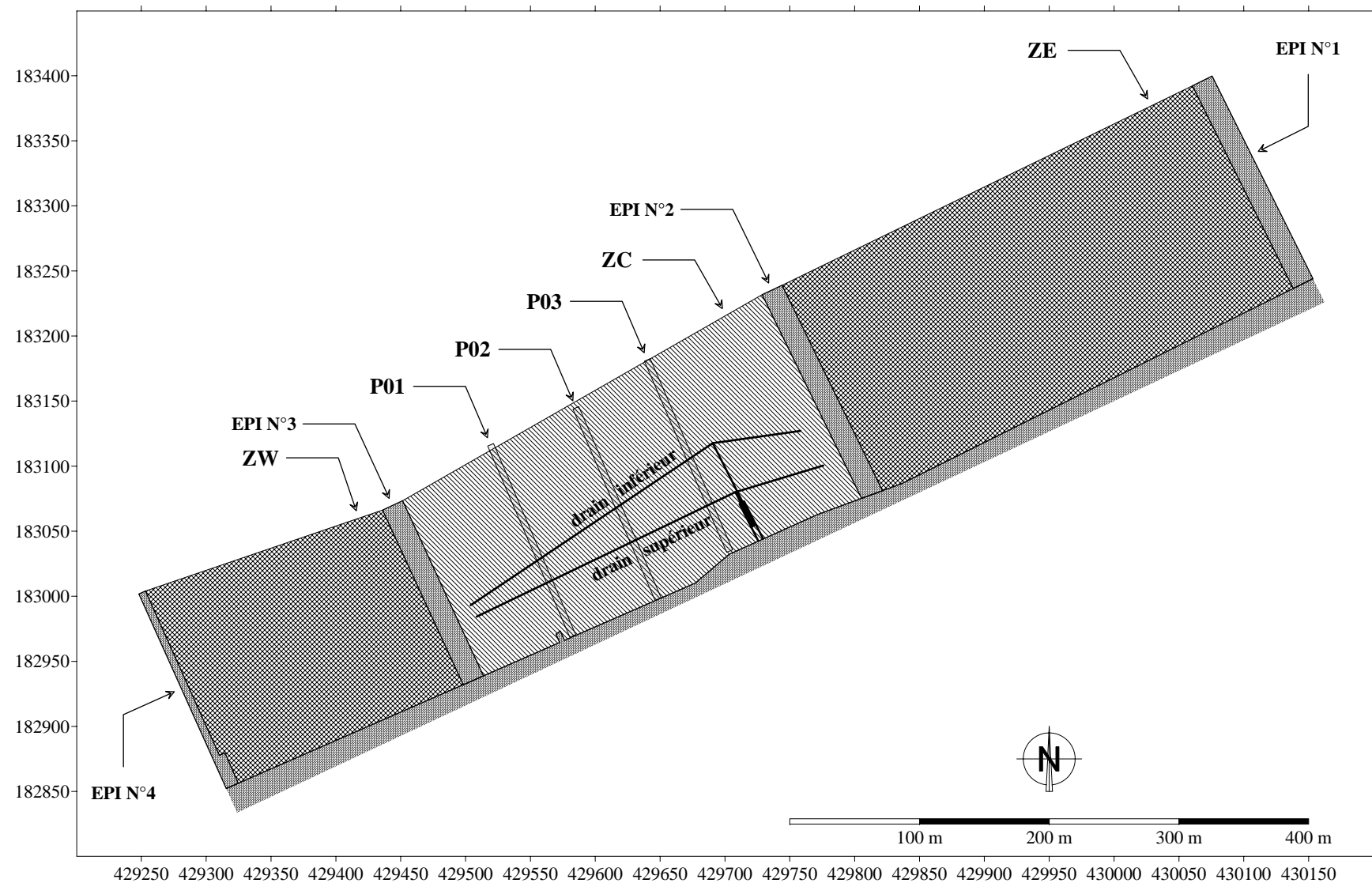


Figure 11 : localisation des différents profils suivis en topographie ainsi que des zones d'emprises des calculs de volumes

III.4.1. Evolution de trois profils topographiques suivis depuis novembre 1998

III.4.1.1 Evolution altimétrique de la plage le long de trois profils suivis depuis novembre 1998

Les fluctuations du niveau des profils de plages ont été globalement plus importantes lors de la période de fonctionnement du procédé de drainage qu'avant sa mise en place. Cette augmentation de l'amplitude des fluctuations de la plage est également mise en évidence au-dessus des drains.

L'évolution des profils de plage entre novembre 1998 et octobre 2002 met en évidence :

- des vitesses d'évolution plus faibles sur la haute plage et sur la partie supérieure de la moyenne plage ;
- un système très dépendant de la construction /déconstruction des barres sableuses et de leur migration dans le profil.

L'évolution des profils de plage depuis la mise en fonction du procédé de drainage (de mai 2003 et avril 2007) présente des différences notables par rapport à la période précédente, avec :

- des vitesses d'évolution altimétrique plus importantes sur la haute plage et sur la moyenne plage soumise au drainage ;
- des vitesses d'évolution moins importantes sur l'extrémité basse des profils (en dehors de la zone directement affectée par le drainage) ;
- un exhaussement sur la partie inférieure de la haute plage et à la jonction haute plage / moyenne plage (zone entre les deux drains).

III.4.2.1 Evolution du volume de la plage le long de trois profils suivis depuis novembre 1998

Pour les trois profils suivis en topométrie depuis novembre 1998, et pour chaque levé effectué, les volumes sédimentaires situés au-dessus de la cote -1 m IGN₆₉ ont été calculés sur les 160 premiers mètres de plage et pour une largeur d'un mètre. Cette longueur de 160 mètres correspond approximativement à la longueur des épis en place sur la plage Mermoz.

Sur la période novembre 1998 – mai 2003, avant la mise en fonction du procédé de drainage, la tendance est globalement à l'augmentation du budget sédimentaire sur les 160 premiers mètres des trois profils situés sur la zone centrale, drainée par la suite (+11, +29 et +26 m³/ml respectivement pour P01, P02 et P03).

Entre mai 2003 et avril 2007, les levés topométriques au D-GPS ont permis d'élaborer des MNT desquels les profils P01, P02 et P03 ont été extraits. Les volumes sédimentaires, le long des 160 premiers mètres de ces trois profils, ont donc été calculés de façon à les comparer aux données issues des suivis au tachéomètre réalisés au cours de la période 1998 / 2002.

Le bilan est à l'érosion pour les trois profils au cours de la période de fonctionnement du procédé (2003 – 2007). Ce constat doit cependant être relativisé en raison de l'influence des conditions d'agitation plus défavorables qu'entre 1998 et 2003.

III.4.2. Evolution de la plage Mermoz entre mai 2003 et avril 2007, entre l'épi n°1 à l'Est et la cale-épi n°4 à l'Ouest

Depuis mai 2003, date de mise en fonction du procédé de drainage, l'évolution morphologique de la plage Mermoz est suivie par le biais de levés topométriques au D-GPS, réalisés sur un linéaire proche de 900 mètres et sur une largeur proche de 300 mètres en avant de la digue de l'Europe (figure 12).

III.4.1.2 Evolution altimétrique de la plage Mermoz entre mai 2003 et avril 2007

Sur la partie de plage équipée du dispositif de drainage, l'évolution entre 2003 et 2007 se caractérise par :

- des fluctuations du niveau de la plage s'accroissant d'Ouest en Est pouvant être liées à l'influence des épis ;
- une migration vers la mer des barres sableuses sur les moyenne et basse plages ;
- un abaissement de la partie supérieure de la haute plage, d'une valeur généralement comprise entre 0,2 et 1 m ;
- un exhaussement du talus de la haute plage (sous le drain supérieur) et le comblement de la dépression située entre les drains supérieur et inférieur.

Sur la zone ouest, non équipée du dispositif de drainage, les tendances évolutives au cours de la période des suivis sont semblables à celles mesurées sur la zone traitée. Toutefois, les amplitudes des évolutions sont moins importantes sur ce secteur dépourvu de drain. A ce titre, il convient de souligner la taille plus réduite de la zone *ouest* par rapport à celle équipée du dispositif de drainage de plage.

Sur la zone *est* non équipée du dispositif de drainage, les tendances évolutives au cours de la période 2003 - 2007 sont sensiblement différentes de celles mesurées sur la zone traitée. L'amplitude des évolutions est moins importante en pied de digue sur ce secteur dépourvu de drain. En revanche, les abaissements et exhaussements mesurés à proximité de l'extrémité des épis sont plus importants que sur les secteurs *ouest*, non équipé, et centre, équipé du dispositif de drainage.

III.4.2.2 Evolution des volumes de plage entre mai 2003 et avril 2007

L'évolution du volume de plage, calculée sur la zone d'emprise des épis (figure 13), a permis de mettre en évidence les fluctuations du budget sédimentaire sur les zones traitée et non traitées au cours des quatre années de fonctionnement du système de drainage.

L'évolution des volumes de plage depuis la mise en fonction du dispositif de drainage montre :

- **une légère érosion de la plage équipée du procédé de drainage ;**
- **une légère accrétion de la plage non équipée à l'Ouest ;**
- **une accrétion nette de la plage non équipée à l'Est.**

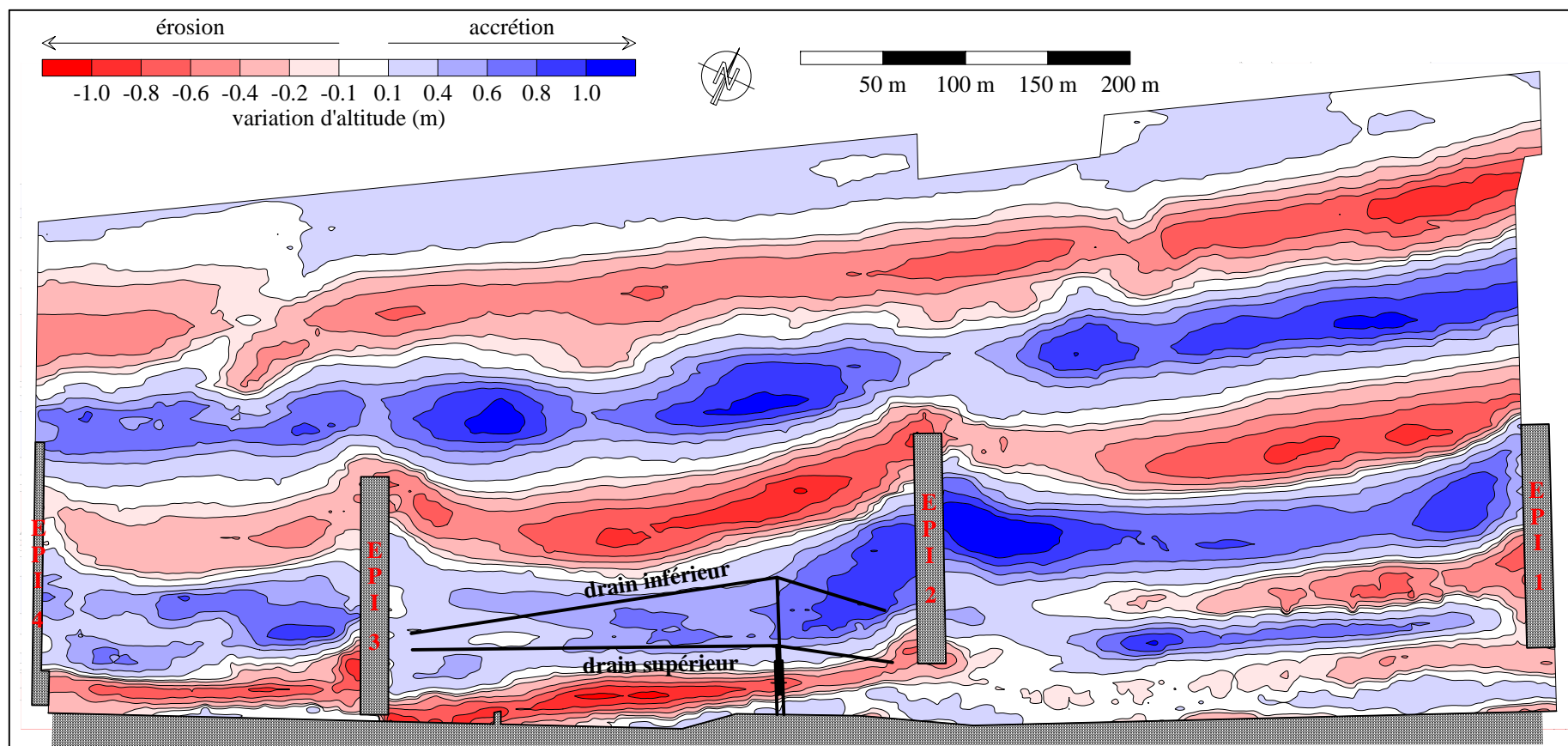


Figure 12 : évolution de la plage de Villers-sur-Mer entre le 15 mai 2003 et le 16 avril 2007

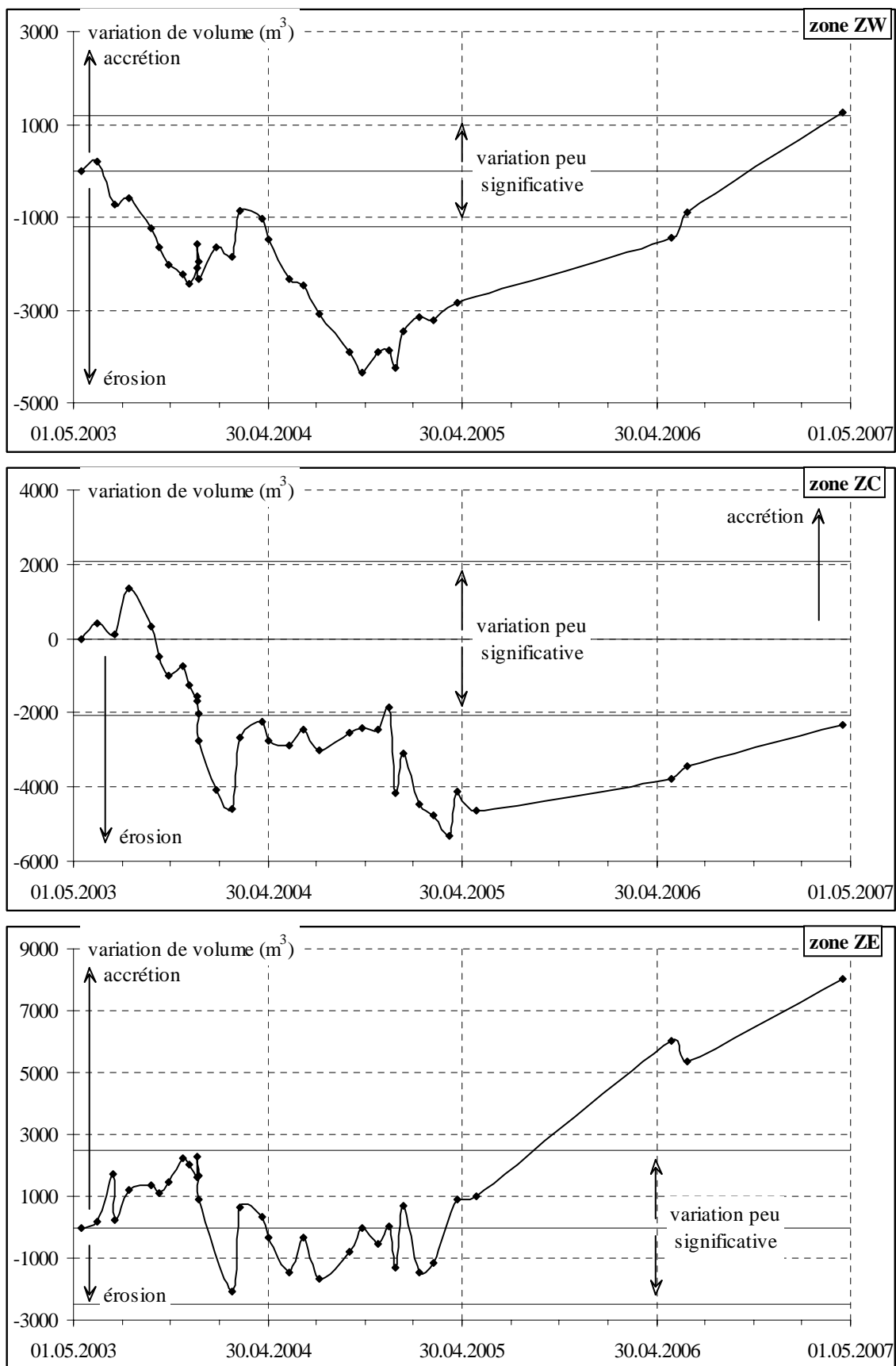


Figure 13 : variation du volume sédimentaire dans les zones d'emprise des épis durant les quatre années de fonctionnement du procédé de drainage

III.5. CONCLUSION SUR L'IMPACT DU PROCEDE DE DRAINAGE EN NATURE

Le procédé de drainage a été mis en place sur la haute plage de Villers-sur-Mer (Calvados) au premier trimestre de l'année 2003. Sa mise en fonction définitive en automatique a eu lieu le 7 mai 2003.

Depuis novembre 1998, un suivi morphologique de la plage Mermoz, sur le site même d'implantation des drains, a permis d'apprécier les fluctuations altimétriques de l'estran préalablement au démarrage du chantier. Ces levés, réalisés entre les épis n^{os}2 et 3 de la plage, n'ont pas permis de dégager de tendance évolutive très marquée commune à l'ensemble de la zone et une relative **stabilité du stock sédimentaire a été mise en évidence jusqu'à l'implantation du procédé de drainage.**

Le suivi réalisé après l'installation du système de drainage a ensuite permis de comparer les évolutions de la plage Mermoz, sous l'impact de ce procédé, par rapport à l'état initial décrit précédemment.

Après quatre ans de drainage de la plage, **l'évolution volumétrique et altimétrique de la plage n'a pas présenté de tendance positive nette sur la zone traitée.** Sur la même période, les secteurs adjacents non traités ont évolué plus favorablement pour des conditions d'agitation similaires. **Du point de vue de la dynamique sédimentaire et de l'évolution de la plage qui en résulte, l'influence du drainage n'a pas encore été mise en évidence.**

En revanche, un impact positif très important du drainage a été mis en évidence en terme d'**assèchement de la plage.** La zone drainée présente nettement moins d'écoulements dans la zone d'emprise des épis que les zones non traitées situées de part et d'autre. Cet assèchement peut avoir un impact non négligeable sur la fréquentation touristique de la plage et constitue de ce fait un atout pour la station balnéaire de Villers-sur-Mer. L'impact visuel du fonctionnement du procédé de drainage tend également à conforter les élus locaux dans leur choix.

Après quatre ans de fonctionnement du procédé de drainage, le bilan reste donc très mitigé quant à l'impact de cette technique en terme de défense contre la mer. A ce jour, les résultats issus du suivi *in situ* ne permettent pas de se projeter dans une optique de modélisation.

III.6. ECHANGES SUR LES RESULTATS DU SUIVI SCIENTIFIQUE

Les résultats du suivi scientifique de la plage de Villers-sur-Mer ont donné lieu à plusieurs échanges entre l'Université de Caen et les partenaires publics ou privés directement intéressés par les résultats.

Ainsi, un entretien a eu lieu à la Mairie de Villers-sur-Mer en date du 25 juillet 2007 afin de recueillir l'opinion du maître d'ouvrage. M. Aubin, adjoint au maire en charge de la plage de Villers-sur-Mer, nous a confirmé sa satisfaction quant à l'état de la plage depuis la mise en fonction du procédé. Selon ses observations, une accrétion notable peut être observée, en période de calme, immédiatement au-dessus du drain situé 70 mètres en avant de la digue. L'impact du drain situé plus haut sur la plage (40 mètres en avant de la digue) lui apparaît moins franc.

Au cours des tempêtes, l'influence des drains est partiellement remise en cause mais, toujours selon M. Aubin, la reconstitution de la plage suite à ces événements semble favorisée par le drainage. Par ailleurs, il précise que l'assèchement visible d'une partie de l'estran est un point primordial pour la commune de Villers-sur-Mer. En effet, la plage est considérée comme la « vitrine » de cette station balnéaire qui fait tout pour améliorer sa capacité d'accueil dans ce domaine. Pour les gestionnaires, le faible impact du drainage de plage sur la dynamique sédimentaire - mis en évidence par le suivi scientifique - devient donc un aspect secondaire puisque le procédé n'est pas réellement utilisé en tant que défense contre la mer. M. Aubin nous a également fait part de la visite du maire de Quend (80). Ce dernier a semblé particulièrement convaincu par l'aspect de la plage soumise au drainage et il envisagerait donc d'étudier la mise en place d'un procédé similaire sur sa commune.

L'enthousiasme des maîtres d'ouvrage à Villers-sur-Mer est cependant tempéré par le coût de fonctionnement induit par le pompage (comprenant les dépenses en énergie et l'entretien de la structure par une société privée), ainsi que par les différents incidents techniques survenus depuis l'installation.

Les résultats du suivi scientifique mis en place à Villers-sur-Mer ont également été communiqués à un bureau d'étude privé - SOGREAH consultants - particulièrement reconnu pour son expertise en terme d'aménagement du littoral et de défense contre la mer. M. Viguier, chef de la division environnement littoral de SOGREAH maritime, a donc apporté son appréciation concernant la technique de drainage de plage. Au regard des résultats obtenus depuis la mise en place du suivi scientifique à Villers-sur-Mer, M. Viguier conclut à la faible influence du drainage de plage sur la dynamique sédimentaire de ce site. Il met également en évidence le coût important de cette technique pour un bénéfice limité à un assèchement localisé à une petite partie de l'estran. Il note également que le même résultat peut être obtenu par des moyens moins onéreux que le procédé mis en place.

En outre, les résultats scientifiques ont été transmis dans une version très détaillée au CETMEF (Centre des Etudes Techniques, Maritimes Et Fluviales). Cet organisme pourra donc apporter son expertise technique et faire circuler cette information au sein des services de l'état en charge de la gestion du littoral.

Ces différents avis viennent compléter l'aspect strictement scientifique du programme et permettent de valoriser les résultats obtenus dans un cadre plus opérationnel. La thématique développée, en rapport avec la défense contre la mer, a donc été élargie à des aspects plus socio-économiques en rapport avec les attentes des gestionnaires.

IV. MODELISATION PHYSIQUE DU PROCEDE DE DRAINAGE

L'ensemble des opérations réalisées en terme de modélisation a fait l'objet d'un rapport intermédiaire. Afin de tenir compte des contraintes de taille imposées à ce document final en vue de sa diffusion, le détail des opérations n'est pas repris à ce stade. Cette partie revient sur les limites techniques qui ont conduit à revoir les objectifs initiaux du programme et ouvre des perspectives en terme de recherche appliquée dans ce domaine.

Suite aux premiers essais, de nombreux problèmes se sont présentés sur le dispositif expérimental du laboratoire M2C. Par ailleurs, le manque d'informations venant de l'entreprise et la faible réponse de la plage au dispositif de drainage nous ont conduit à modifier nos objectifs initiaux. A cela s'ajoute, un doctorant bénéficiant d'une bourse CIFRE accaparé par l'entreprise, dont la présence au laboratoire fut particulièrement réduite malgré nos demandes répétées auprès de ses dirigeants. Ce manque de moyens humains a nécessité un redéploiement de personnels sur le projet à la charge du laboratoire, non pris en considération dans le budget global de l'opération.

Dans le détail, les différents problèmes rencontrés ont été les suivants :

- les contraintes techniques liées au batteur ;

Deux canaux sont disponibles au laboratoire M2C. Pour des raisons de plan de charge, le canal le plus apte à reproduire des conditions hydrodynamiques de qualité n'était pas disponible. Il a fallu se replier sur un canal dont le batteur plus sommaire offrait de moindre potentialité. Le réglage du batteur utilisé n'a pas permis de reproduire une agitation avec un spectre d'énergie proche de ceux observés en nature. Une approche monochromatique a donc été privilégiée dans un premier temps afin de travailler sur les paramètres intrinsèques aux caractéristiques de la plage qui influencent le swash (pente, granulométrie, niveau imperméable). La nécessité de refaire des profils topographiques identiques avant chaque essai, combinée aux difficultés induites par le réglage du batteur, a rendu ces travaux beaucoup plus coûteux en temps personnel que ce qui était envisagé initialement.

- la confidentialité du dimensionnement des drains implantés à Villers-sur-Mer ;

La société détentrice du brevet du système de drainage en France, fait appel au prestataire D.G.I. (Danish Geo-Institute) pour les études de dimensionnement des drains. Nous n'avons pas pu avoir accès à ces informations considérées comme confidentielles par la société à l'origine du procédé. De fait, nous avons renoncé à une partie de la modélisation envisagée, notamment numérique, n'ayant pas les données de base pour la réaliser. En contre partie un effort supplémentaire a porté sur le suivi de terrain et les expériences en canal.

- l'absence de résultats significatifs concernant l'évolution de la plage du site expérimental de Villers-sur-Mer ;

Ce point est très important car l'objectif du projet était bien de pouvoir reproduire à l'aide d'un modèle prévisionnel l'évolution d'une plage sous l'effet d'un drainage. Outre le fait que nous ne pouvions dimensionner le drainage aussi bien sur le modèle physique que numérique (item précédent) du fait d'une absence de données sur ce point, la plage de Villers n'a pas évolué de manière significative et lisible en trois ans ce qui a rendu plus compliquée encore la détermination de l'éventuelle influence des drains.

Ceci constitue d'ailleurs un résultat de première importance à l'issue de ces recherches qu'il convient de souligner. En effet, les suivis intensifs réalisés depuis l'implantation du procédé de drainage en 2003 n'ont pas permis, à ce jour, de mettre en évidence des évolutions topographiques significatives de la plage dans sa partie traitée par comparaison (1) aux secteurs adjacents non équipés et (2) avec des données d'évolution de la plage antérieurement à la pose des drains.

Le forçage principal contrôlant l'évolution de la plage de Villers est donc fondamentalement différent de celui envisagé suite à la pose du dispositif. Le suivi a montré, en particulier, que le rôle des épis et de la dynamique sédimentaire longitudinale restait, malgré le procédé, très important. Au sein même de la zone traitée par le procédé, le secteur ouest est en érosion et le secteur est en accrétion en réponse principalement à la présence des épis et à un transport longitudinal probablement faible mais aux conséquences morphodynamiques notables. De fait, l'inefficacité du dispositif de drainage en terme de réponse morphodynamique à T + 4 ans ne peut permettre une analyse via des outils de modélisation qui apparaissent du coup inadaptés (impossibilité de reproduire en canal une dynamique sédimentaire longitudinale).

Ces résultats, indépendants de notre volonté et propres au fonctionnement du système étudié, rendent impossible une comparaison réaliste entre les données de terrain et les résultats issus d'une modélisation "cross-shore" qu'elle soit en canal à houle ou via une approche numérique.

De plus, il faut souligner que différents problèmes techniques ont affecté l'exploitation du système de drains sur le terrain. Pour mémoire, citons par exemple :

- l'arrachement d'un drain par les équipements de nettoyage de la plage de Villers-sur-Mer ;
- des pannes répétées des pompes et des problèmes de corrosion de ces dernières à l'origine de dysfonctionnements.

Ainsi, des interruptions du pompage ont eu lieu contribuant à limiter l'influence du système ; Ces périodes ne nous ont pas été communiquées par l'entreprise au même titre que certaines données de terrain, notamment concernant l'évolution granulométrique des sédiments. Il en est de même pour la gestion des pompes et notamment le temps de fonctionnement de ces dernières au cours du cycle de marée.

➤ les problèmes de similitudes.

Il y a là une réelle difficulté qui a été soulevée par les rapporteurs lors de l'évaluation du rapport intermédiaire. Il s'agit dans ce type de travail de définir les critères permettant de s'approcher au mieux des processus observés en nature tout en s'adaptant aux contraintes des expériences en laboratoire. L'échelle de réduction initialement choisie (1/20^{ème}) pour les processus hydrodynamiques n'a pas pu être appliquée aux sédiments. En effet, à cette échelle, les matériaux du modèle seraient devenus trop fins et leurs propriétés spécifiques auraient eu un impact très important sur les phénomènes d'infiltration des vagues au travers de la plage. Le choix, dans une première approche, a été fait de conserver des sédiments naturels de façon à favoriser une analogie de processus plus qu'une réelle similitude. En fait, les expériences réalisées doivent être considérées comme représentatives de l'échelle 1, avec donc l'impact de faibles agitations. A ce titre, malgré leur faible portée, il est toutefois possible de valoriser les résultats obtenus.

Le laboratoire M2C mène des recherches sur ce problème de similitudes des écoulements en milieux poreux (thèse de G. Carpentier, encadrement M.Bélorgey). Si des lois existent pour une approche statique, elles restent approximatives pour une vision dynamique telle que celle qui est observée dans la zone de swash. Les travaux projetés à l'avenir sur des thématiques proches (notamment les travaux en cours au laboratoire M2C sur l'absorption du jet de rive qui intègrent une étude ciblée sur les phénomènes irréguliers et aléatoires) devront donc tenter de s'affranchir de ces contraintes.

V. CONCLUSION

Ce programme, qui consistait à étudier l'intérêt du procédé de drainage de plage comme une alternative aux techniques conventionnelles de défense contre la mer, a permis de collecter un grand nombre d'informations.

L'approche scientifique a contribué à répondre au besoin d'information des gestionnaires et des utilisateurs du littoral quant à l'efficacité de cette technique sur le site de Villers-sur-Mer.

Les divers échanges entre les scientifiques, les gestionnaires et les différents experts privés ou publics ont également permis de valoriser ces connaissances dans un cadre opérationnel.

La part du budget allouée aux expériences de modélisation n'a pas permis d'atteindre les objectifs fixés initialement dans ce domaine. Toutefois, au regard des contraintes et des évolutions constatées en nature sur le site expérimental, il semble prématuré de poursuivre ces expérimentations plus avant. Les résultats des différents travaux réalisés en laboratoire ont néanmoins vocation à être réutilisés et valorisés dans le cadre de recherches en cours au sein du Laboratoire M2C.

Finalement, malgré les contraintes techniques évoquées précédemment, le programme a permis d'atteindre des objectifs importants et les résultats obtenus constituent un réel outil d'aide à la décision pour l'ensemble des utilisateurs du littoral.

VI. BIBLIOGRAPHIE

Cette bibliographie reprend à la fois les documents consultés dans l'optique des travaux de modélisation (qui n'ont pas été repris dans ce rapport) et, plus largement, sur la thématique du drainage de plage.

- ARCHETTI (R.), BROCCINI (M.), 2002** : An integral swash zone model with friction : an experimental and numerical investigation, *Coastal Engineering* 45, pp.85-110.
- AUZEL (M.) et BOUCART (J.), 1950** : Sur l'érosion de la plage de Deauville pendant le printemps de 1950. *Cah. Océanog. N°5*.
- AVOINE (J.), 1981** : L'Estuaire de la Seine : sédiments et dynamique sédimentaire. *Thèse de 3e cycle, Université de Caen, 236 p.*
- BAIRD (A.J.), MASON (T.E.), HORN (D.P.), 1997** : Monitoring and modelling groundwater behaviour in sandy beaches as a basis for improved models of swash zone sediment transport, *Coastal Dynamics* 97, pp.774-783.
- BALDOCK (T.E.), HUGHES (M.G.), DAY (K.), LOUYS (J.), 2005** : Swash overtopping and sediment overwash on a truncated beach, *Coastal Engineering* 2005, 13 p.
- BALDOCK (T.E.), HORN (D.P.), Li (L.), 2007** : Laboratory investigation of beach profile evolution with controlled beach groundwater elevation, Special from The Beach Drainage Workshop – Proposed paper.
- BCEOM, 1975** : Le littoral français, dommages côtiers, ouvrages de défense. *Ministère de l'Equipement, Service Central de l'Hydrologie et de l'Environnement.*
- BRIERE (C.), 1999** : Etude de l'évolution d'un profil de plage en modèle physique réduit sédimentologique, Etude de préféabilité d'un système gravitaire de drainage des plages, Rapport de stage pour le D.E.A. de génie civil, option génie côtier, université de Nantes, 35p.+annexes.
- BRUUN (P.), 1989** : The coastal drain: What can it do or not do? *Journal of Coastal research*, 5 (1), pp123-125.
- BUTT (T.), RUSSEL (P.), 2000** : Hydrodynamics and cross-shore sediment transport in the swash zone of natural beaches: a review. *Journal of coastal research*. 16 (2) pp255-268.
- CHAPEL (J.), ELIOT (I.G.), BRADSHAW (M.P.) AND LOWSDALE (E.), (1979)** : Experimental control of beach face dynamics by watertable pumping. *Engineering Geology*, 14 pp. 29-41.
- CHATEL (G.), 1952** : Rapport sur une visite des plages entre Trouville-sur-Mer et Arromanches. *Cah. Océanog., IV.*
- CIAVOLA (P.), VICINANZA (D.), CASTIGLIONE (E.), CALEFFI (S.), 2007** : Performance of a beach drainage system at Lido Adriano, Ravenna, Italy, Special from The Beach Drainage Workshop – Proposed paper.
- COUTON (J-M.), 2000** : Modélisation et comportement de plage dans la perspective du développement durable. Mémoire de DEA de l'Université de Nantes. 82 p.
- COUTON (J-M.), LEVOY (F.), 2004** : Impact du drainage de plage en zone macrotidale - L'exemple de Villers-sur-mer, résultats préliminaires, VIIIèmes journées Génie Civil – Génie Côtier, Compiègne 2004, Proceedings.
- COUTON (J-M.), LEVOY (F.), MONFORT (O.), 2007** : Experience on the macro-tidal beach of Villers-sur-Mer, France, Special from The Beach Drainage Workshop – Proposed paper.
- CURTIS (W.R.), DAVIS (J.E.), TURNER (I.L.), 1996** : Evaluation of a beach dewatering system, Nantucket USA, *Coastal Engineering* 1996, pp.2677-2690.
- CURTIS (W.R.), DAVIS (J.E.), 1998** : Construction Productivity Advancement Research (CPAR) Program demonstration of a multisegmented dewatering system for accreting beach sand in a high-wave-energy environment, technical report (U.S. Army Corps of Engineer waterways experiment station), 47p.

- DANISH GEOTECHNICAL INSTITUTE, 1992** : Beach Management System – Documentation, Job N°300 01414.
- DOUCHIN (C.), 2003** : Suivi et mise en place du procédé Ecoplage® à Villers-sur-Mer : installation et premières conclusions sur les impacts de cet équipement. *Mémoire de DESS "AGIRE", Université de Caen Basse-Normandie, 74 p. + annexes.*
- DUNCAN (J.R.), 1964** : The effect of water table and tide cycle on swash-backwash, sediment distribution, and beach profile development: *Marine geol.*, 2, pp186-197.
- DUPREZ-GASTON (M.), 1988** : Villers-sur-Mer et ses 9 casinos (photographies).
- ECOPLAGE, 1999** : Villers-sur-Mer, Système Ecoplage®, étude de préfaisabilité, rapport 1.
- ECOPLAGE, 2001** : Villers-sur-Mer, Plage Mermoz, Système Ecoplage®, étude de faisabilité.
- ELHAÏ (H.), 1963** : La Normandie occidentale entre la Seine et le golfe normand-breton, étude morphologique. *Thèse Université de Caen. Bière Imp., Bordeaux.*
- ELFRINK (B.), BALDOCK (T. E.), 2002** : Hydrodynamics and sediment transport in the swash zone: A review and perspectives. *Coastal Engineering*, 45, pp149-167.
- FATTAL (P.), PACAUD (S.), WALKER (P.), 2007** : Theory and practice of “soft” protection of loose littoral in a seaside resort : a case study in Les Sables d’Olonne, France, Special from The Beach Drainage Workshop – Proposed paper.
- FILY (G.), 1967** : Etude sédimentologique de l'estuaire de l'Orne et du littoral adjacent (de Langrune à Cabourg). *Thèse 3^{ème} cycle, Université de Caen. 128 p. + annexes.*
- GIRESSE (P.), 1968** : Turbidité des eaux de mer et dynamique des particules fines du Nord-Cotentin. *Cah. Océanogr. n° 7.*
- GIRESSE (P.), 1969** : Essai de sédimentologie comparée des milieux fluvio-marins du Gabon, de la Catalogne et du Sud-Cotentin. *Thèse, Université de Caen, 1 carte.*
- GRECO "Manche", 1986** : La Baie de Seine. Actes du colloque national du CNRS des 24, 25 et 26 avril 1985. *Université de Caen, 1 vol., 531 p.*
- GRESARC, 1996** : Etude de l'agitation et des mouvements sédimentaires dans l'embouchure de l'Orne en vue de l'amélioration des conditions d'accès au port de Caen-Ouistreham. *Rapport GRESARC pour la Chambre de Commerce et d'Industrie de Caen, 121p.*
- GRESARC, 1997** : Littoral de la région de Villers-sur-Mer. Synthèse bibliographique. *Université de Caen, 16 p. + annexes.*
- GRESARC, 1998** : Le procédé de défense contre la mer Ecoplage® - Proposition d'adaptation en régime macrotidal et recherche d'un site d'implantation en Baie de Seine, 42 p.
- GRESARC, 2000** : Synthèse des caractéristiques physiques des zones envisagées pour l'immersion des produits de dragage du port de Deauville, pp. 28-62, in : ERAMM, 2000 : Port de Deauville : recherche d'un site d'immersion pour les dragages du bassin des Yachts et du bassin Morny. *Dossier d'incidence loi sur l'eau - rapport définitif 20-631, 111 p.*
- GRESARC, 2001** : Mise en œuvre du système Ecoplage® sur la plage de Villers-sur-Mer - Etude d'impact, 106 p. + annexes
- GRESARC, 2003** : Installation du procédé Ecoplage® sur la plage de Villers-sur-Mer. Suivi scientifique et technique : phase préparatoire et implantation du procédé. *Ministère de l'Équipement, des Transports et du Logement / CETMEF / Université de Caen, 39 p. + annexes.*
- GRESARC, 2005** : Installation du procédé Ecoplage® sur la plage de Villers-sur-Mer. Suivi scientifique et technique – Evolution morphologique de la plage durant la première année de suivi. *Ministère de l'Équipement, des Transports et du Logement / CETMEF / Université de Caen, 56 p.*
- GRESARC, 2007** : Installation d'un procédé de drainage sur la plage Mermoz de Villers-sur-Mer : suivi scientifique et technique – Bilan après quatre années de fonctionnement. *CETMEF. 65 p. + annexes*
- HUGHES (S.A.), 2004** : Wave momentum flux parameter : a descriptor for nearshore waves, *Coastal Engineering* 51, pp.1067-1084.

- HUGHES (S.A.), 2004** : Estimation of wave run-up on smooth, impermeable slopes using the wave momentum flux parameter, *Coastal Engineering* 51, pp.1085-1104.
- HUGUES (M.), MASSELINK (G.), HANSLOW (D.), 1997** : Toward a better understanding of swash zone sediment transport, *Coastal dynamics* 97, pp.804-813.
- KATOH (K.), YANAGISHIMA (S.I.), FUKUTA (M.), 1994** : Stabilization of beach in integrated shore protection system, International conference on Hydro-technical Engineering for Portland Harbor Construction, Report of "Hydro-Port'94" October 94, Yokosuka, Japan, pp.1077-1096.
- KATOH (K.), YANAGISHIMA (S.I.), 1996** : Field experiment on the gravity drainage system on beach stabilisation, *Coastal Engineering* 1996, pp.2654-2665.
- KOBAYASHI (N.), COX (D.T.), WURJANTO (A.), 1990** : Permeability effects on irregular wave runup and reflection, *Journal of Coastal Research*, 7(1), pp. 127-136, Fort Lauderdale (Florida), ISSN 0749-0208.
- LAKHAN (V.C.), TRENHAILE (A.S.), 1989** : Applications in coastal modelling, Elsevier science publication company, 387 p.
- LAMBERT (A.), REY (V.), SAMAT (O.), SABATIER (F.), PROVANSAL (M.), 2007** : Impact of beach drainage on the beachface morphology of two French mediterranean sandy beaches at different time scales, Special from The Beach Drainage Workshop – Proposed paper.
- LARSONNEUR (C.), 1971** : Manche centrale et Baie de Seine : géologie du substratum et des dépôts meubles. *Thèse de 3^{ème} cycle, Université de Caen*, 394 p.
- L.C.H.F., 1986** : Catalogue sédimentologique des côtes françaises, Côtes de la Mer du Nord et de la Manche. Partie C : de la baie de Seine au Mont-Saint-Michel.. *Coll. Dir. Etudes et Recherches d'E.D.F. n°61. Eyrolles. pp. 233-404.*
- LENZ (G.R.)**, Beach face drainage, a tool for coastal stabilization, Rockaway, New Jersey, Coastal stabilization Inc., 26 p.
- LEVOY (F.) et LARSONNEUR (C.), 1992** : Notice d'impact en vue de travaux de protection contre la mer, Guide Méthodologique. *Centre Régional d'Etudes Côtières – DRAE – Université de Caen*, 72 p.
- LEVOY (F.) et LARSONNEUR (C.), 1995** : Etude des risques d'érosion et de submersion sur les côtes du Calvados. Synthèse bibliographique. *Conseil Général du Calvados / Université de Caen - Centre Régional d'Etudes Côtières – Laboratoire de Géologie Marine*, 81 p.
- LEVOY (F.), ANTHONY (E.J.), MONFORT (O.), LARSONNEUR (C.), 2000** : The morphodynamics of megatidal beaches in Normandy, France. *Marine Geology*, 171, pp39-59.
- LI (L.), BARRY (D.A.), PATTIARATCHI (C.B.), MASSELINK (G.), 2002** : BeachWin: modelling groundwater effects on swash sediment transport and beach profile changes. *Environmental Modelling and Software*, 17(3), pp313-320, ED 1376.
- MEYER (M.), LESPRIT (I.), 1998** : Validation en canal à houle d'aménagement de la plage des Lesques, Génie Civil, Génie Côtier, Session II : Dynamique sédimentaire, pp. 201-207.
- MIGNIOT (C.), 1989** : Moyens d'étude des phénomènes sédimentaires marins, estuariens et fluviaux, extrait de « Similitude », Rapport STCPMVN, LCHF, SOGREAH, pp. 38-55.
- Ministère de l'Aménagement de Territoire et de l'Environnement, 1997** : La défense des côtes contre l'érosion marine. Pour une approche globale et environnementale, 142 p.
- MULVANEY (H.), 1999** : Beach stabilisation through controlled drainage : full scale experiment at Branksome Chine, Dorset, Departement of Civil and Environmental Engineering, Master of Philosophy Thesis Faculty of engineering, 56 p. + annexes.
- NIELSEN (P.), 1997** : Coastal groundwater dynamics, *Coastal Dynamics* 97, pp. 546-555.
- OGDEN (M.R.), WEISMAN (R.N.), 1991** : Beach stabilization using drains an experimental model study, *Coastal sediments* 91.
- SATO (M.), 1990** : Underground water table and beach face erosion, *Coastal Engineering* 1990, pp. 2644-2657.
- SATO (M.), HATA (S.), FUKUSHIMA (M.), 1994** : An experimental study on beach transformation due to waves under the operation of coastal drain system, *Coastal Engineering* 1994, pp.2571-2582.

- SATO (M.), FUKUSHIMA (M.), NISHI (R.), 1996** : On the change of velocity field in nearshore zone due to coastal drain and consequent beach transformation, *Coastal Engineering* 1996, p.2666-2676.
- SHIH (R.W.K.), 1990** : Permeability characteristics of rubble material – New formulae, *Coastal Engineering* 1990, pp.1499-1512.
- S.M.A. INGENIERIE, 1998** : Mise en place du système Ecoplage® - Plage des Sables d'Olonne - Etude d'impact, 134 p.
- TURNER (I.), 1993** : Water table outcropping on macrotidal beaches : a simulation model, *Marine Geology*, vol. 115 n°3-4, pp.227-238.
- TURNER (I.), 1995** : Simulating the influence of groundwater seepage on sediment transported by the sweep of the swash zone across macro-tidal beaches, *Marine Geology*, vol.125 n°1-2, pp.153-174.
- TURNER (I.), LEATHERMAN (S.P.), 1997** : Beach dewatering system as a soft solution to coastal erosion – A history and critical review, *Journal of Coastal Research*, vol. 13 n°4 – 1997, pp.1050-1063.
- VESTERBY (H.), 1987** : “Method of Causing Sedimentation of Solid Material Transported in a body of water such as a lake, a sea, or an Ocean”. Letters of Patent.
- VESTERBY (H.), 1992** : Beach face dewatering – The European experience, Report of Danish Geotechnical Institute, Lyngby, Denmark, 16 p.
- VESTERBY (H.), 1995** : Beach face dewatering – The eco-friendly approach to coastal restoration, COPEDEC IV, September 1995, Rio de Janeiro.
- VESTERBY (H.), MANGOR (K.), REFSGAARD (A.), 1999** : The beach drainage concept, Development of an engineering design tool. COPEDEC V, april 1999, Cape Town, vol 2, pp.961-971.
- VESTERBY (H.), 2000** : Modelling groundwater flow in beach profiles for optimising stabilising measures, International Coastal Symposium 2000, Rotorua, New Zealand, 24-28 april 2000, 7 p.
- VICINANZA (D.), GUIDA (A.), FERRANTE (V.), CIAVOLA (P.), DI NATALE (M.), 2007** : Performance of a beach drainage system at Chiaiolella beach (Procida Island, Italy), Special from The Beach Drainage Workshop – Proposed paper.
- VOLMAT (J.), 1929** : Les érosions du littoral du Calvados et les atterrissements de l'estuaire de la Seine. *Cah. Rech. Hydro. sur la rég. des côtes*, n°22, Paris, 39 p.
- WADDEL (E.), 1976** : Swash - groundwater - beach profile interactions. *Soc. Econ. Paleontol. Mineral., Spec.Publ.*, n°24 pp115-125.
- WEISMAN (R.N.), SEIDEL (G.S.), 1994** : The effect of water manipulation on beach profiles, Report from the University of Bethlehem, 38 p.

LISTE DES ILLUSTRATIONS

<i>Figure 1 : schéma descriptif du procédé de drainage de plage</i>	3
<i>Figure 2 : principe de fonctionnement du système de drainage de plage</i>	4
<i>Figure 3 : photographie du site retenu (la plage Mermoz) pour l'implantation du procédé de drainage à Villers-sur-Mer (cliché : DIREN, 1998)</i>	8
<i>Figure 4 : vue en plan du système de drains installé à Villers-sur-Mer et extension de la zone de suivi topographique (source : J.M. COUTON)</i>	9
<i>Figure 5 : vue en coupe des installations du dispositif de drainage de plage et profils moyens des sections ouest, est et centrale (source : J.M. COUTON)</i>	9
<i>Figure 6 : photographie oblique de la zone d'étude avant l'implantation des drains (DIREN, 1998)</i>	10
<i>Figure 7 : photographie de la plage de Villers-sur-Mer réalisée lors d'un vol du drone, un an après l'implantation du procédé de drainage (M2C, juin 2004)</i>	10
<i>Figure 8 : répartition des vents à Luc-sur-Mer et Bernières-sur-Mer entre le 12 novembre 1998 et le 9 octobre 2002 (source : Météofrance)</i>	12
<i>Figure 9 : répartition des vents à Bernières-sur-Mer entre le 15 mai 2003 et le 31 décembre 2006</i>	12
<i>Figure 10 : rose des houles à Villers-sur-Mer entre le 15 mai 2003 et le 10 mai 2006</i>	13
<i>Figure 11 : localisation des différents profils suivis en topographie ainsi que des zones d'emprises des calculs de volumes</i>	15
<i>Figure 12 : évolution de la plage de Villers-sur-Mer entre le 15 mai 2003 et le 16 avril 2007</i>	18
<i>Figure 13 : variation du volume sédimentaire dans les zones d'emprise des épis durant les quatre années de fonctionnement du procédé de drainage</i>	19

Impact du drainage de plage en zone macrotidale L'exemple de Villers-sur-mer, résultats préliminaires

Jean-Michel COUTON₁ et Franck LEVOY₂

₁ Doctorant

*« Morphodynamique Continentale et Côtière », Université de Caen,
02.31.36.22.36, jmcouton@geos.unicaen.fr*

₂ Maître de Conférences – HDR, UMR 6143

*« Morphodynamique Continentale et Côtière », Université de Caen,
02.31.36.22.23, levoy@geos.unicaen.fr*

Résumé

Afin de déterminer les impacts morpho-sédimentaires d'un dispositif de drainage de plage expérimentale, une instrumentation a été déployée sur la plage de Villers-sur-mer (Calvados) depuis mai 2003. Celle-ci permet d'enregistrer en continue les facteurs dynamiques : houles, courants, marée, vent, nappe phréatique et de suivre l'évolution morphologique au moyen de levés DGPS et photographiques. Après 9 mois de fonctionnement, au cours de périodes d'agitation modérée à forte, la tendance à l'accrétion de la zone traitée est supérieure à celle des zones adjacentes.

Abstract

To determine the impacts of a dewatering system, a specific instrumentation has been deployed on the Villers-sur-mer's beach (French Channel Coast) since May 2003. Records of waves, currents, tide, wind, underground water oscillations have been obtained, and surveys with shore profiles by using DGPS and photographs to quantify beach changes. After 9 month running, during moderate and strong wave climates, the moderate accretion on the treated section is greater than on the others sections non treated.

1- Introduction

Le drainage de plage est une technique récemment utilisée pour stopper l'érosion des plages de sable. Son principe est de rabattre la nappe à l'intérieur de la plage au moyen d'un drain pour favoriser les processus d'infiltration dans la zone du swash, et ainsi renforcer l'accrétion. Cette technique appliquée sur plus de 30 sites dans le monde, (10% sont localisés dans des environnements macrotidaux) montre des résultats différents. La commune de Villers-sur-mer (Calvados) a souhaité s'équiper de ce système pour préserver sa plage contre une érosion lente mais continue. Pour tenir compte de l'environnement macrotidale du site villersois, une installation expérimentale à double drain a été mise en place au premier semestre 2003. Cette expérimentation fait l'objet d'un suivi afin de déterminer

scientifiquement les impacts morpho-sédimentaires du drainage de plage en zone macrotidale.

Cet article décrit le site d'étude, et rappelle les processus hydro-sédimentaires du drainage de plage. L'installation expérimentale de Villers-sur-mer, et la méthodologie déployée pour le suivi sont ensuite exposées. Enfin, après neuf mois de fonctionnement, la comparaison des évolutions entre la zone traitée et celles adjacentes non équipées du dispositif de drainage est présentée.

2. Présentation du site d'étude.

Située en partie orientale de la baie de Seine, la plage Mermoz orientée Nord-Nord-Est Sud-Sud-Ouest ($\sim 25^\circ$), connaît un abaissement continu des profils de plage malgré une batterie d'épis en maçonnerie longs de 130 à 170 mètres. La zone de plage suivie comporte 3 sections séparées par des épis, une section Ouest longue de 190 mètres, une section centrale équipée du drainage de plage, longue de 323 mètres et une section Est longue de 360 mètres (figure 1). Les sections Ouest et centrale se composent d'un haut estran large de 50 à 70 mètres dont la pente varie de 7 à 10%, tandis que la section Est est à un haut estran large de 120 à 140 mètres dont la pente est d'environ 4% (figure 3). Les moyens et bas estrans sont marqués par la présence de 2 à 3 séries de barres et de bâches dont la pente n'excède pas 4% (figure 3). Une rupture de pente est présente entre les hauts et moyens estrans, matérialisée par un cordon de galets et de sables grossiers, ainsi que par la résurgence de la nappe phréatique. Son écoulement inonde le fond des bâches, entaille les barres et forme le long des épis de larges chenaux. Les sédiments de la haute plage sont moyens et hétérogènes avec des graviers, des galets et des débris coquilliers. Ils sont fins et relativement bien classés en bas de plage. Le marnage, de 7,05 mètres par coefficient 95, classe la plage Mermoz parmi les environnements macrotidaux. Le cycle de la marée est dissymétrique avec un flot inférieur à 3 heures et un jusant supérieur à 7 heures. La durée de l'étale de pleine mer est supérieure à 2 heures et l'étale de basse mer est absente. Les courants de flots s'orientent à l'Est-Nord-Est alors que ceux du jusant se dirigent vers l'Ouest-Sud-Ouest. Leurs vitesses restent inférieures à 0,8m/s. Le littoral est exposé à toutes les houles de secteur nord avec une prédominance pour les houles de N-NW (plus de 70%). La hauteur significative annuelle est inférieure à 1 mètre, même si des houles de 3 mètres sont observées. Les périodes enregistrées ne sont qu'exceptionnellement supérieures à 7 secondes.

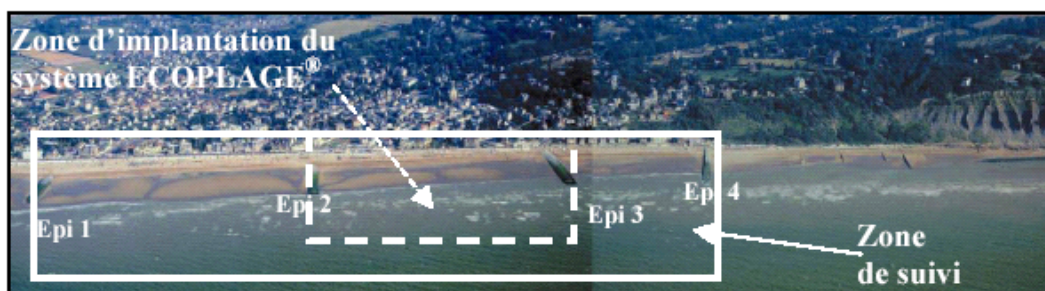


Figure 1 : Vue aérienne de la zone d'étude et de la zone traitée.

3. Présentation du drainage de plage et des processus impliqués.

Le procédé de drainage de plage développé par l'Institut Géotechnique Danois au début des années 1980 (Vesterby, 1987) se base sur le renforcement de l'infiltration de la lame de swash dans une plage dessaturée. Ainsi, l'accrétion se voit renforcée au dépend de l'érosion (Duncan, 1964, Waddell, 1976, Turner, 1993). Concrètement, un drain gravitaire installé parallèlement au trait de côte, crée un cône de dépression qui rabat la nappe plus profondément sous la plage. L'eau présente dans le drain s'écoule par gravité vers un puits de pompage via un collecteur. Lorsque le niveau est suffisamment haut, des pompes se déclenchent pour évacuer l'eau. Celle-ci, filtrée par le sable peut servir à des activités de thalassothérapie (Chigazaki, Japon), ré-oxygéner l'eau de lagune (Thornsminde, Danemark), servir à des activités aquacoles (Hirtshals, Danemark) ou être rejetée en mer, si aucune utilisation n'est nécessaire (Les Sables d'Olonne, France).

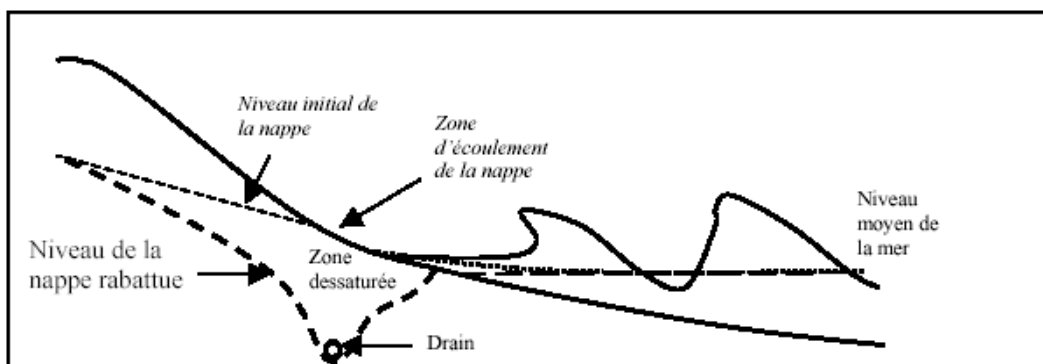


Figure 2 : Schéma de principe d'une nappe rabattue par drainage de plage, vue en coupe (d'après Vesterby, 1987)

Si ce procédé de drainage de plage, est installé sur plus de 30 sites dans le monde, seuls 3 sont situés dans des environnements macrotidaux : Newquay-Towan Bay, 1994 (Royaume-Uni), Les Sables d'Olonne (France), 1999 et 2002, Villers-sur-mer, 2003 (France).

4. L'installation expérimentale de Villers-sur-mer.

Les particularités morphologiques et marégraphiques de la plage Mermoz imposaient une installation différente de celles mises en place précédemment. Un double système de drains est installé sur la section centrale, l'un sur la haute plage (à environ 40 mètres devant la digue promenade à la cote IGN69 0,60 m), l'autre sur la moyenne plage (à environ 70 mètres devant la digue promenade à la cote IGN69 -0,40 m). Chacun des drains, longs de 300 mètres, est relié à la station de pompage par son propre collecteur afin qu'il soit indépendant l'un de l'autre et puisse être régulé suivant la hauteur de la marée (figure 3 et 4). Le puits de pompage situé juste devant la digue promenade à une section de 4m² et une profondeur de 7 mètres. Deux pompes immergées de 300m³/h refoulent les eaux collectées depuis le puits de pompage vers un émissaire de rejet des eaux

pluviales distant de 850 mètres. Les travaux sur la plage ont eu lieu de janvier à mars 2003 et la mise en route en automatique a été effectuée le 7 mai 2003.

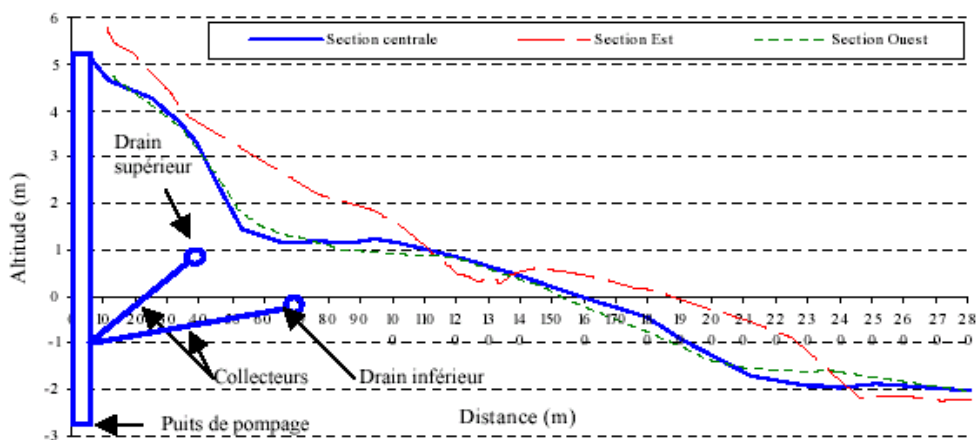


Figure 3 : Profils moyens des sections Ouest, Est et centrale ainsi qu'une vue en coupe des installations du système de drainage.

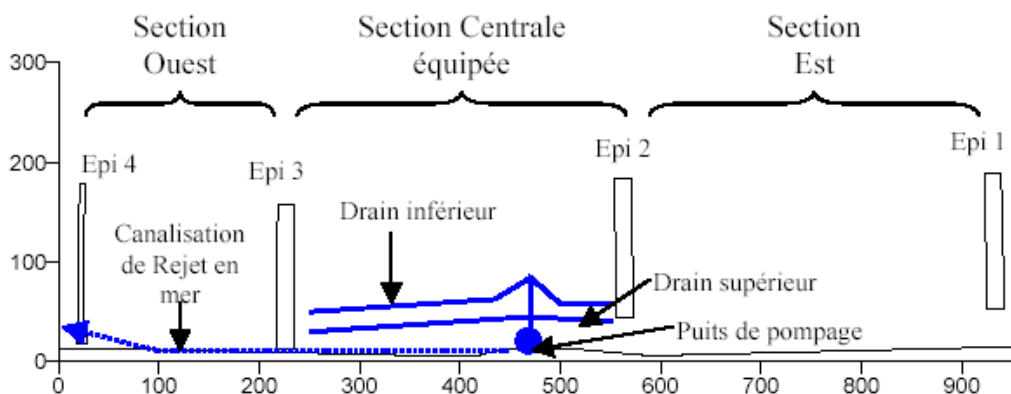


Figure 4: Vue en plan de l'installation du système ECOPLAGE® de Villers-sur-mer.

5. Méthodes et moyens déployés pour le suivi.

Pour déterminer scientifiquement les impacts provoqués par le drainage de plage, un enregistrement des facteurs dynamiques est réalisé en parallèle d'un suivi de l'évolution morpho-sédimentaire du site.

5.1. L'enregistrement en continu des facteurs dynamiques

Un anémomètre à coupoles, une girouette et un capteur de pression, installés sur le poste de secours de la plage Mermoz enregistrent en continu les variations barométriques et les conditions de vent. Le niveau du plan d'eau est enregistré par un marégraphe de type Mors avec une valeur moyenne toutes les 15 minutes. Les conditions hydrodynamiques, houles directionnelles, courants orbitaux et courants moyens, sont enregistrés à partir d'un capteur de pression couplé à un

courantomètre électromagnétique de type S4DW (InterOcéan). La fréquence d'enregistrement est de 2hz avec une acquisition par burst de 18 minutes toutes les 60 minutes.

Deux piézomètres automatiques reliés à un enregistreur, relèvent toutes les 20 secondes les variations de la nappe le long d'un profil de plage sur la section traitée.

5.2. L'évolution morpho-sédimentaire

La topographie de l'ensemble de la zone étudiée est relevée mensuellement lors des marées de vives-eaux, au moyen d'un DGPS à différence de phases (DGPS TRIMBLE 4400 et 4700). Ces relevés d'environ 5000 points permettent de produire des Modèles Numériques de Terrains comparables entre eux. Neuf profils de plage (3 profils dans chacune des sections comprises entre les épis) sont également relevés, soit au tachéomètre, soit au DGPS, en mode « Stop&Go ». Aux relevés mensuels viennent s'ajouter des relevés de « suivis de tempête » sur plusieurs jours consécutifs. Ces relevés journaliers permettent de relativiser les évolutions mensuelles.

Chaque mois, lors des relevés, 30 échantillons de sédiments sont prélevés sur le haut, moyen et bas estran de l'ensemble de la zone d'étude le long de 10 profils. Leur analyse granulométrique permet de suivre les éventuelles modifications de faciès.

5.3 Le suivi photographique

Un suivi photographique est assuré par une webcam recomposant un panorama de la zone d'étude à chaque marée basse diurne. Des photographies aériennes au moyen d'un drone et des photographies ponctuelles pour illustrer des phases bien précises de l'évolution morpho-sédimentaire sont également réalisées.

6. Résultats comparés des mesures.

Après 9 mois de fonctionnement en automatique du système de drainage de plage, deux types de résultats apparaissent. Les premiers, visuels, concernent des modifications morphologiques et hydrologiques notables sur la zone traitée. Les seconds, d'ordre numérique, précisent l'impact du drainage sur la dynamique sédimentaire du site.

6.1. Les résultats visuels des modifications morphologiques et hydrologiques.

Tout d'abord, la nappe rabattue par le système de drainage de plage provoque un assèchement relatif visible sur la haute et moyenne plage ainsi que dans les chenaux d'écoulement qui entaillent la première barre. L'assèchement du moyen estran révèle une zone de plage dessaturée qui s'étend désormais vers la basse plage. Sur les zones adjacentes, la résurgence de la nappe se situe toujours entre

30 et 70 mètres devant la digue promenade et continue de créer sur le moyen et bas estran une zone de plage saturée.

Ensuite, Les mécanismes de déstabilisation et de recul de la haute plage semblent minimisés par la réduction des suintements à sa base.

Enfin, l'absence d'écoulement superficiel de la nappe dans les bâches et chenaux diminue l'énergie potentielle d'entraînement et de transport des sédiments lors du jusant.

6.2. Les résultats numériques de l'impact du drainage sur la dynamique sédimentaire.

Les Modèles Numériques de Terrain sont traités avec le logiciel Surfer. Les sections de plage (Ouest, centrale et Est) sont extraites pour constituer des espaces délimités par les épis et par deux lignes virtuelles situées l'une, en haut de plage à 25 mètres de la digue promenade, l'autre en bas de plage à 265 mètres (Le nettoyage mécanique quasi-quotidien de la haute plage impose la limite haute, celle du bas est définie par la surface commune à tous les MNT). Les volumes sont ensuite calculés par la méthode des trapèzes, et leur évolution rapportée à la surface. L'ensemble des relevés est comparé à celui du 15/05/2004, date du premier relevé après la mise en route du système de drainage (Figure 6). La somme des incertitudes liées aux mesures a été évaluée à 5 cm.

Deux périodes se différencient : une première période de mai à fin août 2003 et une seconde de septembre 2003 à janvier 2004.

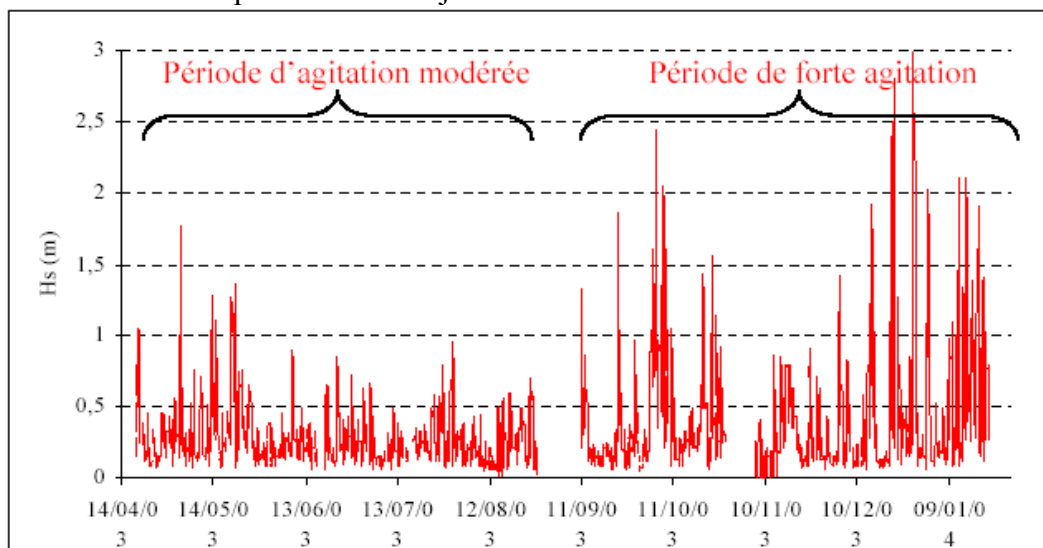


Figure 5 : Houles enregistrées entre le 18/04/2003 et le 21/01/2004 au moyen d'un capteur S4DW

La première période, de mai à août 2003, est marquée par une agitation modérée (H_s moy = 0,29 mètre) et de très rares houles supérieures à 1,0 mètre (Figure 5). Les sections Ouest et Est évoluent de façon identique alternant érosion et accrétion donnant une élévation moyenne pour la zone Ouest de 0,02 mètre et de 0,01 mètre pour la zone Est (Figure 6). La zone traitée a enregistré des phases d'érosion et d'accumulation différentes et dans de moindres proportions. L'élévation sur cette période est de 0,03 mètre.

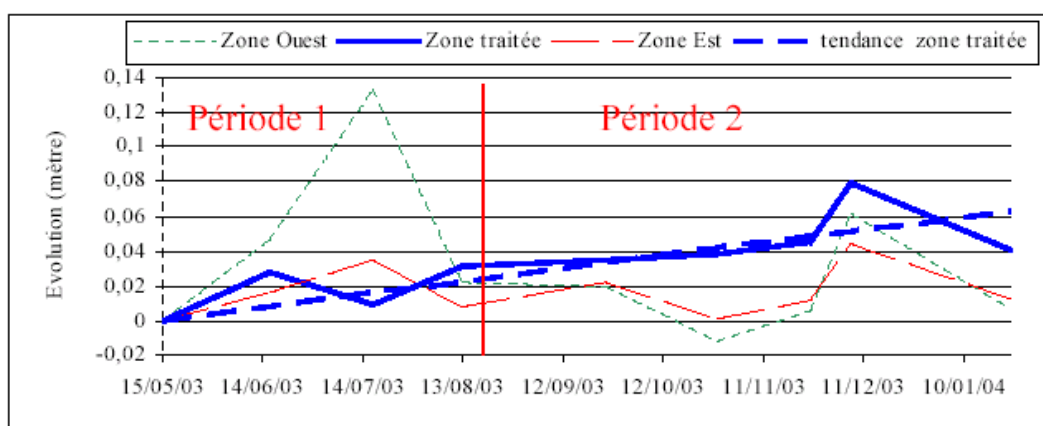


Figure 6 : Evolution des sections suivies : Ouest, centrale et Est, selon les Modèles Numériques de Terrains relevés entre le 23/01/2003 et le 24/01/2004, comparés au relevé du 15/05/2003, ainsi que la tendance de la zone traitée.

La seconde période, de septembre 2003 à janvier 2004, est marquée par une agitation plus forte (H_s moy = 0,46 mètre) avec de nombreuses houles supérieures à 1,0 mètre, atteignant parfois 3,0 mètres (Figure 5). La période allant du 14/12/2003 au 21/01/2004 connaît un surcroît d'énergie développée par des houles ayant une hauteur significative moyenne de 0,60 mètre. Les sections Ouest et Est sont soumises alternativement à des phases d'érosion et d'accrétion approximativement identiques avec néanmoins, pour la section Ouest, des fluctuations plus importantes. L'évolution pour l'Ouest est une diminution de l'accrétion de 0,015 mètre alors qu'une accrétion de 0,004 mètre est enregistrée pour l'Est. La zone traitée connaît, de septembre 2003 à décembre 2003, une phase d'accrétion croissante, puis une phase d'érosion de décembre 2003 à janvier 2004. La résultante pour cette seconde période est une accrétion de 0,01 m. Entre mai 2003 et janvier 2004, la zone traitée a donc connue une élévation moyenne de 0,04 mètre, tandis que les zones Ouest et Est ont une résultante moyenne sur les deux zones de 0,01 mètre. Pour la zone traitée la moyenne quadratique des écarts à la tendance est de 14×10^{-3} mètre, tandis que pour les sections Ouest et Est elles sont respectivement de 48×10^{-3} mètre et 15×10^{-3} mètre. Une tendance semble se dessiner par ailleurs sur la section traitée avec une accrétion moyenne de 0,8 cm/mois. Sur les autres sections, l'évolution altimétrique moyenne de la plage montre une alternance de phases d'érosion et d'accrétion ne permettant pas de mettre en évidence une réelle tendance évolutive.

6. Conclusion

L'objectif de cette étude est d'évaluer les impacts morfo-sédimentaires du système de drainage sur la section centrale de la plage de Villers-sur-mer située en environnement macrotidale. Le rabattement de la nappe phréatique provoque l'assèchement de la haute et moyenne plage, des modifications morphologiques positives sur la stabilisation du profil de haute plage et une probable réduction du transport sédimentaire vers le large par les écoulements dans les chenaux.

L'analyse des MNT depuis la mise en service du dispositif de drainage permet d'évaluer les variations de volumes de chacune des sections de plage suivies avec et sans drain. Bien qu'elles soient inférieures à la marge d'erreur la sédimentation dans la section où se situe le drain est de 4 cm alors qu'elle n'est que de 1 cm sur les sections Ouest et Est. Par ailleurs, seule la section centrale a une tendance à l'accrétion qui semble bien établie. Ces tendances devront être confirmées sur une période plus longue, et complétées par une analyse plus fine des variations morpho-sédimentaires le long des profils de plage dans chaque section étudiée.

7. Références

- Baird, A.J. Horn, D.P. (1996) - Monitoring and modelling groundwater behaviour in sandy beaches. *Journal of Coastal Research* 12(3), pp 630-640.
- Bruun, P. (1989) - The coastal drain: What can it do or not do? *Journal of Coastal Research*, 5 (1), pp123-125.
- Butt, T. Russel, P. (2000) - Hydrodynamics and cross-shore sediment transport in the swash zone of natural beaches: a review. *Journal of coastal research*. 16 (2) pp255-268.
- Curtis, W.R. Davis J.E. (1998) Field Evaluation/Demonstration of a Multisegmented Dewatering System for Accreting Beach Sand in a High-Wave-Energy environment. Construction Productivity advancement research (CPAR) program. Report from US Army Corps of Engineers Waterways Experiment Station.
- Duncan, J.R. (1964) - The effect of water table and tide cycle on swash-backwash, sediment distribution, and beach profile development: *Marine geol.*, 2, pp186-197.
- Elfrink, B. Baldock, T. E. (2002) - Hydrodynamics and sediment transport in the swash zone: A review and perspectives. *Coastal Engineering*, 45, pp149-167.
- Levoy, F., Anthony, E.J., Monfort, O., and Larssonneur, C. (2000) – The morphodynamics of megatidal beaches in Normandy, France. *Marine Geology*, 171, pp39-59.
- Li, L., Barry, D.A., Pattiaratchi, C.B. Masselink, G. (2002) - BeachWin: modelling groundwater effects on swash sediment transport and beach profile changes. *Environmental Modelling and Software*, 17(3), pp313-320, ED 1376.
- Nielsen P. (1997) - Coastal groundwater dynamics. *Coastal dynamics*. pp546-555.
- Turner I. (1993) - Water table outcropping on macrotidal beaches: A simulation model. *Marine Geology*, 115, pp227-238
- Turner, I. Leatherman S.P. (1997) - Beach dewatering as a soft engineering solution to coastal erosion - a history and critical review, *Journal of Coastal Research* 13 (4), pp1050-1063.
- Vesterby, H. (1987) - "Method of Causing Sedimentation of Solid Material Transported in a body of water such as a lake, a sea, or an Ocean". Letters of Patent.
- Waddel, E. (1976) - Swash - groundwater - beach profile interactions. *Soc. Econ. Paleontol. Mineral., Spec.Publ.*, n°24 pp115-125.