

# Méthodes souples

Retour d'expériences pour le littoral

**RAPPORT D'ETUDE**

Juin 2023

Photo : Lège-Cap-Ferret, Cerema

Le Cerema est un établissement public sous la tutelle du ministère de la Transition écologique, présent partout en métropole et dans les Outre-mer grâce à ses 26 implantations et ses 2 400 agents. Détenteur d'une expertise nationale mutualisée, le Cerema accompagne l'État et les collectivités territoriales pour la transition écologique, l'adaptation au changement climatique et la cohésion des territoires par l'élaboration coopérative, le déploiement et l'évaluation de politiques publiques d'aménagement et de transport.

Doté d'un fort potentiel d'innovation et de recherche incarné notamment par son institut Carnot Clim'adapt, le Cerema agit dans 6 domaines d'activités : Expertise & ingénierie territoriale, Bâtiment, Mobilités, Infrastructures de transport, Environnement & Risques, Mer & Littoral.

Site web : [www.cerema.fr](http://www.cerema.fr)

# Méthodes souples

## Retour d'expériences pour le littoral

Commanditaire : MTECT/DGALN/DEB

Auteur : **Bertrand MICHARD**

Responsable du rapport

<b>Boris LECLERC</b> – Département risques, eaux et littoral
Tél. : +33(0) 2 98 05 67 50
Courrier : <b>drel.dtecrem.cerema@cerema.fr</b>
Direction technique risques, eaux et mer, 155 rue Pierre Bouguer 29280 PLOUZANE

Historique des versions du document

Version	Date	Commentaire

### Références

N° d'affaire : C14FI00154

Partenaires : NA

Devis n° : NA

Nom	Service	Rôle	Date	Visa
Bertrand MICHARD	REL/PREL	<b>Auteur principal</b>		
Tom BIRIEN		Contributeur		
Claudine GUYADER		Contributeur		
Laure ZAKREWSKI		Contributeur		
Boris LECLERC	REL	Relecteur		

## Résumé de l'étude

La loi climat et résilience en 2021 vient de conforter la démarche initiée en 2009 qui a conduit à doter la France d'une stratégie nationale pour l'État et les collectivités territoriales et d'une méthodologie de gestion du trait de côte afin d'appréhender de manière différente l'aménagement du littoral. Suite à la demande de la direction de l'eau et de la biodiversité (DEB) du ministère de la transition écologique (MTE), le Cerema a travaillé à l'élaboration et à la rédaction d'un rapport de REX (Retours d'EXpérience) des méthodes souples de protection du littoral. Plusieurs méthodes expérimentées en France métropolitaine, comme le rechargement de plage, la gestion souple des dunes, le drainage de plage, le rétablissement du transit littoral et d'autres procédés au stade plus expérimental sont étudiées. Les REX ont été établis à partir de l'étude du contexte, de la mise en œuvre, de l'efficacité du procédé et de l'évolution de chaque site. Des services déconcentrés du littoral, des organismes partenaires et des collectivités territoriales ont été associés à ce projet sous la forme d'enquêtes et d'entretiens pour recueillir les informations sur les différents sites. Ce rapport d'étude s'adresse à tous les acteurs de la gestion du trait de côte : élus, décideurs, aménageurs, ingénieurs et techniciens des services déconcentrés du littoral et des collectivités territoriales.

### 5 à 10 mots clés à retenir de l'étude

Érosion	Solutions fondées sur la nature
Recul du trait de côte	Loi climat
Gestion du littoral	
Méthodes souples	

### Statut de communication de l'étude

Les études réalisées par le Cerema sur sa subvention pour charge de service public sont par défaut indexées et accessibles sur le portail documentaire du Cerema. Toutefois, certaines études à caractère spécifique peuvent être en accès restreint ou confidentiel. Il est demandé de préciser ci-dessous le statut de communication de l'étude.

- Accès libre : document accessible au public sur internet
- Accès restreint : document accessible uniquement aux agents du Cerema
- Accès confidentiel : document non accessible

Cette étude est capitalisée sur la plateforme documentaire [CeremaDoc](https://doc.cerema.fr/depot-rapport.aspx), via le dépôt de document : <https://doc.cerema.fr/depot-rapport.aspx>

## Contexte et objet de l'étude

Ce rapport d'étude a été réalisé à l'initiative du ministère de la transition écologique et de la cohésion des territoires (MTECT), direction générale de l'aménagement, du logement et de la nature (DGALN), direction de l'eau et de la biodiversité (DEB) avec le concours de services déconcentrés de l'État (DDTM, DREAL), d'organismes partenaires, bureaux d'études et de collectivités territoriales. Ce rapport vise à fournir un état des lieux de solutions de gestion souples du littoral. Il s'agit d'un travail à poursuivre sur la base de retour d'expériences à capitaliser dans le temps et à développer sur tout le territoire.

Il est fréquent d'opposer méthodes dures et méthodes douces, lesquelles sont souvent associées aux solutions fondées sur la nature. Les méthodes exposées ici sont à la croisée de ces chemins et proposent des solutions de gestion réversibles pouvant être utilisées dans des approches « sans regret ».

## REMERCIEMENTS

Suite aux sollicitations des services du littoral, d'organismes partenaires et de collectivités territoriales, sous la forme d'enquêtes et d'entretiens, les rédacteurs et relecteurs tiennent à remercier les personnes suivantes qui ont contribué au recueil d'informations sur les différents sites. Leurs affectations sont indiquées à la date des échanges.

### **Directions départementales des territoires et de la mer (DDTM)**

David SZAREK (DDTM 59)

Stéphane BRIMEUX (DDTM 62)

Jean-Claude LADON (DDTM 80)

Guy RENAUDIER (DDTM 76)

Philippe LE ROLLAND (DDTM 14)

Aurore FAUCHAS, Ronan FLEURY, Pierre-Marie HERBAUX et François MEUNIER (DDTM 50)

Michel DOURFER et Didier FROUX (DDTM 22)

Jacques GUILLOU et Jean-Pierre TERRASSON (DDTM 29)

Xavier BLANQUER, Marie-Odile BOTTI-LE-FORMAL et Jérôme MAJOR (DDTM 56)

Cécile TOUGERON (DDTM 44)

Pierre FAGUET et Yves GAUTIER (DDTM 85)

Jean-Charles PRIEUR et Anthony VELO (DDTM 17)

Johann SCHLOSSER (DDTM 66)

Laïla BELMELIANI et Serge PAGES (DDTM 34)

Serge GARCIA (DDTM 30)

Samuel DIJOUX et Eric THETIOT (DDTM 83)

Agnès MOLINES et Philippe VALLOUIS (DDTM 06)

### **Directions régionales de l'environnement, de l'aménagement et du logement (DREAL)**

Étienne SIMON (DREAL Pays de la Loire)

André GESTA (DREAL Aquitaine)

Gilles CLERCQ-ROQUES et Laurent MONTEL (DREAL Occitanie)

Frédéric VILLERS (DREAL Provence-Alpes-Côte d'Azur)

### **Communauté de communes**

Charlotte LE MAGUER (Lorient Agglomération)

### **Organismes partenaires, bureaux d'études et Cerema**

Nicolas FORAIN (Grand Port Maritime de Dunkerque)

Adrien CARTIER (Bureau d'études Géodunes)

Arnaud GUEGUEN (GIP Littoral Aquitain)

Cyril MALLET (BRGM)

Hugues HEURTEFEUX (EID Méditerranée)

Pierre GAUFRES et Nicolas HUYBRECHTS (Cerema)

*Par la publication de ce document, le Cerema tient également à rendre hommage à son auteur, Bertrand Michard, disparu le 21 janvier 2023 à l'âge de 53 ans.*

*Bertrand travaillait au Cerema à Plouzané depuis près de 20 ans.*

*Il était ingénieur divisionnaire des travaux publics de l'État et avait reçu la qualification d'expert en hydraulique et sédimentologie maritime du Ministère chargé de l'écologie.*

*Son travail de plus de 20 ans a été essentiel pour l'expertise du Cerema en matière de gestion du littoral. Cette publication est le fruit de nombreux échanges, en contact étroit avec la communauté des gestionnaires du littoral. Elle illustre le souci d'objectiver les observations et de fournir au plus grand nombre les clés d'une adaptation plus raisonnée des littoraux au changement climatique.*

*Véritable fil directeur de sa vie et de sa carrière, les deux étant étroitement mêlés, il avait précédemment grandement œuvré à la publication d'un livre qui fait toujours référence au niveau national sur un sujet d'actualité : « La gestion du trait de côte ». Il en avait établi le plan détaillé puis coordonné la rédaction de différents chapitres dont le chapitre 3 consacré à la mise en œuvre des stratégies pour le littoral. Ce sujet qu'il affectionnait tant était également la base du cours mis en place depuis 2015 à l'Université de Bretagne Occidentale.*

*Toujours intéressé par les sciences, il a ainsi durant sa carrière contribué à plusieurs articles scientifiques référencés au niveau international.*

*Avec sa disparition, nous perdons donc un grand ingénieur, nous perdons un collègue, et surtout un ami, Bertrand laissera un grand vide à toutes celles et ceux qui ont eu l'occasion de travailler avec lui.*

# Sommaire

Remerciements .....	6
<b>1 Présentation générale .....</b>	<b>12</b>
<b>1.1 Érosion côtière et stratégie de gestion intégrée .....</b>	<b>12</b>
1.1.1 L'importance de l'érosion côtière .....	12
1.1.2 La stratégie nationale de gestion intégrée du trait de côte .....	12
<b>1.2 Vers une approche systémique et environnementale.....</b>	<b>13</b>
1.2.1 Le littoral, un géosystème dynamique .....	13
1.2.2 Les méthodes de protection du littoral .....	13
<b>1.3 « Construire avec la nature » .....</b>	<b>14</b>
1.3.1 Adopter des « Solutions fondées sur la Nature » .....	15
<b>1.4 Les méthodes souples de protection du littoral.....</b>	<b>16</b>
1.4.1 REX (Retours d'EXpérience) des méthodes souples .....	16
1.4.2 Localisation des REX des sites .....	17
1.4.3 Coûts des méthodes souples .....	18
1.4.4 Fonctions et applications des méthodes souples.....	18
<b>2 Le rechargement de plage .....</b>	<b>23</b>
<b>2.1 Présentation de la méthode .....</b>	<b>23</b>
2.1.1 Objectif et définition .....	23
2.1.2 Principes et conception .....	23
2.1.3 Mise en œuvre .....	25
2.1.4 Inventaire des rechargements de plage en France .....	25
2.1.5 Présentation de REX des sites suivants : .....	28
<b>2.2 Recommandations .....</b>	<b>53</b>
2.2.1 Conditions d'efficacité et limites.....	53
2.2.2 Ressources en sédiments disponibles.....	56
2.2.3 Pour aller plus loin.....	57
<b>3 La gestion souple des dunes .....</b>	<b>58</b>
<b>3.1 Présentation de la méthode .....</b>	<b>58</b>
3.1.1 Objectif et définition .....	58
3.1.2 Principe .....	59
3.1.3 Techniques.....	60
<b>3.2 REX de sites .....</b>	<b>61</b>
3.2.1 Présentation de REX des sites suivants : .....	61
<b>3.3 Recommandations .....</b>	<b>79</b>
3.3.1 Conditions d'efficacité et limites.....	79
3.3.2 Méthodes combinées .....	82

3.3.3	Pour aller plus loin .....	83
<b>4</b>	<b>Le système de drainage de plage .....</b>	<b>84</b>
<b>4.1</b>	<b>Présentation de la méthode .....</b>	<b>84</b>
4.1.1	Objectif et définition .....	84
4.1.2	Principe .....	84
4.1.3	Inventaire des systèmes de drainage de plage en France .....	85
<b>4.2</b>	<b>REX de sites .....</b>	<b>85</b>
4.2.1	Présentation des REX de sites .....	85
<b>4.3</b>	<b>Recommandations .....</b>	<b>100</b>
4.3.1	Conditions d'efficacité et limites .....	100
<b>5</b>	<b>Le rétablissement du transit littoral .....</b>	<b>102</b>
<b>5.1</b>	<b>Présentation de la méthode .....</b>	<b>102</b>
5.1.1	Objectif et définition .....	102
5.1.2	Principe .....	102
5.1.3	Mise en œuvre .....	103
<b>5.2</b>	<b>REX d'un site .....</b>	<b>105</b>
<b>5.3</b>	<b>Recommandations .....</b>	<b>108</b>
5.3.1	Conditions d'efficacité et limites .....	108
5.3.2	Pour aller plus loin .....	108
<b>6</b>	<b>Les autres procédés .....</b>	<b>109</b>
<b>6.1</b>	<b>L'atténuateur de houle en géotextile .....</b>	<b>109</b>
6.1.1	Objectif .....	109
6.1.2	Principe, conditions d'efficacité et limites .....	109
<b>6.2</b>	<b>Les pieux hydrauliques .....</b>	<b>115</b>
<b>6.3</b>	<b>L'atténuateur de courant .....</b>	<b>119</b>
6.3.1	Objectif et définition .....	119
6.3.2	Principe et conditions d'efficacité .....	119
<b>6.4</b>	<b>Le dispositif de stabilisation en géotextile .....</b>	<b>123</b>
6.4.1	Objectif .....	123
6.4.2	Principe et description .....	123
	.....	124
6.4.3	Conditions d'efficacité et limites .....	124
<b>6.5</b>	<b>Le dispositif de sédimentation .....</b>	<b>131</b>
6.5.1	Objectif .....	131
6.5.2	Principe et conditions d'efficacité .....	131
<b>7</b>	<b>Bibliographie .....</b>	<b>137</b>



## Introduction

L'érosion côtière est un phénomène naturel qui s'est amplifié depuis plusieurs décennies à cause des activités humaines. Les enjeux associés de développement économique, de tourisme et d'urbanisme se sont multipliés et dans le contexte du changement climatique, avec une élévation prévisible du niveau de la mer de 1 à 2 m à l'horizon 2100, les risques augmentent et se généralisent sur les littoraux urbanisés. Pour lutter contre l'érosion et la submersion marine, la construction d'ouvrages de défense contre la mer visant à fixer le trait de côte a été depuis plus de 50 ans très souvent préconisée ; mais ces méthodes de protection dites rigides (ou dures) montrent aujourd'hui leurs limites et aggravent même parfois l'érosion des littoraux. Des méthodes souples (ou douces) se sont développées depuis les années 1980. Conçues pour exploiter les processus naturels de sédimentation, ces méthodes autorisent une plus grande mobilité du trait de côte.

La France dispose d'une stratégie nationale pour l'État et les collectivités territoriales et d'une méthodologie de gestion du trait de côte, de recul stratégique et de défense contre la mer, afin d'appréhender de manière différente l'aménagement du littoral pour mieux prendre en compte ces évolutions. Suite à la demande de la direction de l'eau et de la biodiversité (*DEB*) du ministère de la Transition écologique et de la cohésion des territoires (MTECT), le Cerema a travaillé à l'élaboration et à la rédaction d'un rapport de REX (Retours d'EXpérience) des méthodes souples de protection du littoral. Ce rapport d'étude vient compléter l'analyse des méthodes souples référencées dans l'ouvrage « La gestion du trait de côte » du ministère de l'Écologie publié en 2010. Il apporte des éléments de réponse à l'une des recommandations du programme d'actions 2017-2019 de la stratégie nationale de gestion intégrée du trait de côte, qui a pour objectif d'inciter à l'expérimentation et à l'innovation en privilégiant des méthodes de gestion souple.

Le rapport présente dans son premier chapitre les éléments de contexte, comme l'importance de l'érosion côtière, la stratégie nationale de gestion intégrée, l'approche récente plus environnementale du littoral et les types de méthodes de protection du littoral. Les méthodes souples sont ensuite abordées à travers la localisation des REX des sites étudiés, repartis sur les trois façades maritimes de la France métropolitaine, et une vue d'ensemble de leurs fonctions et applications. Plusieurs méthodes souples sont présentées dans les chapitres suivants, comme le rechargement de plage (Chapitre 2), la gestion souple des dunes (Chapitre 3), le drainage de plage (Chapitre 4), le rétablissement du transit littoral (Chapitre 5) et d'autres procédés au stade plus expérimental (Chapitre 6). Chaque chapitre comprend la présentation de la méthode, les REX des sites et des recommandations d'ensemble. Les REX des sites ont été établis à partir de l'étude du contexte, de la mise en œuvre, de l'efficacité du procédé et de l'évolution de chaque site. Des services déconcentrés du littoral, des organismes partenaires et des collectivités territoriales ont été associés à ce projet sous la forme d'enquêtes et d'entretiens pour recueillir les informations sur les sites. Pour chacune de ces méthodes, l'objectif est d'étudier un large panel de sites et d'essayer de mieux appréhender et comprendre les conditions nécessaires à leur bon fonctionnement.

# 1 PRESENTATION GENERALE

## 1.1 Érosion côtière et stratégie de gestion intégrée

### 1.1.1 L'importance de l'érosion côtière

L'érosion côtière est un phénomène naturel, amplifié par les actions humaines, que l'on observe à travers le monde et particulièrement en France. Ainsi, les estimations réalisées au début des années 2000, dans le cadre du projet européen EUROSION, indiquent que le quart du littoral français subit l'érosion et recule, et que les côtes sableuses d'accumulation sont les plus affectées (EUROSION, 2004a), (Ifen, 2006).

L'indicateur national de l'érosion côtière, élaboré par le Cerema, fournit pour la première fois en 2018 des données quantifiées et homogènes sur l'évolution du trait de côte en métropole et en outre-mer. Cet indicateur repose sur la comparaison des positions du trait de côte sur la période récente et sur une période plus ancienne (1920 à 1950), qui ont été digitalisées sur des milliers de kilomètres. L'analyse montre que 19 % des profils calculés par l'indicateur national, espacés de 200 m le long du rivage, sont en recul, dont 7 % présentent une tendance à l'érosion supérieure à 0,5 m/an (Hédou et al., 2018).

L'indicateur national de l'érosion côtière précise que tous les départements français sont concernés par le recul du trait de côte, mais sur des linéaires plus ou moins importants. Ainsi cinq départements (Seine-Maritime, Charente-Maritime, Gironde, Hérault et Bouche-du-Rhône) possèdent au moins 50 % de leurs côtes en recul, alors que les quatre départements bretons, la Loire-Atlantique, la Corse-du-Sud, la Martinique et Mayotte ont moins de 10 % des profils calculés en recul (Cerema, 2018a).

### 1.1.2 La stratégie nationale de gestion intégrée du trait de côte

Avec une vulnérabilité des zones côtières qui devient de plus en plus importante, une élévation du niveau de la mer prévisible résultant du changement climatique et une partie croissante de la population mondiale et française installée sur le littoral et à proximité, se posent aujourd'hui de nouvelles problématiques liées pas simplement au recul du trait de côte, mais aussi à des questions d'aménagement et d'adaptation des territoires littoraux.

Neuf principes communs et neuf recommandations stratégiques sont présentés dans le programme d'actions pour la période 2017-2019 de la stratégie nationale de gestion intégrée du trait de côte, avec les points suivants :

- le premier principe commun énonce que « le littoral est un géosystème dynamique. Le trait de côte est naturellement mobile. Il faut accompagner le changement de paradigme : éviter la défense systématique contre la mer et développer des systèmes d'adaptation raisonnés pour la protection et la recomposition spatiale du littoral en évitant l'artificialisation du trait de côte » ;
- la recommandation stratégique n° 6 a pour objectif « d'inciter à l'expérimentation et à l'innovation en privilégiant des méthodes et des techniques de gestion souple » ;
- et la sous-action 2.4 de l'axe B « Élaborer et mettre en œuvre des stratégies territoriales partagées » du programme d'actions mentionne « l'élaboration d'un recueil des bonnes pratiques et des méthodologies pour la gestion du trait de côte notamment au travers de fiches opérationnelles ». Cette action a pour objectif de définir les modalités pratiques de résilience et de réversibilité des aménagements existants et de faciliter la mise en place d'aménagements et de modes de gestion dans les zones exposées au recul du trait de côte.



Illustration 1 : Stratégie nationale de gestion intégrée du trait de côte. Programmes d'actions pour les périodes 2012-2015 (MEDDTL, 2012) et 2017-2019 (MEEM, 2017)

## 1.2 Vers une approche systémique et environnementale

### 1.2.1 Le littoral, un géosystème dynamique

Situé à l'interface terre, mer et atmosphère, le littoral est un espace particulier qui subit les influences continentale, marine et atmosphérique (notamment éolienne) ainsi que les actions humaines. Celles-ci peuvent en effet perturber la dynamique sédimentaire, accroître l'érosion et menacer de multiples enjeux. En outre, la pression anthropique est de plus en plus importante sur les territoires littoraux.

L'évolution du littoral est donc fonction de toutes ces interactions qui sont variables à diverses échelles de temps et d'espace. La compréhension de ce milieu dynamique nécessite donc une approche systémique, qui fait appel aux idées clés que sont la complexité, le rôle des interactions et l'organisation de l'espace.

Cette perception du littoral, comme un géosystème dynamique, a permis d'apporter des éléments de réponse sur les interactions entre les formes littorales et les processus côtiers, les temporalités des dynamiques et leurs répartitions spatiales. Elle est à l'origine du développement des approches morphodynamiques et hydrosédimentaires, qui sont devenues fondamentales dans l'étude du fonctionnement des évolutions des milieux littoraux (MEEDM, 2010).

### 1.2.2 Les méthodes de protection du littoral

La sélection des méthodes de protection du littoral face à l'érosion côtière et à la submersion marine dépend de l'évaluation des aléas et des enjeux humains, économiques et écologiques. Les solutions de protection doivent par conséquent prendre en compte cette évaluation dans le contexte d'une gestion intégrée basée sur une meilleure compréhension des phénomènes mis en jeu.

Deux types de méthodes se distinguent principalement : les méthodes rigides (ou dures) et les méthodes souples (ou douces). La combinaison de ces deux types de méthodes est souvent envisagée pour des sites exposés aux aléas d'érosion et de submersion marine.

Les méthodes rigides sont basées sur la construction d'ouvrages qui visent à fixer la position du trait de côte. La protection du littoral contre l'action de la mer s'est caractérisée très souvent jusqu'aux années récentes par l'édification d'ouvrages longitudinaux de types murs, perrés ou digues en enrochement. Ces dispositifs rigides considérés comme irréversibles ont pour inconvénients de créer des points durs qui figent le trait de côte et de provoquer des abaissements de niveau de plage en pied d'ouvrage par la réflexion des vagues.

De cette approche fixiste découle également la réalisation d'ouvrages transversaux de maintien des sédiments de types épis et brises-lames, qui ont souvent résolu le problème localement mais l'ont amplifié en aval dérive et sont même parfois devenus une cause indirecte majeure de l'érosion côtière.

Il apparaît nécessaire d'étudier des solutions alternatives et/ou complémentaires à ce type d'ouvrages rigides (murs, perrés, digues, épis et brise-lames) qui n'apportent pas une réponse efficiente.

Les méthodes souples basées sur le concept de résilience côtière, qui ont commencé à se développer à partir des années 1980, sont quant à elles davantage conçues pour travailler avec la nature. Elles intègrent par leurs principes d'action la dynamique naturelle et la mobilité du trait de côte. Il s'agit de laisser au littoral un espace de respiration, préservant sa capacité d'adaptation ; il est par exemple possible d'apporter du sédiment (sable ou galet) au système plage pour consolider un stock sédimentaire déficitaire et rétablir le profil d'équilibre de la plage.

Le rechargement de plage reste néanmoins une méthode temporaire qui ne résout pas durablement le problème, d'où la nécessité de recourir à des rechargements périodiques. D'autres méthodes souples, comme la gestion souple des dunes, les systèmes de drainage de plage et de rétablissement du transit littoral, tentent de remédier plus durablement à la dynamique érosive.

### 1.3 « Construire avec la nature »

Aujourd'hui, le défi du génie côtier est d'apprendre à concevoir des aménagements qui composent avec la nature plutôt que de la combattre. Les aménagements doivent être conçus pour s'adapter aux conditions changeantes de l'environnement et notamment à l'élévation prévisible du niveau de la mer. L'objectif est donc de passer du concept de « Building in nature » à celui de « Building with nature ». La réponse traditionnelle à l'élévation du niveau de la mer est de renforcer les ouvrages existants et de construire des digues plus hautes. Ces projets basés sur des scénarios d'adaptation comprennent des incertitudes et ne laissent pas de place aux ajustements puisqu'une fois érigés, les ouvrages sont figés. Il s'agit d'une lutte perpétuelle et de plus en plus coûteuse, ainsi qu'une artificialisation dommageable pour le territoire.

« Construire avec la nature » est une philosophie de conception qui utilise les processus naturels pour concevoir des structures et créer des avantages pour la société et la nature en même temps. L'approche offre une solution pour rendre les conceptions techniques durables, peu coûteuses et plus adaptables dans un monde soumis par les changements climatiques. Elle permet de développer des solutions qui sont mises en place graduellement et qui peuvent s'adapter aux évolutions de l'environnement.

Ce concept « Building with nature » a été développé par l'organisation néerlandaise EcoShape, mise en place en 2008 pour déployer le programme d'innovation et proposer de nouvelles façons de penser et d'agir sur l'espace littoral. En 2011, la province de Zuid-Holland et la Rijkswaterstaat, qui est l'agence gouvernementale des Pays-Bas chargée des infrastructures, ont lancé l'expérience « The Sand Motor », ou le générateur de sable, unique au monde d'un méga-rechargement de sable de 21,5 millions de m<sup>3</sup>, mis en place sur la côte de Delfland entre La Haye et Rotterdam (De Vriend et al., 2012). L'objectif à travers ce rechargement concentré est de laisser le stock de sable se répartir naturellement le long d'une étendue côtière de 18 km. Les actions marines permettront d'alimenter l'ensemble de la plage et de l'avant-plage en sable, tandis que les actions éoliennes fourniront du sable pour les dunes bordières. Une telle opération devrait compenser l'érosion du secteur pour les vingt prochaines années, sans aucune autre intervention. Une fois que le rechargement a été déposé, l'écosystème devrait être moins

perturbé que dans le cas de rechargements périodiques réalisés depuis les années 1980 et qui ont tendance à amener l'écosystème dans un état perturbé plus ou moins permanent.

De plus, ces opérations de rechargement tous les 5 ans environ avaient pour effet de conduire à une accentuation excessive du profil de plage et à la nécessité de recharger de plus en plus fréquemment. L'impact sur l'environnement est donc limité à un épisode de recouvrement local de la faune et de la flore benthique. Le sable étant ensuite redistribué progressivement sur tout le secteur, les conséquences pour les écosystèmes sont limitées (De Vriend et al., 2015).



Illustration 2: Le générateur de sable « The Sand Motor » de Delfland (à gauche) juste après sa mise en place en juillet 2011 et (à droite) en évolution de forme en octobre 2013 (Source : De Vriend et al., 2015)

L'expérience devrait permettre de déterminer dans quelle mesure l'inconvénient de l'investissement sera compensé par des avantages, tels que des dommages moindres pour l'écosystème, voire de nouvelles opportunités de développement d'activités récréatives par exemple. Ainsi, « *The Sand Motor* » est devenu un site de prédilection pour les kitesurfeurs, ce qui profite à l'économie locale et la zone de dunes est devenue plus large, favorisant une meilleure adaptation du système de protection côtière à l'élévation du niveau de la mer (De Vriend et al. ; 2015). Même si la présentation de ce projet est intéressante pour illustrer le concept de « Construire avec la nature », il convient de préciser qu'un méga-rechargement de ce type n'est pas neutre d'un point de vue environnemental.

### 1.3.1 Adopter des « Solutions fondées sur la Nature »

Plus encore que de composer avec la nature, il est également possible de s'appuyer sur les fonctionnalités des écosystèmes pour répondre à des défis qui se posent aux sociétés humaines. Ces « services rendus » par les écosystèmes sont désormais reconnus. Les écosystèmes côtiers, par « effet tampon », limitent les incursions marines dans les zones vulnérables et réduisent l'érosion. Ils jouent également un rôle fondamental dans l'atténuation du changement climatique par leurs importantes capacités de stockage du carbone. Ils assurent également une régulation de la qualité de l'eau grâce aux capacités épuratoires naturelles des milieux (indispensable par exemple pour la conchyliculture) et fournissent de nombreuses ressources, notamment alimentaires. Ils contribuent au bien-être et à la santé, contribuent à l'attractivité des territoires littoraux en matière de loisir et de tourisme, et sont porteurs de valeurs scientifiques, paysagères, culturelles, artistiques, etc.

En matière de protection contre l'érosion, des études ont ainsi montré que les herbiers de posidonie situés entre 5 et 15 mètres de profondeur jouent par exemple un rôle d'atténuateur de houle permettant de réduire la hauteur des vagues jusqu'à 30 %. Les forêts de mangroves réduisent aussi l'énergie des vagues (entre 13 et 66 %) tout comme les récifs coralliens (entre 51 à 74 %), (CDC Biodiversité, 2019).

Ces services écosystémiques restent difficiles à chiffrer en termes économiques, mais plusieurs études ont permis d'estimer les bénéfices considérables qu'ils apportent. Par exemple, selon l'Initiative française pour les récifs coralliens, ces écosystèmes génèrent entre 115 et 220 millions d'euros d'économie chaque année en Nouvelle-Calédonie, en évitant des dégâts sur la zone côtière, (UICN France, 2013). Selon des estimations du Conservatoire du Littoral, les services de régulation des submersions marines et de l'érosion côtière par les milieux naturels en baie de Somme représentent 6 millions d'euros par an tandis que la protection des espaces naturels sur le littoral des Maures contribue au tourisme à hauteur de 106 millions d'euros par an.

Ainsi, des solutions peuvent s'appuyer sur des concepts tels que la restauration écologique, l'ingénierie écologique, les infrastructures vertes, la gestion fondée sur les écosystèmes, la restauration des paysages forestiers, l'adaptation ou l'atténuation fondée sur les écosystèmes ou la réduction des risques naturels fondée sur les écosystèmes. Ces initiatives, lorsqu'elles sont mises en place pour répondre à un défi humain (tels que la protection contre les risques naturels ou l'atténuation du changement climatique) tout en présentant un co-bénéfice pour la biodiversité, peuvent être qualifiées de « Solutions fondées sur la Nature ».

Ce concept apparaît au début des années 2000 dans la littérature scientifique mais cette notion n'émerge réellement qu'à partir de 2009, sous l'impulsion de l'Union Internationale pour la Conservation de la Nature (UICN), dans le cadre de la quinzième Conférence des Parties de la Convention-cadre des Nations Unies sur les changements climatiques.

Elles sont définies comme « les actions visant à protéger, gérer de manière durable et restaurer des écosystèmes naturels ou modifiés pour relever directement les défis de société de manière efficace et adaptative, tout en assurant le bien-être humain et en produisant des bénéfices pour la biodiversité » (UICN France, 2016). De telles solutions représentent une alternative économiquement viable et durable, souvent moins coûteuse à long terme que des investissements technologiques ou la construction et l'entretien d'infrastructures. Flexibles et adaptables, elles apportent de nombreux co-bénéfices : tourisme, paysage, bien-être, activités économiques durables, etc.

L'exemple de plantation d'oyats sur une dune pour stabiliser le sable et permettre à l'écosystème de jouer son rôle de protection contre l'érosion et les submersions marines constitue une solution fondée sur la nature qui répond à la réduction des risques naturels et qui utilise l'ingénierie écologique (UICN France, 2018).

## 1.4 Les méthodes souples de protection du littoral

Depuis les années 1980, les méthodes souples de protection du littoral se sont développées en France et ont été mises en œuvre sur de nombreux sites soumis à des aléas d'érosion côtière et de submersion marine. Ces méthodes, qui intègrent le concept de résilience côtière, sont considérées comme efficaces sur une perspective d'évolution de moyen à long terme, permettant de limiter le recul du trait de côte, mais n'apportent cependant pas de garantie à court terme (EUROSION, 2004b).

### 1.4.1 REX (Retours d'EXpérience) des méthodes souples

Les méthodes souples, référencées dans le guide « La gestion du trait de côte » (MEEDM, 2010) comme le rechargement de plage, la gestion souple des dunes, le drainage de plage, le rétablissement du transit littoral et d'autres procédés au stade plus expérimental, sont étudiées ici de façon approfondie.

Les méthodes souples sont exposées dans les chapitres suivants et pour chacune d'elles, il s'agit de présenter les REX (Retours d'EXpérience) où elles ont été expérimentées. Le recensement se veut être le plus exhaustif possible.

Les REX sont établis à partir de l'étude du contexte, de la mise en œuvre, de l'efficacité du procédé et de l'évolution des sites. Des services déconcentrés du littoral, des organismes partenaires et des collectivités territoriales ont été associés à ce projet sous la forme de questionnaires et d'entretiens pour recueillir les informations sur les différents sites.

### 1.4.2 Localisation des REX des sites

La carte suivante présente la localisation des sites étudiés ; ils sont listés du nord au sud pour les façades de la Manche et de l'Atlantique et d'ouest en est pour la façade Méditerranéenne (Illustration 3).

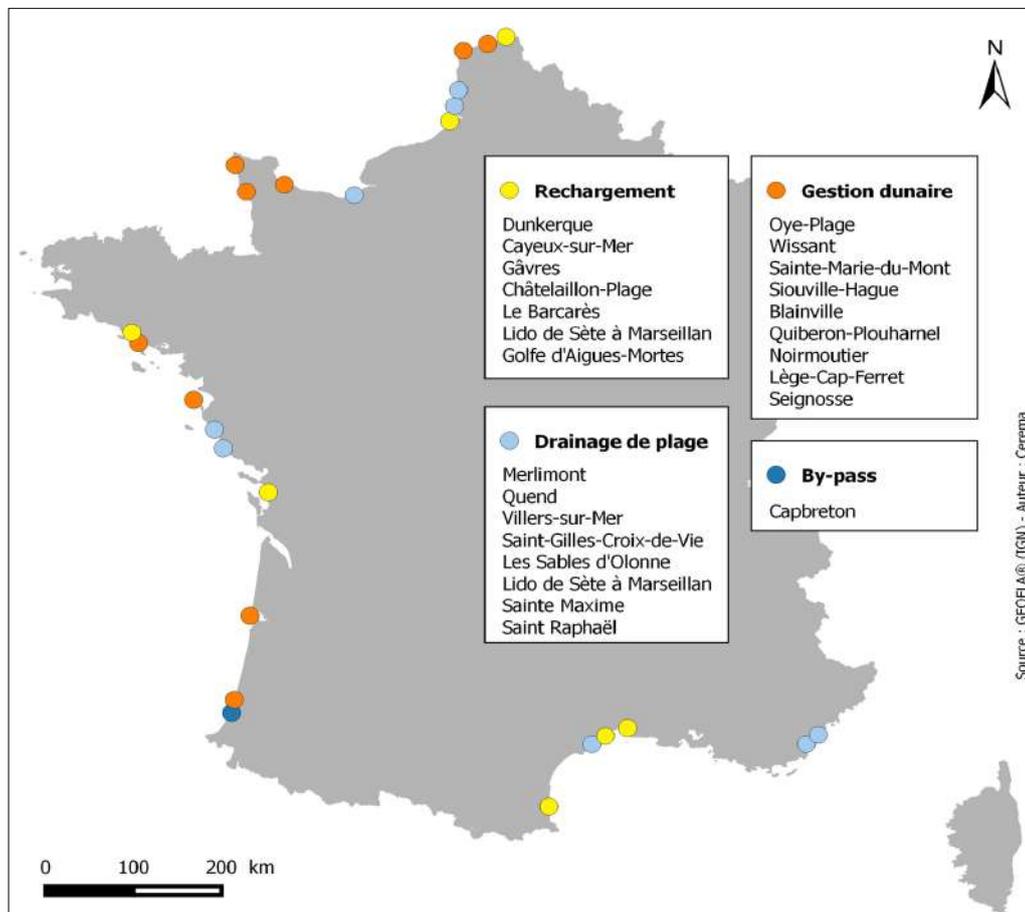


Illustration 3 : Localisation des REX des vingt-cinq sites pour les quatre méthodes souples étudiées

Les REX des sites, au nombre de vingt-cinq concernant les méthodes souples et de onze pour les autres procédés, sont présentés dans les chapitres qui suivent ; l'analyse concerne sept sites de rechargement de plage exposée dans le chapitre 2 et neuf sites de gestion souple des dunes présentée dans le chapitre 3. Pour le drainage de plage exposé dans le chapitre 4 et le rétablissement du transit littoral (ou by-passing) présenté dans le chapitre 5, tous les sites français sont étudiés ; le procédé de drainage de plage est présent sur huit plages françaises, alors que le site de Capbreton est le seul où le by-passing hydraulique est utilisé (Illustration 4).

Par contre, les opérations dites parfois de by-passing mécanique, que l'on retrouve sur les Bas-Champs de Cayeux-sur-Mer (80) ou sur la plage des Miramars à Barcarès (66), sont inventoriées dans les opérations de rechargement de plage du chapitre 2.

D'autres procédés comme l'atténuateur de houle, les pieux hydrauliques, l'atténuateur de courant et les dispositifs de stabilisation et de sédimentation, avec des retours d'expérience plus limités, sont présentés dans le chapitre 6 (Illustration 5).

Méthode souple	Nombre de REX de sites	Chapitre concerné
Rechargement de plage	7	2
Gestion souple des dunes	9	3
Système de drainage de plage	8	4
Rétablissement du transit littoral	1	5

Illustration 4 : Présentation du nombre de REX de sites et du chapitre concerné pour chaque méthode souple étudiée

Autre procédé	Nombre de REX de sites	Chapitre concerné
Atténuateur de houle en géotextile	2	6
Pieux hydrauliques	3	
Atténuateur de courant	2	
Dispositif de stabilisation en géotextile	2	
Dispositif de sédimentation	2	

Illustration 5 : Présentation du nombre de REX de sites et du chapitre concerné pour chaque autre procédé étudié

### 1.4.3 Coûts des méthodes souples

Les coûts des méthodes souples, qui sont indiqués pour certains REX dans les chapitres suivants, ne sont pas repris dans ce paragraphe. Afin d'obtenir une information précise et détaillée, il est proposé de se référer à l'ouvrage du Cerema intitulé « Coût des protections contre les aléas littoraux », publié en 2018, qui vise à apporter une assistance dans l'estimation des coûts des aménagements de protection.

Les chiffres présentés dans cet ouvrage, en particulier dans les parties 6 et 7 relatives aux méthodes de rechargement de plage, de drainage, de by-passing et de gestion des cordons dunaires, éclairent sur les coûts initiaux des aménagements et sur les coûts d'entretien et de gestion (Cerema, 2018b).

### 1.4.4 Fonctions et applications des méthodes souples

Une vue d'ensemble des fonctions et applications des méthodes de protection étudiées dans les chapitres suivants est présentée dans les tableaux suivants :

1. Principes et limites d'application des méthodes souples étudiées (chapitres 2 à 5 ; Illustration 6) ;
2. Principes et limites d'application des autres procédés étudiés (chapitre 6 ; Illustration 7) ;
3. Méthodes souples versus le type de problème, le type de côte et le degré d'exposition du site concerné (Illustration 8) ;

4. Autres procédés versus le type de problème, le type et degré d'exposition du site (Illustration 9) ;
5. Méthodes souples versus la capacité de réduction des aléas littoraux, des vagues et des surcotes (Illustration 10).

### Principes et limites d'application des méthodes souples étudiées (chapitres 2 à 5)

Méthode souple	Principe	Limites d'application
<b>Rechargement de plage</b>	<p>Le rechargement de plage vise à rééquilibrer le budget sédimentaire de la plage par un apport externe de matériaux.</p> <p>L'apport artificiel de sable permet d'augmenter le volume de sédiments sur une plage, d'augmenter la surface récréative et de la sécuriser contre l'érosion.</p> <p>Le rechargement peut être réalisé par pompage hydraulique de sables déchargés sur la plage ou sur l'avant-plage.</p> <p>L'examen d'un rechargement nécessite de définir le régime de la plage, en particulier son taux d'érosion, de rechercher les gisements potentiels d'apport et de déterminer le volume de sable à apporter.</p>	<p>Avant de réaliser une opération de rechargement, il est essentiel d'étudier la morphodynamique du site et les causes du déséquilibre sédimentaire de la plage.</p> <p>Les conditions de rechargement ne sont pas les mêmes sur une plage soumise à des mouvements dans le profil que sur une plage où le transit littoral est important. Dans ce cas, l'efficacité est très limitée et les pertes en sédiments sont généralement importantes.</p> <p>Les facteurs clés à prendre en compte sont le profil de rechargement, la taille des grains du sédiment d'emprunt comparée à celle du sédiment naturel, le volume de rechargement à mettre en place et le suivi de plage.</p>
<b>Gestion souple des dunes</b>	<p>Le principe du contrôle de la mobilité des dunes est la modération de l'érosion éolienne par réduction de la vitesse du vent.</p> <p>La plantation végétale, la pose de rideaux brise-vent, le recouvrement par des branchages, le reprofilage et la canalisation de la fréquentation améliorent ainsi la résilience et la pérennité des cordons dunaires.</p>	<p>L'équilibre naturel des dunes peut être compromis par les dommages causés par la surfréquentation, la dégradation et la stabilisation excessive.</p> <p>Il ne s'agit donc pas de fixer la dune, mais plutôt de lui conserver un certain degré de mobilité qui lui permette de s'ajuster aux changements et de continuer à jouer son rôle d'amortisseur au sein du système plage-dune.</p>
<b>Système de drainage de plage</b>	<p>Le système agit sur les processus de percolation rapide qu'il favorise et permet d'abaisser le niveau de la nappe d'eau sous la surface de l'estran dans la zone d'infiltration, favorisant l'assèchement de la plage.</p>	<p>La méthode est appropriée pour résoudre des problèmes d'érosion lente et continue, mais elle ne permettra pas à elle seule d'inverser la tendance si l'érosion est soutenue ou la disponibilité en sédiment faible.</p>
<b>Rétablissement du transit littoral</b>	<p>La technique de transfert (ou <i>by-passing</i>) mécanique ou hydraulique consiste à déplacer les sédiments (sables ou galets) des zones en accrétion vers les zones érodées, permettant de limiter les opérations de dragage dans la passe d'entrée du débouché en mer.</p>	<p>Pour un système de <i>by-passing</i> hydraulique, les coûts sont relativement importants en termes d'installation, de maintenance ou de complexité du système.</p> <p>Le type d'installation peut être mis à mal par l'action des vagues sur des sites très exposés.</p>

Illustration 6 : Principes et limites d'application des méthodes souples étudiées (chapitres 2 à 5)

## Principes et limites d'application des autres procédés étudiés (chapitre 6)

Autre procédé	Principe	Limites d'application
<b>Atténuateur de houles géotextile</b>	<p>Cet ouvrage constitué de tubes en géotextile posés sur un tapis anti-affouillement, joue le rôle de barre littorale d'avant-côte.</p> <p>Les tubes sont remplis de sable, qui est pompé le plus souvent aux abords de l'implantation de l'atténuateur.</p> <p>L'avantage du principe est la rapidité de la pose qui peut se faire par voie maritime, sans créer de gênes à terre et sans moyens techniques importants comme pourrait le nécessiter la pose d'enrochements.</p>	<p>L'atténuation de la houle obtenue reste moindre qu'avec un ouvrage maçonné mais l'affouillement est plus faible.</p> <p>L'atténuateur présente cependant des inconvénients ; leur installation entraîne une perturbation des écosystèmes durant les travaux, en augmentant la turbidité aux alentours.</p> <p>De plus, les tubes sont sensibles aux déchirements (accidentels, intentionnels ou lors de tempêtes).</p>
<b>Pieux hydrauliques</b>	<p>L'amortissement et la dissipation de l'énergie des vagues au niveau des pieux hydrauliques doit limiter les mouvements sédimentaires (longitudinaux et transversaux) ; ce qui doit favoriser les dépôts de sable principalement en haut de plage.</p>	<p>Les résultats obtenus par les pieux hydrauliques, implantés le plus souvent en haut de plage, restent contrastés et peu concluants.</p> <p>Il semble délicat de proposer une méthodologie de dimensionnement type pour l'implantation des pieux ; cela relève de l'étude morphodynamique de chaque site et dépend des conditions d'exposition aux houles et aux transports sédimentaires dominants associés.</p>
<b>Atténuateur de courant</b>	<p>L'action de l'atténuateur de courant, constitué d'éléments filiformes, est comparable à celle des haies sur le vent.</p> <p>Disposés en épis transversaux par rapport au sens du courant, les atténuateurs de courant permettent de créer à l'aval de la structure en forme de haie des courants de retour près du fond.</p>	<p>L'impact morphosédimentaire des atténuateurs a été montré dans le cadre d'étude en canal à houle effectuée en 2013. Il a été observé des élévations moyennes à l'aval des structures qui favorisent la stabilisation des fonds.</p> <p>Les expérimentations à venir doivent intégrer des suivis de l'évolution des fonds, afin de confirmer les tendances à l'accrétion.</p>
<b>Dispositif de stabilisation géotextile</b>	<p>Le principe repose sur le captage, l'accumulation et le maintien des sédiments sur la plage tout en favorisant l'intégration paysagère des structures, qui ont vocation à être ensevelies sous le sable.</p> <p>Le procédé s'appuie sur l'utilisation de structures remplies de granulats, s'adaptant au terrain naturel et à ses variations.</p>	<p>Le procédé peut être considéré comme une solution alternative aux méthodes rigides de protection pour les sites moyennement exposés aux vagues ; il est rapide à mettre en œuvre, relativement économique et réversible.</p> <p>Les performances et la durabilité du procédé restent des points critiques à améliorer pour les sites très exposés.</p>
<b>Dispositif de sédimentation</b>	<p>Le dispositif de sédimentation appelé filets S-Able ou « dune de turbulence » est destiné à contrôler le transport de sable sur l'estran à proximité des cours d'eau soumis à des divagations de chenaux.</p> <p>Il s'agit d'un ensemble de filets assemblés en une structure tridimensionnelle, qui permet de générer de la turbulence dans les écoulements afin de les réduire.</p>	<p>Les résultats d'essai en modèle réduit montrent que le dispositif agit sur les processus hydrosédimentaires, non pas comme une barrière, mais plutôt comme un modérateur et décanteur de sable.</p> <p>Suite aux suivis expérimentaux réalisés sur les sites, il est préconisé d'augmenter les dimensions des filets (longueur et hauteur).</p>

Illustration 7 : Principes et limites d'application des autres procédés étudiés (chapitre 6)

Les deux tableaux suivants (Illustration 8, 9) sont utilisés pour définir dans un premier temps les problèmes rencontrés (érosion côtière chronique, submersion marine, élévation du niveau de la mer),

le type de côte et le degré d'exposition du site concerné. Cette approche permet ensuite d'examiner les méthodes souples de protection les plus appropriées au site concerné.

Les catégories présentées (problème rencontré, type de côte et degré d'exposition) sont indiquées dans les tableaux par le symbole « ✓ » quand les méthodes de protection sont appropriées et par le symbole « – » quand elles ne le sont pas.

	Problème rencontré			Type de côte (en fonction de l'obliquité de la houle dominante)			Degré d'exposition (en fonction de la hauteur de houle Hs)		
	Érosion côtière chronique	Submersion marine	Élévation du niveau marin	Perpendiculaire	Oblique	Parallèle	Peu exposé (< 1 m)	Exposé (entre 1 et 3 m)	Très exposé (> 3 m)
<b>Rechargement de plage</b>	✓	✓	✓	✓	✓	–	✓	✓	✓
<b>Rechargement d'avant-plage</b>	✓	–	✓	✓	✓	–	–	✓	✓
<b>Gestion souple des dunes</b>	✓	✓	✓	✓	✓	–	✓	✓	✓
<b>Système de drainage</b>	✓	–	–	✓	✓	–	✓	✓	–
<b>Rétablissement transit littoral</b>	✓	–	–	–	✓	✓	✓	✓	✓

Illustration 8 : Méthodes souples versus le type de problème, le type de côte et le degré d'exposition du site concerné

Autre procédé	Problème rencontré			Type de côte (en fonction de l'obliquité de la houle dominante)			Degré d'exposition (en fonction de la hauteur de houle Hs)		
	Érosion chronique	Submersion	Élévation du niveau marin	Perpendiculaire	Oblique	Parallèle	Peu exposé (< 1 m)	Exposé (entre 1 et 3 m)	Très exposé (> 3 m)
<b>Atténuateur de houle</b>	✓	–	–	✓	✓	–	–	✓	✓
<b>Pieux hydrauliques</b>	✓	–	–	✓	✓	–	–	✓	✓
<b>Atténuateur de courant</b>	✓	–	–	✓	✓	–	✓	–	–
<b>Dispositif de stabilisation</b>	✓	✓	–	✓	✓	✓	✓	✓	–
<b>Dispositif de sédimentation</b>	✓	–	–	✓	✓	–	✓	✓	–

Illustration 9 : Autres procédés versus le type de problème, le type de côte et le degré d'exposition du site concerné

Méthode souple	Capacité de réduction des aléas littoraux, des vagues et des surcotes				
	Réduction de l'érosion et stabilisation du trait de côte	Réduction de submersions marines	Atténuation des petites vagues (< 1 m) et stabilisation des sédiments	Réduction de la hauteur et de l'énergie des vagues (entre 1 et 3 m)	Réduction des surcotes (événements extrêmes)
Rechargement de plage	✓	✓	✓	✓	✓
Gestion souple des dunes	✓	✓	✓	✓	✓
Système de drainage	✓	–	✓	–	–
Rétablissement transit littoral	✓	–	✓	✓	–

Symboles utilisés : « ✓ » = approprié ; « – » = non approprié

Illustration 10 : Méthodes souples versus la capacité de réduction des aléas littoraux, des vagues et des surcotes ; tableau adapté d'après (Cunniff et Schawrtz, 2015)

L'efficacité de ces méthodes dépend du type de problème rencontré (érosion chronique, submersion marine, élévation du niveau marin) et du contexte morphodynamique des sites lié au type de côte et au degré d'exposition aux paramètres météo-marins (vent, houle, marée) et aux transports sédimentaires associés (transit littoral, mouvement dans le profil).

La capacité de réduction des aléas littoraux, des vagues et des surcotes est variable suivant les méthodes présentées ; ainsi, le rechargement de plage et la gestion souple des dunes ont de fortes capacités de réduction et peuvent être combinés, et le sont d'ailleurs souvent, sur les sites exposés.

Le rechargement de plage est une méthode très répandue à travers le monde, mais son efficacité varie selon la morphodynamique du site, les causes de l'érosion et les caractéristiques du sable d'emprunt. La gestion souple des dunes et le système de by-pass fonctionnent souvent très bien, mais ces méthodes sont réservées à des environnements spécifiques, à savoir les systèmes dunaires et les débouchés en mer. Enfin, le drainage de plage permet de contrebalancer une érosion lente et continue mais n'est pas adapté lorsque l'érosion est importante et concentré sur quelques événements de tempête. La diversité de ces méthodes apparaît comme une force puisque pour chaque type d'environnement, une d'entre elles devrait être en mesure de répondre au problème d'érosion.

L'analyse de ces méthodes montre que la résolution du problème de protection contre les aléas littoraux d'érosion côtière, de submersion marine et d'élévation du niveau marin reste délicate. La mise en œuvre d'une solution de gestion durable doit s'appuyer sur des études préliminaire et technique conduites à une échelle pertinente (i.e. cellule sédimentaire) pour que les phénomènes en cause et l'impact des mesures envisagées puissent être correctement évalués.

L'étude de faisabilité est proposée dans un premier temps pour identifier le montage opérationnel, le mode de financement et les partenaires possibles du projet. Il s'agit d'étudier les conditions de faisabilité des options de gestion sur les plans technique, environnemental et économique. L'étude technique plus approfondie se décompose en une étude sur plan de définition des objectifs et principes d'aménagement et des études techniques détaillées, qui requièrent le plus souvent à la modélisation. Concernant les méthodes souples de protection du littoral, le suivi fait partie intégrante de la solution et permet d'optimiser la méthode retenue en fournissant des outils de gestion (MEEDM, 2010).

## 2 LE RECHARGEMENT DE PLAGE

### 2.1 Présentation de la méthode

#### 2.1.1 Objectif et définition

Le rechargement de plage vise à rééquilibrer le budget sédimentaire de la plage par un apport externe de matériaux permettant de compenser les effets de l'érosion côtière naturelle ou due à des interventions humaines, comme la construction d'ouvrages portuaires et de protection côtière qui visent à fixer le trait de côte, bloquer le transit littoral et limiter les apports sédimentaires.

La finalité de la méthode est de permettre d'élargir la largeur de la plage et d'augmenter la capacité d'accueil de la plage, mais également de mieux protéger contre les aléas littoraux, en créant une zone tampon qui joue un rôle protecteur essentiel en cas de forts événements de tempêtes. L'apport de sable sur la plage ou au niveau des petits fonds, dans le cas d'un rechargement d'avant-plage, favorise le déferlement des vagues et la dissipation d'énergie associée, en milieu ou bas de plage, atténuant ainsi les effets érosifs des vagues sur le haut de plage.

#### 2.1.2 Principes et conception

Les méthodes de rechargement de plage et d'avant-plage sont bien distinctes. Elles peuvent par ailleurs être associées pour renforcer la totalité du profil de plage suivant son profil d'équilibre.

La méthode de rechargement de plage permet, par l'apport de sable sur la plage, d'augmenter la surface de la plage récréative et d'anticiper des phénomènes d'érosion. La technique est optimisée par la mise en place d'un sédiment d'emprunt identique ou légèrement plus grossier que le sédiment naturel pour pouvoir s'ajuster au profil naturel de la plage. Le rechargement peut s'effectuer par pompage hydraulique de sables déchargés en pied de dune et mis en place ensuite par bulldozers et camions.

La méthode de rechargement d'avant-plage consiste par contre à alimenter en sable l'avant-plage, c'est-à-dire la zone des petits fonds. Ce type de rechargement est préconisé pour les secteurs où le déficit sédimentaire est important et où les techniques de fixation du trait de côte ont rendu le profil de la plage pentu. Le déversement, qui doit être étudié précisément avant d'être appliqué pour permettre aux sédiments de remonter vers la plage et non de se disperser vers le large, peut s'effectuer par clapage, ou autres techniques comme la projection de mixture draguée « rainbow method », avec un prix de revient relativement bas par rapport à la technique de clapage de l'ordre de 30 % moins cher.

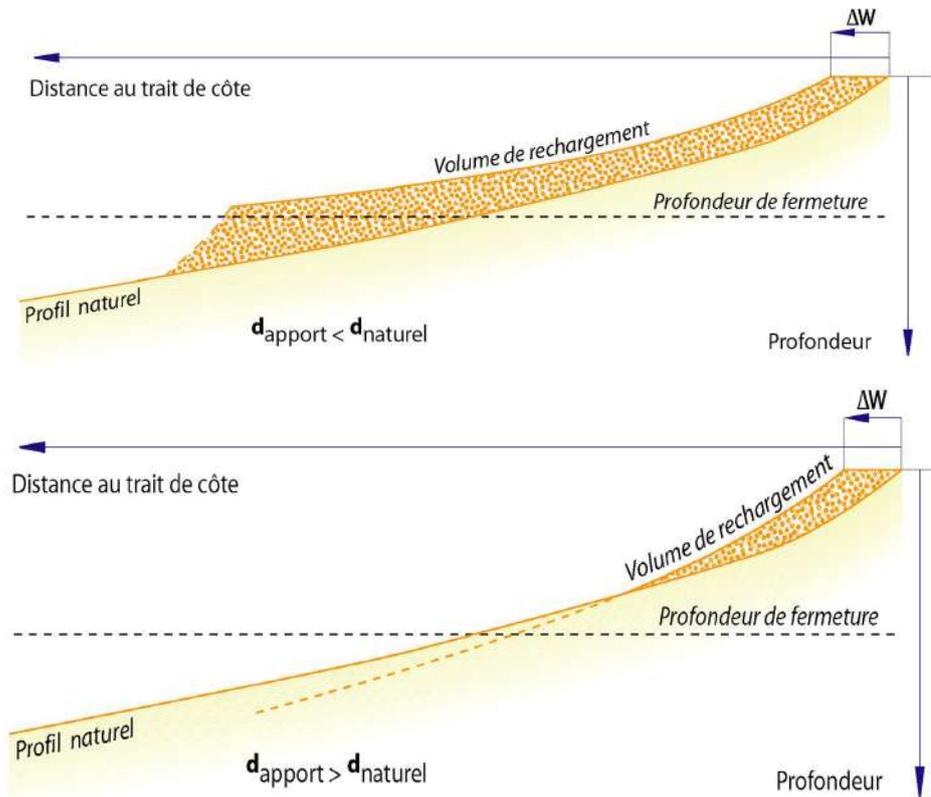


Illustration 11 : Volumes de rechargement nécessaires pour obtenir une largeur supplémentaire de plage avec un matériel d'apport plus fin (figure du haut) et plus grossier (figure du bas) que le sédiment naturel

Le succès de la technique dépend de la taille des grains du sédiment d'emprunt par rapport à la taille des grains du sédiment naturel de la plage. En effet, les caractéristiques des sédiments déterminent la forme du profil de plage en rapport avec le concept de profil d'équilibre développé par Dean (1991) :

Si le sédiment d'emprunt est plus fin que le sédiment naturel de la plage, le profil de la plage tend à s'aplatir et les conditions d'équilibre sont repoussées au-delà de la profondeur limite d'action de la houle, dite profondeur de fermeture, ce qui tend à augmenter le volume à mettre en place,

Par contre, si le sédiment d'emprunt est plus grossier que le sédiment naturel, le profil de la plage va tendre vers un profil plus raide que le profil initial, favorisant la création d'une zone de rechargement avec un volume moins important de sable mis en place (Illustration 11).

L'examen d'un rechargement nécessite de définir le régime de la plage, en particulier son taux d'érosion, de rechercher les gisements potentiels d'apport marin ou terrestre et de déterminer le volume de sable à apporter. Une des difficultés est de trouver le matériau approprié en quantité et en coût acceptable.

La méthodologie de conception de la méthode de rechargement introduit les notions suivantes :

- la connaissance des processus côtiers des sites d'extraction et de dépôt ;
- le choix du site d'emprunt ;
- les caractéristiques granulométriques des sédiments naturels et d'emprunt ;
- le concept de profil d'équilibre et la profondeur limite d'action de la houle ;
- l'estimation du volume de sédiments d'emprunt à mettre en place ;
- la fréquence des entretiens périodiques, la durée de vie et le coût de gestion.

### 2.1.3 Mise en œuvre

L'exécution des travaux nécessite une étude des méthodes à utiliser concernant le site d'emprunt potentiel et les méthodes d'alimentation en sable initiale et périodique, fondée sur :

- l'identification et l'étude de gisement de la zone d'emprunt ;
- les recommandations sur l'extraction des granulats marins ;
- les profils de mise en œuvre, le matériel d'extraction comme les dragues aspiratrices en marche ;
- le refoulement direct ou par conduite et la mise en remblai ;
- les plans de gestion des sédiments côtiers et l'évaluation des impacts environnementaux ;
- la gestion des apports périodiques et les pertes (mouvements dans le profil et transit littoral).

De manière générale, les règles de mise en œuvre, en phase travaux, préconisent de placer les matériaux directement sur la partie supérieure de la plage et de laisser le profil se développer naturellement vers son état d'équilibre.

### 2.1.4 Inventaire des rechargements de plage en France

Les rechargements de plage ou d'avant-plage sont très pratiqués à travers le monde et en Europe depuis les années 1980. En France, en dehors des plages artificielles surtout sur le littoral méditerranéen, il n'y avait pas eu, jusqu'à l'exemple de Châtelailon (Charente-Maritime) en 1989, de plages reconstituées avec des rechargements effectués par extraction marine. Depuis les années 2000, la technique connaît un engouement croissant en France, avec près de trente sites rechargés par des apports de plus de 100 000 m<sup>3</sup>. Le procédé est aujourd'hui très répandu en France métropolitaine puisque 22 des 24 départements littoraux y ont déjà eu recours. Le nombre d'opérations de rechargement varie donc d'un département à un autre, quelques paramètres permettent d'expliquer ces variations, qui dépendent du linéaire de côte sableuse, de l'importance de l'érosion et de la densité des enjeux présents sur le littoral.

Les premiers rechargements de plage recensés sur la façade Atlantique sont ceux de La Rochelle en 1967, Saint-Jean-de-Luz (1971) et Anglet (1974). Depuis, des opérations de rechargement ont été menées sur douze plages de la Manche, cinquante-huit de la façade atlantique et trente-cinq de la façade méditerranéenne. Leur répartition n'est pas homogène puisque 29 % des plages rechargées se trouvent dans le département de la Charente-Maritime et notamment sur les communes de l'île de Ré et de l'île d'Oléron, à Royan, et à Châtelailon-Plage. Dans le nord-ouest de la France, les opérations sont moins nombreuses. En Méditerranée, c'est dans l'Hérault avec douze sites et dans le Var, avec huit plages, que la densité est la plus importante sur le littoral. Les opérations majeures se concentrent sur les lidos de Sète à Marseillan et de Frontignan, les plages du Golfe d'Aigues-Mortes, de Fréjus et de Hyères.

Le tableau suivant présente les principales opérations de rechargements de plage de plus de 100 000 m<sup>3</sup> réalisées France métropolitaine, illustrées par les cartes de localisation et de volumes associés.

Localisation	Année(s)	Type rechargement	de Longueur (m)	Volume (10 <sup>3</sup> m <sup>3</sup> )	Unité de volume (m <sup>3</sup> /m)	de Site d'emprunt
<b>Manche</b>						
Malo-Les-Bains (59)	1978, 1988	Plage	600	360	600	Dragage
Digue des Alliés, Dunkerque (59)	2011, 2014	Plage	1200	1500	1250	Extraction en mer
Bas-Champs, Cayeux-sur-Mer (80)	1994 (*), 2013	Plage (galets)	4000	900	9	Extraction en mer
Criel-sur-Mer (76)	1994 (*)	Plage (galets)	500	150	20	Terrestre et extraction en mer
<b>Atlantique</b>						
Moulin-Blanc, Brest (29)	1978 (*)	Plage	900	160	180	Dragage
Grande plage, Gâvres (56)	2012	Plage	1200	168	140	Extraction en mer
La Baule (44)	2004	Plage	3300	215	65	Extraction en mer
Les Minimes, La Rochelle (17)	1967 (*)	Plage	300	–	–	Dragage
Châtellailon-Plage (17)	1989 (*), 1998, 2002, 2004, 2015	Plage	1200	580	480	Extraction en mer
Bourcefranc-le-Chapus (17)	1993 (*)	Plage	1250	117	94	Dragage
Les Portes de Ré (17)	2003	Plage	700	300	430	Dragage
La Couarde-sur-Mer (17)	2003	Plage	1000	200	200	Dragage
La Teste de Buch (33)	2007, 2012	Plage	800	162	200	Terrestre
Pyla-sur-Mer (33)	2003, 2009, 2012, 2016	Plage	1800	1500	830	Extraction en mer
Les Cavaliers, Anglet (64)	1974, 1992 (*)	Avant-plage	1200	450	375	Dragage
Plage de Marinella, Anglet (64)	2014	Avant-plage	4500	580	130	Dragage
<b>Méditerranée</b>						
Saint-Vincent, Agde (34)	2008, 2016	Plage	–	235	–	Dragage
Lido de Sète (34)	2006, 2010, 2015	Plage	2200	350	160	Extraction en mer
Lido de Sète, Marseillan (34)	2013	Plage et Avant-plage	2000	410 et 100	255	Extraction en mer
Lido de Frontignan (34)	2015	Plage	1280	300	235	Extraction en mer
Villeneuve-lès-Maguelone (34)	1986, 1990 (*)	Dune	11000	37	3,4	Plage
Palavas-Les-Flots (34)	2008	Plage	3000	300	100	Extraction en mer
Carnon-Plage (34)	2008	Plage	1800	205	114	Extraction en mer
Le Petit-Travers, Mauguio (34)	2008	Plage	3400	410	120	Extraction en mer
Le Grau-du-Roi (30)	2008	Plage	2000	155	78	Extraction en mer
Le Prado, Marseille (13)	1975, 1990 (*)	Plage	1300	150	115	Terrestre
Saint-Aygulf, Fréjus (83)	1989 (*)	Plage	500	200	400	Dragage
La Croisette, Cannes (06)	1962, 1964 (*)	Plage	1040	125	120	Terrestre
Calvi (2B)	2001, 2004	Plage	500	–	–	Dragage

Illustration 12 : Principaux rechargements de plage de plus de 100 000 m<sup>3</sup> en France ; information indiquée avec le symbole (\*) issue de (Hanson et al., 2002) pour les opérations d'avant 2000

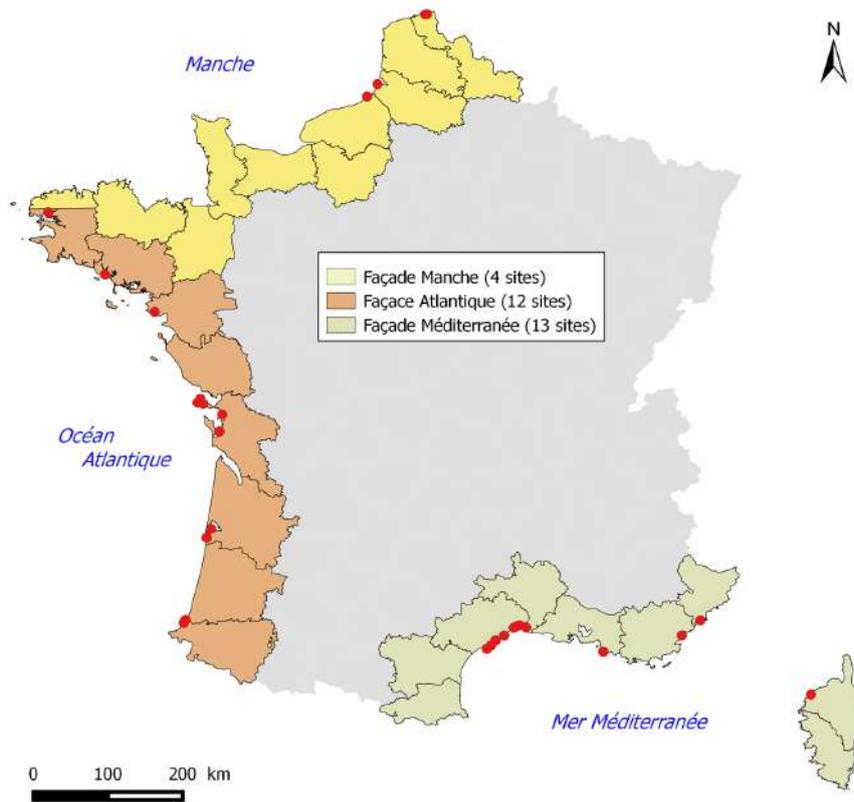


Illustration 13 : Localisation des principaux rechargements de plage en France métropolitaine de plus de 100 000 m<sup>3</sup>

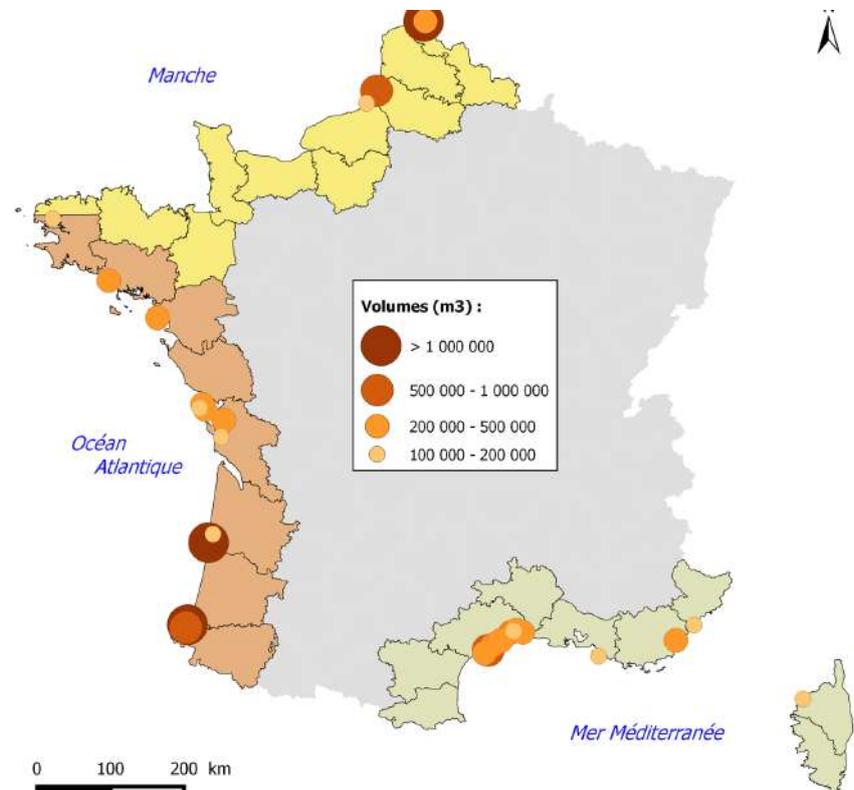
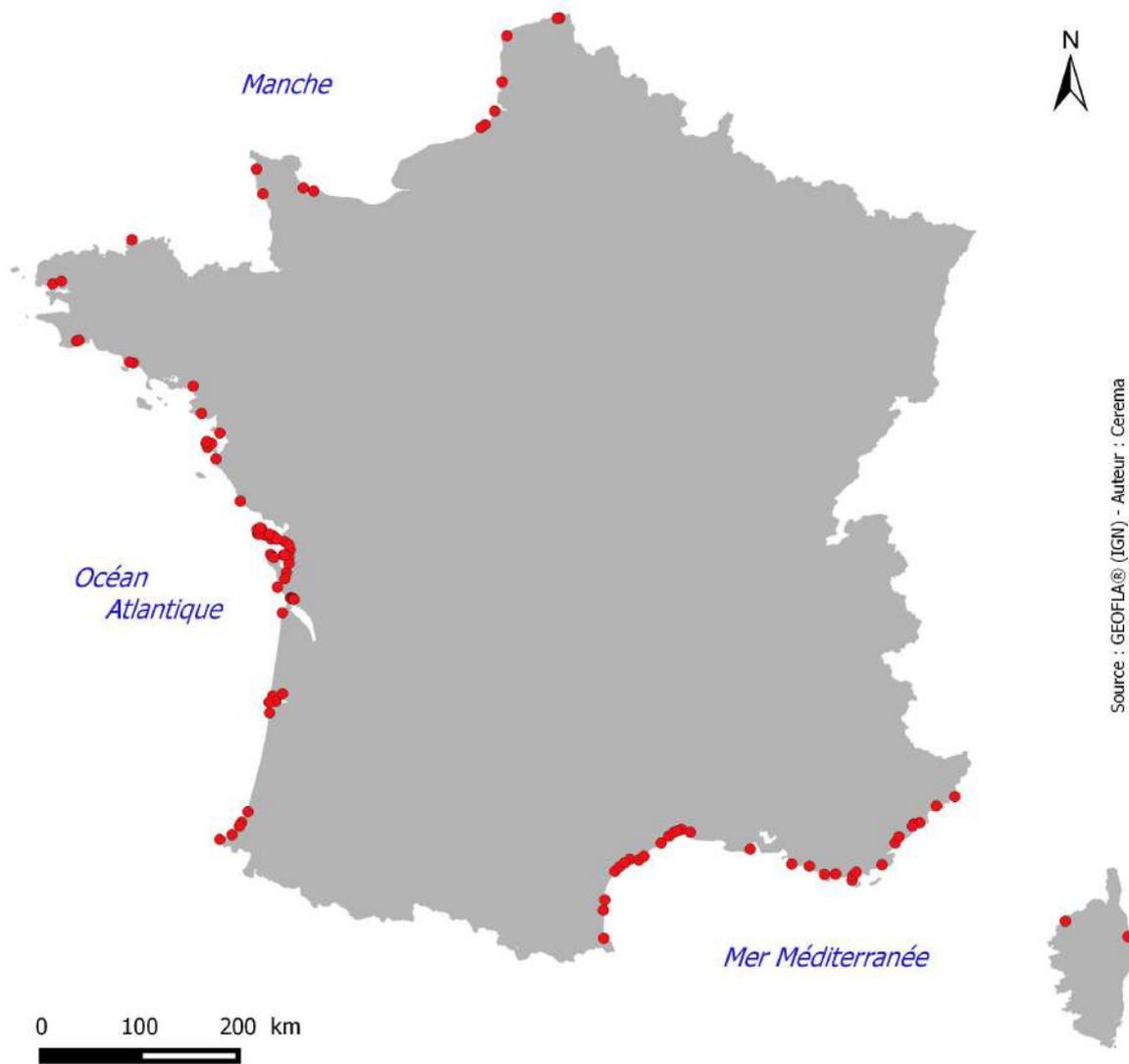


Illustration 14 : Volumes des principales opérations de rechargement de plage de plus de 100 000 m<sup>3</sup>

## Localisation des sites de rechargements de plage en France métropolitaine



Source : GEOFLIA® (IGN) - Auteur : Cerema

Illustration 15 : Localisation des rechargements de plage en France métropolitaine depuis 1960

REX de sites

### 2.1.5 Présentation de REX des sites suivants :

1. Châtelailon-Plage (17)
2. Digue des Alliés – Dunkerque (59)
3. Cayeux-sur Mer (80)
4. Golfe d'Aigues-Mortes (30, 34)
5. Lido de Sète à Marseillan (34)
6. Plage du Lido – Le Barcarès (66)
7. Grande plage de Gâvres (56)

## Châtelailon-Plage (17)

### Contexte

Le recul de la côte de Châtelailon atteignait, d'après les cartes anciennes, 200 m entre la fin du XVII<sup>ème</sup> et la fin du XVIII<sup>ème</sup> siècle. Cette érosion passait inaperçue sur une côte déserte, mais se révéla menaçante à la mise en place de la station. Dès 1857, des mesures sont prises pour ralentir l'érosion de la plage, par la construction de l'épi de l'Eperon à l'extrémité sud, puis d'une digue est implantée vers le nord pour protéger la voie ferrée établie en 1873.



À partir de 1925, un perré en béton et des enrochements sont prolongés le long du rivage, et viennent interrompre les échanges entre la plage et le cordon dunaire, et accentuer le départ de sédiments dus aux réflexions des vagues. L'installation d'une batterie d'épis en palplanches ne permettant pas non plus de contrer l'érosion, un nouvel enrochement est alors mis en place entre 1972 et 1980.

Bien que trois épis en Y soient implantés ensuite sur l'estran en 1987, les processus d'érosion de la plage se sont poursuivis, avec la disparition du sable sur le haut de plage, faisant chuter la fréquentation touristique de manière drastique à 4 000 visiteurs par an.



Illustration 16 : Couverture de Châtelailon-Plage par le satellite SPOT6 (2014) - Géoportail – Sources © Airbus Defense and Space, IGN, IRSTEA, CNES

## Mise en œuvre

Dans le but de retrouver son statut de station balnéaire, la municipalité décide en 1989 d'engager une importante opération de rechargement en sable de la plage. Les travaux se sont déroulés en plusieurs étapes de 1989 à 2015.

Entre 1989 et 1991, un rechargement de plage d'un volume de 350 000 m<sup>3</sup> de sable est étalé sur une longueur de 1200 m et une épaisseur de 4,5 m devant le perré. Le sable est extrait en mer par une drague flottante à 25 km au large par 25 m de profondeur sur le banc de Chassiron, entre les îles de Ré et d'Oléron. La granulométrie du sable d'emprunt est supérieure à celle du sable naturel de la plage. L'opération a coûté 3,8 millions d'euros.

En 1998, un premier rechargement périodique est effectué ; 110 000 m<sup>3</sup> de sable sont refoulés sur la plage centrale. Le sable est encore une fois extrait en mer, au niveau du chenal de la Perrotine, sur le site de Boyard, à proximité de l'île d'Oléron. L'opération a coûté 1,1 millions d'euros (Illustration 17). En 2004, 60 000 m<sup>3</sup> sont de nouveau déposée au nord de la plage. Les sédiments ont été prélevés sur la côte est de l'île d'Oléron pour un coût de 1,3 millions d'euros.

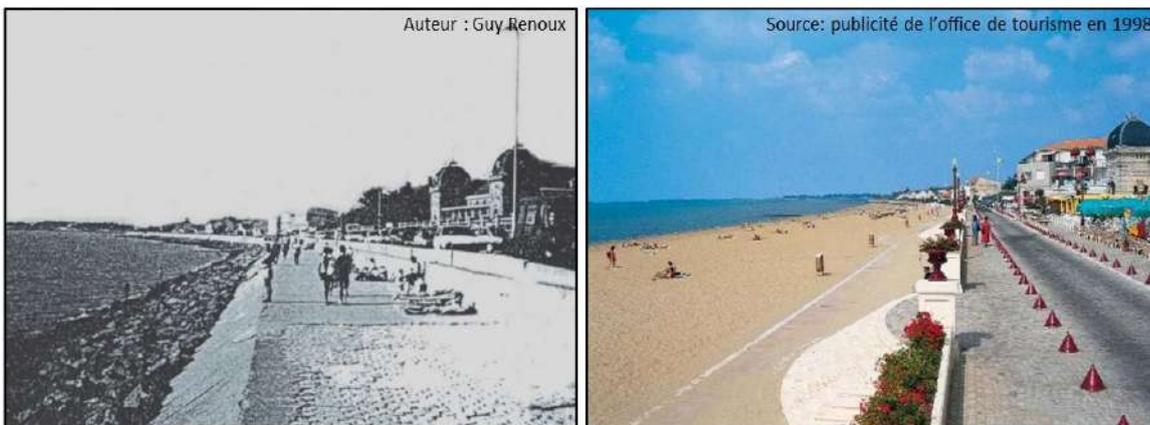


Illustration 17 : Le front de mer de Châtelailon-Plage dans les années 1980 et en 1998

Enfin, en 2015, un troisième rechargement périodique de 60 000 m<sup>3</sup> extraits en mer sur le site de Boyard, est effectué au nord de la plage. Un brise-lame de 220 m de long est construit en avant du rechargement afin de contribuer à la formation d'un tombolo. L'opération a coûté 3 millions d'euros dans son ensemble, dont 1,7 millions pour le rechargement (Illustration 18).

En plus des opérations de rechargements de plage, un remaniement de plage a lieu chaque année afin de contrer l'action de la dérive littorale. Le sable qui s'accumule derrière la jetée de l'Éperon, à l'extrémité sud de la plage, est ramené sur les parties centrale et nord de la plage. Cela représente un entretien annuel compris entre 30 000 et 76 000 €. De plus, pour piéger le sable transporté par le vent, des rideaux brise-vent sont mis en place durant l'hiver. Ils sont enlevés l'été et le sable retenu est étalé sur l'estran.



Illustration 18 : L'opération de rechargement de plage périodique de 60 000 m<sup>3</sup> extraits en mer (2015)

### Suivi scientifique

En 1988, le bureau d'études SOGREAH réalise l'expertise technique pour la première opération de rechargement de plage du site. En 1991, une étude des autorités publiques (Service maritime DDE 17) réalise un suivi de la plage post-rechargement. Le bureau d'étude Créocéan est chargé de réaliser l'étude d'impact relative au rechargement de plage de 1998 et de 2004.

En 2011, Créocéan a pour mission de réaliser une expertise et de faire des propositions d'aménagements de défense contre la mer ; il est à l'origine du projet combinant le rechargement de plage et la construction d'un brise-lames en 2014. En 2014, ARTELIA est en charge de l'étude d'impact et de l'autorisation des travaux de la dernière opération de rechargement.

### Évolution du site

L'évolution topographique de la plage de Châtelailon a été analysée précisément entre novembre 1998 et janvier 2001. Elle met en évidence une érosion de la partie centrale de la plage (- 74 000 m<sup>3</sup>), un engraissement de sa partie sud (+ 70 000 m<sup>3</sup>) et une absence de dépôt voire une tendance érosive (- 4 000 m<sup>3</sup>) dans la partie nord. Les déplacements sédimentaires se font donc naturellement du nord vers le sud de la plage sous influence de la dérive littorale.

Le remaniement de la plage (transport mécanique des sédiments du sud vers le nord) permet de limiter grandement les besoins de rechargement. La plage est toujours en érosion mais les sédiments, bloqués par la jetée de l'Eperon, ont tendance à rester dans la cellule hydrosédimentaire.

### Efficacité du rechargement

L'opération de rechargement de plage de 1989 a permis à la commune de Châtelailon de redynamiser son attractivité touristique, faisant remonter le chiffre de fréquentation à 44 000 visiteurs en 2000. D'autre part, la plage joue le rôle de zone tampon et protège la ville de la submersion marine en dissipant l'énergie des vagues.

En 1999, une importante tempête a provoqué l'inondation de 300 maisons au nord de la plage, en raison de la largeur de plage insuffisamment importante pour amortir les vagues. Cela illustre l'importance d'entretenir annuellement le rechargement de plage pour conserver son efficacité et lutter contre les effets du transit sédimentaire parallèle au rivage.

La méthode de rechargement de plage mise en place à Châtelailon-Plage apparaît bien mise en œuvre, avec une granulométrie des sédiments adaptée et des rechargements périodiques non négligés. De plus, les retombées économiques liées à la présence de la plage, compensent le coût important de la mise en place des rechargements périodiques et remaniements. Le brise-lames construit en 2015 doit également contribuer au ralentissement de l'érosion sur le secteur nord de la plage.

### Bibliographie

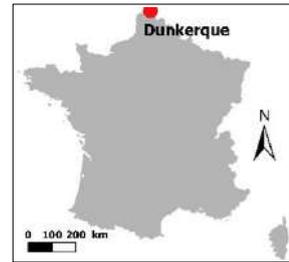
Artelia, 2013 ; Couton, 2002 ; Goumard, 2014 ; Paskoff et Prat, 2004.

## Digue des Alliés – Dunkerque (59)

### Contexte

La digue des Alliés, située entre la jetée Est du port de Dunkerque et le perré de Malo-les-Bains, sépare la mer du canal exutoire, unique lieu d'évacuation des eaux à la mer du système de canaux drainant la plaine flamande.

L'ouvrage de prévention de classe B, d'une longueur de 900 m construit en 1876, procure pour l'agglomération dunkerquoise une protection contre les crues du territoire des Watteringues et les submersions marines.



Compte tenu des ruines partielles suite aux événements de tempête de 1949 et 1953, des dégradations récentes et de la vulnérabilité des territoires protégés en arrière, l'État a confié la maîtrise d'ouvrage déléguée au Grand Port Maritime de Dunkerque (GPMD) pour mener à bien un projet de confortement de la digue des Alliés afin de disposer d'une meilleure protection vis-à-vis des événements de tempête.

Les études avant-projet, menées en 2011 et 2012, ont permis de caractériser la morphodynamique du site et d'aboutir à la préconisation d'une solution souple de rechargement massif en sable en pied de digue afin de dissiper les houles susceptibles de venir endommager l'ouvrage.

Cette solution s'inspire du guide méthodologique de gestion durable du trait de côte (MEEDM, 2010), et les campagnes de mesures topographiques montrent que l'érosion naturelle du site alimente la plage de Malo-les-Bains.

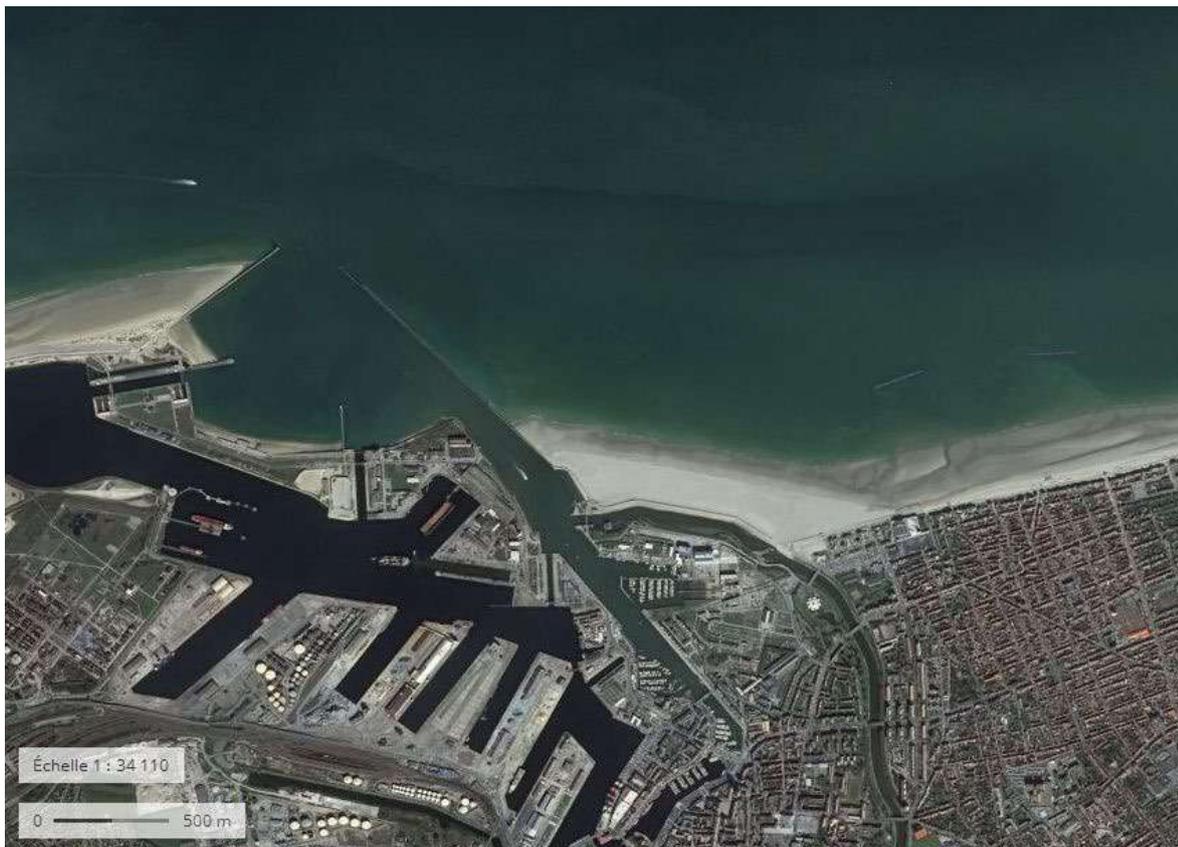


Illustration 19 : Couverture de Dunkerque Est et de la Digue des Alliés par le satellite SPOT6 (2014) - Géoportail - Données cartographiques © Airbus Defense and Space, IGN, IRSTEA, CNES



Illustration 20: Situation avant et après la première phase de rechargement en 2011 (300 000 m<sup>3</sup>)

### Mise en œuvre

Entre 2011 et 2014, un volume de 1,5 Mm<sup>3</sup> de sable a été réparti sur une longueur d'environ 1 200 m en pied de la digue des Alliés, correspond à une répartition de 1 250 m<sup>3</sup>/ml de plage. La première phase de rechargement réalisée en décembre 2011, avec le refoulement de 300 000 m<sup>3</sup> de sable constitua une couche d'usure dans l'attente de la deuxième phase, la principale réalisée début 2014, avec 1,2 Mm<sup>3</sup> d'apport de sable associé d'ailleurs à la réparation structurelle de l'ouvrage. Ce volume de sable, très conséquent, a été déterminé par une étude morphodynamique du bureau d'études DHI.

L'analyse des paramètres météo-marins extrêmes a montré qu'une tempête d'occurrence cinquantennale engendre des niveaux d'eau de +7 m à +8 m CM. Pour que la plage en avant de la digue des Alliés, soit en mesure de dissiper l'énergie d'un tel événement, le haut estran doit être à la côte +7,5 m CM sur une largeur de 30 m ; ce qui a conduit à un dimensionnement du rechargement en sable de 1,5 Mm<sup>3</sup>.



Illustration 21: Deuxième phase de rechargement en cours en 2014 (1,2 Mm<sup>3</sup>) de la digue des Alliés

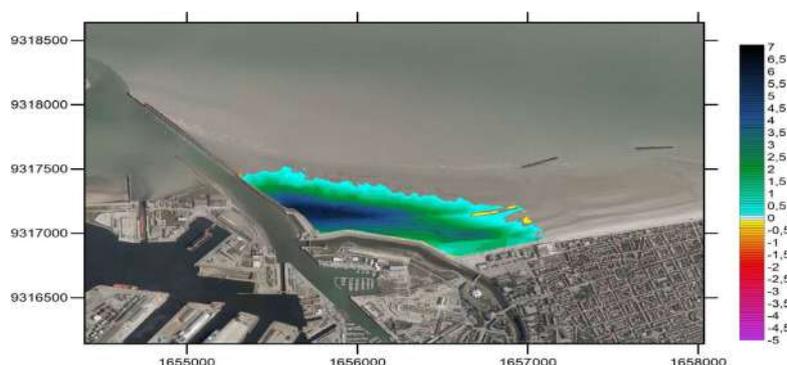


Illustration 22 : Deuxième phase de rechargement de 1,2 Mm<sup>3</sup> en 2014 (Source : GPMD)

Les sédiments d'apports ont été extraits en mer, dans deux zones d'emprunt en avant du port de Dunkerque. La granulométrie avait été étudiée au préalable, pour recharger avec des sédiments de taille supérieure à celle des sédiments naturels de la plage. Le sable est pompé par une drague aspiratrice en marche dans des profondeurs comprises entre 8 et 15 m CM.

Dans le but de pérenniser le rechargement et donc de maintenir le sable en place, 2 200 m de filets brise-vent ont été mis en place en 2014 sur le haut de la plage. Ce sont des filets synthétiques maintenus par des pieux en bois. En 2016, des oyats ont été plantés au niveau des accumulations sableuses qui se sont formées à proximité des rideaux brise-vent.



Illustration 23: Plantation d'oyats en 2016, de part et d'autre des filets brise-vent qui retiennent le sable

### Suivi scientifique

En 2011, le bureau d'études DHI a effectué les études d'avant-projet, d'affinage du plan masse définitif, comprenant la caractérisation morphodynamique du site à partir des modélisations numériques.

Les objectifs principaux étaient d'estimer le volume initial à mettre en place, de déterminer les caractéristiques adéquates du sable d'emprunt, d'estimer les pertes annuelles en sédiments et d'évaluer la dispersion des sédiments en phase travaux.



Illustration 24 : Rechargement de plage, filets brise vent et oyats, Digue des Alliés (Source : Cerema)

Le bureau d'études Géodunes a réalisé le suivi topographique du site entre 2012 et 2014 ; il est depuis effectué par l'Université du Littoral Côte d'Opale (ULCO) à travers des conventions CIFRE de suivi.

Tous les mois, neuf profils topographiques de la plage sont effectués au DGPS et des échantillonnages granulométriques sont prélevés deux fois par an, tandis que Géodunes poursuit, en tant que prestataire de l'ULCO, le suivi topographique et l'analyse morpho-sédimentaire du site.

### Évolution du site

Les études ont mis en évidence que l'érosion de la plage résultait davantage de mouvements longitudinaux liés à la dérive littorale que de mouvements transversaux dans le profil. La modélisation numérique a estimé que l'érosion résultante de la dérive littorale est de l'ordre de  $90 \text{ m}^3/\text{m}/\text{an}$  et que celle résultante d'une tempête d'occurrence cinquantennale a un impact pratiquement insignifiant sur la stabilité du rechargement en pied de digue (de  $10 \text{ m}^3/\text{m}$ ). Ce site est donc caractérisé par une évolution morphodynamique faible, même en cas d'événements de tempête importants.

Le taux d'érosion annuel avait été estimé dans l'étude DHI à  $45\,000 \text{ m}^3$  par an, mais un an après le rechargement, les mesures ont montré que seulement  $21\,000 \text{ m}^3$  de sédiments avaient été perdus. Ce volume est relativement faible, ne représentant que 1,4 % du volume total rechargé, alors que dans de nombreux projets, 20 % du stock est perdu dès la première année.

Des rechargements périodiques de  $225\,000 \text{ m}^3$  étaient initialement prévus tous les cinq ans mais cette période et ce volume sont basés sur des pertes plus importantes (estimés à  $45\,000 \text{ m}^3/\text{an}$ ). Si le taux d'érosion reste aussi faible que celui observé en 2015, le volume périodique de  $225\,000 \text{ m}^3$  ne serait nécessaire que tous les 10 ans. Ce résultat, qui apparaît très prometteur pour la suite, résulte peut-être des incertitudes d'estimations du modèle numérique, de conditions d'exposition relativement favorables pendant cette période et de l'influence des filets brise-vent et des oyats. La date du premier rechargement périodique n'est pas encore connue, les suivis terrains permettront de la déterminer, ainsi que d'estimer les volumes nécessaires.

### Efficacité du rechargement

Deux ans après son implantation, le rechargement assure son rôle de zone tampon. La digue demeure toujours hors d'atteinte des vagues lors des marées hautes de vives eaux. Sous l'action de la dérive littorale, une redistribution du sable s'opère progressivement vers l'est. L'étalement progressif du rechargement se traduit par un impact positif sur l'ensemble de la plage de Malo-les-Bains qui bénéficie de cet apport de sable.

Les mesures d'accompagnement qui ont été mises en place en décembre 2014 (filets brise-vent) permettent de retenir efficacement le sable et donc de stabiliser le haut de plage. Une accumulation de  $10\,000 \text{ m}^3$  est observable à leur niveau. Néanmoins ce dispositif devrait être étendu à l'ensemble du haut de plage devant la digue des Alliés pour éviter les envols de sable qui continuent de s'opérer au niveau la partie ouest de la plage (Illustration 25). Ces envols sont préoccupants puisque une partie du stock de sable fini par se retrouver de l'autre côté de la jetée de Malo, au fond du canal exutoire.



Illustration 25 : Pertes de sédiments sous l'effet de la déflation éolienne le long de la digue des Alliés, dispositif expérimental (Dunkerque Port) pour limiter les envols de sable (Source : Cerema)

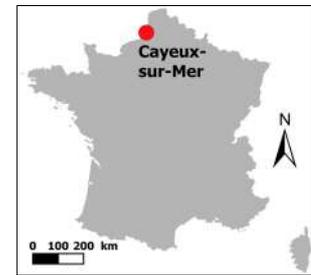
### Bibliographie

Bogucki, 2014 ; Cartier et al., 2014 ; Grunnet et Tessier, 2012 a et b ; Spodar, 2016.

## Cayeux-sur-Mer (80)

### Contexte

La commune de Cayeux-sur-Mer est située sur le secteur des Bas-Champs, délimité au nord-est par l'embouchure de la Somme et au sud-est par les falaises du Pays de Caux. La zone basse est protégée par un cordon de galets qui constitue l'unique rempart face à la mer. Les actions marines (vent, houle, courant) sont importantes dans le secteur, il en résulte une forte dérive littorale en direction du nord-est. Les galets du cordon sont donc transportés dans cette direction mais comme les apports naturels sont très faibles, les pertes ne sont pas compensées et l'érosion est importante.



La réalisation des jetées portuaires de Dieppe, Penly et Le Tréport ont interrompu presque totalement le transit de matériaux et donc réduit massivement les apports venant du sud. En l'état naturel, les houles faisaient cheminer les galets vers le nord à raison de 20 000 à 30 000 m<sup>3</sup>/an contre seulement 2 000 m<sup>3</sup>/an aujourd'hui.

Lutter contre l'érosion du cordon est indispensable puisque de nombreux enjeux de l'arrière-pays sont situés en zone submersible. Un risque important d'ouverture de brèches et d'intrusion marine est présent comme en témoigne les submersions marines de 1972, 1977, 1984 et 1990.

Pour que le cordon littoral assure son rôle de digue imperméable, des moyens de défense sont continuellement mis en œuvre depuis les années 1960. Afin de freiner les pertes de galets, de nombreux épis ont été construits sur le cordon, et des rechargements sont effectués dans les casiers.



Illustration 26 : Couverture de Cayeux-sur-Mer par le satellite SPOT6 (2014) - Géoportail - Données cartographiques © Airbus Defense and Space, IGN, IRSTEA, CNES

### Mise en œuvre

Le premier épi du cordon de galet a été construit en 1966, il y en avait quatre-vingts en 2000 et plus de cent aujourd'hui. Ce sont majoritairement des épis en palplanches de type plongeant de 80 à 90 m de long, espacés de 90 m les uns des autres.

La dernière opération majeure, entreprise par le Syndicat Mixte Baie de Somme (maître d'ouvrage des travaux), s'est déroulée entre 2013 et 2015. Au cours de ces deux années, 24 nouveaux épis sont mis en place sur un linéaire côtier de 2 200 m, et entre chaque épi, des sédiments sont refoulés. Ce rechargement de 390 000 m<sup>3</sup> est essentiellement composé de galets dont 40 % ont une granulométrie supérieure à 40 mm.

Les galets proviennent de différentes origines, car il est plus difficile de trouver des sources d'alimentation conséquentes pour ce type de matériaux que pour le sable (Illustration 27). Une partie provient de la flèche littorale de la Mollière, située au nord-est de Cayeux-sur-Mer, le reste provient des carrières terrestres de Crotoy et du Hourdel. L'industriel SILMER contribue au rechargement du cordon de galets, de par son activité de criblage de galets sur le domaine public maritime (flèche de la Mollière), à l'est de Cayeux-sur-Mer.

### Suivi scientifique

Des suivis ont été réalisés en 1994, 1999, 2001, 2004 et 2010. Des levés topographiques du cordon de galets, des levés bathymétriques du bas estran sableux, et la granulométrie des sédiments ont ainsi été étudiés à plusieurs reprises. Néanmoins, le bureau d'étude Créocéan soulignait en 2011 que le manque de suivis réguliers dans le temps ne permettait pas une bonne estimation de l'évolution de l'estran.

Il est par exemple difficile d'évaluer la variabilité saisonnière qui affecte le cordon de galets. Depuis 2013, deux fois par an, la limite sable-galets (ligne de flexure) est mesurée au GPS. Le suivi et l'entretien des épis est assuré par le Pôle Gestion du Littoral de la DDTM de la Somme.

### Évolution du site et efficacité du rechargement

Sur le cordon de Cayeux-sur-Mer, c'est donc une action combinée qui est réalisée depuis plusieurs décennies, avec une méthode souple de rechargement de galets combinée à une méthode rigide d'épis.

En raison de la dynamique élevée du transit littoral, le rechargement de plage seul ne serait pas efficace sur le site, car considéré comme étant non pérenne et onéreux sur le long terme. Les épis permettent de limiter les pertes de galets dans le temps, qui sont divisées par quatre. À ce jour, le recul du trait de côte n'étant pas une option socialement acceptée, il ne semble pas y avoir de meilleure alternative à la combinaison des épis et des rechargements de plage.

Les galets qui sont déposés sont caractérisés par une granulométrie légèrement supérieure à celle des galets naturels de la plage. Cela permet de réduire le transit littoral, mais ils entraînent aussi une augmentation de la pente de la plage (Illustration 28). Cette pente plus forte entraîne une réflexion des vagues sur les galets ainsi qu'un abaissement du niveau moyen du bas estran sableux (Illustration 29).



Illustration 28 : Aval dérive d'un épi à Cayeux-sur-Mer en 2016



Illustration 29 : Profil de la plage de Cayeux-sur-Mer au niveau de l'amer sud

Les galets sont acheminés mécaniquement sur le site où ils sont régalés sur le haut de la plage, laissant le bas des casiers insuffisamment remplis. Pour améliorer l'efficacité du rechargement, il faudrait mieux répartir les galets dans les casiers.

Globalement il est difficile de parler d'efficacité du rechargement, le transit littoral, bien que ralenti par les épis, continue de s'opérer et chaque année le bilan sédimentaire de la plage est négatif. Ce constat ne pourra pas changer du fait de la sectorisation du littoral qui modifie profondément la dynamique sédimentaire du secteur et donc les apports naturels en sédiments.

La dernière submersion marine remontant à plus de 25 ans (1990), les méthodes déployées pour le maintien du cordon de galets et l'absence de tempête majeure significative ont permis la protection du secteur des Bas-Champs. Néanmoins, dans le contexte actuel du changement climatique, l'élévation du niveau marin et la probable augmentation de l'intensité et de la fréquence des tempêtes auront pour effet d'accélérer l'érosion. La méthode utilisée atteindra alors ses limites et à moyen terme, l'option du repli stratégique se devra d'être envisagée.

#### Bibliographie

Bastide et al., 2005 ; Créocéan, 2011.

## Golfe d'Aigues-Mortes (30, 34)

### Contexte

Le littoral du Golfe d'Aigues-Mortes connaît une érosion prononcée depuis plus de trente ans. D'après les études réalisées par Artelia, la plage du Petit-Travers à Carnon a vu son trait de côte reculé de 30 m entre 1992 et 2002, soit un recul moyen de 1,5 m/an. L'érosion dans le Golfe se justifie en grande partie par la construction en 1977 d'une digue d'arrêt des sables sur la commune du Grau-du-Roi. Cette digue de la plage de l'Espiguette permet d'éviter l'ensablement des chenaux qui mènent à Port-Carmargue, premier port de plaisance d'Europe, mais en interrompant le transit sédimentaire dû à la dérive littoral le long du rivage, elle participe largement à l'érosion des plages du Golfe. L'image Lidar suivante présente l'accumulation de sable à l'amont dérive, avec la flèche sous-marine de l'Espiguette, qui se forme progressivement à l'aval de l'ouvrage (Illustration 30).

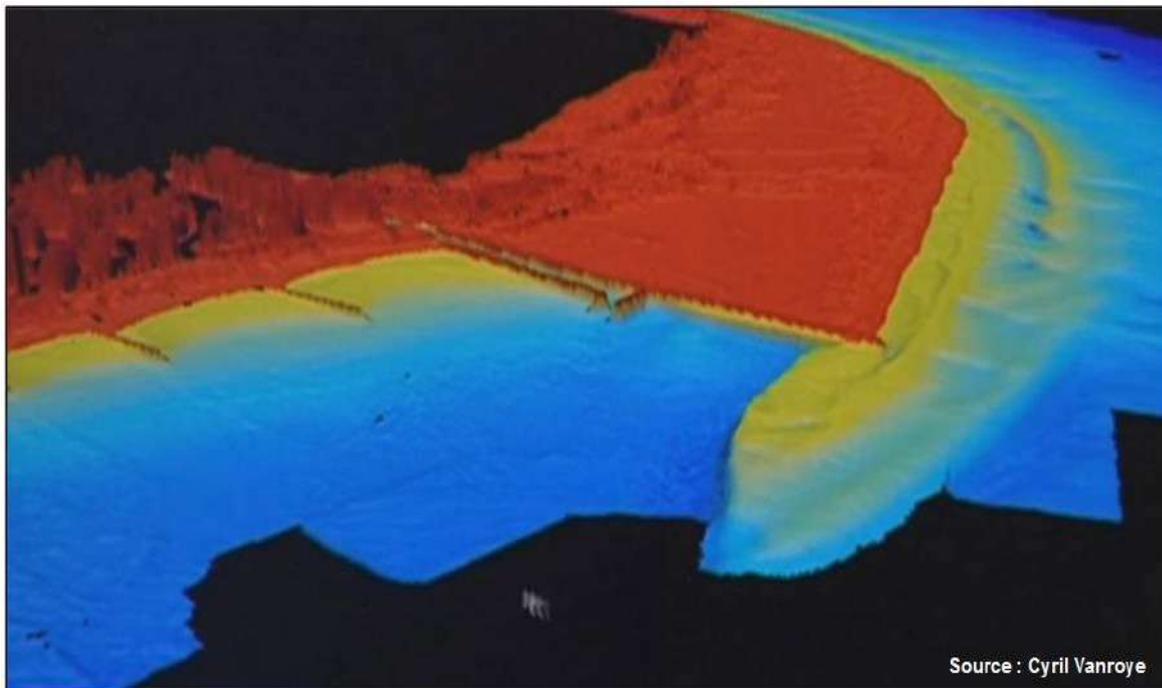


Illustration 30 : Image Lidar montrant l'accumulation importante de sable à l'amont dérive de la digue de l'Espiguette (en rouge) et la flèche sous-marine à l'aval dérive (en jaune et vert)

Afin d'intervenir sur la cellule hydrosédimentaire de façon cohérente, les communes de Palavas, Carnon, La Grande-Motte et le Grau du Roi se sont regroupées et ont constitué un Syndicat Intercommunal à Vocation Multiples (SIVOM) compétant en matière de gestion du trait de côte. Au cours de l'hiver 2007, il est constaté une nouvelle fois un recul inexorable des plages et un approfondissement des petits fonds. Pour y remédier, une vaste opération de rechargement de plages a été lancée, afin de conserver l'attrait touristique des plages du Golfe et de protéger les habitations de la submersion marine. Le SIVOM est maître d'ouvrage de ce projet évalué à 700 000 €, avec une maîtrise d'œuvre du bureau d'études Artelia.

### Mise en œuvre

L'opération consiste à rétablir le transit sédimentaire de manière artificielle en prélevant une partie du stock bloqué au niveau de la digue de l'Espiguette et en le répartissant sur les plages du fond du Golfe. Entre janvier et avril 2008, 1,1 Mm<sup>3</sup> de sable est prélevé au niveau de la flèche sous-marine par une drague aspiratrice en marche et acheminé jusqu'aux différentes plages pour être directement refoulé.

### Méthodes souples

Retour d'expériences pour le littoral

Juin 2023

Les plages sont ainsi rechargées avec le sable qui, en l'absence de la digue, transiterait directement sur les rivages du Golfe d'Aigues-Mortes. Les quatre plages suivantes sont concernées par le rechargement :

- plage du Petit-Travers : 410 000 m<sup>3</sup> répartis sur 3 400 m ;
- plage de Carnon-Est : 205 000 m<sup>3</sup> répartis sur 1 800 m ;
- plage de Palavas : 300 000 m<sup>3</sup> répartis sur 3 000 m ;
- plage du Boucanet : 155 000 m<sup>3</sup> répartis sur 2 000 m.

Le rechargement de plage est accompagné de diverses opérations comme la gestion du cordon dunaire de la plage du Petit-Travers, l'allongement d'un brise-lame sur la plage de Carnon-Est et la réalisation de trois épis sur la plage du Boucanet. C'est donc la méthode combinée, alliant méthode souple et méthode rigide de protection du trait de côte, qui a été choisie par le SIVOM pour ces sites.

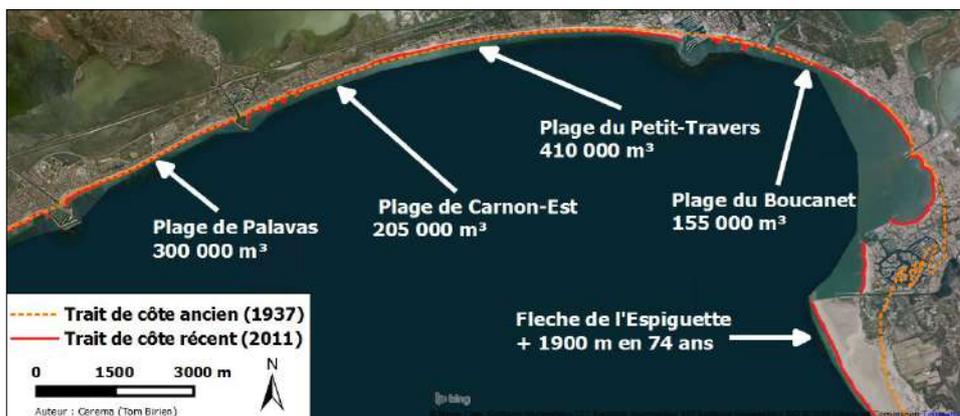


Illustration 31 : Opération de rechargement de plage dans le Golfe d'Aigues-Mortes



Illustration 32 : Conduit de refoulement des sédiments utilisé lors de l'opération de rechargement

### Suivi scientifique

Suite à ces travaux, la DREAL Languedoc-Roussillon a mis en place des relevés topo-bathymétriques des plages rechargées effectués chaque année par l'EID Méditerranée.

### Évolution du site

Pour mesurer l'efficacité du rechargement, les volumes de sable sont calculés chaque année et comparés avec l'état initial. Entre 2008 et 2012, la plage de Palavas a perdu seulement 28 % du stock rechargé initialement, cette dernière étant protégée par des ouvrages, les pertes latérales sont limitées.

Au contraire, la plage de Carnon-Est est la plage la plus touchée par l'érosion puisque 53 % du volume rechargé en 2008 était sorti du système en 2012. La plage du Petit-Travers enregistre des pertes globales de l'ordre de 34 % mais l'évolution de la plage est hétérogène avec une érosion marquée à l'ouest de la plage et une accrétion, qui ne compense pas les pertes, à l'est de la plage. Enfin la plage du Boucanet a perdu 40 % du stock mis en place quatre ans auparavant avec encore une fois une grande disparité entre l'ouest (- 50 %), le centre (- 16 %) et l'est (- 100 %) de la plage.

#### Efficacité du rechargement

Sur le secteur du Golfe d'Aigues-Mortes, les causes de l'érosion demeurent, le transit sédimentaire parallèle au trait de côte continue d'être bloqué par la digue de l'Espiguette. Les plages subissent donc des pertes qui ne sont jamais compensées par des apports naturels. Cette opération de rechargement effectuée en 2008 permet de préserver les plages durant quelques années, mais des rechargements périodiques fréquents seront nécessaires pour les entretenir. La durée de vie des rechargements et donc l'efficacité du procédé pourrait être améliorée si la granulométrie du matériau d'emprunt était plus grossière. Les analyses granulométriques montrent que le sable d'apport a une granulométrie inférieure (diamètre médian de 170 à 190  $\mu\text{m}$ ) à celle du sable des plages rechargées (diamètre médian de 230 à 260  $\mu\text{m}$ ). Il est avéré que lorsque le sable d'emprunt est plus fin que le sable naturel, les pertes sont très importantes dès la première année et se poursuivent les années qui suivent à un rythme important.

#### Bibliographie

Clercq-Roques, 2014 ; Vanroye, 2009 ; Vanroye et Barthaz, 2010.

## Lido de Sète à Marseillan (34)

### Contexte

Le lido de Sète à Marseillan, qui s'étend sur 12 km de long et jusqu'à 2 km de large, renferme le plus grand plan d'eau de la région Languedoc-Roussillon, l'étang de Thau, d'une superficie de 7 500 hectares. Dès les années 1950, les aménagements touristiques émergent sur le site. Aujourd'hui, le lido se compose d'une plage, d'une dune, d'une route départementale, d'une voie ferrée, d'un camping et d'une exploitation vinicole. Depuis plusieurs décennies, la combinaison de différents facteurs est à l'origine d'une érosion chronique de la plage.



Les apports naturels en sédiment ont diminué à cause de la sectorisation du littoral (épis, digues, arasement de la dune, ...) et de la baisse des apports du Rhône, liée à la construction de barrages hydrauliques. La dérive littorale est importante dans le secteur et les départs en sédiments ne sont plus compensés par les apports, le bilan sédimentaire est largement déficitaire. Depuis les années 1970, le recul du trait de côte menaçait les aménagements côtiers et les activités du Lido. Des portions de route ont notamment été endommagées au cours d'épisodes tempétueux, comme ce fut le cas en 1982. Un important projet de réhabilitation du lido est lancé en 2003.



Illustration 33 : Vue du projet d'aménagement du lido de Sète à Marseillan, 2005 (Source : Thau agglo)

### Mise en œuvre

Cette opération d'envergure, la plus importante de la façade méditerranéenne française, doit permettre de lutter efficacement contre l'érosion du littoral. Elle comprend notamment le recul stratégique de la route départementale (2007-2009), un rechargement de plage conséquent, l'implantation d'un système atténuateur de houles et d'un dispositif de drainage de plage (2009-2015). À la place de l'ancienne route côtière, le cordon dunaire doit être reconstitué.

Le coût de l'opération de rechargement de plage est chiffré à 4,3 millions d'euros mais le budget global de l'opération de sauvegarde du lido est de 55 millions d'euros, notamment dû au déplacement de la route départementale. Le projet fut financé par l'Europe (35 %), Thau Agglo (22 %), la région Languedoc-Roussillon (15 %), le département (15 %) et l'État (13 %).

Le rechargement massif en sable s'est déroulé fin 2014. Un volume de 510 000 m<sup>3</sup> a été réparti sur 2 200 m, 410 000 m<sup>3</sup> de sable furent répartis sur la plage émergée, afin de porter sa largeur à 70 m, et 100 000 m<sup>3</sup> furent injectés dans les petits fonds pour reconstituer un stock de sable au niveau de la plage sous-marine. La dérive littorale se déplaçant du nord-est vers le sud-ouest, la majorité du sable fut déposé au nord-est de la zone. Il s'agit de laisser faire les processus naturels des actions marines

redistribuer le sable. Cette technique a vocation à limiter les pertes en sédiment ainsi que les déplacements mécaniques des bulldozers sur la plage.

Le sable a été extrait à l'aide d'une drague aspiratrice au niveau de la flèche sous-marine de l'Espiguette, à proximité du Golfe d'Aigues-Mortes. Cette flèche est située à 40 km du lido de Sète et le transport du sable fut directement réalisé par voie maritime (Illustration 34).



Illustration 34 : Mise en place de la canalisation de refoulement sur la plage du lido de Sète à Marseillan

#### Suivi scientifique

C'est le BRGM qui est en charge du suivi du site. Des mats sont équipés de caméras afin de prendre des clichés réguliers de la plage, ces images sont ensuite ortho-rectifiées pour permettre un meilleur suivi de l'évolution du trait de côte. Le BRGM doit aussi mesurer l'efficacité des systèmes atténuateur de houles et de drainage de plage. Si un de ces deux systèmes s'avère particulièrement efficace, il sera étendu à l'ensemble du site.

#### Évolution du site et efficacité du rechargement

Le rechargement permet à la plage d'atteindre localement une largeur de plage de 94 m puis, une fois le sable remanié et stabilisé, une largeur moyenne de 70 m.

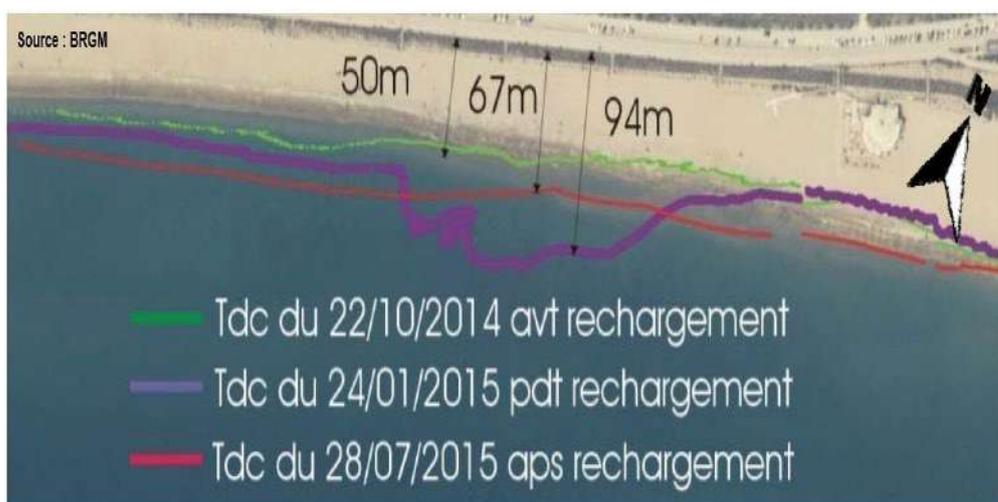


Illustration 35 : Evolution de la largeur de la plage du lido ; opération de rechargement de 2015

Le trait de côte est resté stable durant les tempêtes de janvier et février 2015. Par contre, durant la tempête de mars 2015, un recul significatif de la plage est constaté. Le sable s'est en fait déplacé au

niveau de l'avant-côte et une partie de ce stock remontera sur la plage dans les jours qui suivent. Après cet événement modéré, le trait de côte redevient stable, traduisant d'un nouvel équilibre post-rechargement.

Les tempêtes de janvier et février 2015 n'ont pas influencé de manière significative la position du trait de côte mais, comme attendu, elles ont contribué au décalage du stock de sédiment en direction du sud-ouest. Ces sédiments restent sur la plage du lido, ils ne sont donc pas perdus pour la cellule sédimentaire. La tempête de mars 2015 a entraîné un recul important du trait de côte, suivi d'une reconstruction rapide et naturelle.

Ces événements de tempête ont permis de se rapprocher d'un état d'équilibre de plage, car le sable avait initialement été juste déposé dans un secteur. Le volume et la pente de la plage ne correspondaient pas à la morphodynamique du site, d'où cette redistribution rapide des sédiments. Six mois après en juin 2015, une partie du stock de sable mis en place s'est déplacé de 1500 m vers le sud-ouest de la plage, témoignant d'une dérive littorale importante.

### **Bibliographie**

Balouin et al., 2016a et b ; Guiraud, 2013 ; Thau Agglo, 2015.

## Plage des Miramars – Le Barcarès (66)

### Contexte

La commune du Barcarès s'est construite sur un cordon littoral qui abrite l'étang de Leucate. Les jetées du port perturbent le transit sédimentaire, résultant d'une dérive littorale orientée du sud vers le nord. L'accumulation de sédiments à l'amont dérive des digues, entraîne un déficit sédimentaire important à l'aval dérive. Les enjeux sont importants dans ce secteur très urbanisé et pour les protéger, des épis et des brise-lames en enrochements ont été érigés (Illustration 36). Ils ne suffisent cependant pas à protéger les plages des Miramars et du Lido soumises à de violents coups de mer.

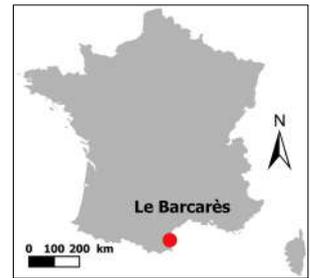


Illustration 36 : Plages du Lido, des Miramars en érosion au nord et port du Barcarès qui bloque le transit littoral avec l'accumulation sédimentaire au sud

### Mise en œuvre

Dès 2003, la commune a démarré des études pour établir un diagnostic et proposer des solutions d'aménagement pour lutter contre l'érosion. La Communauté d'Agglomération Perpignan Méditerranée, qui a repris en 2010 la compétence en matière de gestion durable du littoral, a proposé un schéma directeur de protection du Barcarès approuvé en février 2011 ; cependant l'Etat a demandé des études complémentaires afin qu'un nouveau projet soit établi et qu'une procédure d'autorisation réglementaire spécifique soit engagée,

C'est pourquoi, par l'intermédiaire du cabinet conseils SAFEGE, la Communauté d'Agglomération, maître d'ouvrage, a élaboré un scénario de rechargement de plage, avec des propositions de solution pour protéger les plages des Miramars et du Lido. Les objectifs des études réalisées dès 2011 et présentées plus récemment en février 2016, sont de rétablir le transit sédimentaire en utilisant temporairement le procédé du by-pass hydraulique et de prendre en compte dans l'aménagement proposé le cadre réglementaire (loi sur l'Eau, étude d'impact, évaluation des incidences Natura 2000, ...).





Illustration 38 : Opérations de rechargement de plage en 2012, Les Miramars (Le Barcarès.fr)

Pour aller dans le sens du rétablissement du transit sédimentaire, les options étudiées et présentées en réunion publique en février 2016, conduisent à retenir une solution durable, où les épis en enrochement de la plage des Miramars devraient être démantelés dans les années qui viennent, et leurs matériaux seront utilisés pour réaliser des brise-lames émergents parallèles à la plage. Ces structures, qui perturbent moins la dynamique sédimentaire, devraient permettre d'accroître la durée de vie des stocks rechargés. D'autres opérations de rechargement de plage, utilisant le système de by-passing hydraulique sont prévues à partir de 2020.

#### Suivi scientifique

Le bureau d'étude SEANEO qui a réalisé, en 2013, le dossier réglementaire pour l'extraction indique que les éléments de diamètre inférieur à celui du sédiment naturel ne pourront pas être mis en place sur les plages pour des raisons de stabilité du profil. Avant d'effectuer le rechargement, le bureau d'étude IDRA Environnement a procédé à des analyses granulométriques du sable des zones d'extraction. La médiane des échantillons prélevés est comprise entre 840  $\mu\text{m}$  et 1335  $\mu\text{m}$ , tandis que la médiane du sable naturel de la plage est comprise entre 500  $\mu\text{m}$  et 1050  $\mu\text{m}$ . Le sable extrait est donc plus grossier que le sable naturel de la plage, ce qui est favorable à sa stabilité.

#### Efficacité

Les opérations de rechargements, permettent de rétablir une partie du transit littoral interrompu par les jetées du port. Ces actions de by-passing devront néanmoins se poursuivre dans le temps pour limiter l'érosion du littoral à l'aval dérive du port du Barcarès. D'un point de vue technique, la mise en place d'un dispositif assurant le by-passing hydraulique automatisé, comme à Capbreton, serait judicieux, mais en raison du coût de l'installation et des volumes relativement faibles à transférer chaque année, la méthode jusqu'ici utilisée est probablement la plus rentable.

#### Bibliographie

Dalias et al., 2013 ; IDRA Environnement, 2011 ; SAFEGE, 2011.

## Grande plage de Gâvres (56)

### Contexte

La presqu'île de Gâvres, reliée au continent par un tombolo de plus de 5 km entre Porh-Guerh et Linès, est très exposée aux aléas d'érosion côtière et de submersion marine. Large de 800 m à son centre, au niveau de Kersahu, le tombolo se rétrécit jusqu'à 50 m au niveau de l'enceinte militaire située à l'entrée du bourg. Le trait de côte de la Grande Plage et de l'anse de Goërem est artificialisé par des ouvrages longitudinaux de protection atteints par la mer à marée haute (Illustration 39).

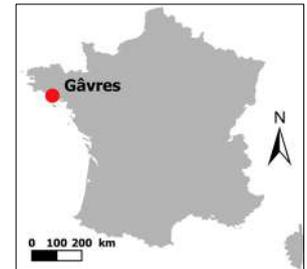


Illustration 39 : Presqu'île de Gâvres reliée au continent par son tombolo de 5 km

La tempête du 10 mars 2008 est à l'origine de nombreux dégâts sur la presqu'île. La conjonction de vents forts (plus de 120 km/h) et de fortes houles, avec un coefficient de marée de 106 et une surcote de 70 cm, a engendré la submersion marine d'un secteur urbanisé, inondant quatre-vingts maisons, en arrière de la Grande Plage et dégradant les murs de protection sur les deux sites.

Cet événement majeur a conduit l'agglomération de Lorient à réaliser une opération de prévention des risques littoraux, qui a fait l'objet de propositions concrètes de travaux des secteurs du Goërem et de la Grande Plage. Les études réalisées ont permis d'analyser la morphodynamique des sites, de définir les enjeux sensibles et les opérations de protection contre l'érosion et la submersion marine pour assurer la sécurité des personnes et des biens.

### Mise en œuvre

L'aménagement retenu a permis de créer de nouveaux secteurs de plage en équilibre, en réalisant des épis et des opérations de rechargements de plage, afin de stopper la fuite de sédiments vers l'est sur la Grande Plage et vers le nord sur l'anse de Goërem. Des rechargements d'entretien à l'est de l'épi oriental (de l'ordre de 35 000 m<sup>3</sup>/10 ans) de la Grande Plage de Gâvres ont été également préconisés. Cet aménagement répond à la double problématique d'érosion et de submersion marine, en garantissant une largeur d'estran suffisante qui empêche le franchissement du trait de côte par les houles de tempête.



Illustration 40 : Grande Plage de Gâvres en 2006 et ouvrages longitudinaux de protection (Cerema)



Illustration 41 : Grande Plage de Gâvres en 2015 suite au rechargement en sable de 2012 (Cerema)

En 2012, un rechargement de plage de l'ordre de 215 000 m<sup>3</sup> est mis en place et réparti entre la Grande Plage et l'anse de Goërem. Le sable est extrait de la passe ouest du port de Lorient par une drague aspiratrice en marche, transporté par voie maritime, puis refoulé et régalié mécaniquement sur les plages. Le rechargement est combiné à la mise en place de deux épis en bois (150 et 170 m) sur la grande plage et deux épis en enrochements (70 et 85 m) sur la plage du Goërem. Les 168 000 m<sup>3</sup> de sable déposés sur la Grande plage, se répartissent en un volume de 109 000 m<sup>3</sup> pour le secteur à l'ouest de l'épi ouest et 58 500 m<sup>3</sup> entre les deux épis. L'ensemble de l'opération a eu un coût d'environ 1,8 millions d'euros.

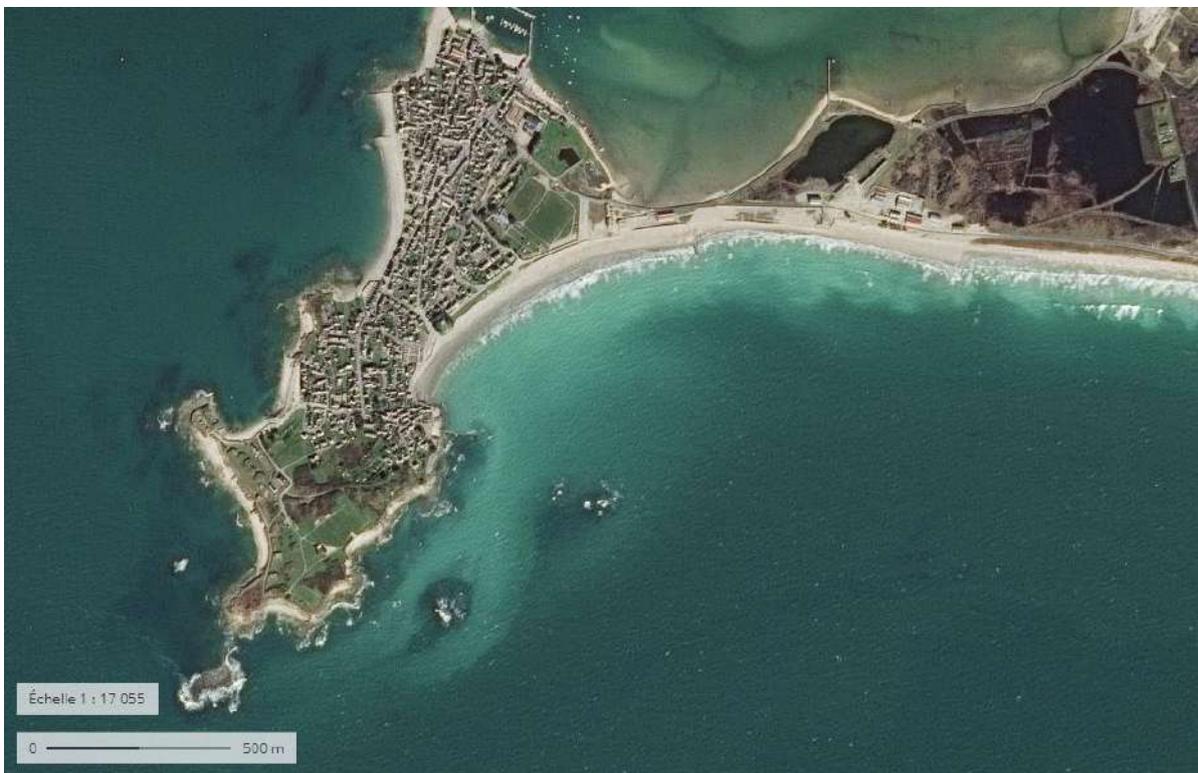


Illustration 42 : Couverture de la presqu'île de Gâvres (rechargement sur la Grande Plage avec la présence de deux épis transversaux et sur le secteur de l'Anse de Goërem) par le satellite SPOT6 (2014) - Géoportail - Données cartographiques © Airbus Defense and Space, IGN, IRSTEA, CNES

### Suivi scientifique

Depuis la fin des opérations à l'automne 2012, le laboratoire de Géosciences marines et géomorphologie du littoral (GMGL) de l'Université de Bretagne Sud (UBS) effectue des relevés topographiques.

### Évolution du site

Les résultats mettent en avant l'importance marquée de la saisonnalité entre les périodes d'érosion et d'accrétion de la plage.

À l'amont dérive de l'épi situé le plus ouest de la Grande Plage (au niveau de l'isthme), c'est-à-dire dans la zone rechargée, la période d'accrétion correspond aux mois printaniers et estivaux. Par contre, à l'aval de ce même épi, il n'y a pas de réelle tendance à l'accrétion et l'érosion est marquée en hiver, notamment au niveau du pied de dune. Cet épi ne présente donc pas d'effet significatif sur les variations altimétriques des profils de plage étudiés par le GMGL ; en revanche, l'épi situé plus à l'est engendre une forte accrétion du haut de plage à l'amont dérive, et une forte érosion à l'aval dérive.

### Efficacité du rechargement

On remarque que les phénomènes d'accrétion et d'érosion ne sont pas visibles sur l'épi situé le plus à l'ouest. Il apparaît un espace vide entre l'épi en bois, qui a été dégradé sur une section de 50 m par la tempête d'avril 2012, et l'épi en enrochement qui a été réalisé ensuite par la commune. Les sédiments peuvent passer au travers de cet espace vide, empêchant le maintien des sédiments en haut et milieu de plage à l'amont dérive de cet épi transversal (Illustration 43).



Illustration 43 : Epi situé le plus ouest de la Grande Plage de Gâvres réalisé initialement en bois et reconstruit en enrochements après l'événement de tempête d'avril 2012, présentant un espace vide en milieu de plage, empêchant le maintien des sédiments à l'amont dérive - juin 2015 (Source : Cerema)

Le rechargement de la Grande Plage est délimité plus à l'est par un second épi, constitué en bois, qui interrompt les échanges entre l'ouest et l'est de la Grande Plage. Un effet érosif se produit directement à l'aval dérive de l'épi bien visible (Illustration 44 et 98), malgré la présence d'un enrochement.

Si on s'en tient au volume, le rechargement est efficace, car le sable reste en place mais la transition brutale entre la zone rechargée et la zone adjacente, peut être remise en question dans ce secteur ou un rechargement plus homogène, protégeant l'ensemble de la zone, sera préférable, mais à un coût beaucoup plus élevé.



Illustration 44 : Second épi en bois, situé le plus à l'est de la Grande Plage de Gâvres en 2015 (Source : Cerema)



Illustration 45 : Érosion à l'aval dérive de l'épi en bois, situé le plus à l'est de la Grande Plage de Gâvres en 2015 (Source : Cerema)

### Bibliographie

ANCORIM, 2009 ; Cadot, 2011 ; GMGL, 2015 ; MEEDM, 2010.

## 2.2 Recommandations

### 2.2.1 Conditions d'efficacité et limites

Avant de réaliser une opération de rechargement, il est essentiel d'étudier la morphodynamique du site concerné et de déterminer les causes du déséquilibre sédimentaire de la plage. Des méthodes de dimensionnement, présentées dans les guides de recommandations suivants (CETMEF, 1998), (Dean, 2000) et (USACE, 2003), permettront d'estimer le volume nécessaire à mettre en place initialement ainsi que les apports périodiques ultérieurs.

Les conditions de rechargement ne sont pas les mêmes sur une plage soumise à des mouvements dans le profil que sur une plage où le transit littoral est important. Dans ce dernier cas, l'efficacité de la méthode est limitée et les pertes sont généralement importantes. Le fait de combiner un rechargement avec des ouvrages transversaux de maintien des sédiments, améliore alors la pérennité de l'opération.

Les facteurs clés à prendre en compte sont le profil de rechargement, la taille des grains du sédiment d'emprunt comparée à la taille du sédiment naturel de la plage, le volume de rechargement à mettre en place et le suivi de plage.

#### Profil de plage

Le profil de plage varie avec la taille des grains des sédiments, le climat de houle, le marnage, etc. En raison de la variabilité de ces facteurs, l'estimation de la forme du profil de plage à recharger est délicate. Si la granulométrie est similaire, le profil à mettre en œuvre doit se rapprocher du profil naturel de la plage avant travaux, décalé vers le large du fait de l'engraissement apporté par le rechargement. La règle générale indique que le profil rechargé doit refléter une forme concave de plage naturelle. Une fois le rechargement effectué, la plage va naturellement s'ajuster aux conditions ambiantes jusqu'à se trouver dans une situation d'équilibre dynamique.

#### Taille des grains du sédiment d'emprunt

Les profils de plage tendent à s'aplatir avec la diminution de la taille des grains des sédiments. Pour obtenir un profil de plage dit naturel, il est nécessaire d'utiliser une taille de grain de sédiment d'emprunt équivalent. Si le sédiment d'emprunt est trop fin, il sera instable et emporté au large ou sur des secteurs adjacents par l'énergie des vagues, produisant une érosion rapide de la plage. Si le sédiment d'emprunt est trop grossier, les vagues ne pourront le déplacer, la plage deviendra alors plus pentue et réflexive (Capobianco et al., 2002).

#### Site d'emprunt

Le site d'emprunt idéal doit être en mesure de fournir une quantité suffisante de sable, de qualité convenable et transportable à un prix de revient acceptable sur la zone à recharger. Pour la définir, une prospection sédimentologique caractérisant la nature du sédiment d'emprunt doit être réalisée. Les principaux critères à prendre en compte pour le choix du site sont l'emplacement, l'accessibilité et la morphologie, le volume disponible et les caractéristiques du sédiment. Afin de ne pas provoquer d'érosion sur le littoral, il faut prélever les sédiments au-delà de la profondeur limite d'action de houle.

#### Volume de rechargement initial et apports périodiques

La mise en place d'un volume théorique de matériau dépend des plusieurs paramètres comme la granulométrie, les cote et largeur de berme, le profil de plage, la profondeur de fermeture et les zones de transition. Les opérations importantes de rechargement s'appuient généralement sur des extractions de sable au large par des dragues de type dragues aspiratrices en marche, ou de carrières à terre.

Afin d'obtenir un volume de matériau restant en place satisfaisant, le matériau d'emprunt doit être mis en excédent, majoré de 10 ou 20 % en général, pour pallier aux effets d'ajustement du profil et des pertes résultant des processus de transports sédimentaires longitudinaux et transversaux. A titre indicatif, des ordres de grandeurs de volumes de rechargement en sable sont présentés en fonction du degré d'exposition aux conditions de houle par mètre linéaire de plage et par an (Van Rijn, 2014) :

- de 10 à 50 m<sup>3</sup>/m/an pour des sites peu exposés ;
- de 50 à 150 m<sup>3</sup>/m/an pour des sites moyennement exposés ;
- et de 150 à 300 m<sup>3</sup>/m/an pour des sites très exposés.

Il faut noter également qu'un rechargement de plage initial n'offre généralement pas de solution permanente au problème de l'érosion de plage. Cette approche est simplement une solution temporaire aux pertes de sédiments, d'où la nécessité de recourir à des rechargements périodiques définis à partir des suivis mis en place. En moyenne, l'érosion à la suite d'un rechargement de plage est de l'ordre de 15 m<sup>3</sup>/m/an sur les plages peu exposées, de 30 m<sup>3</sup>/m/an sur les plages modérément exposées et de 70 m<sup>3</sup>/m/an sur les plages très exposées. Ces valeurs intègrent à la fois les départs de sédiments dus aux transports parallèles et perpendiculaires au littoral, qui sont du même ordre de grandeur. Ces chiffres varient aussi en fonction de la granulométrie du sédiment d'emprunt, avec des pertes annuelles estimées de l'ordre de 10 à 20 % pour des matériaux de granulométrie proche du sédiment naturel de la plage.

Les pertes en sédiments peuvent être très variables d'une saison ou d'une année sur l'autre. Ainsi, des événements tempétueux peuvent être à l'origine de la majorité des pertes, qui sont donc étroitement liées à l'occurrence des événements de tempête, notamment lors des premières années qui suivent le rechargement.

Rechargement	de plage	d'avant-plage
<b>Avantages</b>		
La plage est étendue immédiatement	X	
Ralentissement du recul du trait de côte	X	X
Création de barres longitudinales réduisant donc l'attaque des vagues	X	X
Atténuation des effets d'interruption du transport littoral	X	X
Le rechargement permet de se rapprocher du profil d'équilibre de la plage	X	X
La solution naturelle s'appuyant sur la résilience naturelle de la côte	X	X
À long terme, le rechargement peut être relativement économique	X	X
Création d'une zone tampon devant le trait de côte, réduisant les aléas d'érosion et de submersion marine	X	
Création d'une zone tampon dans les petits fonds, ralentissant l'érosion du trait de côte		X
Réduction de l'attaque des vagues	X	X
Coût moindre pour le déversement par clapage dans les petits fonds		X
<b>Inconvénients</b>		
L'érosion n'est pas stoppée, le trait de côte reste mobile	X	X
Les événements de tempêtes peuvent disperser vers le large des sables rechargés sur l'avant-plage ou la plage	X	X
Des extractions d'importantes quantités de sable sont nécessaires	X	X
Même considéré comme relativement faible et limité, le rechargement a un impact négatif sur la flore et la faune	X	X

Illustration 46 : Avantages et inconvénients des méthodes de rechargement de plage et d'avant-plage

## Suivi de plage

L'objectif du suivi est de fournir la tendance évolutive de la plage et de définir les zones à recharger et son profil d'équilibre. Le suivi initial, suivant un protocole standardisé, s'effectue par un relevé complet

topo-bathymétrique de la plage, qui est répété plusieurs fois au cours d'au moins une année complète. Il permet de caractériser la mobilité du trait de côte et le régime de la plage.

Des analyses granulométriques des sédiments composant la plage (prélèvements réalisés en bas, milieu et haut de plage) et des sédiments d'apport sont également réalisées. Ce suivi doit se poursuivre pendant et après les travaux sur une durée plus longue, de l'ordre de cinq ans, pour prendre en compte les variations saisonnières et annuelles (Hamm et al., 2002).

Pour effectuer ce suivi, l'acquisition de profils de plage à l'aide d'un GPS différentiel, ou bien en utilisant la télédétection par laser ou LIDAR sont les procédés les plus répandus et précis. Pour quantifier les déplacements sédimentaires, la topographie complète du système dune, plage et avant-plage doit être intégrée dans les mesures. En complément, un suivi des conditions météo-marines (vent, houle, marée, courants associés) permet de comprendre les processus à l'origine des déplacements sédimentaires.

### **Impact des rechargements sur l'environnement**

Les rechargements de plage et d'avant plage induisent un recouvrement de la faune benthique sur la zone de déversement mais, compte tenu de l'étendue des biocénoses des sables d'estran et d'avant-plage, cet impact peut être considéré comme faible et limité dans le temps et l'espace ; une restauration de la faune et de la flore s'opérant très rapidement après l'opération.

### **2.2.2 Ressources en sédiments disponibles**

Les principales sources de sédiments d'emprunt sont l'extraction terrestre, les dragages portuaires et l'extraction en mer. L'extraction en carrières terrestres présente l'avantage d'être plus facile à réaliser que l'extraction en mer, mais la disponibilité des matériaux reste souvent limitée, avec des granulométries de sédiments de carrière souvent inappropriées ou incompatibles.

Les sédiments issus des opérations de dragages portuaires présentent des granulométries très souvent trop fines pour se maintenir sur une plage. Les sources marines apportent des matériaux plus compatibles avec les sédiments naturels des sites à recharger. Le développement d'engins de dragage innovants a rendu ces sources attractives. Avec des coûts de déploiement des engins de manutention plus importants pour l'extraction en mer, la rentabilité des opérations croît avec l'importance des volumes de rechargement.

### **Gestion des granulats marins**

Les études menées par l'Ifremer estiment que la ressource en granulats marins de la façade maritime Loire-Gironde est d'environ 19,8 milliards de m<sup>3</sup>. Compte tenu des contraintes techniques, réglementaires, économiques et environnementales, seuls quelques pourcents sont actuellement exploitables, mais la stratégie nationale pour la gestion des granulats vise à augmenter la proportion des granulats marins dans la production nationale à 5 % d'ici 2020 (Kalaydjian, 2012).

Les besoins pour le rechargement de plage seraient de 2 à 3 millions de tonnes de sable par an (Secrétariat général de la mer, 2006). Pour identifier et désigner les réserves de sédiments stratégiques, il est nécessaire d'établir des plans de gestion des ressources sédimentaires (MEEDM, 2010).

Des cartes faisant l'inventaire des ressources en matériaux marins des différentes façades maritimes sont disponibles sur le site Sextant de l'Ifremer, rubrique Granulats marins, volet Ressources minérales.

Les résultats des phases de l'étude « Manche Est, Loire-Gironde ; de 2005 à 2009 » et « Bretagne, Sud-Gascogne ; de 2010 à 2012 » sont présentés de manière détaillée dans les rapports, annexes décrivant les carottes existantes sur chacune des façades et cartes à l'échelle 1/250 000 avec le plan de positionnement des travaux, l'épaisseur des sédiments meubles et le potentiel extractif (Ifremer, 2013). Le cadastre minier numérique est consultable sur le site Camino (<https://camino.beta.gouv.fr/>).

### Mode d'extraction des sédiments d'emprunt

L'extraction de granulats marins se fait très majoritairement par aspiration hydraulique en marche, mise en œuvre par des navires spécifiques, les dragues aspiratrices en marche. Les sédiments sont aspirés sur une dizaine de centimètres d'épaisseur et sur une largeur de l'ordre du mètre, puis ils sont stockés dans les cales avant d'être refoulés sur la plage via des conduites de refoulement. Le prix d'une opération de rechargement dépend du volume mis en œuvre, avec des tarifs au m<sup>3</sup> souvent définis au préalable et dépendant de l'accessibilité du site d'emprunt.

### Impacts des extractions sur l'environnement

Les études relatives aux impacts écologiques des activités d'extraction sur les habitats benthiques et les biocénoses sont peu nombreuses et ponctuelles. Actuellement, il est impossible de tirer des conclusions sur les pressions et impacts écologiques de ces activités à l'échelle d'une sous-région marine. Il semble néanmoins clair que le prélèvement de sédiments, le re-dépôt des particules fines mises en suspension, les changements granulométriques, la complexification de la topographie et la création d'un territoire à coloniser, induisent un changement rapide des communautés benthiques.

L'importance des impacts directs et la possibilité de revenir à un état proche de l'état initial sont surtout fonctions de l'intensité de l'extraction et de la résilience écologique du site. Ils dépendent également des types de travaux, de la stratégie d'exploitation proposée, des conditions morphodynamiques locales.

### Réglementation

En France, les prélèvements en lien avec le rechargement de plage, sont soumis à déclaration ou autorisation au titre des articles L. 214-1 à 6 du code de l'environnement. Si le montant de travaux est supérieur à 1,9 M€ ou si l'emprise du rechargement sur la plage est supérieure à 2 000 m<sup>2</sup>, les travaux sont soumis à étude d'impact (article R. 122-8 du code de l'environnement). Dans le cas contraire, seule une notice d'impact est exigible (article R. 122-9 du code de l'environnement).

#### 2.2.3 Pour aller plus loin

Il faut se référer aux guides de recommandations suivants :

CETMEF, 1998. Recommandations pour la conception et la réalisation des aménagements de défense du littoral contre l'action de la mer, 540 p, rapport ER PM 98.01, chap II : 7-30 et annexe I : 8 p ;

Dean R., 2000. Beach nourishment, Theory and practice, World Scientific, vol. 18, 399 p ;

U.S. Army Corps of Engineers, 2003. Coastal Engineering Manual, chapitre V-4 Beach Fill Design, 109 p.

## 3 LA GESTION SOUPLE DES DUNES

### 3.1 Présentation de la méthode

#### 3.1.1 Objectif et définition

Les systèmes littoraux sableux sont parfois adossés de dunes qui, d'origine éolienne, nécessitent du vent, une plage d'envol large et régulière pour mobiliser les sables et un stock sableux issu de sédiments reliques, résultant de l'évolution de la transgression flandrienne depuis 18 000 ans. L'avant-plage et l'arrière-côte doivent être suffisamment larges et à pente douce pour faciliter l'alimentation en sable et le développement des systèmes dunaires.

Des échanges de sable entre la dune, la plage et l'avant-plage s'opèrent continuellement. La dune bordière assure le transfert sédimentaire entre le massif dunaire et la plage : elle démaigrît en période de tempête pour alimenter l'estran et s'engraisse en période calme, principalement l'été. La dune se comporte comme une protection de côte, naturelle et flexible (Illustration 47 ; 49)

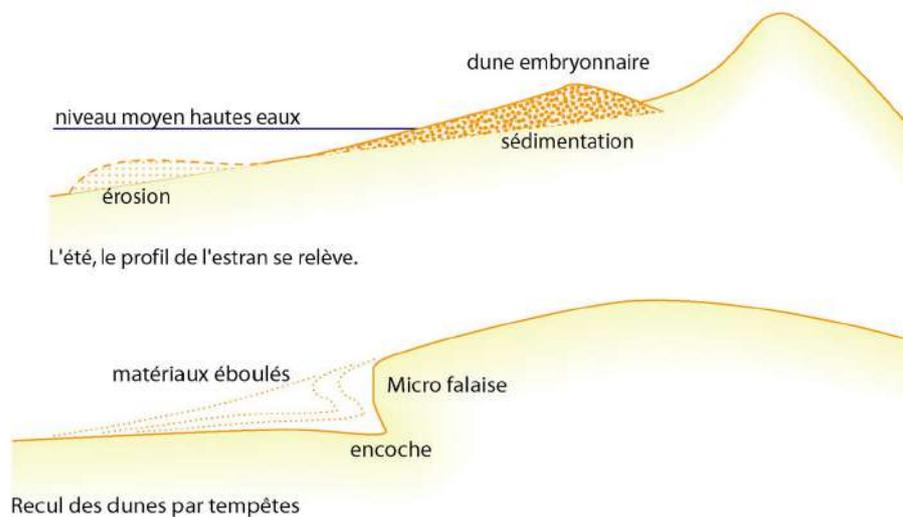


Illustration 47 : L'échange dune-plage, une protection flexible ; interaction et équilibre dynamique : recul en période de tempête (schéma du haut) et engraissement en période calme (schéma du bas).

En France, les actions anthropiques ont modifié la plupart des dunes. À cause des extractions massives de sable ou de l'aménagement littoral (urbanisation, agriculture, forêts), les systèmes dunaires ont disparu de plusieurs zones littorales. D'autres ont été isolés de la plage par des ouvrages de défense contre la mer (murs, perrés, ouvrages en enrochements) qui interrompent les échanges sédimentaires entre la dune et la plage. Les fréquentations piétonnière et véhiculée sur les cordons et massifs dunaires ont accentué la dégradation des dunes en détériorant la végétation, favorisant ainsi la déflation éolienne.

Pourtant, les dunes sont de véritables barrières naturelles face à l'aléa de submersion marine. Dans le contexte actuel d'élévation du niveau marin, elles sont amenées à jouer un rôle de plus en plus important de protection naturelle des enjeux humains. Les dunes sont également des niches écologiques pour de nombreuses espèces végétales et animales (Lewis, 1992).

La prise de conscience progressive de leurs intérêts a conduit au développement de mesures pour les protéger. La nature de ces protections varie en fonction de l'intensité de la dégradation, des enjeux humains et de l'espace disponible. Les projets de restauration dunaire impliquent dans certains cas la

reconstruction partielle ou totale des dunes ou leur reprofilage à l'aide d'engins mécaniques. Dans d'autres cas, la restauration dunaire, plus souple, se fait en accompagnant les processus naturels par la mise en place de structures légères ou de végétation (Nordstrom, 2008).

### 3.1.2 Principe

Les dunes littorales sont des accumulations sableuses qui se forment le long des côtes basses sous l'action du vent. Elles sont naturellement caractérisées par un certain degré de mobilité naturelle, et d'un équilibre dynamique ; l'impact des actions humaines a tendance à fragiliser leur équilibre. Aujourd'hui, presque tous les systèmes dunaires de France font l'objet d'une gestion dont l'importance est plus ou moins développée selon les sites.

L'objectif de la gestion souple des dunes est de contrôler leur mobilité en modérant la déflation éolienne et en favorisant l'accumulation du sable. Pour cela, plusieurs procédés permettent de réduire la vitesse du vent localement ou de stabiliser le sol de la dune. Les principales techniques utilisées sont la plantation végétale, la pose de rideaux brise-vent, le recouvrement par des branchages végétaux, le reprofilage et le rechargement de la dune. Dans la majorité des plans de gestion, la canalisation de la fréquentation accompagne les autres mesures (Gouguet, 2018).

Sur les côtes non urbanisées, où le recul est socialement acceptable, les actions peuvent être de faible ampleur, à l'inverse certains cordons dunaires, jouant un rôle de digue entre l'océan et un arrière-pays de basse altitude, font l'objet de mesures de gestion renforcées impliquant des interventions humaines conséquentes.

Les dunes occupent 16 % du linéaire côtier français, soit environ 900 km. Les plus grands ensembles sont situés dans les Landes, en Vendée, dans le Cotentin, en Picardie et en Bretagne (Illustration 48). Un recensement exhaustif des dispositifs de gestion ne présente pas de plus-value particulière. Seules les mesures les plus courantes seront évoquées et détaillées.

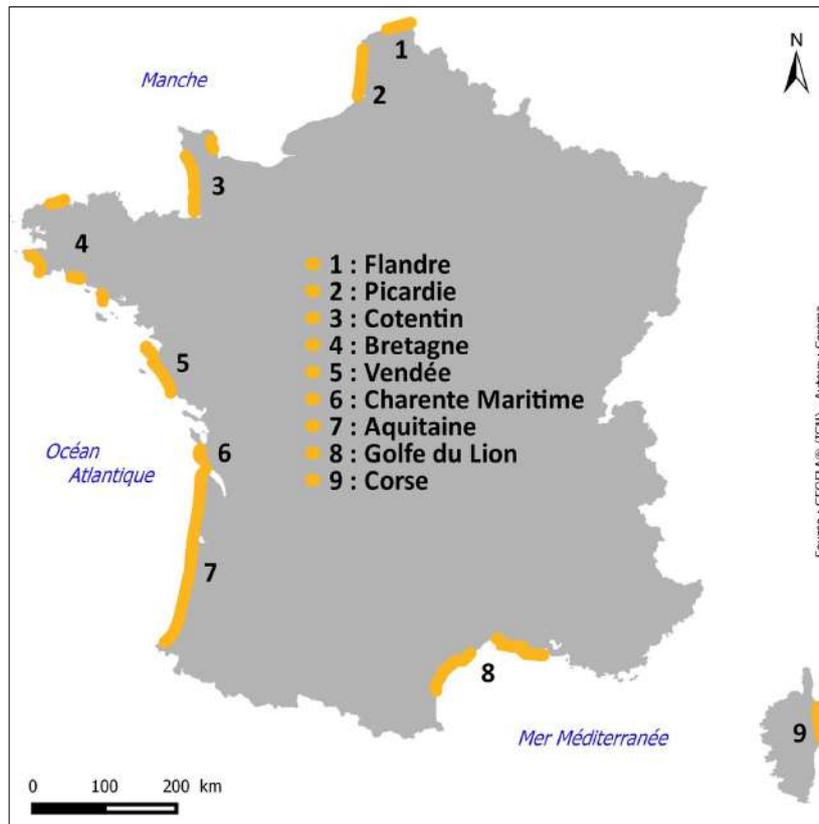


Illustration 48 : Principaux systèmes dunaires occupant 16 % du linéaire côtier en France métropolitaine

Ces espaces littoraux mobiles par nature mais aussi fragilisés par des pressions multiples requièrent une attention particulière en raison de leur spécificité. Les actions de stabilisation présentées n’ont pas vocation à fixer les dunes, mais doivent davantage assurer une gestion souple, à l’image des travaux réalisés par l’Office National des Forêts (ONF) sur la côte Atlantique. Le principe de base du contrôle de la mobilité des dunes est la modération de l’érosion éolienne par réduction de la vitesse du vent.

### 3.1.3 Techniques

Les principales techniques de contrôle de la mobilité des dunes sont la plantation végétale, la pose de rideaux brise-vent, le recouvrement par des branchages végétaux, le reprofilage et la canalisation de la fréquentation. Bien mises en œuvre, ces mesures de gestion améliorent la résilience et la pérennité des cordons dunaires comme le montrent les exemples d’actions réalisées par le Conservatoire du littoral.

La plantation de végétaux, le plus souvent des oyats, sur le versant externe des dunes permet de réduire la vitesse du vent près de la surface du sol. La couverture végétale favorise la croissance de la dune bordière par le piégeage et la stabilisation du sable transporté par le vent. Le recouvrement des surfaces de dunes fortement exposées est une autre mesure de stabilisation du sable.

La mise en œuvre de rideaux brise-vent, par pose de lignes ou de maillage de barrières semi-perméables favorise le dépôt de sable transporté par le vent et protège les secteurs plantés. Différents types de brise-vent peuvent être mis en place : ganivelles en lattes de châtaignier, filets synthétiques, etc. La mise en place des dispositifs obligent à définir des cheminements piétons qui réduisent ou limitent la fréquentation à des secteurs bien définis.



Illustration 49 : Deux sections d'un cordon dunaire avec à gauche, la présence d'une micro-falaise et à droite, une accrétion de la dune bordière, avril 2016, Lampaul-Ploudalmézeau (29) (Source : Cerema)

## 3.2 REX de sites

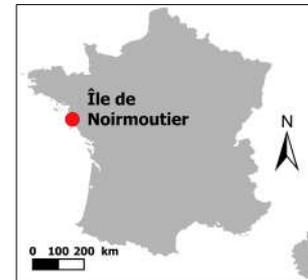
### 3.2.1 Présentation de REX des sites suivants :

8. Île de Noirmoutier (85)
9. Utah Beach, Siouville et Blainville (50)
10. Lège-Cap-Ferret (33)
11. Les Estagnots – Seignosse (40)
12. Saint-Pierre Quiberon – Plouharnel – Erdeven (56)
13. Dune d'Aval – Wissant (62)
14. Platier d'Oye – Oye-Plage (62)

## Île de Noirmoutier (85)

### Contexte

La côte basse de l'île de Noirmoutier, qui est exposée aux événements tempête de secteur sud-ouest dominant, est vulnérable à l'érosion et submersions marines, puisque les deux-tiers de la superficie de l'île situés sous le niveau des pleines mers de vives eaux. La conjonction d'une forte dépression, de vents violents et de vagues, peut générer des surcotes importantes. Si l'événement de tempête se produit lors d'une pleine mer de fort coefficient, l'aléa de submersion marine s'accroît et se traduit par des franchissements et des brèches des cordons dunaires, qui constituent les seuls remparts de protection de l'île.



de  
aux  
sont  
  
peut

### Trois systèmes dunaires

Trois systèmes dunaires majeurs sur la côte occidentale de l'île de Noirmoutier. Au nord-ouest, le cordon de Luzéronde, appelé Dune de l'Homme, s'étend de la Pointe de l'Herbaudière à la Pointe du Devin, sur une longueur de 4 km et une largeur comprise entre 50 et 400 m. Au sud de la Pointe du Devin, le cordon dunaire de l'Épine s'étire jusqu'à la Pointe de la Loire, sur 4,5 km de long et 500 m de large. Enfin, une flèche littorale, ancrée au nord au niveau de la Pointe de la Loire, se développe sur 12 km de long, de 500 m à 1 km de large jusqu'à l'extrémité sud de l'île, nommée la pointe sableuse de la Fosse (Illustration 50).

### Cordon dunaire de Luzéronde

Ce cordon protège une zone basse submersible, non urbanisée mais qui est largement exploitée par l'activité salicole.

La dérive littorale est orientée sud-nord et il en découle un recul du trait de côte au sud (de 2 m/an) et de l'accrétion au nord. La gestion des dunes est assurée par la Communauté de Communes de l'Île de Noirmoutier (CCIN) et par l'Office National des Forêts (ONF). Suite aux fortes tempêtes de 2002, les gestionnaires ont décidé d'organiser le recul du cordon dunaire afin de lui redonner une pente douce et un profil aérodynamique. Des travaux de remodelage de la plage ont été engagés en 2008, une partie du stock sédimentaire, a été remontée vers le pied de dune. L'ONF a procédé à un reprofilage du versant externe de la dune qui a été couvert de branchages et planté d'oyats et de chiendent des sables. Les flèches rouges sur l'illustration 51 désignent l'ancienne ligne de rivage, matérialisée par la clôture en fil lisse. La dune s'est depuis développée sur la plage. En 2016, la dynamique sédimentaire est donc équilibrée et la dune est apte à jouer un rôle de protection face aux aléas d'érosion et de submersion marine.

### Cordon dunaire de l'Épine

La situation est différente pour ce cordon dunaire, car les enjeux en arrière sont très importants, la majorité du littoral étant urbanisé. Ce secteur est naturellement en érosion et le port du Morin, situé plus au nord, amplifie encore le phénomène en bloquant le transit sédimentaire. La gestion souple n'a pas été privilégiée sur ce site puisque de nombreux épis ont été érigés et la majorité du trait de côte est enrochée (Illustration 52). Des rechargements en sable effectués à plusieurs reprises depuis 1997 ne permettent pas de compenser les pertes estimées à plus de 100 000 m<sup>3</sup> depuis 15 ans. La dynamique sédimentaire est interrompue par les ouvrages de protection longitudinaux et transversaux et la combinaison avec les rechargements n'est pas efficace. Des pieux hydrauliques s'étendent sur 500 m au sud-ouest de la zone, au niveau de la dune des Eloux. Sur le cordon dunaire de l'Épine, les opérations mises en place depuis des décennies montrent clairement leurs limites en matière de lutte contre l'érosion.

La comparaison de ces deux cordons dunaires très proches géographiquement est intéressante. Sur le cordon dunaire de Luzéronde, les enjeux, moins importants, ont rendu possible la mise en place d'une protection souple du rivage tandis que sur le cordon de l'Epine, les forts enjeux ont motivé la construction d'ouvrages rigides, dans le but de fixer le trait de côte. Or les dunes littorales sont mobiles par nature et leur stock sédimentaire est en échange constant avec la plage. Artificialiser le trait de côte, au niveau du cordon de l'Epine, revient à interrompre toute dynamique sédimentaire, il en découle un budget sédimentaire déficitaire.



Source : Cerema  
Illustration 52 : Ouvrages de protection longitudinaux et transversaux au nord de la dune des Eloux (juin 2016)

### Flèche littorale du sud-ouest

La dérive littorale d'orientation nord-sud est à l'origine d'un transit sédimentaire important, avec le secteur nord de la flèche littorale en érosion, et sa partie distale en accrétion très importante au sud. Dans la partie proximale de la flèche littorale, au niveau des dunes de La Tresson, un plan de gestion de l'érosion des dunes a été réalisée pour la période 2012-2016, avec comme objectif principal est de préserver l'évolution naturelle du système dunaire. Les actions vont dans le sens de la conservation de la mobilité du trait de côte par la mise en place de systèmes brise-vent, de plantation végétale et de canalisation de la fréquentation (Illustration 53), associé à un suivi de la dynamique du cordon dunaire.



Source : Cerema  
Illustration 53 : Dunes embryonnaires au sud et systèmes brise-vent dunes de La Tresson (Juin 2016)

Les moyens d'interventions privilégiés sont volontairement légers et les actions peu nombreuses. En 2016, le système dunaire est dynamique, avec une accrétion très importante au sud. Cependant, l'érosion persiste localement, principalement au nord de La Tresson.

### Bibliographie

EUCC-France, 2012 ; Le Cornec et al., 2008 ; ONF, 2009.

## Utah Beach, Siouville, Blainville (50)

### Utah Beach, Sainte-Marie-du-Mont

La plage d'Utah Beach subit une érosion importante au droit du musée, qui est aujourd'hui séparé de la mer par une dune d'une largeur comprise entre 10 et 20 m. Afin de le protéger, un projet de restauration dunaire a été mené au cours de l'automne 2015. Sur un tronçon de 100 m de long et de 10 m de large, 2 000 m<sup>3</sup> de sédiments ont été apportés pour reconstituer le versant externe de la dune. Afin de fixer le sable, des oyats ont été plantés et un filet anti-érosion a été installé en mars 2016. Pour favoriser l'accumulation de sable par l'action éolienne, deux rangées de rideaux brise-vent ont été mis en place (Illustration 54).

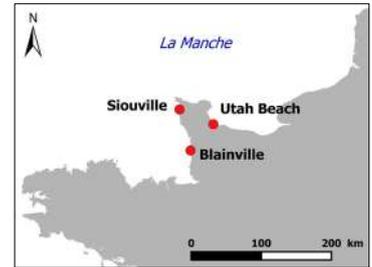


Illustration 54 : Gestion dunaire sur la plage d'Utah Beach, mise en place de rideaux brise-vent

Durant l'hiver 2015-2016, la dune n'a pas évolué ; il n'y a pas eu d'érosion mais les ganivelles n'ont pas permis d'accumuler de sable supplémentaire, qui peut s'expliquer notamment par un niveau de plage bas au droit du projet avec du sable mouillé en permanence. Ces conditions ne sont pas favorables à la déflation éolienne. Ce projet vise à compenser le déficit sédimentaire constaté au niveau du musée. Il s'agit d'une démarche à court terme permettant de gérer une situation d'urgence. Un projet de plus grande ampleur devrait être engagé prochainement. L'érosion importante constatée sur le site résulte notamment d'une sous-alimentation sédimentaire et d'un « effet d'ouvrage » constaté au nord du musée. Sur l'illustration 55, la flèche rouge montre l'emplacement du musée depuis l'ouvrage en enrochement mis en cause. À l'aval dérive de l'ouvrage longitudinal, l'érosion est considérable avec une falaise vive atteignant près de 10 m de haut. Cette érosion s'amointrit en s'éloignant de l'ouvrage pour s'estomper totalement après le secteur du musée où les dunes embryonnaires succèdent aux falaises vives.



Illustration 55 : Effet d'ouvrage après l'ouvrage en enrochement (à gauche) et retour à une dynamique d'accrétion après le secteur du musée au nord de la plage (à droite)

### Siouville-Hague

Les événements de tempête de l'hiver 2013-2014 ont entraîné un recul dunaire de plus de 10 m au sud de l'embouchure du Petit Douet. Le centre de soins et de rééducation Korian l'Estran, initialement implanté sur le massif dunaire, se retrouve désormais à seulement une dizaine de mètres du cordon dunaire (Illustration 56). Le centre représente un enjeu important à préserver pour la commune de Siouville-Hague. En octobre 2015, 6 000 m<sup>3</sup> de sable sont acheminés sur la dune afin de la reconstituer. Le stock est réparti sur 200 m linéaires et compenserait l'érosion depuis une dizaine d'années. Afin de stabiliser le sable, 15 à 20 000 pieds d'oyats sont plantés en février 2016 par le Conservatoire du Littoral. Des panneaux informatifs pour lutter contre l'érosion anthropique sont placés tout autour de la zone.



Illustration 56 : Centre de rééducation de Siouville-Hague protégé par la dune reconstituée

Au cours de l'hiver 2015-2016, le pied de la dune rechargé est attaqué par les vagues et une partie du stock sédimentaire descend sur le haut de la plage. Le pied de dune est atteint par le jet de rive à chaque marée de coefficient supérieur à 100, ce qui se produit fréquemment. L'action répétée des vagues, même en l'absence de fortes tempêtes, a tendance à éroder le pied de dune et à déstabiliser le cordon dunaire.

En complément, un rechargement du haut de plage est envisagé pour permettre de faciliter les échanges de sable dune-plage et de créer une zone tampon protégeant la dune de l'action des vagues.

### Blainville

Une partie de la flèche sableuse nord, qui protège le Havre de Blainville, a été submergée au cours d'un événement de tempête de l'hiver 2013-2014. Afin de conforter le cordon dunaire, des rangées de fascines ont été disposées en 2015, au niveau du haut estran et du haut du cordon dunaire.



Illustration 57 : Rangée de fascines située sur le haut de la flèche sableuse nord à Blainville

Pour que l'efficacité des fascines soit maximale, elles sont orientées perpendiculairement à la direction des vents dominants (nord-ouest). Moins d'un an après leur mise en place, le bilan est mitigé. Les fascines placées sur le haut estran n'ont pas résisté à l'action des vagues, ces structures faites pour accumuler le sable sous l'effet du vent, n'ont pas été conçues pour résister aux actions des vagues, rendant leur positionnement sur la plage inefficace. À l'inverse, les fascines placées sur le cordon, sont aujourd'hui en bon état et une quantité importante de sable s'est accumulée à leur niveau (Illustration 58). Leur utilisation s'est avérée appropriée pour lutter contre la déflation éolienne et ses effets érosifs.



Illustration 58 : Fascines dénudées sur le haut estran et recouvertes de sable sur le cordon

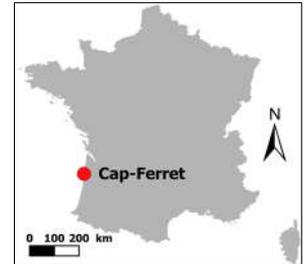
### Bibliographie

Barbet, 2016 ; Conseil Général de l'Environnement et du Développement Durable, 2015.

## Lège-Cap-Ferret (33)

### Contexte

Le site de Cap Ferret se situe à l'extrémité sud du massif dunaire qui s'étend, sans discontinuité depuis la Pointe de Grave au nord. C'est une flèche littorale alimentée par une dérive littorale nord-sud estimée à 700 000 m<sup>3</sup>/an, qui tend à fermer le bassin d'Arcachon. Cette dérive est contrée par les forts courants en sortie du bassin, où le cycle d'évolution des passes du bassin rythme l'évolution de la pointe du Cap-Ferret, caractérisée par une avancée de 400 m entre 1936 et 1984 et un recul de 700 m depuis 1984.



Le Cap ne se peuple véritablement que dans les années 1880 avec l'essor de l'ostréiculture et la construction des premières cabanes. La presqu'île commence à être davantage fréquentée au début du XX<sup>ème</sup> siècle, lors du développement de la station balnéaire d'Arcachon. Puis l'urbanisation progresse tout au long du siècle. En 1975, les dunes laissées sans entretien depuis plusieurs décennies et sujettes à une importante fréquentation sont très dégradées, entraînant leurs remises en mouvement et l'ensevelissement de certaines maisons. L'acquisition du site par le Conservatoire du littoral débute en 1980 et de vastes opérations de restauration des dunes sont menées à partir de la fin des années 1980, et se poursuivent aujourd'hui.

### Mise en œuvre

C'est donc entre 1989 et 1996 que la commune de Lège-Cap-Ferret, par l'intermédiaire de l'ONF, met en place d'importantes mesures pour stabiliser les formes dunaires. Afin de maintenir le plus grand degré de naturalité possible, le relief existant est conservé, sans action de remodelage. Les travaux s'appuient sur les capacités constructives des agents naturels, les reboisements sont très limités pour conserver la dune grise, espace ouvert caractéristique de ce type de milieu. Après le désensablage de rues et de certaines maisons, la restauration dunaire privilégie donc la plantation d'oyats et de genêts, la pose de brise-vents, et la reconstitution de la frange forestière (Illustration 60 et Illustration 61).



Illustration 59 : Le Cap-Ferret et les passes du bassin d'Arcachon



Source : Conservatoire du Littoral

Illustration 60 : Plantation d'oyats sur la dune, Cap-Ferret

Comme dans la plupart des opérations de gestion des dunes, le succès de la réhabilitation dépend de la gestion de la fréquentation anthropique. Sur les six kilomètres linéaires du rivage atlantique de Cap-Ferret, 12 sentiers, matérialisés par des clôtures en ganivelles, traversent la dune littorale en faisant la jonction entre la plage et un sentier piéton en arrière-dune (Illustration 62). La canalisation de la fréquentation localement facilite la reprise végétale par ailleurs.



Illustration 62 : Résultat de la restauration dunaire sur la dune au Cap-Ferret



Illustration 61 : Importante opération de plantation d'oyats sur la dune du Cap-Ferret

### Évolution du site et efficacité du procédé

La restauration du cordon dunaire réalisée par le Conservatoire du Littoral a conduit à une importante évolution du paysage qui est passé de dunes blanches très mobiles à des dunes végétalisées d'une apparente stabilité. Ce résultat est très positif pour les populations locales qui ont vu les problèmes liés à l'ensablement diminuer au cours du temps. La végétation joue donc bien son rôle, en limitant la déflation éolienne et en favorisant l'accumulation du sable à son niveau.

La restauration dunaire a permis de retrouver les cortèges végétaux typiques des dunes landaises. L'organisation de l'accueil du public permet une poursuite de la fréquentation en minorant son impact sur la richesse patrimoniale du site, cependant, un entretien continu des sentiers et une surveillance sont nécessaires. Ce chantier de grande ampleur montre qu'il est possible de réhabiliter assez rapidement un écosystème dunaire côtier très mobile et déstabilisé.

Si la lutte contre l'érosion éolienne et contre la fréquentation anarchique est possible, il n'en est pas de même de l'érosion marine. L'extrémité sud de la flèche littorale connaît depuis 1996 un recul très fort et continu (30-40 m/an) qui a réduit à néant les travaux réalisés sur ce tronçon, à proximité duquel on a imprudemment construit (Illustration 63 et Illustration 64).



Illustration 63 : Erosion du trait de côte, Cap-Ferret (2016)



Illustration 64 : Extrémité de la flèche littorale du Cap-Ferret

### Bibliographie

Favennec, 2002 ; Moulis et al., 2001 ; Natura 2000, 2007.

## Les Estagnots – Seignosse (40)

### Contexte

La commune de Seignosse, qui se situe sur la côte des Landes au nord de la station de Hossegor, est une station balnéaire récente. Les aménagements touristiques de la station, qui ont démarré en 1965, s'étendent sur 8 km le long de l'océan, sur un site initialement vierge. Avec une pression anthropique de plus en plus forte au fil des années, la dégradation du système dunaire devient préoccupante en avant de la zone urbanisée. Deux ensembles se distinguent aujourd'hui. La dune « sauvage » au nord, qui a conservé les caractéristiques des dunes littorales landaises et la dune « urbaine » au sud, qui a subi de nombreuses transformations liées à la fréquentation touristique importante.



La dune « sauvage » se caractérise par un cordon dunaire peu transformé par la pression anthropique et l'avant-dune bien individualisée témoigne d'une longue phase de répit de l'érosion marine.

La dune « urbaine » des Estagnots présente un pied de dune totalement dé-végétalisé, le piétinement ayant fait disparaître les banquettes et dunes embryonnaires (Illustration 65). Les encoches de déflation, appelées caoudeyres, sont nombreuses sur la dune grise et son versant externe est artificialisé.



Illustration 65 : Seignosse, Les Estagnots, dune « urbaine »

Aujourd'hui, l'Office National des Forêts (ONF) et le Conservatoire du Littoral mènent des actions en faveur de la restauration et de sa conservation de la dune dans un état relativement naturel.

### Mise en œuvre

Avec une érosion marine peu significative sur le secteur, les travaux engagés n'ont pas vocation à lutter directement contre elle mais davantage contre la déflation éolienne et les perturbations anthropiques. L'ONF fait remarquer qu'il est inutile d'engager des travaux de réhabilitation de la dune, si la pression anthropique n'est pas canalisée et qu'il faut, avant toute chose, limiter le piétinement des dunes. L'expérience a montré que si l'on veut fermer un passage « sauvage » important, la partie est perdue d'avance, les plages doivent donc rester facile d'accès pour le public, même sur les portions sauvages du massif dunaire. Sur les dunes de Seignosse, les clôtures de type trois fils lisses sont les plus utilisées avec un prix de revient faible, une facilité de relevage et un faible impact paysager (Illustration 66).



Illustration 66 : Chemin d'accès à la plage canalisé par des clôtures de type trois fils lisses sur la dune

Dans certains cas, et pour renforcer l'efficacité du dispositif, les ganivelles sont utilisées. Elles sont plus dissuasives, donnent une image plus finie, mais restent plus fragiles et coûteuses.

Sur le tronçon « sauvage » au nord, les interventions se limitent à réduire le piétinement par la mise en place de ces clôtures et de panneaux informatifs alors que sur le tronçon « urbain », d'importants travaux de lutte contre la déflation éolienne sont nécessaires au vu du fort degré de dégradation. Ainsi, les versants et les crêtes des dunes ont été remodelés mécaniquement pour limiter la déflation.

Le sable des talus internes, menaçant les parkings, a été prélevé et redistribué au niveau des zones basses du cordon dunaire. Des agropyrons et des oyats ont été plantés respectivement sur l'avant-dune et sur la dune blanche afin d'apporter une stabilité relative au système dunaire. Enfin, très localement, des branches provenant de l'élagage de pins ont été étalées sur la dune afin de retenir le sable durant la période hivernale où la dune est soumise aux vents forts des événements de tempête (Illustration 67).

### Évolution du site et efficacité du procédé

La réhabilitation du système dunaire a débuté à la fin des années 1990 et très vite, les résultats se sont montrés concluants. Aujourd'hui les principaux objectifs sont atteints :

L'avant-dune dégradée s'est reconstituée très rapidement. Les zones non plantées sont colonisées progressivement et naturellement ;

Les talus internes sont eux aussi en cours de colonisation naturelle par diverses pionnières ;

Les caoudeyres sont moins nombreux et la dune est moins mobile.

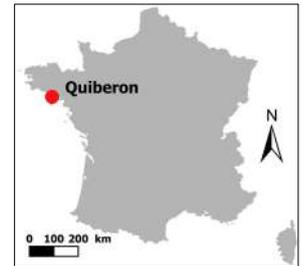
Des promeneurs continuent néanmoins de se déplacer en dehors des couloirs prévus pour accéder à la plage. Lorsque ces actions sont répétées, elles favorisent l'apparition de brèches et donc la remobilisation du sable par le vent et accélère les processus d'érosion.

### Bibliographie

Secret, 2012 ; Favennec, 2002 ; Granereau, 2002 ; Moulis et al., 2001 ; Prat, 2002.

### Contexte

Le cordon dunaire qui s'étend de Gâvres jusqu'à la presqu'île de Quiberon est le plus vaste ensemble dunaire de Bretagne. Il est entrecoupé en son centre par la ria d'Étel (en haut de l'illustration 68). À partir des années 1960, le tourisme balnéaire se développe très vite sur le littoral morbihannais. Son essor se traduit rapidement par une surfréquentation estivale du site et le piétinement intensif va entraîner le creusement de nombreux chemins d'accès ainsi que la disparition du couvert végétal de la dune grise. Cette pression anthropique, visible sur les photographies aériennes des années 2000, est un facteur important de l'évolution morphologique du massif dunaire (Illustration 69).



À partir des années 1980, les communes de Plouharnel et de Quiberon vont entreprendre des travaux d'organisation de l'accueil du public pour limiter les dégradations des dunes. Début des années 2000, dans le cadre d'un projet européen « Life Environnement », les dunes dominiales font l'objet de mise en œuvre d'expérimentations de réhabilitation du massif dunaire. En tant que gestionnaire de ces milieux naturels, l'ONF est en charge de la réorganisation de l'accueil du public.

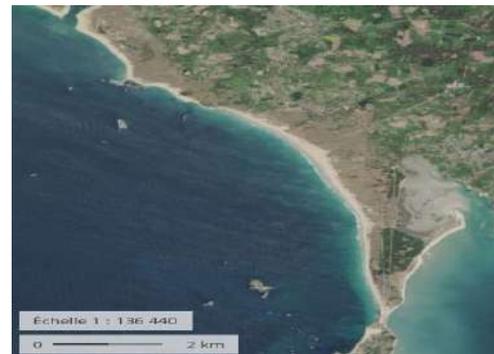


Illustration 68 : De la ria d'Étel à l'isthme de Penthièvre (Géoportail)

### Mise en œuvre

Dans un premier temps, il s'agit de canaliser les flux de véhicules et de piétons. Le nombre d'aires de stationnement est réduit à cinq, sans pour autant diminuer la capacité d'accueil globale, afin de concentrer le flux piétonnier sur quelques sites. Les parkings sont également déplacés en bordure du site. Pour canaliser la fréquentation et exclure le piétinement des zones érodées, les accès sont encadrés par des clôtures en bi-fils, tri-fils, grillage ou ganivelles. Une signalétique permettant l'information et l'orientation du public est également mise en place sur les différents sites. Enfin, des actions de surveillance et de sensibilisation sont menées pour pallier les mauvaises pratiques.



Illustration 69 : Cheminements sur le massif dunaire à Plouharnel (photographie aérienne de 2004)

Les dunes sont des entités mobiles par nature, mais cette mobilité est normalement modérée par la végétation. Des oyats sont plantés dans les zones érodées, parfois accompagnés d'une couverture par des branchages pour créer des conditions favorables (piégeage des graines, rétention d'eau) à la colonisation végétale. De manière expérimentale, des filets coco ont été posés sur des secteurs très érodés pour maintenir le sol et faciliter l'implantation des graines lors de leur décomposition.

Enfin, la mise en place de ganivelles sur le haut de plage permet de protéger la dune bordière du piétinement et favorise aussi l'accumulation de sable à son niveau. Cette mesure est aussi intéressante pour lutter contre l'érosion marine, la dune étant parfois attaquée par les vagues lors des événements de tempête.

### Évolution du site et efficacité des procédés

Le nombre de cheminements « sauvages » a diminué considérablement depuis les années 1980 et la végétation dunaire a regagné du terrain en haut de plage, comme le présente l'évolution de la dune bordière en dix ans sur le site de Penthièvre à Saint-Pierre-Quiberon (Illustration 70 et Illustration 71).



Illustration 70 : Dune bordière en 2007, Penthièvre, Saint-Pierre-Quiberon (56), (Source : Cerema)



Illustration 71 : Progradation de la dune bordière en 2016, Penthièvre, Saint-Pierre-Quiberon (56), (Source : Cerema)

Sur certains secteurs, les rideaux brise-vent sur le front dunaire sont progressivement remplacés par du grillage à mouton pour ne pas perturber les échanges sédimentaires entre la dune et la plage. Le sable peut alors venir plus facilement colmater les brèches de la dune et le cordon dunaire adopte une morphologie plus naturelle, avec une pente plus douce, propice à la recolonisation végétale.

### Bibliographie

Natura 2000 et Life Environnement, 2009 ; Natura 2000, 2015 ; Gouguet, 2002 ; Hallégouët, 2002.

## Dune d'Aval – Wissant (62)

### Contexte

Située dans le département du Pas-de-Calais (62), la baie de Wissant et sa plage de sable fin s'étendent sur 12 km en formant une courbe du Cap Blanc-Nez au Cap Griz-Nez. Cette côte basse sableuse est exposée aux houles de nord-ouest et le marnage peut dépasser 8 m lors des forts coefficients de marée. L'érosion marine est très importante dans la baie et entraîne un recul du trait de côte et un abaissement de l'estran. Les dunes et les ouvrages situés en haut de plage deviennent vulnérables aux aléas de submersion et d'érosion marine. De plus, la réduction de la surface de sable sec entraîne une diminution de l'attrait touristique de la station de Wissant. À marée basse, les affleurements de tourbe témoignent du démaigrissement important de la plage (Illustration 72).

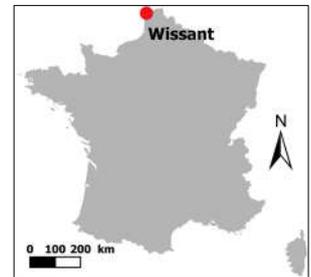


Illustration 72 : Affleurement de tourbe et d'argile sur l'estran en avant de la dune d'aval

La dune d'Aval, située à l'ouest immédiat de la commune de Wissant, recule drastiquement. Sa largeur a diminué de 60 m entre 1999 et 2014 et les événements de tempêtes de l'hiver 2013-2014 ont provoqué un recul de 10 m. En 2015, les maisons les plus proches du trait de côte ne sont plus qu'à 40 m et au rythme actuel du recul, elles seront d'ici quelques années atteintes par l'érosion côtière (Illustration 73).

Dans les années 2000, des rangées de pieux hydrauliques ont été implantés avec pour but de freiner la dérive littorale et d'amortir l'énergie des houles, afin de favoriser l'accumulation de sable et limiter le démaigrissement de la plage. Ce dispositif a montré ses limites sur ce site exposé aux houles (Illustration 74). En 2014, une étude de stabilisation de la dune d'Aval à court terme a été réalisée par la Cellule Technique Littorale du Pôle Métropolitain de la Côte d'Opale (PMCO), avec l'objectif d'aider la commune de Wissant à choisir l'option de protection du littoral la plus adaptée, dans l'attente de la mise en œuvre d'une solution de plus grande envergure, efficace à long terme, à l'échelle de la cellule sédimentaire de la baie de Wissant. Le bureau d'étude Idra Environnement a ainsi mis en avant l'intérêt de procéder à un rechargement massif de la plage.



Illustration 74 : Rangée de pieux hydrauliques sur l'estran en avant de la dune d'Aval

## Mise en œuvre

En mai 2016, la décision de déclencher la procédure d'urgence d'aménagement et de stabilisation de la dune d'Aval, d'un montant de 1,3 M€, a été prise pour limiter le recul du trait de côte, situé à 30 m des habitations du quartier. Début juillet, une opération de rechargement de plage d'un volume de 50 000 m<sup>3</sup> a été réalisée, avec du sable en provenance des travaux du port de Calais, refoulé depuis une drague au large via une conduite de 400 m. Le stock a ensuite été étalé par des bulldozers sur un linéaire de 250 m pour redonner une pente plus naturelle et créer un haut de plage sec, même à marée haute. La mise en place de pieux hydrauliques, de casiers de ganivelles et de plantations d'oyats a été réalisée courant septembre pour atténuer l'énergie de vagues et stabiliser le rechargement de plage, bien que deux coups de vent d'août aient déjà attaqué le stock rechargé et détruit les premières ganivelles.

## Évolution du site et efficacité des procédés

Les événements de tempête de l'automne 2016 ont ensuite dégradés le dispositif, en détruisant une partie importante du rechargement et des rangs de ganivelles, rendant stupéfaits et sceptiques les riverains, qui ne comprennent pas et réclament pour certains un cordon en enrochement, dans le prolongement de celui existant. Il faut rappeler que l'aménagement, qui n'était pas terminé dans son ensemble, s'est détérioré dès les premiers coups de vent, en raison de l'action des vagues amplifiées par les effets de bords du cordon en enrochement existant ; les sept rangées de pieux hydrauliques n'ont été posés qu'en septembre. Mais, les événements de tempête, qui ont suivi à l'automne, laissent tout de même perplexes sur l'efficacité du dispositif : sa dégradation est considérable. Le dispositif avait été conçu pour durer cinq ans, le temps de trouver le moyen et les financements pour intervenir à l'échelle de la cellule sédimentaire par la mise en place d'un rechargement massif de la baie de Wissant ; Le bureau d'étude EGIS ayant préconisé en 2014 un scénario de rechargement de 680 000 m<sup>3</sup> sur 2,5 km, suivi d'un rechargement périodique de 300 000 m<sup>3</sup> tous les 5 à 6 ans pour stabiliser le trait de côte.



Illustration 75 : Dune d'Aval en phase érosive en janvier 2017, suite à la procédure d'urgence d'aménagement et de stabilisation de court terme réalisée à l'été 2016

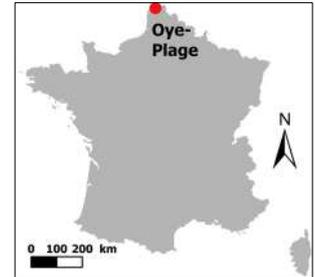
## Bibliographie

Battiau-Queney, 2006 ; Ghesquiere et Bourlet, 2014 ; Tresca, 2015.

## Platier d'Oye – Oye-Plage (62)

### Contexte

Le littoral du Platier d'Oye se caractérise par une côte sableuse en accrétion depuis plusieurs siècles. L'évolution la plus significative du trait de côte se situe au niveau de l'Anse de l'Abri Côtier, où la dune progresse sur la plage. Néanmoins, l'évolution n'est pas homogène et la partie centrale du Platier d'Oye connaît des périodes érosives. L'accrétion a été prédominante dans cette zone entre 1949 et 1963 (+0,65 cm/an), tandis que la tendance fut à la stabilisation entre 1963 et 1972. Le trait de côte recula (-1 m/an) ensuite de 1972 à 1994, et depuis cette date, le secteur est relativement stabilisé, estimé en faible érosion à l'ouest et en faible accrétion en partie centrale.



Le Platier d'Oye présente la particularité d'héberger un lotissement de 150 maisons, les Escardines, avec un projet initial de lotir 1 000 maisons dans les années 1970, revu à la baisse (Illustration 76). Ce lotissement construit en zone basse (4 m NGF) se situe en arrière du cordon dunaire, qui s'est aminci côté ouest, avec une largeur inférieure à 20 m. Ce cordon représente l'unique rempart entre la mer et la zone basse située en arrière. Dans le contexte actuel d'élévation du niveau de la mer, la présence du lotissement a motivé le développement d'aménagements favorisant la stabilisation du cordon dunaire.



Illustration 76 : Couverture du platier d'Oye par le satellite SPOT6 (2014) - Géoportail - Données cartographiques © Airbus Defense and Space, IGN, IRSTEA, CNES

### Mise en œuvre

Pour ralentir l'érosion de la plage et de la dune au droit du lotissement des Escardines, des mesures de protection ont été prises dès 1988. Le cordon dunaire a été reprofilé mécaniquement et stabilisé par la plantation d'oyats. Des rangées de pieux hydrauliques perpendiculaires au rivage ont été implantées pour jouer le rôle d'épis, face à l'importante dérive littorale du secteur. En 2000, de nouveaux épis ainsi qu'un brise-lame composé de pieux hydrauliques sont venus compléter le dispositif. Et en 2010, une série de huit casiers à vent, constitués de pieux hydrauliques et de ganivelles, a été implantée sur le haut de plage afin de favoriser l'accumulation de sable pendant la période estivale et de limiter l'action des houles et des courants à marée haute (Illustration 77).



Illustration 77 : Série de casiers à vent en pieux hydrauliques et ganivelles sur le haut de plage

### Suivi scientifique

Les services de l'État effectuent des mesures topographiques depuis 1996 sur la plage située en avant du lotissement des Escardines. Deux fois par an, après l'hiver et après l'été, neuf profils perpendiculaires au rivage sont relevés au DGPS. L'évolution de la position du trait de côte depuis 1952 a aussi été étudiée à partir de photographies aériennes ortho-rectifiées.

### Évolution du site

Entre 1952 et 2015, des périodes d'accrétion et d'érosion se sont succédé mais en moyenne, le trait de côte a reculé de 40 cm/an au niveau de la partie centrale du Platier d'Oye. C'est au droit du lotissement que l'on enregistre le recul maximal (- 48 m) mais depuis l'installation des premiers dispositifs sur le haut de plage à la fin des années 1980, le rivage est globalement stable avec une érosion de l'ordre de 35 cm/an à l'est de la zone et une accrétion comprise entre 17 et 61 cm/an à l'ouest (Illustration 78).



Illustration 78 : A l'est, présence d'une micro-falaise et à l'ouest le pied de dune est en accrétion

Le sable s'accumule dans les casiers à vent sur le haut de la plage, créant ainsi une zone tampon qui protège la dune des actions marines. Néanmoins, ces dispositifs retiennent le sable qui en leur absence, viendrait naturellement alimenter la dune en arrière (Illustration 79).



Illustration 79 : Accumulation significative au sein d'un casier à vent en haut de plage

### Efficacité des procédés

Les épis en pieux hydrauliques ne permettent pas l'accumulation de sédiments puisque la plage est au même niveau à l'ouest et à l'est de ces ouvrages. Ils jouent toutefois un rôle d'amortisseur face aux

courants et aux vagues. Le brise-lame composé de pieux hydrauliques est certainement plus efficace pour amortir les houles, étant placé parallèlement au rivage.

Les casiers à vent, constitués de pieux hydrauliques et de ganivelles permettent l'accumulation de sédiments sur le haut de plage. Le pied de dune à l'arrière de ces ouvrages est relativement stable. Globalement, les résultats montrent que depuis leur mise en place, les taux d'érosion ont diminué de moitié à l'est de la zone et la tendance s'est inversée à l'ouest où le haut de plage est en accrétion.

Néanmoins, deux blockhaus situés au droit du lotissement sont à l'origine d'une érosion localisée, en favorisant la réflexion des vagues et l'abaissement du niveau moyen de la plage.

#### Bibliographie

Brimeux, 2016 ; Dubaille, 2016 ; Gabillard, 2016 ; Ruz et al., 2016.

## 3.3 Recommandations

### 3.3.1 Conditions d'efficacité et limites

La gestion souple des dunes revient à composer avec les éléments naturels (vent, vagues, marées, apport de sédiments) pour atténuer l'érosion et favoriser l'accrétion sédimentaire. Réduire la vitesse du vent localement ou stabiliser le sol permet de contrôler la mobilité de la dune. L'équilibre naturel des dunes peut être compromis par les dommages causés par la surfréquentation, la dégradation et la stabilisation excessive. Il ne s'agit donc pas de fixer la dune, mais plutôt de lui conserver un certain degré de mobilité qui lui permette de s'ajuster aux changements et de continuer à jouer son rôle d'amortisseur au sein du système plage-dune.

Les techniques présentées sont le reprofilage, le rechargement, la mise en œuvre de rideaux brise-vent, la plantation de végétaux et la canalisation de la fréquentation. Il faut éviter les interventions lourdes qui tendent à fixer la position du cordon dunaire, à augmenter sa hauteur et à en réduire l'aérodynamisme. La perte de la végétation est par ailleurs critique pour la stabilité des dunes et leur développement à long terme. Pour éviter les dégradations des cordons et massifs dunaires, il faut réglementer l'accessibilité en canalisant la fréquentation par des sentiers d'accès aux plages (Gouguet, 2018).

#### Reprofilage

La technique consiste à retravailler le profil de la dune, afin de la rendre moins vulnérable face à l'action du vent et limiter ainsi la déflation éolienne. Il est préconisé de combler les surplombs, ravines et cuvettes de déflation afin d'obtenir une topographie de dune homogène qui réduit les prises au vent. Le reprofilage apparaît utile pour des dunes fortement érodées, présentant des microfalaises dunaires en pieds. Il permet de rendre un profil plus aérodynamique aux cordons dunaires et d'éviter leur destruction plus rapide par glissement et effet du vent accentué. Il permet aussi de préparer le terrain en vue d'une végétalisation bien qu'une dune homogène ne soit pas propice à la colonisation végétale, car sa topographie manque de diversité et sa pente n'est pas toujours adaptée.

#### Rechargement

Selon l'importance de la dégradation et les caractéristiques morphologiques de la dune, la technique de rechargement peut s'opérer sur ses versants maritime et/ou terrestre ou sur sa crête. Elle est aussi utilisée plus ponctuellement, afin de combler les cuvettes de déflation. Le rechargement nécessite la mobilisation de moyens techniques importants et doit être réservée aux cas où la dune est très dégradée ou si les enjeux sont importants.

Un rechargement de haut de plage contribue à la restauration dunaire par la mise en place de sable mobilisé par le vent et qui viendra engraisser la dune, jouant aussi le rôle de zone tampon entre la dune et la zone de déferlement des vagues. Cette technique permet d'apporter du sable à la dune de façon naturelle, elle est notamment préconisée à la suite d'un événement de tempête érosive. Pour que la dune s'engraisse, les sédiments d'emprunt disposés sur le haut de plage doivent avoir une granulométrie compatible et appropriée aux conditions de vent du site. Conjointement, la mise en place de rideaux brise-vent sur les dunes peut aider à retenir le sable dans les zones souhaitées.

#### Rideaux brise-vent et plantation de végétaux

Les rideaux brise-vent permettent de réduire la vitesse du vent et de favoriser les dépôts du sable et de contraindre sa remise en mouvement ; ils sont fabriqués à base de matériaux végétaux ou synthétiques. Leur efficacité dépend de la disponibilité des sédiments, de la taille des grains, de la vitesse et direction

du vent mais également des caractéristiques suivantes du dispositif (Pye et al., 2007 ; Nordstrom, 2008) :

- porosité : si elle est inférieure à 20 %, le rideau brise-vent se comporte presque comme un obstacle solide, les sédiments sont réfléchis et l'accumulation ne sera pas favorisée. Une porosité comprise entre 30 et 50 % est idéale pour que le sable s'accumule, se dépose de part et d'autre du rideau, sur une distance correspondant à deux fois sa hauteur ;
- hauteur : si l'objectif est d'augmenter la hauteur de la dune, des clôtures de deux mètres sont recommandées alors que des clôtures d'un mètre favoriseront son élargissement ;
- nombre de rangées : la mise en place de plusieurs rangées permet de créer des dunes plus larges, avec des pentes plus faibles et des lignes de crêtes ondulées, imitant mieux les formes dunaires naturelles (Illustration 80) ;
- distance entre les rangées : un espacement de quatre fois la hauteur du rideau brise-vent est préconisé, notamment lorsque le but est d'augmenter la largeur de la dune ;
- orientation : l'efficacité maximale est atteinte lorsque le rideau est placé perpendiculairement à la direction du vent dominant mais dans la majorité des cas, ils sont placés le long du rivage pour que la dune croisse tout en conservant la morphologie du trait de côte. Par rapport aux dispositifs linéaires, les dispositifs en « zig-zag » augmentent sensiblement le volume de sable accumulé mais ne justifie pas forcément les coûts supplémentaires que leur mise en place engendre.



Illustration 80 : Rangées de rideaux brise-vent disposés sur le versant maritime d'une dune de la côte Aquitaine (Source : ONF)

La plantation de végétaux est une technique pérenne qui permet de conserver les caractéristiques naturelles de la dune ; elle doit être préférée aux rideaux brise-vent, qui vont avoir tendance à raidir sa pente moyenne et à altérer sa stabilisation. La végétation permet de maintenir une dune en bonne santé et l'utilisation des rideaux brise-vent est seulement nécessaire si l'objectif est d'obtenir une croissance rapide de la dune (Illustration 81).

Notons que les cuvettes de déflation et les zones ponctuelles non végétalisées ne doivent pas être perçues systématiquement comme un problème dans la gestion des dunes. Ce sont des formes qui se retrouvent systématiquement dans les systèmes dunaires en bon état.



Illustration 81 : Gestion souple ; à gauche, reprofilage et rideaux de brise-vent à Quend (80) et à droite, rideaux et plantation qui ont favorisé la progradation de la dune sud de La Tresson à Noirmoutier (85), (Source : Cerema)

L'installation de rideaux brise-vent sur le haut de la plage doit être évitée, elle favorise l'engraissement de la plage au détriment de la dune et ralentit les échanges entre les deux entités. De plus, ces structures sont la plupart du temps fragiles et rapidement dégradées par les actions marines. Des installations de type pieux hydrauliques peuvent être conçus à la fois pour favoriser l'accrétion et pour amortir l'énergie des vagues sur le pied de dune.

Bien que les dispositifs brise-vent de type ganivelle peuvent aider à construire ou conforter des dunes rapidement, ils doivent être utilisés prudemment. Les milieux dunaires sont mobiles par nature et les déplacements sédimentaires ne doivent pas être interrompus. Les ganivelles ont tendance à créer des dunes linéaires alors que les dunes naturelles présentent une grande diversité topographique. Leur utilisation est préconisée dans les projets de restauration dunaire, mais doit être limitée dans le temps pour ne pas fixer excessivement la dune restaurée.

Des dispositifs brise-vent peuvent être mis en place ponctuellement au niveau des cuvettes de déflation (Nordstrom, 2008).



Illustration 82 : Aménagement d'urgence de la dune d'Aval, Wissant (62), rechargement, brise-vent, plantation et pieux hydrauliques : situation en août 2016, présentée sur la photo du haut (Source : Les amis de la baie de Wissant) et situation en janvier 2017, présentée sur la photo du bas avec une orientation de la prise de vue inversée Sud-Nord (Source : Drone Littoral)

## Canalisation de la fréquentation

La végétation des dunes est fragile, elle pousse dans des conditions climatiques difficiles et sur un substrat meuble et est particulièrement vulnérable au piétinement. Lorsqu'il fait chaud et sec, elle sèche, et même une fréquentation modérée peut causer des dommages qui mettront plusieurs années à se résorber. La présence d'usages récréatifs sur les dunes engendre une dégradation importante de la végétation, accentuant la déflation éolienne.

La mise en place de chemins d'accès bien encadrés par de des clôtures mono-fil, bi-fils ou de ganivelles permettent de limiter très largement les impacts du piétinement sur les dunes. Les chemins étant eux-mêmes sensibles à l'érosion, ils peuvent être renforcés par un revêtement en géotextile ou en écorces de pin afin d'éviter leur surcreusement (De la Torre et al. 2014 ; Feilberg and Jensen, 1992).

Le même type de clôtures, c'est-à-dire des ganivelles, est souvent utilisé pour canaliser la fréquentation et pour retenir les sables. Or les chemins d'accès à la plage sont souvent perpendiculaires au rivage, et lorsqu'ils sont entourés de ganivelles, des formes dunaires non naturelles se mettent en place. Lorsque l'objectif est d'isoler les visiteurs de l'environnement dunaire, des clôtures à fils doivent être préconisées car elles ne perturbent pas la dynamique sédimentaire et les déplacements de la faune (Illustration 83).



Illustration 83 : Chemins d'accès, à travers le massif dunaire, à la plage de Luzérondo, Noirmoutier (85), recouvert d'écorces de pin et séparé de la dune par des clôtures en bi-fils, et à la plage des Blancs-Sablons, Le Conquet (29), par un escalier en bois et séparé par des clôtures en ganivelles et bi-fils (Source : Cerema)

### 3.3.2 Méthodes combinées

La plupart des techniques présentées sont complémentaires et gagnent en efficacité si elles sont combinées. Les opérations de reprofilage et de rechargement sont très souvent accompagnées par la pose de rideaux brise-vent et de plantation de végétaux afin de stabiliser le stock de sable mis en place. Les rideaux brise-vent peuvent contribuer au développement des végétaux, car ils stabilisent le milieu ; il est néanmoins préférable de les retirer lorsque la végétation est suffisamment développée.

La canalisation de la fréquentation est une technique indispensable à la gestion efficace des dunes. Elle est essentielle au bon fonctionnement d'autres mesures comme la plantation de végétaux, et limite grandement la dégradation des cordons et massifs dunaires, résultant de la pression anthropique (De la Torre et al. 2014), (Gouguet, 2018).

## Impact des ouvrages longitudinaux sur les cordons dunaires

Dans la gestion des cordons dunaires, les techniques souples qui accompagnent les processus naturels doivent être préconisées préférentiellement aux techniques qui s’y opposent. Autant que possible, il faut travailler avec la nature, en jouant sur la mobilité du cordon dunaire plutôt que de construire des ouvrages rigides immobiles. L’emploi de ces dispositifs lourds doit être limité au cas où les aléas d’érosion et de submersion marine sont très forts, que les enjeux humains dans le secteur sont importants et vulnérables et qu’une délocalisation n’est pas une option envisageable.

Les ouvrages longitudinaux visant à fixer le trait de côte ont un impact fort sur la dynamique sédimentaire du système plage-dune ; ils sont à proscrire en matière de protection de dunes. Ces ouvrages rigides, souvent inesthétiques, accentuent le phénomène d’érosion à proximité du haut de plage en interrompant les échanges entre la plage et la dune. Ils favorisent par la réflexion des vagues, le départ des sédiments vers le large, ce qui conduit à abaisser le niveau du haut de plage et à voir disparaître les plages sèches.

À cela s’ajoute les coûts importants liés à leur construction et à leur maintenance. Dans bien des cas, la gestion souple des dunes peut s’accommoder de l’absence de tels dispositifs. Deux exemples d’ouvrages longitudinaux en enrochement, parmi les nombreux implantés sur les cordons dunaires des côtes françaises, sont présentés ici (Illustration 84).



Illustration 84 : Interruption de la dynamique sédimentaire entre la plage et la dune par des ouvrages longitudinaux : en haut, le site des Sables d’Or, Fréhel (22) et en bas, le site des Eloux, Noirmoutier (85), (Source : Cerema)

### 3.3.3 Pour aller plus loin

Il faut se référer au guide de recommandation suivant :

CETMEF, 1998, Recommandations pour la conception et la réalisation des aménagements de défense du littoral contre l’action de la mer, 540 p, rapport ER PM 98.01, chap. II : 43-47.

Gougnet L., 2018, Guide de gestion des dunes et des plages associées, guide piloté par l’ONF à la demande du ministère de la Transition écologique et solidaire, Collection savoir faire, édition Quae, 244 p.

## 4 LE SYSTEME DE DRAINAGE DE PLAGE

### 4.1 Présentation de la méthode

#### 4.1.1 Objectif et définition

Le drainage de plage est une technique souple de protection qui a été développée et testée depuis les années 1980 sur la côte nord du Jutland au Danemark. Après avoir installé un système de filtrage pour alimenter le centre marin aquarium de Hirtshals, l'Institut danois de Géotechnique a découvert en 1981 que le drain longitudinal enfoui sous la plage favorisait l'accroissement du niveau de la plage et de sa largeur près de l'installation.

Par la suite, de 1985 jusqu'en 1991, des tests réalisés à plus grande échelle sur le site exposé de Thorsminde ont montré que l'exploitation d'un système de drains et de pompes stabilisait le niveau de la plage sur environ 25 mètres près de la ligne d'installation des drains.

Les systèmes de drainage fonctionnent en abaissant la nappe d'eau et en créant ainsi une zone non saturée sous la surface de l'estran près du trait de côte. Ces résultats sont obtenus en évacuant l'eau à travers des drains horizontaux enterrés et parallèles au trait de côte. C'est l'Institut Géotechnique Danois qui a breveté la technologie du système de drainage de plage désigné sous l'appellation d'ECOPLAGE®.

Les systèmes de drainage sont recommandés pour la gestion de plages de sable tidales exposées modérément aux vagues, ayant des variations saisonnières significatives de profil de plage et soumises à une érosion de plage mineure à long terme. Le système de drainage est apprécié pour les activités récréatives en raison de l'absence d'impact visuel et de l'assèchement rapide du sable.

#### 4.1.2 Principe

Le système agit sur les processus de percolation rapide qu'il favorise et permet d'abaisser le niveau de la nappe d'eau sous la surface de l'estran dans la zone d'infiltration. L'eau chargée en grains de sables apportée par la vague sur la zone du jet de rive s'écoule par percolation et est collectée dans le drain, tandis que le sable est retenu sur l'estran ; ce qui permet l'assèchement accéléré du haut de plage à marée descendante.

La captation des sables est améliorée et l'infiltration accrue de l'eau entraîne une diminution de l'énergie de la nappe de retrait. L'absorption du jet de rive favorise ainsi le dépôt des sédiments au-dessus des drains, alors que les départs de sable sont limités par la nappe de retrait qui est amoindrie (ECOPLAGE ; CIRIA, 1996 ; GRESARC, 2007 ; MEEDM, 2010).

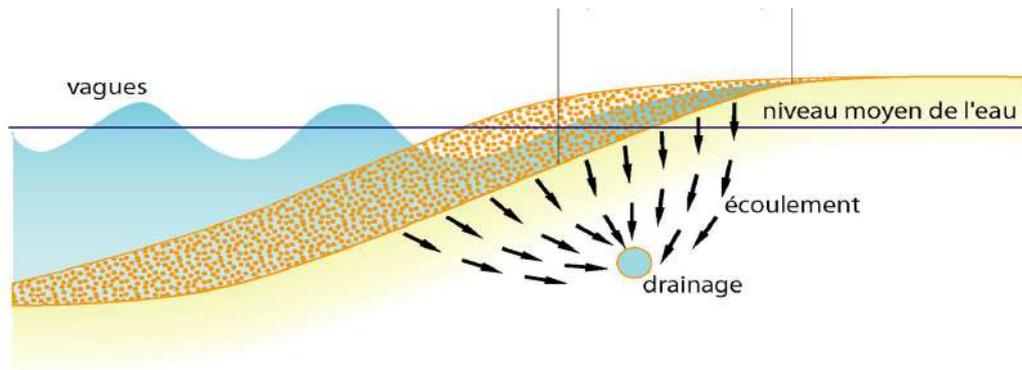


Illustration 85 : Principe de fonctionnement du système de drainage de plage ECOPLAGE®

Le système de drainage de plage est constitué :

- de drains horizontaux, enterrés à un niveau choisi en fonction des conditions hydrodynamiques du site, en général à 1 à 2 mètres de profondeur, et disposés parallèlement au trait de côte ;
- de canalisations de transport et de puits collecteurs qui permettent à l'eau captée par les drains de s'écouler vers le bas estran ;
- et d'une station de pompage-relevage qui permet l'évacuation de l'eau de mer filtrée.

L'eau filtrée par les drains s'écoule par effet gravitaire, avec une pente très faible de l'ordre de 0,3 %, vers les puits collecteurs, qui peuvent être implantés en bas estran ou ailleurs, pourvu qu'ils puissent être alimentés par gravité, avant d'être relevée et évacuée par la station de pompage. Elle peut ensuite être rejetée en mer ou valorisée pour les activités de proximité (aquarium, thalassothérapie, piscine,...).

#### 4.1.3 Inventaire des systèmes de drainage de plage en France

Depuis 1990, des systèmes de drainage de plage ont été mis en œuvre sur plus de trente plages à travers le monde ; citons le Danemark, les Etats-Unis, le Royaume-Uni, le Japon, la Suède, la France, l'Italie, la Malaisie et les Emirats Arabes Unis (Karambas, 2008).

En France, le système ECOPLAGE a été expérimenté sur les plages des Sables d'Olonne (85) en 1999, de Villers-sur-Mer (14) en 2002 et de Saint-Raphaël et Saint-Maxime (83) en 2003 et 2004. Plus récemment, le système de drainage a été installé sur les plages de Quend-Plage (80) en 2008, du Lido de Sète à Marseillan (34) en 2012, Saint-Gilles-Croix-Vie (85) en 2013 et Merlimont (80) en 2014.

## 4.2 REX de sites

### 4.2.1 Présentation des REX de sites

Les REX de sites concernent les huit communes présentées sur la carte suivante, qui utilisent le système de drainage de plage (Illustration 86).

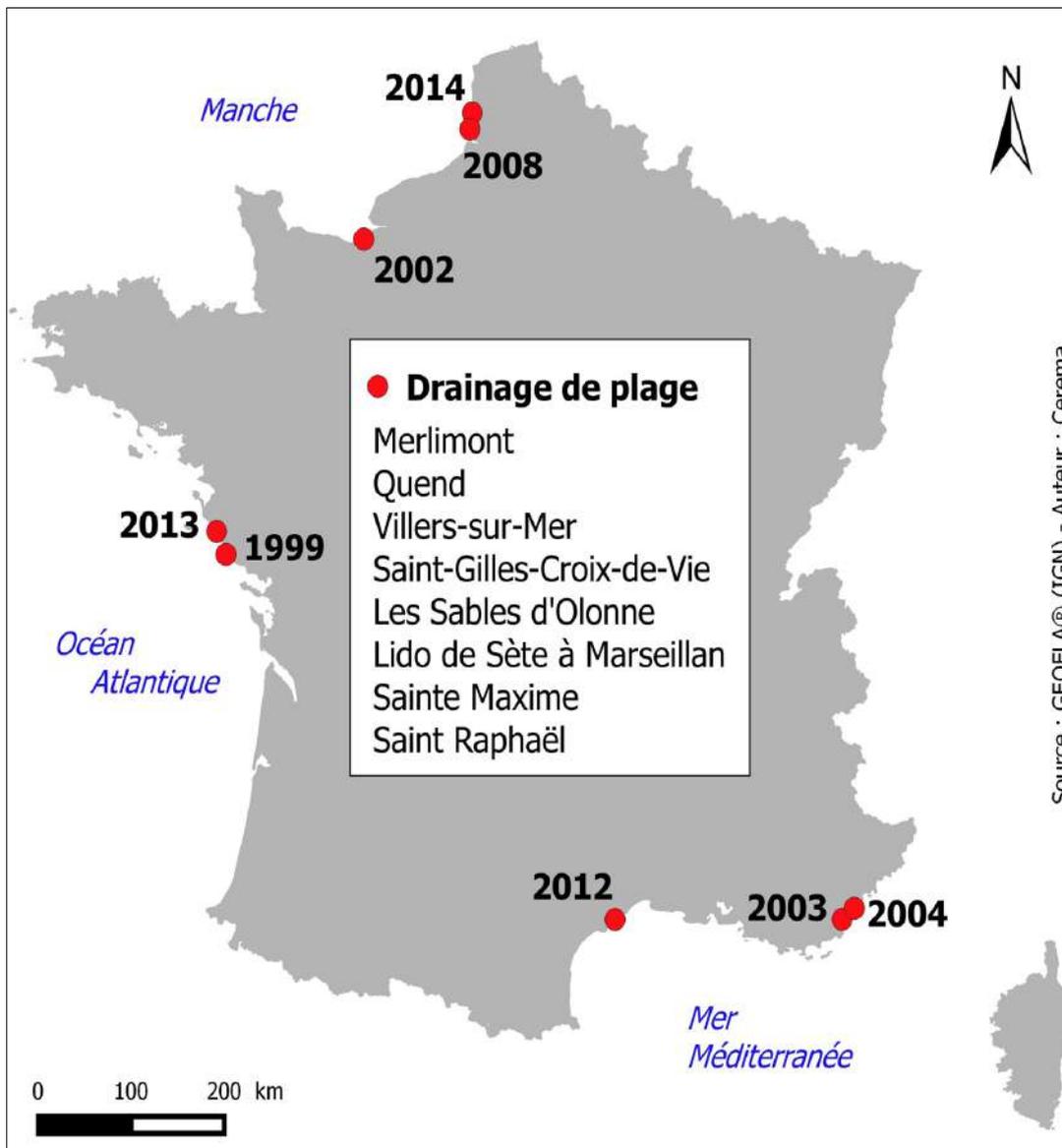


Illustration 86 : Présentation des REX de sites des huit communes qui utilisent le système de drainage de plage, avec l'indication des dates de mises en œuvre

## Les Sables d'Olonne (85)

### Contexte

Au cours du XX<sup>ème</sup> siècle, le bilan sédimentaire de la grande plage des Sables d'Olonne aurait été déficitaire de 100 000 m<sup>3</sup>, ce qui représente une érosion moyenne de 1 000 m<sup>3</sup> par an (volume estimé à partir des suivis réalisés par le service maritime depuis 1970). En raison de l'abaissement du niveau moyen de la plage, les infrastructures et notamment le remblai sont vulnérables aux déferlements des vagues lors des événements de tempête. Et la plage saturée en eau, avec très peu de zones sèches, est moins propice aux activités récréatives. Pour pallier le phénomène d'érosion côtière et rendre plus attractive la plage, la municipalité des Sables d'Olonne a choisi d'opter en 1999 pour la solution d'un système de drainage de plage, qui devient le premier site d'expérimentation en France.



### Conception et mise en œuvre

En 1999, un premier drain de 700 m linéaires est installé au niveau du haut de la plage, le procédé sera complété en 2002 par un second drain parallèle, de 600 m linéaires, enfoui au niveau du milieu estran. L'eau captée par ces deux lignes de drains est acheminée par gravité vers la station de pompage équipée de deux pompes de 250 m<sup>3</sup>/h. L'eau de mer issue des drains est rejetée en mer grâce à une canalisation de rejet. La commune des Sables d'Olonne était le maître d'ouvrage des travaux, dont le montant est estimé à 726 000 €. Le coût de fonctionnement annuel du système est d'environ 16 000 €, essentiellement dû à l'alimentation électrique de la station de pompage qui rejette l'eau filtrée en mer.

### Suivi scientifique

Depuis la mise en place du système de drainage, un suivi est effectué chaque année par le laboratoire Geolittomer de l'Université de Nantes avec des suivis topographiques au DGPS et une reconnaissance bathymétrique à l'aide d'un sonar à balayage latéral. Il existe donc un suivi rigoureux débuté en 1999 et qui permet aujourd'hui de suivre l'évolution morphologique de la plage sur une période significative. Le bureau d'étude Créocéan a aussi participé à l'étude du site.

### Évolution du site

Le bilan sédimentaire, sur les six années (2000-2006) qui ont suivi la mise en place du système est plutôt positif, avec un net assèchement de la plage et une diminution de la teneur en eau des sédiments de 50 % au niveau des drains (Illustration 87).

L'évolution se traduit par une surélévation du haut de plage en fin d'été, l'assèchement à marée descendante de la plage et l'élargissement du haut de plage à l'est. Le point de rupture de pente a été repoussé d'une dizaine de mètres vers le bas estran et la largeur de la plage à marée haute a augmenté d'au moins dix mètres (Illustration 87 et Illustration 88).

### Efficacité du procédé

Après les six premières années de suivi (2000-2006), le bilan est satisfaisant, la plage ne s'est pas érodée et la tendance est au contraire à l'accrétion avec plus de 20 000 m<sup>3</sup> de sédiments, résultant d'un transfert de sables du bas de plage vers le haut de plage. Les drains favorisent le stockage du sable avant l'été et permettent à la plage de retrouver un profil transversal correct. Ils évitent ainsi la mise à nu des fondations des ouvrages hydrauliques situés à proximité. Le système de drainage permet d'obtenir un assèchement rapide de la plage à marée descendante, et donc un usage récréatif plus confortable.



Illustration 88 : La plage des Sables d'Olonne avant et après la mise en place du système de drainage

Ces résultats sont toutefois à nuancer car, au cours de cette période, les conditions météorologiques ont été particulièrement favorables, avec des hivers cléments et des tempêtes érosives assez rares. De plus, au cours de l'année 2002, les déblais issus du dragage du port des Sables d'Olonne, représentant un volume de 16 600 m<sup>3</sup>, ont été clapés sur l'avant-côte de la grande plage. Entre 65 et 90 % des sédiments clapés de granulométrie similaire à celle des sédiments de la plage, représentant un volume d'au moins 10 000 m<sup>3</sup>, sont venus alimenter la cellule hydrosédimentaire. Ainsi, l'apport substantiel des déblais de dragage du port est à signaler et conduit à préciser que les gains constatés de 20 000 m<sup>3</sup> sur la période ne peuvent pas être attribués qu'au seul bénéfice du système de drainage de plage.



Illustration 89 : Surélévation du haut de plage et assèchement à marée descendante (juin 2016) : grande plage des Sables d'Olonne (Source : Cerema)

Depuis cette date, d'autres opérations de dragage du port et de clapage des sédiments ont été réalisées. En plus, avant la saison estivale, la commune fait également prélever du sable en bas de plage pour le régaler devant le remblai avant la mise en place des restaurants de plage. Bien que ce remodelage ne change pas directement le bilan sédimentaire de la cellule (pas de perte, ni de gain), ce changement de topographie empêche d'isoler le rôle du procédé de drainage sur l'évolution de la morphologie de la plage.

Il est donc difficile, dans ces conditions d'exploitation du site, de juger de l'efficacité du seul système de drainage de plage. Globalement, depuis 1999, le bilan est plutôt positif puisque la plage des Sables d'Olonne ne présente plus de tendance à l'érosion. Cependant, le procédé a subi des dégradations lors des forts événements de tempêtes de l'hiver 2013-2014. En effet, un des drains, sur un linéaire de 100 m de drains, a été endommagé et réparé pour un montant de 75 000 € début 2015.

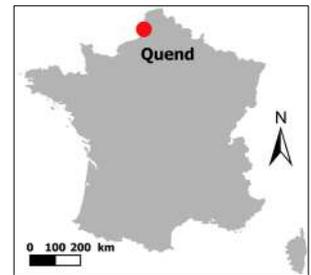
### Bibliographie

ECOPLAGE ; Fattal et Walker, 2008.

## Quend (80)

### Contexte

La plage de Quend, orientée nord-sud, est particulièrement exposée aux houles d'ouest et lors des années de fortes tempêtes, l'érosion de l'estran et de la dune est souvent marquée. Au début des années 2000, l'abaissement de la plage au niveau du haut estran ne permet plus une bonne atténuation des houles qui rendent le perré et le pied de la dune encore plus vulnérables. La commune de Quend a décidé en 2006 de lancer une étude de faisabilité pour trouver une solution technique durable pour lutter contre l'érosion et permettre une bonne protection des dunes et du haut estran de la station balnéaire. C'est le système de drainage de plage qui a été retenu pour pallier l'érosion côtière.



### Mise en œuvre

En 2008, un drain de 5 m de large et de 900 m de long est enfoui sous le sable au niveau du haut de plage, parallèlement au perré de la station balnéaire. Le drainage est couplé à la mise en place de rideaux brise-vent sur les dunes, de part et d'autre du perré long de 300 m (Illustration 90). La commune est le maître d'ouvrage de l'opération qui a initialement coûté 1 870 000 €. Chaque année, le coût de fonctionnement du système de drainage s'élève approximativement à 15 000 €.

### Suivi scientifique

Suite à l'installation du procédé et à la demande de la DDTM, de nombreuses données topographiques et granulométriques ont été acquises depuis 2008 grâce à des campagnes de mesures réalisées tous les 6 mois. Les suivis sont effectués en avril et en septembre de chaque année à l'aide d'un DGPS. Les suivis sont réalisés par l'Institut Polytechnique LaSalle Beauvais et par l'association GEMEL.

### Évolution du site

Concernant l'évolution morphologique de la plage, les études de suivi montrent qu'il y a une variabilité interannuelle et saisonnière importante mais que la tendance générale de la plage est à la sédimentation. Sur la période 2008-2012, le pied de dune s'est engraisé de 29 187 m<sup>3</sup>, le haut estran de 40 060 m<sup>3</sup> tandis que le bas et le moyen estran enregistre un démaigrissement de 51 727 m<sup>3</sup>. Le bilan global de la plage sur cette période de quatre ans se traduit donc par un engraissement de 17 520 m<sup>3</sup>. Ce volume est relativement faible mais avant l'installation du système de drainage, la plage était en érosion significative et enregistrait des pertes annuelles comprises entre 20 000 et 30 000 m<sup>3</sup>. De plus, d'importants événements de tempête érosifs se sont produits au cours de cette période.



Illustration 90 : Travaux réalisés en 2008 et situation de la plage de Quend avant et après la mise en place du système de drainage de plage (Source : ECOPLAGE)

Les deux photos ci-dessous illustrent bien l'évolution du haut estran et la tendance à l'engraissement entre 2008 (Illustration 91 - A) et 2016 (Illustration 91 - B). En 2008, il n'y avait plus de haut de plage sec en avant du perré, la nappe phréatique affleurait directement alors qu'en 2016, le haut de la plage s'est reconstitué.



Illustration 91 : Evolution de la plage au pied du perré entre 2008 (avant les travaux) et mai 2016

Néanmoins, l'engraissement marqué au sud n'est pas généralisé sur l'ensemble de la plage. Au niveau de la partie centrale du perré, la plage sèche est présente mais un affouillement au pied du perré est bien visible (Illustration 92 - A), tandis qu'à l'extrémité nord, il n'y a plus de plage sèche et la nappe phréatique continue d'affleurer en avant du perré (Illustration 92 - B). Il faut noter que les photos ont été prises en mai 2016 et donc juste avant la période estivale où l'engraissement naturel prédomine.



Illustration 92 : Affouillement au pied du perré sur la partie nord de la plage de Quend (mai 2016)

### Efficacité du procédé

Le système de drainage de plage s'est montré efficace dès les premières années. Le pied de dune et le haut estran se sont engraisés et la tendance générale de la plage est à la stabilisation. Le système de drainage compense donc l'érosion de la plage de Quend sans pour autant permettre d'inverser la tendance, la sédimentation est faible au nord de la plage. Au cours de l'épisode tempétueux Xynthia, un tronçon du drain sud a été endommagé, perturbant le fonctionnement de l'installation et nécessitant des travaux pour remplacer la partie endommagée.

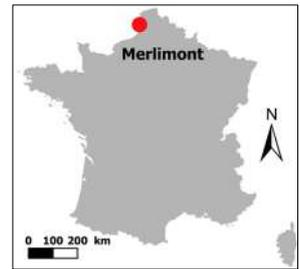
### Bibliographie

Bain, 2011, 2012, 2013, 2014 ; De Santis et al., 2014 ; ECOPLAGE.

## Merlimont (80)

### Contexte

Depuis les années 1970, le trait de côte recule en moyenne de 80 cm/an au niveau du massif dunaire, situé au nord de la station balnéaire de Merlimont, et de 1,40 m/an sur le massif dunaire situé au sud. Cette érosion se traduit également par un abaissement du niveau moyen de la plage, contribuant à un moindre amortissement des houles de tempête. Le perré en béton qui protège la station est fragilisé à cause de l'affouillement significatif en son pied. Les épis en enrochement, non entretenus depuis 30 ans, ne permettent plus de lutter efficacement contre l'érosion. À terme, le recul du trait de côte pourrait entraîner la déstabilisation de deux bâtiments et d'une partie de la voirie situés au sud.



### Mise en œuvre

Conscience de l'aléa, de la vulnérabilité de son front de mer et des enjeux touristiques associés à l'exploitation de la plage, la Communauté de Communes Mer et Terres d'Opale (CCMTO) s'est lancée en 2012 dans un projet de drainage de plage pour conforter la plage. En 2014, un système de drainage, composé d'un drain de 900 m, positionné sur le haut de plage parallèlement au perré, de collecteurs et canalisations de transport et de station de pompage, a été réalisé pour un coût de 1 300 000 €. Au préalable, cinq des six épis en enrochement présents sur la plage ont été enlevés pour permettre la mise en place du système.

### Suivi scientifique

Depuis que le système de drainage est opérationnel, un suivi morphosédimentaire est réalisé par le bureau d'étude Géodunes et le laboratoire LOG de l'Université du Littoral Côte d'Opale. Il est effectué deux fois par an sur la période 2015-2018. L'objectif est d'évaluer l'évolution morphologique de la plage et l'efficacité du système de drainage de plage.

### Évolution du site

Depuis la mise en place du dispositif en 2014, le suivi montre qu'environ 12 500 m<sup>3</sup> de sable auraient été soustraits à la plage, majoritairement sous l'action des événements de tempête. En avril 2016, la plage est en situation critique avec un abaissement constaté de 2 m du niveau de la plage depuis septembre 2015 (Illustration 93 et Illustration 94). Plusieurs raisons expliquent ce démaigrissement important :

- Le front de mer aménagé se retrouve aujourd'hui en avant du trait de côte avoisinant, avec des apports sédimentaires latéraux très limités ;
- La plage est exposée aux houles de tempêtes de secteurs sud-ouest à nord-ouest ;
- Le perré en béton du front de mer, avec des confortements en enrochement, est très réflexif. Les sables sont emportés vers le large sous l'action des vagues et des courants sagittaux associés ;
- Le bilan sédimentaire de la cellule sédimentaire est déficitaire ;

Au cours de l'hiver 2015-2016, la succession de coups de vents d'intensité moyenne mais répétés a abaissé considérablement le niveau de la plage.



Illustration 93 : Plage de Merlimont avec au premier plan l'abaissement du niveau de la plage près du perré et au second plan le bourrelet de sable au droit du drain (mai 2016), (Source : Cerema)



Illustration 94 : Abaissement du niveau de la plage devant le perré en béton de Merlimont (mai 2016), (Source : Cerema)

### Efficacité du procédé

Lors de la première année, les résultats du suivi morphosédimentaire avaient été encourageants puisque les relevés topographiques montraient une accélération de l'engraissement estival avec notamment l'apparition de bourrelets de sable au-dessus des drains du système (Illustration 95). Néanmoins, si le procédé fonctionne par temps calme ou peu agité, il ne permet pas d'empêcher l'érosion en cas d'événements de tempête successifs.

Le système permet pour l'instant de favoriser l'accumulation de sable pendant les périodes calmes, sans pour autant résoudre le problème ; l'érosion se poursuit à un rythme soutenu et le démaigrissement de l'hiver 2015-2016 a été spectaculaire. Par ailleurs, pendant une durée de six à huit mois entre 2015 et 2016, deux des trois pompes du système ne fonctionnaient pas correctement, réduisant donc l'efficacité du dispositif.

En matière de protection du trait de côte, le bilan sédimentaire du système de drainage est pour l'instant négatif sur la plage de Merlimont.



Illustration 95 : Bourrelet de sable au droit des drains du système et abaissement du haut de plage dû à la réflexion sur le perré, avec un affleurement de la nappe phréatique (mai 2016), (Source : Cerema)

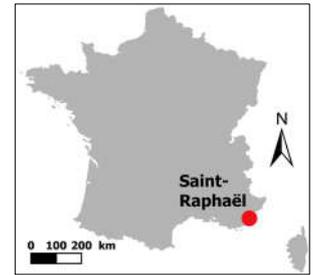
#### Bibliographie

ECOPLAGE ; Leduc, 2016 ; Leviel 2014 ; Merlin, 2016.

## Saint-Raphaël (83)

### Contexte

La plage d'Agay à Saint-Raphaël est sujette à une érosion lente et continue, avec un recul moyen annuel de 0,5 m/an. En raison de son fort potentiel touristique, des mesures de protection côtière, essentiellement le reprofilage et le rechargement de plage, sont mises en œuvre chaque année. En 2001, consciente du coût prohibitif du maintien de la plage d'Agay, les communes de Saint-Raphaël et de Sainte-Maxime commandent une étude d'implantation expérimentale d'un système de drainage, destiné à pallier les reprofilages et rechargements annuels. Ce projet s'inscrit dans le cadre d'une politique de gestion visant à trouver une alternative durable aux techniques de protection côtière déployée jusqu'ici.



### Mise en œuvre

Le système de drainage est implanté sur la plage de Saint-Raphaël en février 2004 (Illustration 96). Un drain de 600 m est enfoui au niveau du haut estran. Sa mise en place est accompagnée du démantèlement des épis en enrochement.

Le système de drainage a coûté 710 000 € et son coût de fonctionnement, lié au pompage de l'eau du drain, est de 6 000 € par an. La commune de Saint-Raphaël était le maître d'ouvrage du projet.

### Suivi scientifique

Entre 2003 et 2005, un suivi topobathymétrique de la plage d'Agay est effectué chaque mois, excepté l'été, suivant 19 profils perpendiculaires au trait de côte. Les profils débutent de l'arrière-plage et vont jusqu'à une profondeur de 4,5 m. Ces mesures de profils effectuées par le Centre Européen de Recherche et d'Enseignement en Géosciences (CEREGE) a permis de comparer l'évolution morphologique de la plage avant et après la mise en place du système de drainage.



Illustration 96 : Mise en œuvre du système de drainage de plage ECOPLAGE sur la plage d'Agay en 2004 (Source : Cerema)

### Évolution du site

Sur la période 2003-2004, c'est-à-dire avant la mise en place du système ECOPLAGE, le bilan sédimentaire de la rade d'Argay est proche de l'équilibre, sensiblement positif, avec un gain global de 800 m<sup>3</sup> de sable. Néanmoins, ce volume, concentré à l'ouest de la zone, correspond au rechargement de plage annuel opéré dans ce secteur. Sur la période 2004-2005 post-drainage, les relevés topobathymétriques mettent en évidence un bilan sédimentaire positif sur l'ensemble de la rade, avec un gain de 600 m<sup>3</sup>, sans avoir eu recours cette fois à la technique de rechargement de plage et après avoir détruit les épis transversaux en enrochement. Le suivi du site a été réalisé durant trois ans dans le cadre d'une thèse ; il aurait été intéressant de poursuivre ce suivi sur une plus longue durée, afin d'observer la tendance d'évolution sédimentaire à moyen et long terme.

### Efficacité du procédé

Durant la première année de fonctionnement, le système de drainage implanté sur la plage d'Agay a démontré son aptitude à remplacer le dispositif d'épis en enrochements et les rechargements de plage. Il a permis de stabiliser le trait de côte, dans un contexte d'érosion lente du site. Par ailleurs, il est

démontré que le système de drainage de plage permet d'obtenir un assèchement significatif de la plage au niveau des drains, suite au rabattement de la nappe phréatique.

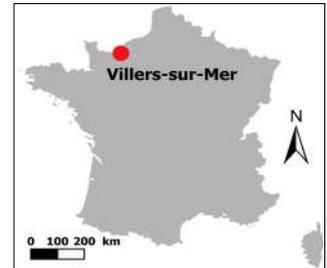
### Bibliographie

ECOPLAGE ; Lambert et al., 2007 ; Héquette, 2006, MEEDM, 2010.

## Villers-sur-Mer (14)

### Contexte

À Villers-sur-Mer, la plage de Mermoz subit une érosion chronique, qui se caractérise par un recul du trait de côte compris entre 0,30 et 0,80 m/an. Dans les années 1980, quatre épis ont été installés sur la plage afin de retenir le sable mais sans grande efficacité. Une zone humide importante apparaissait sur le haut de la plage, signe de la résurgence de la nappe phréatique. En 2002, afin de conserver l'attrait touristique de la plage, et pour se protéger contre l'érosion côtière, la commune de Villers-sur-Mer décide de mettre en place un système de drainage de plage ECOPLAGE.



### Mise en œuvre

La configuration du dispositif de drainage a été adaptée au contexte macrotidal de la plage. Ainsi, deux drains parallèles au rivage sont installés en 2002 afin d'augmenter la performance du procédé. Ces drains, d'une longueur de 300 m chacun, sont respectivement situés sur le haut de plage et sur le milieu de l'estran. Disposer deux rangées de drains permet d'augmenter le temps de fonctionnement du système et d'augmenter ainsi son efficacité.

Le système, qui représente un coût total d'installation de 577 000 €, est positionné entre deux épis transversaux qui influent la dynamique sédimentaire de la plage. La commune de Villers-sur-Mer était le maître d'ouvrage du projet.

### Suivi scientifique

À partir de novembre 1998, un suivi de la plage de Mermoz est réalisé par le laboratoire GRESARC de l'Université de Caen. Pendant huit ans, des levés topométriques sont réalisés deux à trois fois par an.

Pour apprécier l'efficacité du procédé, les mesures sont entreprises quatre ans avant la mise en place du système de drainage et se poursuivent quatre années après. De plus, les mesures sont effectuées sur la zone pourvue du système, mais aussi sur les secteurs situés de part et d'autre des épis. Cela permet notamment de distinguer l'évolution de la plage liée au système de drainage de l'évolution naturelle.

### Évolution du site

Sur les quatre années qui précèdent la mise en place du système de drainage (1998-2002), la tendance est à la stabilité du stock sédimentaire, avec une légère accrétion constatée. Sur les quatre années qui suivent l'installation (2003-2007), l'évolution de la plage n'a pas présenté de tendance évolutive nette, avec une légère érosion.

Les conditions d'agitation modérée étaient plus favorables à l'accrétion avant la mise en place du système qu'après, avec des événements de tempête plus forts. Entre 2003 et 2007, une légère érosion de la plage équipée du système de drainage est constatée alors que, au nord-est comme au sud-ouest, les secteurs non équipés sont sensiblement en accrétion.

### Efficacité du procédé

Du point de vue de la dynamique sédimentaire, l'influence du système de drainage n'a pas été mise en évidence sur la période de suivi.

Les secteurs de plage non équipés se portent au moins aussi bien que ceux qui en sont équipés. Après quatre années de fonctionnement, le bilan reste donc incertain quant à l'impact du procédé.

Sur les deux photos suivantes (2002 et 2006), la diminution de l'humidité sur le haut de plage est visible, la nappe phréatique s'est légèrement rabattue (Illustration 97).

Illustration 97 : Situations de la plage de Villers-sur-Mer avant la mise en place du système de drainage ECOPLAGE en 2002 (A) et quatre ans après en 2006 (B) En

revanche, le rôle positif du drainage en termes d'assèchement du haut estran a été mis en évidence (Illustration 98). Cet assèchement a 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.



Illustration 98 : Assèchement visible du haut de plage au niveau des drains à Villers-sur-Mer

### Bibliographie

ECOPLAGE ; GRESARC, 2007.

## Autres sites

L'érosion côtière et les enjeux qui en découlent ont conduit trois autres communes de France à opter pour le système ECOPLAGE.

### Lido de Sète à Marseillan (34)

En 2012, deux drains de 700 m linéaires sont enfouis au niveau du haut de plage, associés à la mise en place d'ouvrages en geotextile atténuateurs de houle, d'un rechargement de plage de 600 000 m<sup>3</sup> et d'une opération de restauration dunaire.

Un suivi photographique du site réalisé par le BRGM, a permis de suivre l'évolution du trait de côte et de l'évolution de la plage.

Les résultats ne sont pas concluants ; au cours des trois années d'utilisation du système de drainage, la plage n'a fait que perdre du sable. À tel point qu'en avril 2015, des morceaux des drains et du collecteur ne sont plus sous le sable (affouillement) et un segment est hors service.

La période de suivi avait débuté avant la mise en place du système, et en comparant les périodes avant et après, aucune tendance ne se dégage. Les reculs lors des tempêtes sont du même ordre de grandeur et les reconstructions post-tempêtes également (Balouin et al., 2012, 2016a, 2016b ; Balouin, 2013 ; Breton, 2015 ; ECOPLAGE).

### Sainte-Maxime (83)

En 2004, deux drains de 300 m linéaires ont été enfouis au droit du haut de plage. Lors de l'installation, les épis présents sur la plage furent démantelés. Des suivis topo-bathymétriques sont alors assurés par les laboratoires CEREGE et LSEET. L'année suivante, le système est efficace.

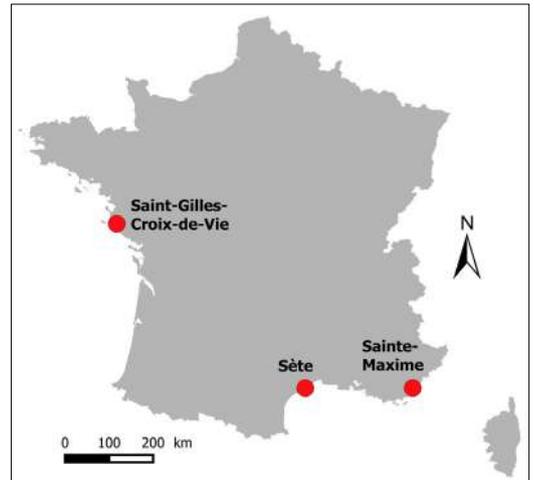
Tous les profils de plage montrent une accumulation ou au moins une stabilisation, alors que la plage était en recul quasi général auparavant. Cependant, un rechargement de 2 800 m<sup>3</sup> ayant eu lieu au cours de cette période, la totalité de l'engraissement ne peut pas être attribuée au seul système de drainage.

Des suivis récents seraient nécessaires pour connaître l'évolution actuelle de la plage (ECOPLAGE ; Héquette, 2006 ; Lambert et al., 2007).

### Saint-Gilles-Croix-de-Vie (85)

En 2013, un drain a été installé au niveau du haut de plage sur 40 m à titre expérimental. C'est un essai grandeur nature du système ENERPLAGE qui permet, en plus du procédé ECOPLAGE, de produire de l'énergie et de l'eau potable.

Au vu de ses dimensions, les répercussions du système sur la dynamique sédimentaire seront relativement faibles.



## 4.3 Recommandations

### 4.3.1 Conditions d'efficacité et limites

Le système de drainage n'est pas adapté à toutes les situations d'érosion, un ensemble de conditions doit être réuni pour qu'il soit efficace. Dans l'idéal, le procédé doit être mis en place sur des plages relativement abritées, affectées par un marnage microtidal et où l'érosion résulte de transferts sédimentaires perpendiculaires au rivage.

Le drainage de plage est une solution appropriée pour résoudre des problèmes d'érosion lente et continue, mais il ne permettra pas à lui seul d'inverser la tendance si l'érosion est soutenue ou la disponibilité en sédiment faible. Le dispositif de drainage doit donc être dimensionné de façon spécifique pour chaque site.

Lorsque l'enjeu touristique est important, ce système apporte une réponse satisfaisante en augmentant la surface sèche de la plage de manière significative. Sur certains sites, le drainage de plage a été une alternative viable aux autres méthodes de protection et financièrement bénéfique sur le long terme.

#### Perméabilité du sable

Des études préalables sont nécessaires pour déterminer la perméabilité du sable. Une bonne perméabilité assure une fonctionnalité correcte des drains et évite tout colmatage. Des études de faisabilité sont indispensables avant la mise en place du système de drainage de plage.

#### Caractéristiques du site

Les systèmes de drainage sont recommandés pour la gestion des plages de sable exposées modérément aux vagues, ayant des variations saisonnières significatives du profil de plage et soumises à une érosion de plage mineure à long terme. Il existe un risque d'échec pour les plages à fort transit littoral, et un risque d'endommagement des installations sur les sites exposés à de forts événements de tempêtes.

#### Méthodes combinées

Le procédé ne produisant pas de sable, il est donc conseillé d'y combiner un rechargement de plage pour les sites à fort enjeu touristique.

#### Suivi de plage

Il est nécessaire, comme pour toute méthode, de réaliser un suivi morphosédimentaire de la plage afin de statuer sur l'efficacité du système à moyen terme et long terme. Les sites présentés ont généralement fait l'objet de suivis réguliers avant et après l'installation du procédé.

#### Avantages du procédé

L'infiltration de jet de rive favorise le maintien en place des sédiments sur la plage au droit des drains, et les dépôts si les eaux sont chargées en sédiments. Cette accumulation peut jouer le rôle de zone tampon en amortissant l'énergie des vagues. Le système permet aussi à la plage de se reconstruire plus rapidement après des événements de tempête.

L'infiltration de l'eau favorise l'assèchement du haut de la plage et donc facilite le transport éolien, la plage alimente alors davantage le pied de dune ou le pied de digue en sable. Cet assèchement du haut de plage est aussi favorable aux activités touristiques en élargissant la superficie de la plage sèche.

Le système de drainage permet de lutter localement contre l'érosion sans pour autant impacter les zones littorales adjacentes. Cette caractéristique n'est pas négligeable, car la plupart des mesures de lutte contre l'érosion modifient le transit littoral et reportent l'érosion sur les plages voisines. Le procédé

de drainage ne déplace pas le problème d'érosion mais tente d'agir localement sur la fixation des sédiments.

En plus, le système, qui est invisible et silencieux, n'impacte pas le paysage et ne présente pas de contrainte pour les activités récréatives.

### Inconvénients du procédé

Le procédé présente tout de même des inconvénients ; il n'est pas adapté à tous les types de côtes et est seulement efficace pour une érosion relativement faible.

La durée d'action d'un drain de plage est directement liée au type de marnage. Si le régime de marée est microtidal, le drainage va être actif presque en continu, car la zone de balancement des marées est peu mobile. À l'inverse, pour un type macrotidal, la zone de swash ou de jet de rive, se déplacera plus rapidement sur l'ensemble du profil de plage et sera donc moins longtemps dans la zone d'action des drains. Une étude écossaise montre que si le marnage a une amplitude supérieure à 4 ou 5 m, le procédé n'est efficace que pendant 25 % de l'année (Coates et al. 2000). Pour remédier à cette difficulté, plusieurs rangées de drains peuvent être implantées sur l'estran afin de couvrir une plus grande surface et donc d'étendre le champ d'action du système.

Lorsque des périodes intenses de tempêtes se produisent, l'érosion peut faire émerger les drains, ils deviennent alors inefficaces et surtout très vulnérables face à l'action des vagues. De nombreux drains ont été partiellement ou totalement endommagés suite à des épisodes de démaigrissement significatif de plage, le procédé n'est donc pas adapté aux plages dont le profil fluctue de manière importante au cours de l'année.

Le système est efficace lorsque l'érosion résulte de mouvements transversaux de sédiments, c'est-à-dire dans le profil, mais il n'est pas conçu pour lutter contre un transit littoral, plus parallèle au trait de côte. Si la dérive littorale est importante, le procédé n'est pas adapté.

La mise en œuvre du système de drainage génère peu d'impacts en phase travaux et probablement très peu d'impacts en phase d'utilisation, avec des effets négligeables sur la faune benthique.

### Pour aller plus loin

Il faut se référer aux guides de recommandations suivants :

CETMEF, 1998, Recommandations pour la conception et la réalisation des aménagements de défense du littoral contre l'action de la mer, 540 p, rapport ER PM 98,01, chap. II : 19 à 20 ;

U.S. Army Corps of Engineers, 2003, Coastal Engineering Manual, chapitre V-3 Shore protection project, p. 90.

## 5 LE RETABLISSEMENT DU TRANSIT LITTORAL

### 5.1 Présentation de la méthode

#### 5.1.1 Objectif et définition

Le concept de rétablissement du transit littoral, appelé souvent par simplicité by-passing, s'est développé en réponse à des désordres côtiers liés à la présence d'ouvrages et de passes d'entrée de débouchés en mer dans les secteurs où la dérive littorale est importante.

L'objectif du procédé est de rétablir le transit littoral, qui est interrompu par les aménagements, principalement transversaux au trait de côte, qui engendrent une accrétion excessive à l'amont dérive du débouché en mer, une sédimentation importante dans la passe et une érosion accrue en aval dérive.

En effet, lorsqu'un port est situé à l'embouchure d'un cours d'eau, il est souvent nécessaire de stabiliser ses rives pour sécuriser la navigation. Des ouvrages de type jetées sont alors construits à son embouchure et se prolongent en mer afin de maintenir un chenal de navigation stable.

Généralement, ces désordres côtiers ne font que s'amplifier avec le temps, le by-passing apporte donc une réponse satisfaisante au problème en assurant artificiellement le transport sédimentaire qui s'opérerait naturellement avant la mise en place des ouvrages.

#### 5.1.2 Principe

La technique consiste à déplacer les sédiments non cohésifs (sables ou galets) des zones en accrétion vers les zones érodées, permettant de limiter ainsi les opérations de dragage dans la passe d'entrée du débouché en mer (Illustration 99).

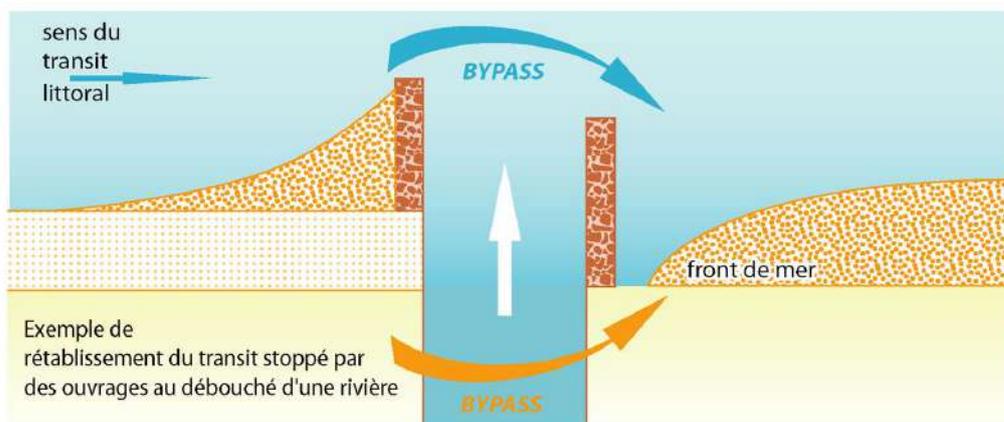


Illustration 99 : Principe de fonctionnement du rétablissement du transit littoral ou by-passing

Ce système permet d'une part, d'éviter l'érosion à l'aval dérive et d'autre part, de limiter l'accrétion à l'amont dérive. L'accrétion peut aussi poser problème, car lorsque la jetée arrive à saturation, les sédiments s'accumulent au niveau de la passe d'entrée et des bancs de sable se forment, constituant un danger pour la navigation.

Le by-passing nécessite un transfert des sédiments, qui peut s'effectuer de différentes manières, par pompage et refoulement en aval (Boswood et Murray, 2001 ; Clausner, 1999 ; Mazières et al., 2013 ; MEEDM, 2010 ; Pedro, 2008).

Les techniques courantes de transferts sont les *by-passing* mécanique et hydraulique :

1. *By-passing mécanique* : Les exemples de la plage des Miramars à Barcarès et du cordon de galets de Cayeux-sur-Mer peuvent être cités, ils restent néanmoins peu nombreux en France. La manipulation des sédiments se fait par bulldozers et camions. Ce procédé apparaît comme donnant un régalage de matériau d'épaisseur et de calibrage meilleur que si le sédiment était ramené sur le profil par les autres moyens (hydraulique notamment) ;
2. *By-passing hydraulique* : Il peut être mis en œuvre par des dispositifs fixes, semi-mobiles ou flottants. Dans tous les cas, le système met en œuvre le transport du sable par mélange avec de l'eau sous pression au moyen d'une pompe hydraulique, éventuellement orientée par une grue mobile.

### 5.1.3 Mise en œuvre

Les domaines d'application et la mise en œuvre des deux techniques de *by-passing* sont distincts :

**By-passing mécanique** : Les systèmes mécaniques nécessitent une proximité entre les zones d'apport et les zones de dépôt des sédiments ainsi qu'une bonne accessibilité des deux sites. Les coûts de transport augmentent fortement dans un cas contraire. Le mode mécanique reste cependant difficile à mettre en œuvre dans les zones urbanisées et touristiques en raison des nuisances sonores pendant les opérations, de l'utilisation récréative interrompue et des impacts environnementaux sur les sites liés au transport des sédiments. A Cayeux-sur-Mer, la noria de camions se fait avant la saison touristique pour ramener les galets du nord dans les casiers au sud de la ville ;

**By-passing hydraulique** : Les systèmes hydrauliques permettent le refoulement depuis la zone de déferlement vers le haut de plage sur une distance de quelques centaines de mètres, ou depuis une zone proche qui est en engraissement dans le cas de port, de digue ou d'embouchure (Illustration 100). Les systèmes fixes sous forme de pompes nécessitent une connaissance très fine du transit littoral tandis que les systèmes mobiles (pompes sur barge, drague) sont soumis aux conditions d'états de mer.

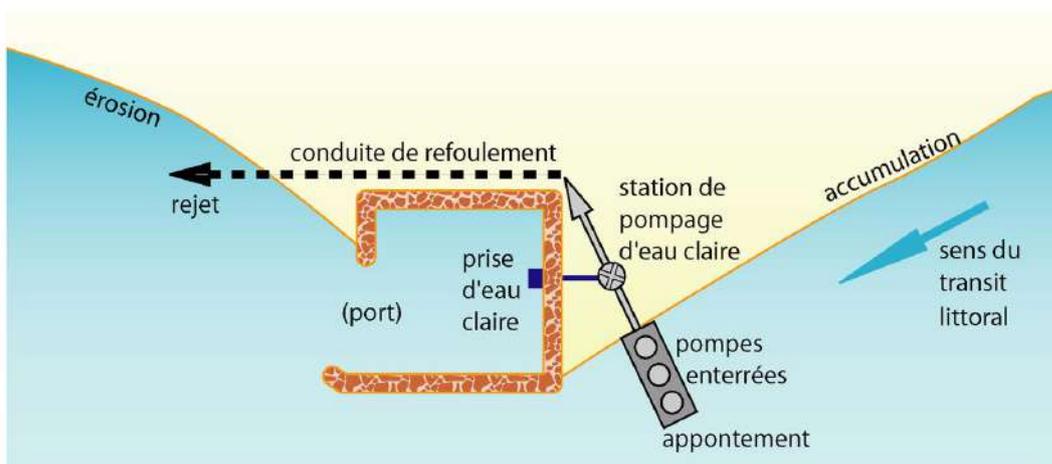


Illustration 100 : Principe de fonctionnement du *by-passing* hydraulique

Par exemple le by-passing hydraulique mis en œuvre à l'embouchure de la Tweed River en Australie a permis de transférer 8,4 millions de mètres cubes de sédiments entre mars 2001 et juin 2016 (NSW Government, 2016).

Il peut être mis en œuvre en utilisant des stations de pompage fixes, semi-mobiles ou flottantes. Les dispositifs qui peuvent être déplacés demandent souvent plus de main d'œuvre mais permettent de cibler les secteurs où on extrait les sédiments et donc de répartir les prélèvements.

Il existe une importante diversité de systèmes hydrauliques de rétablissement de transit ou by-passing hydrauliques : quatre exemples sont schématisés succinctement sur la figure suivante (Illustration 101 ; Pedro, 2008).

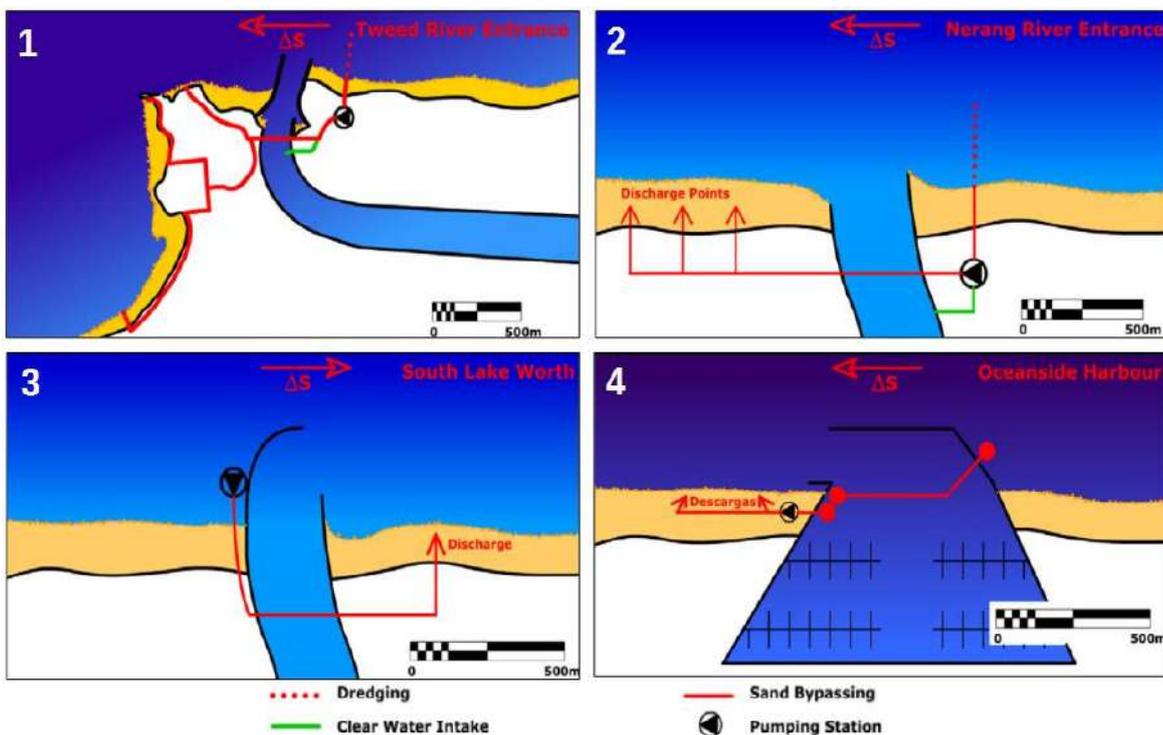


Illustration 101 : Différents systèmes de by-passing au niveau des embouchures de la Tweed River, Queensland, Australia (1) ; de la Nerang River, Queensland, Australia (2) ; de la South Lake Worth River, Florida, USA (3) et du port d'Oceanside, California, USA (4) (Source : Pedro, 2008)

(1) Les jetées présentes au débouché en mer de la Tweed River en Australie bloquent les sédiments sur la côte est (Illustration 102). Le dispositif de by-pass permet de prélever environ 245 000 m<sup>3</sup>/an sur cette plage afin de les redistribuer sur trois plages de la côte ouest. Il fonctionne tout au long de l'année, avec un débit moyen de 500 m<sup>3</sup>/h.

(2) Le système est similaire à l'embouchure de la Nerang River, les sédiments, retenus derrière la jetée, sont dragués au niveau du débouché en mer (plage sous-marine) et redistribués sur trois secteurs, à l'ouest de l'embouchure de la rivière ; 500 000 m<sup>3</sup> sont déplacés chaque année depuis 1986.

(3) Le système est un peu différent au niveau de la South Lake Worth River en Floride, car le dispositif « drague-pompe » est situé sous le niveau des basses mers. Cela permet de limiter les nuisances sonores et visuelles. Ce dispositif ancien (1937) transfère en moyenne 53 500 m<sup>3</sup> de sable chaque année.

(4) La plupart des dispositifs de by-passing sont situés à l'embouchure de rivières mais d'autres ouvrages peuvent faire obstacle à la dérive littorale. C'est le cas du port de plaisance d'Oceanside en Californie. À partir de 1989, 80 000 m<sup>3</sup> sont dragués sur la plage sous-marine du débouché en mer à l'amont dérive et refoulés à l'aval dérive.



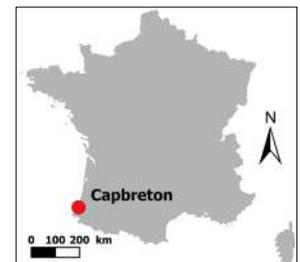
Illustration 102 : Débouché en mer de la Tweed River avec la structure de dragage des sédiments sur l'avant-plage (ponton au premier plan)

## 5.2 REX d'un site

### Capbreton (40)

#### Contexte

Dans le but d'améliorer les conditions de navigation dans le chenal d'accès au port de Capbreton, des digues ont été construites afin de stabiliser les rives du débouché en mer. Le chenal du Boucarot est endigué dès la première moitié du XX<sup>ème</sup> siècle mais, en raison de l'accumulation sableuse grandissante au nord des ouvrages, les digues doivent être prolongées en 1958 puis en 1974. Ces dernières interrompent le transit sédimentaire longitudinal, résultant d'une dérive littorale nord-sud et engendrant une importante accrétion au nord sur la plage de Notre-Dame et une érosion au sud qui se répercute successivement sur la plage de l'Estacade, la plage Centrale et la plage de la Savane.



Pour protéger la station balnéaire située à proximité immédiate, des perrés en béton et en enrochements ont été érigés, ainsi que des épis qui perturbent encore un peu plus la dynamique sédimentaire (Illustration 103).

## Mise en œuvre

Jusqu'en 2007, des camions chargés de sable transitaient des plages nord vers les plages sud pour rétablir de manière mécanique la dynamique sédimentaire naturelle. Pour compenser l'érosion hivernale à l'aval dérive du débouché en mer, 4000 trajets devaient être réalisés chaque printemps.

Ce système de by-passing mécanique ne donnait pas satisfaction en raison des nuisances liées au passage répété des camions sur les routes, et du temps qui devait être consacré au transfert.

C'est pourquoi, à partir de 2003, le bureau d'études SOGREAH proposa à la commune de Capbreton de passer d'un système de by-pass mécanique à un système hydraulique. Le projet fut étudié les années suivantes puis retenu ; les travaux débutèrent à la fin de l'année 2007. Il s'agissait de construire une conduite de refoulement passant sous le chenal du Boucarot et sous le boulevard du front de mer.



Illustration 103 : Photo aérienne de 2016 présentant le port, les digues du chenal du Boucarot et les ouvrages de protection sur les plages à l'aval dérive du débouché en mer

L'extraction du sable est réalisée sur la plage de Notre Dame située au nord, grâce à un hydro-éjecteur, utilisant l'eau claire sous pression pour désagréger les sables. L'extraction est réalisée sur la plage nord de Notre-Dame et le mélange eau/sable est refoulé vers les plages méridionales par la conduite de refoulement (Illustration 104). Six bouches de sorties, régulièrement espacées sur le front de mer des plages sud la commune, permettent une répartition des sédiments refoulés sur un linéaire de 1 370 mètres (Illustration 105).

Le système de by-passing est actionné tous les printemps et mobilise entre 60 000 m<sup>3</sup> et 100 000 m<sup>3</sup> de sable chaque année. À un rythme de 250 m<sup>3</sup> par heure, six semaines de pompage peuvent suffire à rétablir le transit sédimentaire annuel.

D'un coût global de 4,9 millions d'euros, le projet a été subventionné à hauteur de 655 000 € par l'État et le conseil régional et à hauteur de 833 600 € par le conseil général. Le mètre cube extrait par ce système coûte 2,90 € contre 5 € pour celui transporté par camion.



Illustration 104 : By-passing hydraulique à Capbreton ; pompage du mélange eau et sable à l'aide de l'hydro-éjecteur qui est relié par des tuyaux flexibles à la station de pompage (Source : Exca)

### Efficacité du procédé

D'après la commune de Capbreton, l'étude de stratégie littorale a prouvé que la plage de Notre-Dame était en engraissement permanent. Le système de by-pass permet donc depuis huit ans maintenant de réengraisser les plages méridionales de la commune, sans perturber le stock de la plage nord.

En mars 2016, les pompes ont été remplacées pour la première fois, pour un coût de 120 000 €. Chromées, elles sont plus résistantes à l'usure et permettront un réensablement qui pourra être plus important au cours des années à venir.

Conjointement au système de by-passing, l'ONF réalise différentes actions pour restaurer la dune qui sépare la plage de la Savane de l'urbanisation. La dune retravaillée, plus basse, aérodynamique et végétalisée permet de limiter la déflation éolienne. Au sud de la commune, un boudin en géotextile a été posé fin 2007 afin de protéger localement une station d'épuration.

### Bibliographie

Alexandre et al., 2003 ; Carrère et Ufay, 2008 ; Mazeiraud et Viguier, 2004 ; Prat et Clus-Auby, 2006.

## 5.3 Recommandations

### 5.3.1 Conditions d'efficacité et limites

L'évaluation de la dynamique sédimentaire du site est nécessaire avant d'envisager la mise en œuvre d'un by-passing. L'étude des processus littoraux doit permettre d'estimer les transports de sédiments liés à l'action de la houle et de distinguer le transit littoral, cause principale de l'évolution à long terme, des mouvements dans le profil, qui sont en général la cause de l'évolution à court terme.

Des mesures sont à effectuer afin d'estimer les taux d'accrétion et d'érosion des plages de part et d'autre du débouché en mer. Les effets escomptés du dispositif concernent les secteurs de plage en érosion, situés à l'aval dérive, qui doivent retrouver un profil d'équilibre.

Si la présence d'ouvrages perpendiculaires au trait de côte, combinée à une importante dérive littorale, sont à l'origine d'une érosion significative sur le site d'étude, le système de by-pass peut-être préconisé dans les secteurs où les enjeux humains sont importants et le stock sédimentaire le permet.

Dans le cas d'un système de by-passing hydraulique, les coûts sont relativement importants en termes d'installation, de maintenance ou de complexité de système. C'est probablement une des principales limites de la technique. Le type d'installation peut également être mis à mal par l'action des vagues sur des sites fortement exposés (Pedro, 2008).

On s'attachera à satisfaire les critères de bon fonctionnement suivants (MEEDM, 2010) :

- la capacité de prélèvement et de refoulement (débit et capacité de l'ouvrage) ;
- la maîtrise du prélèvement (définition de la zone de pompage) ;
- la continuité de fonctionnement (influence des conditions d'agitation du site) ;
- la fiabilité, l'automatisation du système ;
- le coût de fonctionnement ;
- l'encombrement et l'impact visuel.

Le coût de construction d'un by-passing est élevé, mais il peut être compensé sur le long terme par son coût de fonctionnement modéré. En général, le transfert des sédiments revient à 3 €/m<sup>3</sup>, auxquels s'ajoute 1 €/m<sup>3</sup> pour la maintenance et la gestion. A titre de comparaison, ces coûts oscillent entre 5 à 10 €/m<sup>3</sup> et parfois plus, pour un rechargement de plage, dépendant de la proximité et de l'exploitabilité du gisement, en fonction de la profondeur et la nature du sédiment d'emprunt (Boswood et Murray, 2001).

Le système de by-pass permet également de diminuer les besoins de dragage des voies de navigation puisqu'il limite l'ensablement des débouchés en mer. Aux États-Unis, il a été estimé en 2000 qu'entre 50 et 100 millions de mètres cubes de sédiments étaient dragués à la sortie des ports, représentant une dépense supérieure à 100 millions de dollars. La diminution de ce type de dépense doit être considérée lorsque les coûts du by-passing sont évoqués (Fitzgerald et al., 2000).

### 5.3.2 Pour aller plus loin

Il faut se référer aux guides de recommandations suivants :

CETMEF, 1998, Recommandations pour la conception et la réalisation des aménagements de défense du littoral contre l'action de la mer, 540 p, rapport ER PM 98.01, chap. II : 36-42 et annexe II : 10 p ;

U.S. Army Corps of Engineers, 2003, Coastal Engineering Manual, chapitre V-6 Sediment Management at inlets, pp. 131-142.

## 6 LES AUTRES PROCÉDES

Les autres procédés de protection du littoral, développés pour certains depuis les années 1980, sont nombreux et différents les uns des autres par leurs modes d'action. Comme beaucoup d'entre eux en sont restés ou sont encore au stade expérimental, il convient d'être prudent sur leur efficacité. Il est donc recommandé la mise en place de suivis afin de les évaluer. Dans ce chapitre, il ne s'agit pas de les présenter tous, mais d'en sélectionner quelques-uns suivant leurs modes d'action, comme ceux qui agissent sur la houle, les courants ou les fonds littoraux. On expose ainsi l'atténuateur de houle, les pieux hydrauliques, l'atténuateur de courant et les dispositifs de stabilisation et de sédimentation.

### 6.1 L'atténuateur de houle en géotextile

#### 6.1.1 Objectif

L'atténuateur de houle en géotextile vise à protéger les sites côtiers qui subissent une érosion importante du profil de plage, due principalement aux événements de tempête. Ce dispositif joue le rôle de barre littorale d'avant-côte, permettant la dissipation de l'énergie des vagues par déferlement bathymétrique. Immergés en permanence sur les côtes méditerranéennes microtidales, il présente l'avantage de ne pas impacter la vue, ni d'interférer avec les usages de la plage (Illustration 106).

#### 6.1.2 Principe, conditions d'efficacité et limites

Cet ouvrage est constitué de tubes en géotextile (matériau polypropylène tissé) posés sur un tapis anti-affouillement (Illustration 107). Les tubes sont remplis de sable, qui est pompé le plus souvent aux abords de l'implantation de l'atténuateur. L'avantage du principe est la rapidité de la pose qui peut se faire par voie maritime, sans créer de gênes à terre, et sans moyens techniques importants comme pourrait le nécessiter la pose d'enrochements. Le fait d'être immergé permet également d'offrir une solution non agressive visuellement, cette dernière pouvant en outre être facilement réversible (Koffler et al., 2009).

Les tubes en géotextile sont fabriqués sur mesure et adaptés spécifiquement aux lieux d'implantation. Le dimensionnement des tubes (longueur, largeur, hauteur) dépend des caractéristiques particulières des sites (amplitude de houle, courant, direction, pente de plage). Ils présentent l'avantage de pouvoir être fixés au fond par un système d'ancrage et leur souplesse leur permet de s'adapter à la forme du fond. Leurs sections étant elliptiques et leurs parois perméables à l'eau, ces ouvrages sont plus absorbants vis-à-vis de la houle incidente que des ouvrages en enrochement. L'atténuation de la houle obtenue reste moindre qu'avec un ouvrage maçonné mais l'affouillement est plus faible (Gervais et al., 2016).

L'atténuateur présente cependant quelques inconvénients ; son installation entraîne une perturbation des écosystèmes durant les travaux, en augmentant la turbidité aux alentours. En effet, même si le dragage des sables locaux n'est pas systématique, le remplissage des tubes se fait généralement sur le site. De plus, les tubes sont sensibles aux déchirements (accidentels, intentionnels ou lors de tempêtes) et peuvent donc occasionner une pollution plastique des mers et océans.



Illustration 106 : Géotubes immergés devant les plages de la Croisette, Cannes (Source : TenCate)

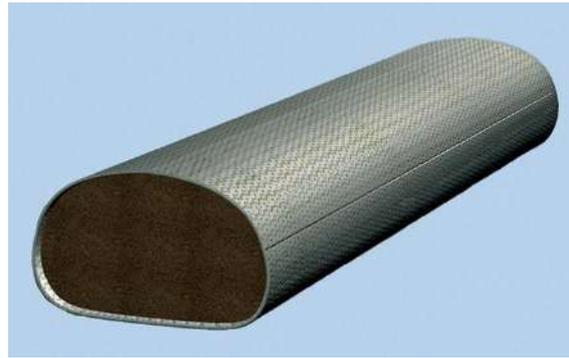


Illustration 107 : Schéma d'un tube géotextile Geotubes® (Source : Koffler et al., 2009)

En milieu marin, les ouvrages immergés sont rapidement colonisés par les organismes vivants, ce qui n'est pas le cas en milieu terrestre. Les ouvrages atténuateurs en géotextile se transforment assez rapidement en « récifs ». Ils constituent des récifs artificiels vis-à-vis de la faune et de la flore marine, avec l'aptitude à remplacer une fonction écologique perdue ou dégradée (Illustration 108).

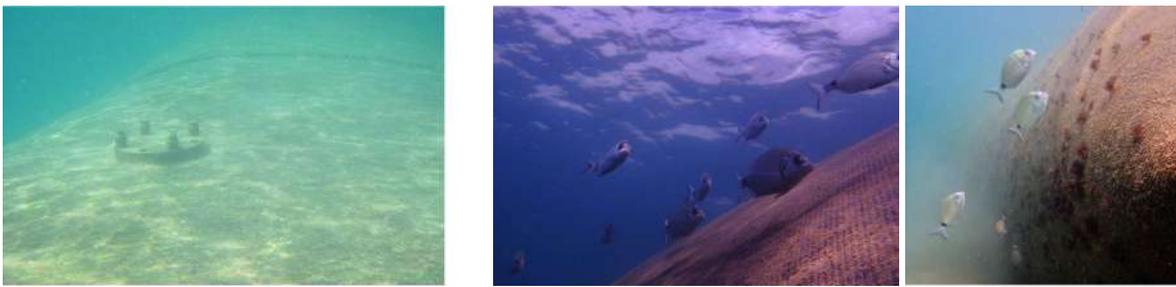


Illustration 108 : Géotubes des plages de La Croisette transformés en récifs

Cate)

Le REX d'atténuateur de houle en géotextile est présenté par la suite, à travers les exemples des sites du lido de Sète à Marseillan et des plages de la Croisette à Cannes.

## Lido de Sète à Marseillan (34)

### Contexte

Le lido de Sète à Marseillan est une bande sableuse de 11 km de long et de 1 à 2 km de large séparant l'étang de Thau de la mer. Comme présenté dans les chapitres précédents, plusieurs solutions souples ont été expérimentées sur le lido : rechargement de plage entre 2014 et 2015, système de drainage de plage et ouvrage atténuateur de houle en géotextile, d'une longueur de 1000 m mis en place en 2013.

### Conception et mise en œuvre

Thau Agglo, maître d'ouvrage, a confié la maîtrise d'œuvre à INGEROP/BRLI et les travaux ont été réalisés par TRASOMAR. L'atténuateur de houle se compose de deux rangées de géotubes de 3 m de haut sur 6 m de large positionnées en parallèles au trait de côte, posés sur des tapis anti-affouillement, à 300 m du rivage et à une profondeur de 4,5 m, laissant passer une lame d'eau d'1,50 m au-dessus (Illustration 109).

### Suivi et évolution

Le site est équipé d'un système de suivi vidéo installé en 2011 comprenant huit caméras réparties sur deux mats de 20 m de haut et situés au sud-est et au nord-ouest. Ce système permet de suivre à la fois la réponse morphologique de la plage et la dynamique du système barre d'avant côte et trait de côte. Après deux ans de suivi, les résultats de l'évaluation du dispositif atténuateur de houle ont été jugés positifs puisqu'un élargissement de la plage d'environ 12 m au droit de l'ouvrage est apparu. Aussi, il a été décidé en 2017 de prolonger cet ouvrage par 1400 m supplémentaires de géotubes (Illustration 110).



Illustration 109 : Atténuateur de houle mis en place devant le lido de Sète (Source : TRASOMAR)



Illustration 110 : Mise en place d'un atténuateur de houle, lido de Sète (Source : TRASOMAR)

### Bibliographie

Artelia, 2017a, 2007b ; Balouin, 2016c ; Bouvier, 2018.

## Plages de La Croisette – Cannes (06)

### Contexte

Les plages de la Croisette, qui s'étendent sur 1,4 km entre le vieux port de Cannes et Port Canto, sont des plages sableuses artificielles avec des enjeux touristiques et économiques importants. La baie est soumise à un fort risque d'érosion et de submersion lors des tempêtes hivernales. L'action de la houle et de la surcote engendre alors des pertes sédimentaires, ce qui se traduit par un abaissement du profil de plage, un recul du trait de côte et une dégradation des infrastructures de haut de plage. Pour limiter ces dommages, la ville de Cannes, qui recherchait une solution sans impact sur les paysages et les usages de la plage, a décidé en 2010 la construction d'un ouvrage atténuateur de houle en géotextile.

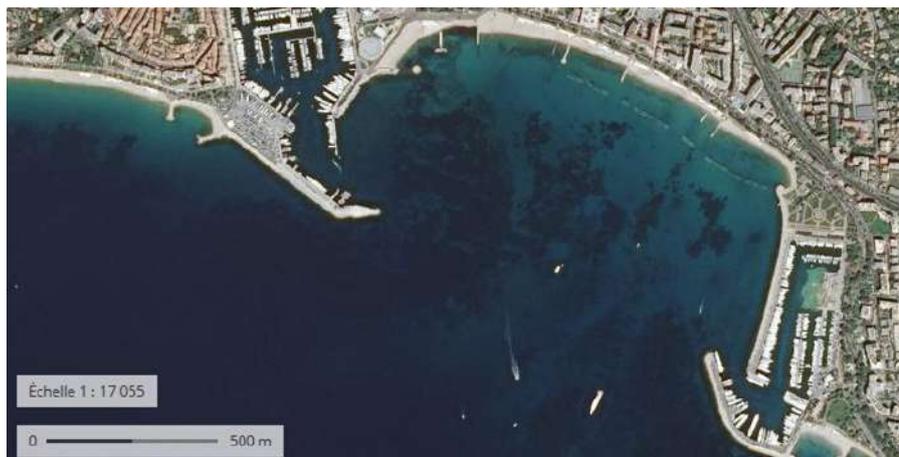


Illustration 111 : Plages de La Croisette et digue sous-marine vues par le satellite SPOT6 (2014) - Géoportail - Données cartographiques © Airbus Defense and Space, IGN, IRSTEA, CNES

### Conception et mise en œuvre

La commune de Cannes, maître d'ouvrage, a confié la maîtrise d'œuvre au bureau d'étude ARTELIA, qui a défini en 2008 les solutions à mettre en œuvre et suivi les travaux réalisés du printemps à l'automne 2011 par l'entreprise monégasque TRASOMAR.

La digue sous-marine, constituée par deux systèmes de géotubes et située face aux plages de la Croisette, a une longueur totale de 545 m linéaire. Elle est implantée à 80 et à 100 m de la plage par des fonds de 3,40 m de profondeur. Compte tenu de la présence des chenaux de navigation, de l'espacement nécessaire entre les chenaux et les extrémités de la digue et de la présence des émissaires, la digue a été constituée par quatre tronçons présentés (Illustration 112).



Illustration 112 : Localisation des quatre sections de géotubes de la digue sous-marine réalisée devant les plages de la Croisette (Source : TRASOMAR)

La digue est constituée de deux systèmes de géotubes TenCate Geotubes® disposés côte à côte. Ils sont remplis de sable et mis en œuvre sur place de façon à assurer un tirant d'eau d'environ 1 m au-dessus de la digue. Les systèmes sont disposés sur un tapis anti-affoulement de 20,20 m de large. Les tubes pré-confectionnés sur mesure en usine, d'une hauteur de 2,40 m une fois remplis et posés sur les fonds, permettent d'obtenir ainsi une digue avec les caractéristiques précisées plus haut (Illustration 113).

Le tapis anti-affoulement en géotextile permet d'éviter les risques de retournement, de torsion, et d'affoulement des tubes. Il dispose d'un système de lest de part et d'autre, sous la forme de petits tubes de 50 cm de diamètre, disposés de chaque côté du tapis et remplis également de sable.

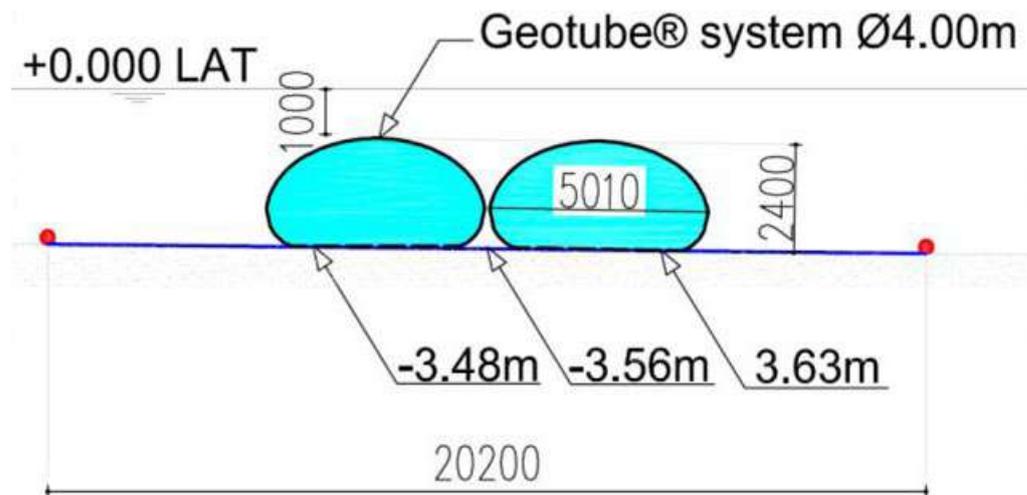


Illustration 113 : Dimensions de l'ouvrage, composé de deux systèmes TenCate Geotubes® disposés côte à côte (Source : TenCate)

Des mesures environnementales, figurant dans l'étude d'impact, ont été demandées dans le cadre des travaux à l'entreprise par le Service Eaux littorales de la DDTM et se résument comme suit :

- ne pas porter atteinte de quelque façon que ce soit aux herbiers ;
- utiliser des canalisations flottantes permettant de refouler la mixture eau-sable vers les tubes ;
- mettre en place dans les zones de travaux situées à moins de 50 m des herbiers un barrage anti-MES (matières en suspension) en géotextile pour limiter la dispersion des fines lors du dragage ou lors d'éventuelles fuites au cours du remplissage d'un tube.

Le mode d'exécution des ouvrages a fait l'objet de l'agrément du maître d'œuvre avant le démarrage des travaux. Le processus de remplissage et de mise en œuvre des géotextiles proposé par l'entreprise a été validé par le fabricant afin d'assurer la pérennité structurelle des géotextiles lors de ces opérations, tout en respectant les contraintes environnementales (Illustration 114).

Le remplissage des tubes se fait par moyens hydrauliques en injectant un mélange eau et sable dans des proportions définies. Les eaux ressortent au travers des pores du textile, les sables restant dans le tube qui se remplit ainsi progressivement. Les zones de prélèvement des sables ont été définies préalablement de manière très précise et aucune extraction de sable n'a été autorisée en dehors de ces gisements. L'entreprise de travaux maritime a mis en œuvre en moyenne un système TenCate Geotubes® par jour.



Illustration 114 : Opérations de travaux réalisées en 2011 par l'entreprise TRASOMAR (Source : TRASOMAR)

### Suivi et évolution

Les ouvrages ont été régulièrement contrôlés lors de la construction par la ville de Cannes, par le biais d'un contrôle externe, y compris après les événements de tempête de novembre 2011.

Il a été constaté que l'environnement marin s'est approprié rapidement l'ouvrage. La couleur de départ noire a disparu sous l'effet du développement de la flore et la nature a progressivement transformé l'ouvrage en récif artificiel. Différentes espèces de poissons sont revenues sur le site. En plus de cette digue sous-marine, un rechargement de plage a été effectué ; un suivi a été programmé sur 10 ans, avec levés topographiques et bathymétriques simultanés tous les deux ans pour en suivre les effets.

### Bibliographie

SOGREAH, 2008 ; TenCate, 2008, 2012 ; Brehin et al., 2018.

## 6.2 Les pieux hydrauliques

Depuis très longtemps, la ville de Saint-Malo implante des pieux hydrauliques près des murs de la plage du Sillon pour dissiper l'énergie des vagues juste avant qu'elles ne déferlent. Les murs de front de mer sont ainsi mieux protégés des déferlements et de l'impact des vagues. Sur un principe similaire, des opérations de protection de cordons dunaires ont permis d'implanter plus récemment des pieux en bois sur des sites très exposés aux houles comme Noirmoutier (85), Sangate, Wissant (62), Le Cap Ferret (33) ou Tréffiagat (29). Les résultats obtenus par ces dispositifs, qui sont implantés le plus souvent en haut de plage des systèmes dunaires, restent cependant contrastés.

La méthode s'appuie sur le principe d'amortissement et de dissipation de l'énergie des vagues au niveau des pieux hydrauliques pour limiter les mouvements sédimentaires longitudinaux et transversaux et favoriser les dépôts de sable principalement en haut de plage. Ce n'est cependant pas très efficace, comme le montre le REX des sites présentés, avec des résultats dans l'ensemble peu concluants. De plus, il semble délicat de proposer une méthodologie de dimensionnement type pour l'implantation des pieux ; cela relève de l'étude morphodynamique de chaque site et dépend des conditions d'exposition aux houles et aux transports sédimentaires dominants associés.

### Plage du Sillon – Saint-Malo (35)

#### Contexte

Pour protéger les ouvrages de front de mer de la plage du Sillon, la ville de Saint-Malo a mis en place depuis trois siècles un dispositif constitué de 3000 pieux hydrauliques en bois, qui permet d'amortir et de dissiper l'énergie des vagues avant qu'elles ne déferlent sur les murs maçonnés.

#### Mise en œuvre

La première implantation de pieux en bois sur la plage de Saint-Malo eut lieu en 1698, après les marées d'équinoxes de mars et septembre qui endommagèrent les fortifications de la ville. Ainsi, 300 pieux furent plantés sur deux à trois rangées.

En 1825, l'ingénieur des Ponts et Chaussées Robinot fait installer 2700 pieux supplémentaires ayant pour dimensions 7 m de haut, 30 cm de diamètre, enfoncés de 2,5 m appelés pieux tortillards car disposés en quinconce. Depuis, ces pieux hydrauliques en bois, qui constituent une protection des murs, sont régulièrement remplacés (Illustration 115).



Illustration 115 : Pieux hydrauliques implantés près des murs de la plage du Sillon, Saint-Malo (Source : Cerema)

### Dunes de Léhan – Tréffiagat (29)

#### Contexte

Situées sur la commune de Tréffiagat dans le Finistère, les dunes de Léhan sont exposées aux houles de sud-ouest et soumises à une dérive littorale d'ouest en est. Le cordon dunaire protège les parties basses de la commune du risque de submersion marine. Ce secteur souffre des tempêtes hivernales et s'érode au fil des ans, menaçant la zone urbanisée située en arrière des dunes. Dans les années

1990, un ouvrage en enrochement a été réalisé afin de limiter le recul du trait de côte. Cependant, les effets de bord de l'ouvrage ont par la suite accentué l'érosion du cordon dunaire coté est à l'aval dérive.

En 2011, un procédé Stabiplage, qui est une structure de protection longitudinale en géotextile remplie de sable, a été mis en place sur la section érodée. Ce dispositif n'a par contre pas résisté aux événements de tempête successifs des années suivantes, en particulier les événements majeurs de l'hiver 2013-2014, qui ont accéléré le processus d'érosion du cordon dunaire avec un recul de 6 m. La commune a alors entrepris à l'hiver 2014-2015 des travaux d'urgence en confortant par des remblais l'arrière-dune. Sur un linéaire de 200 m à l'extrémité est de l'ouvrage en enrochement, un volume de 20 000 m<sup>3</sup> de sable est venu recharger les dunes pour un coût de 173 000 €.

### Conception et mise en œuvre

Avec une érosion significative du cordon dunaire et l'extrémité de l'enrochement qui se disloque due aux effets de bord, le risque de brèches dans ce secteur est important. Suite aux travaux d'urgence et à l'état dégradé des dunes (Illustration 116), la commune a lancé en 2015 une étude afin de mieux comprendre la morphodynamique du site et proposer des solutions d'aménagement et de protection durable.



Illustration 116 : Dunes du Léhan en 2015, après le confortement de l'arrière dune (Source : Cerema)



Illustration 117 : Dunes de Léhan en 2017, après l'implantation des pieux en 2016 (Source : Cerema)

Ainsi, les conclusions de l'étude Hydratech ont conduit à l'implantation en 2016 de 400 pieux hydrauliques de 6 m de haut, enfoncés de 4 m et disposés en haut de plage sur deux rangées, afin de protéger le cordon dunaire érodé (Illustration 117).



Illustration 118 : Dunes de Léhan en 2017, après l'implantation de pieux hydrauliques en 2016 sur le haut de plage en continuité de l'ouvrage en enrochement (Source : Cerema)

Ce dispositif, qui vient assurer la continuité avec l'extrémité de l'ouvrage en enrochement, a pour but de limiter les effets de bord de l'ouvrage et de dissiper l'énergie de la houle. D'un coût de 81 000 €, il

est considéré comme provisoire, ayant été conçu pour durer 5 ans, jusqu'à la conception et la réalisation d'une solution pérenne envisagée à l'horizon 2022 (Illustration 118).

Malgré l'installation de 400 pieux hydrauliques pour limiter les effets de bord de l'ouvrage en enrochement et dissiper davantage l'énergie des vagues, le cordon dunaire continue de s'éroder (Illustration 119).



Illustration 119 : Dunes de Léhan en 2017, avec les deux rangées de pieux hydrauliques et la dégradation du cordon dunaire qui se poursuit (Source : Cerema)

## Dune d'Aval – Wissant (62)

### Contexte

La dune d'Aval, située au droit du secteur sud-ouest urbanisé de Wissant, est soumise à une forte érosion depuis une vingtaine d'années. Le recul du trait de côte très significatif est estimé à 60 m sur la période de 1999 à 2014, en sachant que les événements de tempête de l'hiver 2013-2014 ont provoqué un recul de 10 m ; plus d'informations sur le contexte et l'évolution du site sont présentées dans le REX du chapitre précédent « La Gestion souple des dunes ». Notons que la morphodynamique du site est relativement complexe en raison de l'action combinée des paramètres météo-marins (vent, houle, marée) et de la présence de bancs sableux en baie de Wissant. Le transport littoral net longitudinal s'effectue du sud-ouest vers le nord-est, suivant le sens de la dérive littorale, mais des mouvements sédimentaires transversaux importants s'opèrent également sur le secteur.

### Conception et mise en œuvre

Dans les années 2010, des rangées de pieux hydrauliques ont été implantées sur le haut de plage, en continuité de l'ouvrage en enrochement, avec pour but de freiner la dérive littorale et d'amortir l'énergie de la houle, afin de favoriser l'accumulation de sable et limiter le démaigrissement de la plage. Ce dispositif a cependant montré ses limites sur ce site très exposé aux vagues.



Illustration 120 : Dune d'Aval en mai 2016, pieux hydrauliques longitudinaux et transversaux ne limitant pas le recul du trait de côte (Source : Cerema)

Des études de modélisations numériques hydro-morphosédimentaires, associant la propagation de houle, la courantologie, le transport de sédiments et l'évolution des fonds, sur la période 2017 à 2019 doivent conduire au dimensionnement d'un rechargement massif de la dune d'Aval dont les travaux sont prévus à l'horizon 2021. Des solutions de protections d'urgence provisoires ont été mises en œuvre d'ici cette échéance. Ainsi, à deux reprises, en 2013 puis en 2016, des pieux hydrauliques ont été implantés sur le haut de plage, parallèlement au trait de côte pour dissiper l'énergie des vagues et perpendiculairement à celui-ci pour maintenir les sédiments soumis à la dérive littorale (Illustration 120 et Illustration 121).

En mai 2013, 1000 pieux ont ainsi été implantés parallèlement à la dune, sur une longueur de 225 m, pour un coût de 220 k€ ; en septembre 2016, 700 pieux ont été implantés sur une longueur de 150 m en sept rangées, dans le cadre d'une opération globale de 1,3 M€, comprenant la réalisation d'une dune artificielle constituée de ganivelles et de plantations d'oyats et d'un rechargement de plage de 50 000 m<sup>3</sup>. Cependant, les pieux hydrauliques ont montré par la suite leur inefficacité pour atténuer l'énergie des vagues et les effets de bords de l'ouvrage sur ce site ; le cordon dunaire continue de s'éroder.



Illustration 121 : Dune d'Aval en 2017 ; implantation de 700 pieux hydrauliques (Source : Drone Littoral)

## 6.3 L'atténuateur de courant

### 6.3.1 Objectif et définition

L'atténuateur de courant à base d'éléments filiformes, qui reproduit l'effet de haie, peut selon les cas être mis en œuvre en complément d'ouvrages existants pour stabiliser les fonds littoraux meubles et atténuer l'affouillement en pied d'ouvrages de types murs, digues et épis en enrochements. Bien adapté aux secteurs à fort courant, il peut se présenter comme un déflecteur modifiant le sens du courant, un atténuateur freinant l'intensité du courant ou plus souvent comme une combinaison des deux fonctions.

### 6.3.2 Principe et conditions d'efficacité

L'action des atténuateurs de courant est comparable à celle des haies sur le vent. Disposés en épis transversaux par rapport au sens du courant, ils permettent de créer à l'aval de la structure en forme de haie des courants de retour près du fond. Les modélisations de l'effet de haie réalisées avec le code de calcul Aquilon à l'Université de Bordeaux 1 montrent que les courants de retour favorisent l'accumulation des sédiments sur une longueur d'environ huit fois la hauteur de la structure (Illustration 122).

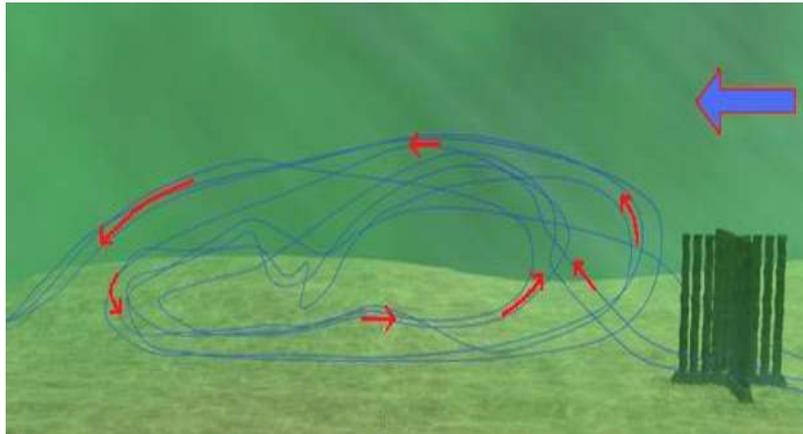


Illustration 122: Modélisation de l'effet de haie par le code Aquilon, Université de Bordeaux 1, A. Sarthou (Source : Borde-Sue, 2011)

Deux types d'atténuateurs constitués d'éléments filiformes rigides sont présentés par la suite : la structure « Haie fixe » de DBS-Traitement et le dispositif Rebamb© de SAS BIOBAMB (Illustration 123 ; 124).

La structure « Haie fixe » est composée d'une multitude d'éléments filiformes autoporteurs, constitués de joncs en fibre de verre et résine époxy (16 mm de diamètre et 2 m de haut) fixés sur des poutrelles en béton, dans lesquelles sont fichés les joncs. Plusieurs structures « Haie fixe » peuvent être assemblées.

Le dispositif Rebamb© présente une architecture d'assemblage de cannes sèches de bambous, avec une canne centrale (4 m de long, 120 mm de diamètre) qui supporte deux cannes de plus petite longueur (2 m) afin d'augmenter la surface qui interagit avec le courant de houle ; la canne centrale est fixée sur le fond sur une ancre à vis et assemblée à l'aide de deux renforts latéraux en bambou de 2 m de long.

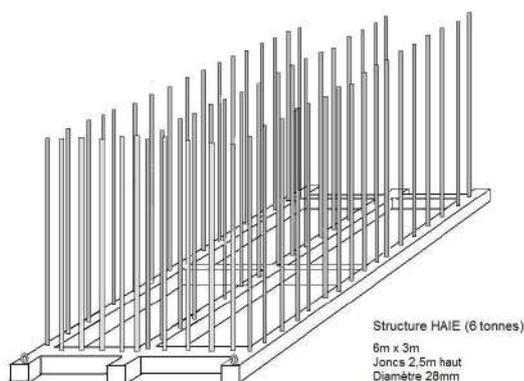


Illustration 123 : Structure « Haie fixe » (Source : DBS-Traitement)

Illustration 124 : Schéma de principe du dispositif Rebamb© (Source : SAS BIOBAMB)

L'impact morphosédimentaire des deux atténuateurs a été montré dans le cadre d'étude en canal à houle effectuée en 2013 au sein du Laboratoire Ondes et Milieux Complexes de l'Université du Havre. Il a été observé des élévations moyennes à l'aval des deux structures qui favorisent la stabilisation des fonds, avec un effet d'accrétion plus important à l'aval pour le dispositif Rebamb© (Farnole et al., 2018).

La structure « Haie fixe » de DBS-Traitement se compose d'une multitude d'éléments filiformes qui sont des supports privilégiés pour le développement de la faune sous-marine (Illustration 125) ; c'est le concept de bio-construction selon lequel une armature filiforme de 16 mm peut générer, dans le cas

des moules, un manchon de 300 mm et une biomasse de 35 kg/ml. Cette bio-construction, spécifique à chaque site est à considérer dans la conception des structures, notamment pour l'écartement des éléments filiformes, qui doit être adapté aux espèces qui vont se fixer afin de ne pas créer une paroi pleine. Il s'agit d'atténuer et non de bloquer le courant tout en optimisant le développement de la faune fixée (Illustration 127).



Illustration 125 : Bio-construction sur la structure « Haie fixe », diamètres de manchons, de gauche à droite : jour 1 (16 mm) ; jour 60 (50 mm) ; jour 150 (125 mm) (Source : Scaph Pro)

## Lège-Cap-Ferret (33)

### Contexte

Le procédé de structures « Haie fixe » a été utilisé pour stabiliser les fonds sableux au pied d'une digue en enrochements sur la face interne de la pointe du Cap Ferret. Les fonds de forte pente ( $15^\circ$ ) subissent une érosion importante en raison de forts courants de marée de flot et jusant qui peuvent atteindre jusqu'à 2,6 m/s, provoquant l'éboulement fréquent de sections de la digue.

### Conception et mise en œuvre

Deux structures « Haie fixe » de 1,8 m de hauteur, 5 m de long sur 3 m de largeur, écartées de 18 m, ont été disposées en épis transversaux par rapport au sens du courant, au pied de la digue en enrochements. Le chantier commandé par un riverain a été effectué entre septembre et octobre 2001 sur une longueur de 25 m de linéaire, une largeur de 15 m, à une profondeur variant entre 13 et 15 m (Illustration 126).



Illustration 126 : Maquette du chantier du Cap Ferret, composé de deux structures « Haie fixe » transversales au courant (Source : Scaph Pro)



Illustration 127 : Perméabilité de la structure et bio-construction (Source : Scaph Pro)

## Suivi et évolution

Un suivi de l'évolution des fonds par l'association de plongeurs « Scaph Pro » a eu lieu de 2001 à 2008. La perméabilité des structures a varié de 90 à 40 % en fonction de la bio-construction (fouling). Scaph Pro a disposé sur le fond seize fiches graduées pour suivre l'évolution sédimentaire. Une accrétion constante a été observée ainsi qu'une diminution de l'amplitude des rides de courant de 35 cm à 5 cm.

Les résultats ont été validés en 2003 par le bureau d'étude MD-CONSULTANT et en 2006 par le bureau d'étude SECOTRAP. Ces expertises confirment la stabilisation des fonds dans la zone traitée (400 m<sup>2</sup> de fond), la pérennité des matériaux et des travaux sur le moyen terme. En 2015, Scaph Pro a réalisé de nouvelles observations, qui ont permis de confirmer le maintien des accrétions jusqu'à 10 cm par endroit.

## Bibliographie

Borde-Sue, 2017 ; Scaph Pro, 2009.

## Villeneuve-Loubet (06)

### Contexte

L'érosion de la plage entre Villeneuve-Loubet et Antibes est un constat avéré sans qu'il y ait eu jusqu'à présent de solution satisfaisante. Le recul est estimé à 1 m/an et la largeur de l'estran est réduite par endroit à quelques mètres, augmentant la fréquence du phénomène de submersion en particulier sur la plage de Vaugrenier. L'expérimentation du procédé Rebamb© a pour objet de tester une solution alternative souple et réversible pour atténuer l'effet des vagues lors de fortes tempêtes et limiter la submersion à un ou deux événements dans l'année au lieu des cinq à sept observés actuellement. Le département des Alpes-Maritimes a manifesté son intérêt pour ce procédé et s'est engagé en 2016 dans cette démarche expérimentale.

### Conception et mise en œuvre

Le dispositif Rebamb© se compose de quatre rangées de cannes sèches de bambou, espacées de 10 m et implantées sur 100 m de linéaire couvrant une surface de 3 000 m<sup>2</sup>. Les cannes centrales sont fixées au fond sur des ancrs à vis et assemblées à l'aide de renforts latéraux en bambou (Illustration 128). L'implantation du dispositif immergé à une profondeur de 5 m est localisé à 100 m du trait de côte, sur un fond de sable fin de pente faible (2,5 %) et régulière.

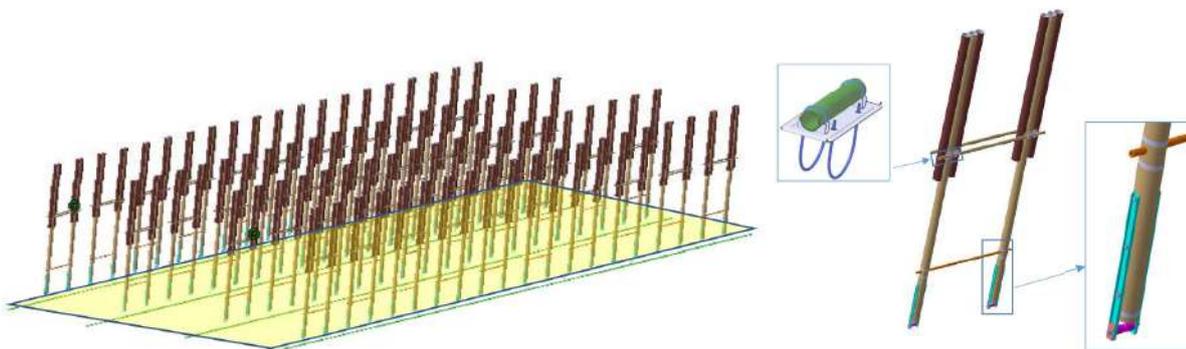


Illustration 128 : Vue 3D du dispositif Rebamb© et détails de fixation de l'assemblage en bambous : la canne centrale de 4 m de long, qui supporte deux cannes de 2 m, est fixée sur une ancre à vis et assemblée à l'aide de deux renforts latéraux en bambou de 2 m (Source : SAS BIOBAMB)

## Suivi et évolution

L'expérimentation Rebamb© lancée sur la plage de Vaugrenier fait l'objet d'une convention de partenariat signée en juillet 2016 entre le département des Alpes-Maritimes, la SAS BIOBAMB et le laboratoire GEOAZUR, UMR de l'Université Nice-Sophia Antipolis et du CNRS. Elle intègre un suivi par des instruments adaptés des conditions hydrodynamiques, de l'évolution du trait de côte et des submersions éventuelles sur trois ans.

## Bibliographie

Farnole et al., 2018.

# 6.4 Le dispositif de stabilisation en géotextile

## 6.4.1 Objectif

Le dispositif de stabilisation en géotextile, le plus souvent constitué des structures en géocomposite injectées hydrauliquement de granulats, a pour but de protéger les plages soumises à l'érosion en limitant les pertes de sédiments. Les procédés, comme le STABIPLAGE® développé par la société Espace ont pour objectifs de composer avec la dynamique sédimentaire de chaque site.

## 6.4.2 Principe et description

Le principe du dispositif repose sur le captage, l'accumulation et le maintien des sédiments sur la plage tout en favorisant l'intégration paysagère des structures, qui ont vocation à être ensevelies sous le sable, naturellement suite à l'accumulation des sédiments qu'elles piègent ou parce qu'elles ont été recouvertes en phase travaux. Le procédé s'appuie sur l'utilisation de structures en géotextile remplies de granulats, continues et stables, s'adaptant au terrain naturel et à ses variations. Le dispositif est conçu sur mesure pour répondre aux caractéristiques hydrodynamiques de chaque site.

Le STABIPLAGE® est une structure multicouches formant une enveloppe fermée et perméable, conçue à partir de matériaux géocomposites ; le modèle type est constitué d'un minimum de deux couches, à savoir un filtre intérieur perméable et une carapace externe résistante permettant d'assurer la longévité de la forme de l'ouvrage et de sa résistance aux agents extérieurs (abrasion, UV, alcalins, micro-organismes, etc.). A l'intérieur de cette enveloppe, sont injectés par un réseau hydraulique des sédiments, qui vont remplir la structure puis constituer l'ouvrage. Une fois la phase d'injection terminée, le dispositif présente un corps monolithique, avec un minimum de surfaces planes et une coupe en section elliptique. L'ouvrage est maintenu par un système d'ancrage enfoui dans le sol qui évite sa déformation ou son déplacement en cas d'événement de tempête (Illustration 129).

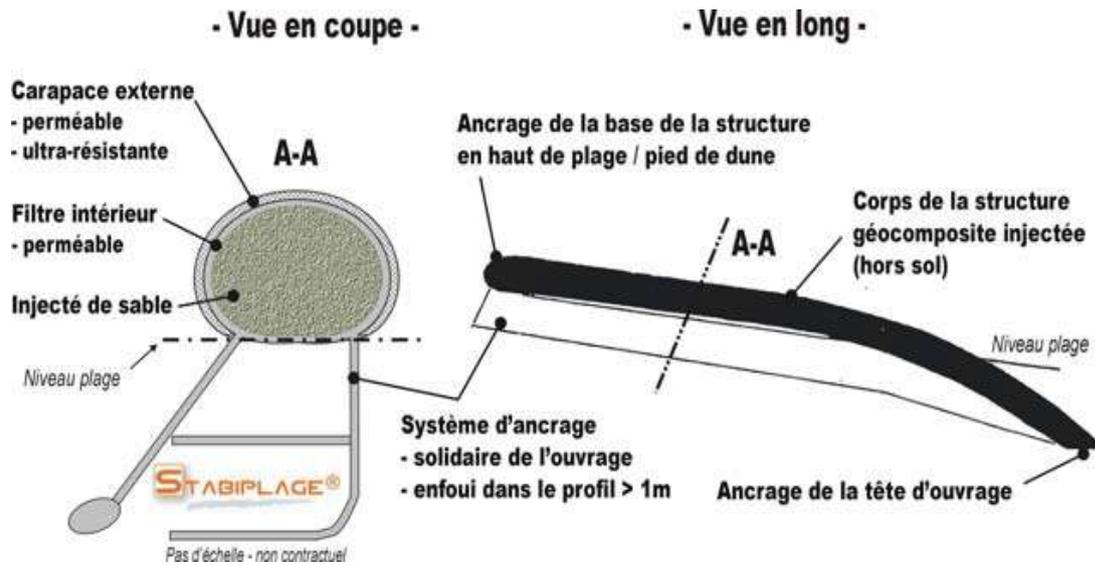


Illustration 129 : Vue en coupe du procédé STABIPLAGE® avec système d'ancrage et vue en long d'un ouvrage utilisé pour stabiliser la plage en agissant sur le transit littoral (Source : Espace Pur)

### 6.4.3 Conditions d'efficacité et limites

Avant la mise en œuvre du dispositif de stabilisation, une étude du site est nécessaire pour déterminer les causes du déficit sédimentaire et concevoir les solutions de protection. Généralement, la technique d'implantation consiste en la pose d'ouvrages en géotextile (nombre et dimensionnement déterminés par l'étude), pouvant être perpendiculaires au trait de côte pour maintenir les sédiments ou parallèles au trait de côte visant à le fixer (Illustration 130). En fonction de la morphodynamique du site (marnage, degré d'exposition au vent, aux vagues et courants), la configuration d'implantation, les dimensions et le système d'ancrage des ouvrages doivent être adaptés pour assurer une efficacité optimale.

L'aspect monolithique et cylindrique des dispositifs leur assure une stabilité importante, sans effet de sur ou de sous-pression. Le caractère perméable et souple des ouvrages permettent d'écarter les risques d'affouillement et favorise l'adaptation au sol naturel. Lorsque les structures ont bien joué leur rôle de captage et d'accumulation des sédiments, elles sont naturellement le plus souvent quasi-recouvertes, permettant aux usagers de la plage de les franchir en sécurité. Si ce n'est pas le cas, il est parfois difficile de franchir les structures perpendiculaires au trait de côte de type épis, qui peuvent présenter une différence altimétrique importante (de 1 à 2 m) entre l'amont et l'aval dérive de l'ouvrage.



Illustration 130 : STABIPLAGE® perpendiculaire au trait de côte de maintien des sédiments et parallèle au trait de côte visant à le fixer, Grève Blanche, Le Guilvinec, 2018 (Source : Cerema)

<b>Dispositif de stabilisation en géotextile</b>
<b>Avantages</b>
Rapidité d'intervention, pas de moyens techniques lourds pour la mise en œuvre
Structures monolithiques continues et stables, s'adaptant au terrain naturel et à ses variations
Structures en géotextile perméables, souples et résistantes à l'abrasion et aux UV, alcalins, micro-organismes
Remplissage en granulats par injection hydraulique (utilisation possible des sédiments du site)
Réversibilité du procédé si impact négatif : destruction et régalinge des sédiments sur le site
<b>Inconvénients</b>
Stabilité faible sur les fonds en pente dans les cas de fortes houles
Risque de déchirement de la carapace de la structure (vandalisme, chocs de vague, débris)
Affouillement possible en pied si existence de vides dans la structure dus à un remplissage trop lent
Résistance faible aux UV pour les structures d'ancienne génération
Impact environnemental en cas de déchirement de la structure en géotextile (pollution des mers et océans)
Impact visuel pour les usagers, difficulté de franchissement des structures visibles (pouvant parfois présenter une différence altimétrique de 1 à 2 m entre l'amont et l'aval dérive de l'ouvrage)
Surveillance très régulière impérative pour ajuster éventuellement le fonctionnement et palier les défauts

Illustration 131 : Avantages et inconvénients du dispositif de stabilisation en géotextile

Le procédé peut être considéré comme une solution alternative aux méthodes rigides de protection pour les sites moyennement exposés aux vagues ; il est rapide à mettre en œuvre, relativement économique et réversible. Cependant, les performances et la durabilité du procédé restent des points critiques à améliorer pour les sites très exposés. Les retours d'expérience permettent de mettre en avant les avantages et les inconvénients des dispositifs de stabilisation, pour lesquels la mise en place de suivi est fortement recommandée (Illustration 131).

Plusieurs dispositifs en géotextile ont été installés sur les côtes françaises depuis les années 2000. Les REX suivants présentent un aperçu de l'évolution des ouvrages et des secteurs côtiers, après plus d'une dizaine d'années, au cours de laquelle les côtes ont été exposées à des événements de tempête, majeurs, comme Johanna en mars 2008 et ceux successifs de l'hiver 2013-2014.

## Plage des Sables Blancs – Lesconil (29)

### Contexte

La plage des Sables Blancs, qui est située dans l'anse de Lesconil, est exposée aux houles de secteurs sud-ouest à sud-est. Sa forme en flèche littorale de 1,1 km résulte d'une dérive littorale d'est en ouest et protège une zone basse poldérisée. La construction d'un pont barrage en 1967 sur le cours d'eau le Ster a modifié la dynamique sédimentaire de l'anse, en réduisant l'effet de chasse du cours d'eau au jusant, augmentant son ensablement et ne permettant plus aux sédiments d'être renvoyés au large pour être repris par les houles et alimenter la flèche sableuse.

L'érosion de la plage est ainsi constatée depuis des années, avec des ruptures du cordon dunaire qui ont engendré des submersions du polder à plusieurs reprises. En 2002, les communes de Plobannaec-Lesconil et Loctudy sollicitent la société Espace Pur pour la mise en place de dispositifs STABIPLAGE® pour stabiliser le trait de côte, engraisser le profil de plage et assurer la protection du cordon dunaire, de l'écosystème et des aménagements situés en arrière.



Illustration 132 : Contexte géographique de la plage des Sables Blancs (Source : Suanez et al., 2006) et vue aérienne de l'anse, de la plage et des cinq STABIPLAGE® (Source : Espace Pur)

### Conception et mise en œuvre

En 2004, les trois communes, maîtres d'ouvrage, désignent la DDE de Pont-l'Abbé comme maître d'œuvre pour la réalisation des ouvrages, implantés en épis, perpendiculairement au trait de côte, afin de limiter le transit littoral et exhausser le profil de plage. Entre les mois de février et mars 2004, cinq STABIPLAGE®, d'une longueur de 35 m pour une hauteur de 80 cm, ancrés sur toute la longueur à 1 m de profondeur et espacés de 50 m les uns des autres, sont ainsi posés par la société Espace Pur.



Illustration 133 : Plage des Sables Blancs en mars 2004 : cinq ouvrages STABIPLAGE® perpendiculaires au trait de côte et un ouvrage quasi-recouvert, Anse de Lesconil (Source : Espace Pur)

### Suivi et évolution

Un suivi morphosédimentaire a été réalisé par l'Université de Bretagne Occidentale en collaboration avec le Cetmef sur la période de janvier 2005 à décembre 2006, avec un levé supplémentaire effectué en janvier 2018. Des levés topographiques au DGPS de la zone concernée ont permis de construire des modèles numériques de terrain associant des calculs de cubature et des représentations du profil longitudinal et des profils transversaux de la plage afin d'évaluer la capacité des ouvrages à maintenir les sédiments et stabiliser le cordon dunaire (Illustration 134).

Dans un premier temps, l'évolution a été favorable puisque l'analyse a permis de mettre en évidence une stabilisation globale du trait de côte, un exhaussement du haut de plage et un gain de sédiments au niveau des compartiments de 1500 m<sup>3</sup>, représentant une accrétion de 20 cm pour la zone des ouvrages entre janvier 2005 et décembre 2006. L'accrétion a concerné le secteur ouest, situé à l'aval dérive, alimenté à partir de transferts opérés plus à l'est, résultant du transit littoral.

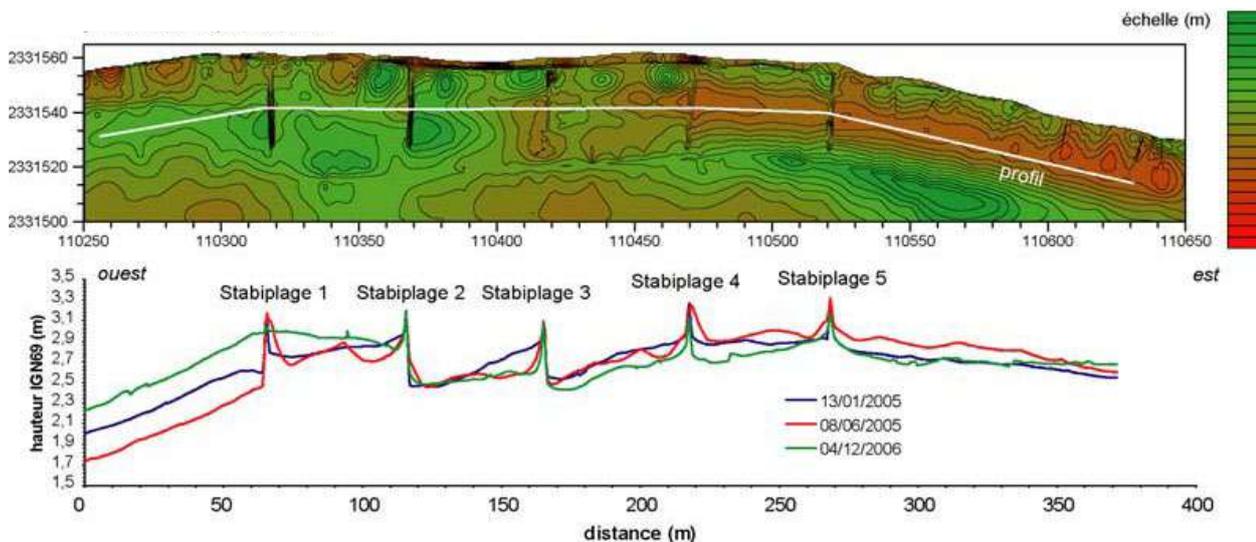


Illustration 134 : Evolution morphologique et du profil longitudinal de la plage (partie médiane) recoupant les cinq STABIPLAGE® entre le 13 janvier 2005 et le 4 décembre 2006 (Source : Cariolet et al., 2008)

L'évolution longitudinale du profil de plage montre que les sédiments se sont accumulés entre janvier et juin 2005 sur les compartiments situés à l'est, en amont dérive. Lorsque les compartiments amonts ont été suffisamment remplis, le stockage de sédiments s'est poursuivi plus en aval entre juin 2005 et décembre 2006. Cette évolution favorable est à relativiser, la période 2004-2006 n'ayant connu aucun événement de tempête majeur. Ce fonctionnement peut être perturbé par le transport transversal, qui

engendre des variations importantes du profil de plage entre les périodes estivale et hivernale, avec une remobilisation des sédiments vers le large durant les événements de tempête.

Les observations menées sur l'hiver 2007-2008 ont montré que les ouvrages ont subi des dégradations, avec des déchirures de carapaces et des pertes de matériaux des structures. Les STABIPLAGE® ont été très dégradés puis quasi-tous détruits lors des événements de tempêtes successifs de 2012 et 2014 (Illustration 135). Un fort abaissement de la plage s'en est suivi ainsi que la formation de micro-falaises et une érosion marquée. La destruction des ouvrages au cours des événements de tempête interroge néanmoins sur leur pérennité et leur durabilité sur des sites très exposés.



Illustration 135 : Plage des Sables Blancs en juin 2015 : présence d'un seul STABIPLAGE® dégradé et déchiré (Source : Cerema)

### Bibliographie

Cariolet et al, 2008 ; Suanez et al., 2006.

## La Grève Blanche – Le Guilvinec (29)

### Contexte

La plage de la Grève Blanche correspond à l'extrémité est d'un cordon dunaire de 4,5 km s'étendant du port de Kérity à l'ouest jusqu'à la pointe de Men Meur, sur la commune du Guilvinec. La plage, qui est exposée aux houles de secteur sud-ouest, subit une érosion importante depuis les années 1990. Sur le secteur le plus à l'est, un ouvrage en enrochement de haut de plage a permis dans un premier temps de fixer le cordon dunaire et de protéger l'arrière-dune urbanisée. Mais l'ouvrage rigide et réflexif a aussi provoqué en quelques années un abaissement du profil de plage, menaçant même sa stabilité. Le secteur ouest de la plage, caractérisé par un cordon dunaire non aménagé mais exposé à l'érosion marine et éolienne, est en recul significatif. La commune du Guilvinec demande en 2002 à la société Espace Pur d'analyser le fonctionnement du site et de proposer une solution d'aménagement durable.

### Conception et mise en œuvre

En 2005, la commune du Guilvinec, maître d'ouvrage, décide la mise en œuvre par Espace Pur de deux types d'ouvrages de protection. Un ouvrage STABIPLAGE© parallèle au trait de côte est implanté en pied de dune et recouvert afin de protéger et stabiliser le cordon dunaire avec un noyau artificiel. Trois ouvrages STABIPLAGE© perpendiculaires au trait de côte sont implantés sur le secteur enroché à l'est de la plage afin d'exhausser le niveau de la plage au droit de l'enrochement existant (Illustration 137).

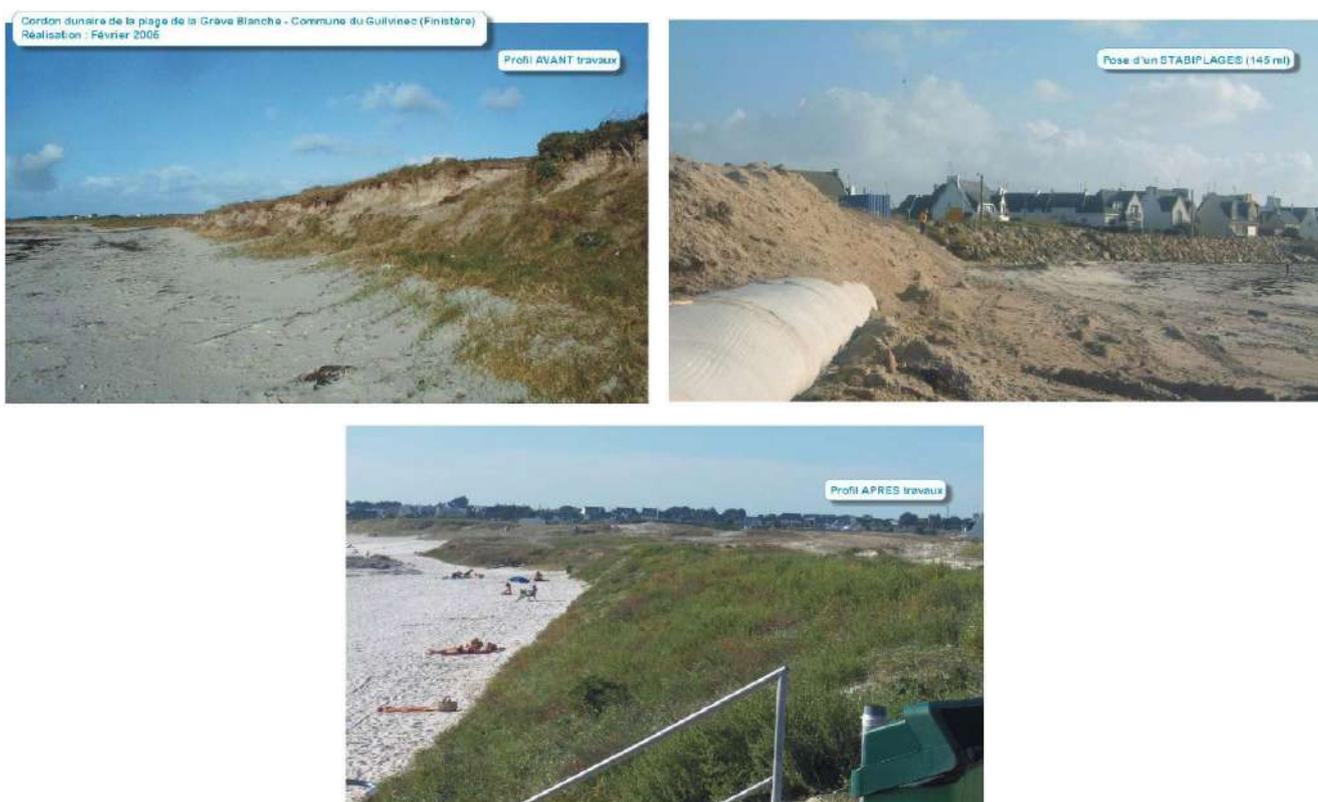


Illustration 136 : Profil du cordon dunaire avant travaux, pose de l'ouvrage STABIPLAGE© parallèle au trait de côte (145 m de long) et profil après travaux (ouvrage recouvert) en 2005 (Source : Espace Pur)

Les dimensions du STABIPLAGE© parallèle au trait de côte sont de 145 m de long et de 0,8 m de hauteur hors sol et celles des trois ouvrages perpendiculaires sont de 35 m de long et de hauteur identique (0,8 m). En 2016, l'installation d'un nouvel ouvrage parallèle de 55 m de long est réalisé à l'ouest en continuité du précédent afin de poursuivre la stabilisation du cordon dunaire.

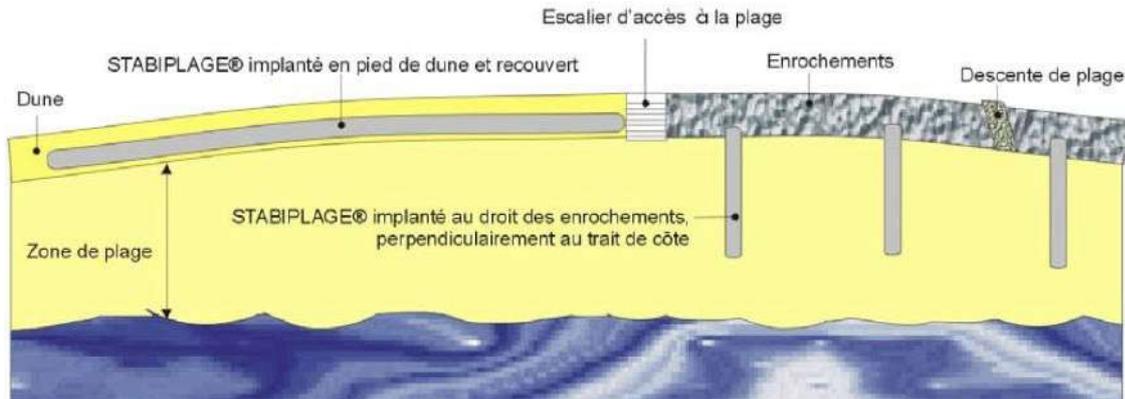


Illustration 137 : Schéma d'implantation des ouvrages STABIPLAGE©, la Grève Blanche, Le Guilvinec (Source : Espace Pur)

### Suivi et évolution

Un suivi des ouvrages a été réalisé par la société Espace Pur. Globalement, les ouvrages ont donné satisfaction puisqu'ils ont résisté aux événements de tempête majeurs du 10 mars 2008 et de l'hiver 2013/2014 et qu'en 2016, la commune du Guilvinec a fait procéder à l'installation d'un nouveau STABIPLAGE© parallèle au trait de côte de 55 m prolongeant celui déjà installé en 2005.



Illustration 138 : Ouvrages STABIPLAGE© parallèle et perpendiculaire au trait de côte, juin 2018, la Grève Blanche, Le Guilvinec (Source : Cerema)



Illustration 139 : Ouvrage STABIPLAGE© parallèle au trait de côte et visible, affouillement en pied par endroit, avec les trois ouvrages perpendiculaires en arrière-plan (à droite), juin 2018 (Source : Cerema)

En 2018, les ouvrages STABIPLAGE© sont toujours présents et visibles. Il est à noter que les ouvrages transversaux ne sont toujours pas ensevelis sous le sable même s'ils ont permis un exhaussement suffisant du haut de plage pour qu'une plage existe à marée haute. Par ailleurs, la végétation ne recouvre plus les ouvrages, ce qui génère un impact visuel pour les usagers.

## 6.5 Le dispositif de sédimentation

### 6.5.1 Objectif

La société Able a développé et breveté un dispositif de sédimentation appelé filets S-Able ou « dune de turbulence », destiné à contrôler le transport de sable sur l'estran à proximité des cours d'eau soumis à



Illustration 140 : Un des ouvrages STABIPLAGE© perpendiculaire, installé en 2005 et visible en 2018 (Source : Cerema)

des divagations de chenaux. Ces déplacements peuvent en effet perturber les usages de la plage en créant des obstacles à la libre circulation, des courants forts aggravant le danger pour la baignade et de nouveaux secteurs en érosion. En utilisant l'énergie marine et fluviale au lieu de la contrer et en se servant des processus naturels, le procédé novateur amène les cours d'eau à déplacer leurs lits par le reprofilage des méandres.

### 6.5.2 Principe et conditions d'efficacité

Il s'agit d'un ensemble de filets assemblés en une structure tridimensionnelle (forme pyramidale), qui permet de générer de la turbulence dans les écoulements afin de les réduire. Le dispositif se compose de nappes de filets noués en polyéthylène (PE) de maille de 50 m assemblées en « V » inversé (fil en PE vert de 4 mm de diamètre) et fixées au fond par un système de chaînes et ancres (Illustration 136 ; 137).

La flottabilité du dispositif S-Able, et donc son déploiement vertical à marée haute, est assuré par des flotteurs fixés au plus près des structures. En effet, ces filets sont destinés à être déposés en zone d'estran : ils ne sont donc pas toujours immergés et déployés. Lorsqu'ils le sont, ils constituent un milieu poreux, qui génère de la turbulence et réduit les courants responsables du transport sédimentaire, favorisant la sédimentation au niveau de la « dune de turbulence ».

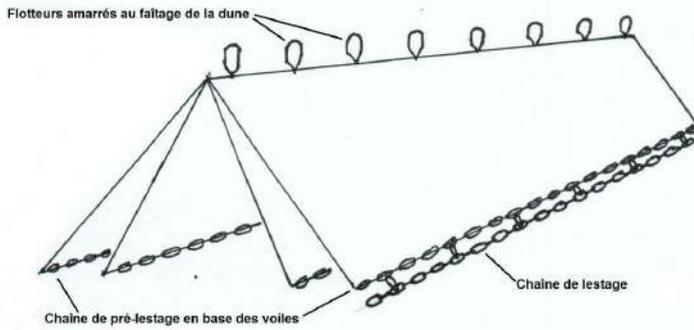


Illustration 141 : Schéma de nappes de filets assemblés et fixés au fond, avec des flotteurs fixés au faîtage (Source : Able)



Illustration 142 : Maquette au 1/10ème du dispositif S-Able (Source : Able)

Le fonctionnement du dispositif a été étudié au Laboratoire d'Hydraulique Saint-Venant de Chatou ; des essais en modèle réduit (maquette au 1/10ème) ont été réalisés dans un canal à houle. Les résultats montrent que le dispositif agit sur les processus hydro-sédimentaires, non pas comme une barrière, mais plutôt comme un modérateur et décanteur de sable. La formation d'une barre fixée au sein des filets est observée. Elle n'est pas assez développée pour prévenir l'érosion majeure pouvant se produire à pleine mer, lorsque de fortes vagues arrivent à la côte. Mais le dispositif maintient le stock de sable plus proche de la côte, mobilisable lors des périodes d'accalmie, propices à l'engraissement des plages (Boucher et al., 2014).



Illustration 143 : Filets S-Able verts et flotteurs blancs disposés sur l'estran (Source : Able)

Le dispositif a été installé sur quelques sites afin de pouvoir reprofiler les méandres de cours d'eau (Illustration 140). Les expérimentations menées à Saint-Brevin et en baie d'Authie sont décrites par la suite.

Il faut néanmoins rappeler que ces REX concernent essentiellement la rectification de cours d'eau et plus indirectement la protection du trait de côte. Les enseignements en matière de fixation d'un méandre ne sont donc pas nécessairement généralisables à la lutte contre l'érosion du trait de côte.

L'impact environnemental du dispositif S-Able composé de filets en polyéthylène (filets de pêche), d'un linéaire de plus de 100 m sur les sites étudiés, est à considérer pour la pollution plastique des mers et océans, en cas de déchirement et pour la faune, qui peut être piégée.

## Saint-Brevin (44)

### Contexte

Le Boivre est un cours d'eau dont l'exutoire débouche sur la plage de l'Ermitage à Saint-Brevin-les-Pins, sur laquelle il serpente avant de rejoindre la mer. Entre les années 2000 et 2010, son cheminement à travers l'estran s'est allongé énormément, posant quelques problèmes aux usagers de la plage. En effet, à marée basse, il les contraignait à faire un détour de près de 600 m pour atteindre la mer, le chenal du Boivre étant trop large et trop profond pour être traversé. À marée haute, sa présence engendrait des courants de baie, rendant la baignade dangereuse. La mairie de Saint-Brevin et le Syndicat d'Aménagement Hydraulique (SAH) Sud Loire ont donc lancé plusieurs études afin de remédier à cette situation et ont finalement décidé d'expérimenter le dispositif de sédimentation appelé filets S-Able.

### Conception et mise œuvre

La première phase de l'expérimentation a été conduite par la mairie à partir d'avril 2013 et a consisté en l'installation de 18 m de filets. Au vu des premiers résultats, la mairie et le SAH ont décidé de poursuivre l'expérimentation en posant 24 m de filets supplémentaires en juin 2013. Puis l'expérimentation a été encore étendue de 100 m linéaire. Pour cette dernière phase, qui s'est déroulée de janvier à juin 2014, le SAH était maître d'ouvrage et le coût du mètre linéaire de filet avoisinait 1 000 €.



Illustration 144 : Evolution du cheminement du Boivre sur la plage de l'Ermitage à Saint-Brevin-les-Pins (44) suite à l'installation des filets S-Able en 2013 (à gauche : divagation du Boivre sur l'estran) et 2017 (à droite : redressement du trajet du Boivre au plus près de la mer) ; (Source : SAH Sud Loire)

### Suivi et évolution

Les opérations de suivi, réalisées par la DDTM 44 et le Cerema, ont été menés jusqu'en juin 2015 afin de tenir compte des phénomènes naturels saisonniers. Un suivi photographique et des levés topographiques par DGPS ont été réalisés à intervalle régulier (Illustration 144). En juillet 2014, il a été constaté que l'expérimentation avait atteint ses objectifs, avec le constat d'un redressement du trajet du Boivre au plus près de la mer avec un chenal plus droit, suite à la mise en place du dispositif S-Able (Illustration 145).



Illustration 145 : Méandres stabilisés et présence d'un filet S-Able de 30 m dans le coude du Boivre, juillet 2014 – Saint-Brevin-les-Pins (Source : Le Courrier du Pays de Retz)

### Bibliographie

Boucher et al., 2014 ; SAH Sud Loire, 2016 ; Michon, 2017.

## Baie d'Authie (62)

### Contexte

Le fleuve Authie, qui débouche dans la baie du même nom, a une dynamique sédimentaire complexe. En particulier, son cheminement dans la baie varie au cours du temps et le fleuve emprunte parfois un de ces anciens lits longeant la côte vers le nord : du Bec du Perroquet en passant près du blockhaus puis vers le bois des sapins. Lorsque cela se produit, l'action de la houle et des courants érode fortement le trait de côte au niveau de l'anse du bois des sapins. Durant l'été 2014, la Communauté d'Agglomérations des Deux Baies en Montreuillois (CA2BM) a constaté que ce phénomène était en train de se produire et a décidé de mener une expérimentation de filets S-Able afin de contrôler la trajectoire de l'Authie dans la baie et de l'empêcher de rejoindre son ancien lit (Illustration 146).



Illustration 146 : Baie d'Authie, chenaux de divagation du fleuve côtier et emplacement des 150 m de filets S-Able sur l'ancien lit (Source : Cerema, Google earth)

### Mise en œuvre

En novembre 2014, un linéaire de 150 m de filets de hauteur de 1,10 m a été installé sur l'estran afin de provoquer un détournement du lit mineur (50° environ) et d'empêcher l'Authie de reprendre son ancien lit (Illustration 147). Par la suite, une rehausse a été réalisée en mars 2016, puis en mai 2017 de 2 m.



Illustration 147 : Un linéaire de 150 m de filets S-Able a été déployé en baie d'Authie (Source : Cerema)

### Suivi et évolution

Le Cerema a réalisé un suivi qui s'appuie sur des mesures topo-bathymétriques, des photos prises régulièrement sur le site et des mesures de courant. Au terme de ce suivi expérimental en 2017, les

objectifs ont été atteints puisque l'Authie n'a pas rejoint son ancien lit le long de l'anse du bois des sapins et que des dépôts sédimentaires ont été constatés près des filets S-Able.

Cependant, la dynamique semble être contrôlée par la migration d'un banc plus important qui « pousse » l'Authie vers le rivage. Afin de valider complètement l'efficacité du dispositif S-Able, le Cerema a préconisé d'augmenter la longueur des filets et si possible leur hauteur afin d'obtenir une efficacité optimale. Des relevés topo-bathymétriques plus réguliers couvrant une zone plus large sont également préconisés.

### Bibliographie

Cerema, 2017 ; ABLE, 2014.

## 7 BIBLIOGRAPHIE

- ABLE (2014). Installation d'un dispositif expérimental de contrôle de sédimentation de l'Authie, Note technique, 10 p.
- Alexandre A., Mallet C., Le Nindre Y.M. et Benhammouda S. (2003). Evolution du littoral Aquitain, impact des ouvrages de protection : secteurs Biscarosse, Mimizan et Capbreton, BRGM/RP-51877-FR, 193 p.
- ANCORIM (2009). Étude de protection du littoral de la presqu'île de Gâvres : gestion et prévention de l'érosion côtière, Cap l'Orient Agglomération (organisme promoteur) et GEOS (partenaire associé), 12 p.
- Artelia Eau & Environnement Sud-Ouest (2013). Protection de la plage nord de Châtelailon-Plage, Étude d'impact environnemental, Résumé non technique.
- Artelia Eau & Environnement Méditerranée (2017a). Protection et aménagement durable du lido de Sète à Marseillan - Déploiement d'un atténuateur de houle - Tranche 2, Pièce 1 : Résumé non technique, 30 p.
- Artelia Eau & Environnement Méditerranée (2017b). Protection et aménagement durable du lido de Sète à Marseillan - Déploiement d'un atténuateur de houle - Tranche 2, Pièce 2 : Autorisation loi sur l'eau, pp. 122-134.
- Bain O. (2011). Suivi scientifique de l'action du procédé de drainage de plage ECOPLAGE implanté sur la plage de Quend, Institut Polytechnique LaSalle Beauvais, rapport annuel, 38 p.
- Bain O. (2012). Suivi scientifique de l'action du procédé de drainage de plage ECOPLAGE implanté sur la plage de Quend, Institut Polytechnique LaSalle Beauvais, rapport annuel, 32 p.
- Bain O. (2013). Suivi scientifique de l'action du procédé de drainage de plage ECOPLAGE implanté sur la plage de Quend (2013-2015), Institut Polytechnique LaSalle Beauvais, rapport annuel, 35 p.
- Bain O. (2014). Suivi scientifique de l'action du procédé de drainage de plage ECOPLAGE implanté sur la plage de Quend (2013-2015), Institut Polytechnique LaSalle Beauvais, rapport annuel, 192 p.
- Balouin Y., Desbiendras L. et Tesson J. (2012). Suivi par vidéo numérique de l'expérimentation de techniques de protection du littoral du lido de Sète à Marseillan, Phase 1 : Présentation et validation du système ARGUS, Rapport BRGM RP-60874-FR, 54 p.
- Balouin Y. (2013). Suivi par vidéo numérique de l'expérimentation de techniques de protection du littoral du lido de Sète à Marseillan, Rapport d'avancement, Rapport BRGM RP-62594-FR, 64 p.
- Balouin Y., Colombet Y. et Longueville F. (2016a). Suivi par vidéo numérique de l'expérimentation de techniques de protection du lido de Sète à Marseillan, Volume 1 : Atténuateur de houle et rechargement, Rapport BRGM RP-65607-FR, 65 p.
- Balouin Y., Colombet Y. et Longueville F. (2016b). Suivi par vidéo numérique de l'expérimentation de techniques de protection du littoral du lido de Sète à Marseillan, rapport final, BRGM/RP-65607-FR, 61 p.
- Balouin Y., Longueville F. et Colombet Y. (2016c). Video assessment of nearshore and beach evolution following the deployment of a submerged geotextile wave breaker. Journal of Coastal Research, 75, pp. 617-621.
- Barbet O. (2016). Étude de faisabilité pour la protection du littoral de Siouville-Hague, Phase 2 : définition des enjeux et orientations d'aménagements, ISL Ingénierie SAS, 82 p.
- Bastide J., Anthony E. et Dolique F. (2005). Le littoral des Bas-Champs (Picardie, France) soumis aux risques perpétuels d'inondation, 15 p.
- Battiau-Queney Y. (2006). Quelle stratégie adopter face aux dégâts actuels et prévisibles de l'érosion marine ? Atelier EUCC-France, Pas-de-Calais, 2 p.
- Beuret S. (2012). Amicale des Surfeurs du Ponant : stabilisation de la dune à Seignosse.
- Bogucki M.E. (2014). Confortement de la digue des alliés à Dunkerque : la seconde phase de ré-ensablement a démarré, Communiqué, 2 p.

- Borde-Sue D. (2017). Lutte contre l'érosion côtière, nouveau procédé : les structures haies sous-marines, DBS-traitement, rapport de présentation, 19 p.
- Boucher O., Pham-Van-Bang D., Sergent P. et Michon D. (2014). Étude en modèle réduit de l'impact de filets 3D sur la dynamique hydro-sédimentaire en zone côtière. XIII<sup>èmes</sup> Journées Nationales Génie Côtier- Génie Civil, 2-4 juillet 2014, Dunkerque, pp. 247-256.
- Bouvier C., Balouin Y. et Castelle B. (2018). Réponse morphologique de la plage du lido de Sète suite à l'installation d'un ouvrage atténuateur de houle, XV<sup>èmes</sup> Journées Nationales Génie Côtier- Génie Civil, 29-31 mai 2018, La Rochelle, pp. 209-2016.
- Boswood P.K. and Murray R.J. (2001). World-wide Sand Bypassing Systems : Data Report, Coastal Services technical report R20, Conservation technical report N°15, 60 p.
- Breton C. (2015). Suivi de l'évolution de la plage du Lido de Sète sur la zone d'influence du système ECOPLAGE, Rapport ECOPLAGE n°14/3.0.34.01.15, 11 p.
- Brimeux S. (2016). Suivi du trait de côte du Platier d'Oye de 1947-49 à 2000 et de 1996 à 2015, Atelier EUCC-France, Dunkerque, pp. 34-37.
- Brehin F., Farnole P., Mercery P., Coespel P., Brun D. et Dufour G. (2018). Comparaison des franchissements et de l'érosion sur le littoral cannois en présence d'ouvrages submergés et de haut de plage (merlons). XV<sup>èmes</sup> Journées Nationales Génie Côtier Génie Civil, 29-31 mai 2018, La Rochelle, pp. 749-758.
- Cadot M. (2011). Avis de l'autorité environnementale portant sur le projet de protection du littoral de la Presqu'île de Gâvres présenté par Cap Lorient Agglomération, Préfet de la région Bretagne, 7 p.
- Capobianco M., Hanson, H., Larson, M., Steetzal, H., Stive, M. J. F., Chatelus, Y. and Karambas, T. (2002). Nourishment design and evaluation: applicability of model concepts. Coastal Engineering, 47(2), pp. 113-135.
- Cariolet J.-M., Suanez S., Carol F. et Magne R. (2008). Evaluation de la technique StabiPlage® mise en place sur deux plages du Finistère : les Sables Blancs à Plobannalec-Lesconil-Loctudy, et Boutrouilles à Kerlouan, X<sup>èmes</sup> Journées Nationales Génie Civil- Génie Côtier, 14-16 oct. 2008, Nice Sophia-Antipolis, pp. 201-210.
- Carrère C. et Ufay E. (2008). Capbreton : un « By Pass » au secours des plages, texte réalisé à partir du Dossier d'autorisation, Travaux de protection du trait de côte, Commune de Capbreton, 5 p.
- Cartier A., Tresca A., Grunnet N., Michard B., Forain N. et Vial T. (2014). Confortement d'un ouvrage de prévention des inondations et des submersions marines : l'exemple de la digue des Alliés à Dunkerque, XIII<sup>ème</sup> Journées Nationales Génie Côtier Génie Civil, 8 p.
- CDC Biodiversité (2019). Biodiv'2050 numéro 17 – Évaluation socioéconomique des Solutions fondées sur la Nature
- Cerema (2017). Expérimentation sur le rehaussement des filets S-Able en baie d'Authie, rapport de recherche, 19 p.
- Cerema (2018a). Indicateur national de l'érosion côtière : présentation, méthodologie spécifique, premiers enseignements et accès aux données, Géolittoral, le portail de la mer et du littoral.
- Cerema (2018b). Coût des protections contre les aléas littoraux, Collection Connaissances, 244 p.
- CETMEF (1998). Recommandations pour la conception et la réalisation des aménagements de défense du littoral contre l'action de la mer, rapport ER PM 98.01, 540 p.
- Clausner J. (1999). Sand Bypassing Cost and Performance Database, US Army Corps of Engineers, 6 p.
- Clercq-Roques G. (2014). Note sur le suivi du littoral du Golfe d'Aigues-Mortes après rechargement des plages, DREAL Languedoc-Roussillon, 8 p.
- Coates T., Brampton A. and Motyka G. (2000). A guide to managing coastal erosion in beach/dune systems, Summary 13: beach drainage, For the Scottish Natural Heritage by HR Wallingford, 130 p.

- Conseil Général de l'Environnement et du Développement Durable (2015). Décision de l'Autorité environnementale, après examen sur le « projet de rechargement en sable du pied de dune au droit du musée du débarquement d'Utah Beach sur la commune de Sainte-Marie-du-Mont (50) », 5 p.
- Couton J.M. (2002). Rechargement de Châtelailon (France).
- Créocéan (2011). Étude d'impact 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, 233 p.
- Cunniff S. and Schawrtz A. (2015). Performance of natural infrastructure and nature-based measures as coastal risk reduction features, Environmental Defense Fund (EDF), september 2015, 34 p.
- Dalias N., Fabre E. et Foulquié M. (2013). Dossiers réglementaires pour l'extraction et le prélèvement de sable nécessaire au rechargement de plage associé à la construction de brise-lames sur la commune du Barcarès, plage du Lido, Perpignan Méditerranée Communauté d'Agglomération et SEANEO, 353 p.
- Dean R.G. (1991). Equilibrium Beach Profile : characteristics and applications. Journal of Coastal Research, 7(1), pp. 53–84.
- Dean R.G. (2000). Beach nourishment, Theory and practice, World Scientific, vol. 18, 399 p.
- De la Torre Y., Belon R., Balouin Y. et Stepanian A. (2014). Inventaire et analyse des solutions douces de gestion de l'érosion côtière et applicabilité au littoral corse, Rapport final, BRGM RP-63034-FR, 53 p.
- De Santis C., Howlett S., Laget F., Meier E., Robin-Diot S., Roue J. et Bain O. (2014). Le littoral du Marquenterre : une plage sous haute surveillance, Institut Polytechnique LaSalle Beauvais, Journées Nationales de Géotechnique et de Géologie de l'Ingénieur, Beauvais, 8-10 juillet 2014, 13 p.
- De Vriend H.J. and Van Koningsveld M. (2012). Building with nature : Thinking, acting and interacting differently, EcoShape, Building with Nature, Dordrecht, the Netherlands, 44 p.
- De Vriend H.J., Van Koningsveld M., Aarninkhof S., De Vries M. and Baptist M. (2015). Sustainable hydraulic engineering through building with nature, Journal of Hydro-environment Research, Volume 9, Issue 2, pp. 159-171.
- Dubaille E. (2016). Présentation du Platier d'Oye, Atelier EUCC-France, Dunkerque, pp. 21-25.
- ECOPLAGE, Stabilisation des plages et valorisation de l'eau de mer, présentation du procédé, 10 p.
- EUCC-France (2012), Connaissance et gestion des dunes littorales, Risque d'érosion et de submersion, Atelier EUCC-France, Noirmoutier, 21 p.
- EUROSION (2004a). Vivre l'érosion côtière en Europe : Espaces et sédiments pour un développement durable, Bilan et recommandation du projet EUROSION, Commission Européenne, Direction générale de l'Environnement, 60 p.
- EUROSION (2004b). Living with coastal erosion in Europe : Sediment and Space for Sustainability, A guide to coastal erosion management practices in Europe, Final version, June 30, 164 p.
- Fattal P. et Walker P. (2008). Le drainage de plage : une méthode douce de stabilisation d'un littoral meuble, Étude de cas aux Sables d'Olonne (Vendée), Xème Journées Nationales Génie Côtier, Génie Civil, 14-16 octobre 2008, Sophia Antipolis, pp. 243-252.
- Farnole P., Brehin F., Poisson C. et Malavan A.M., (2018). Expérimentation du procédé Rebamb© sur la plage de Vaugrenier (Villeneuve-Loubet). XV<sup>èmes</sup> Journées Nationales Génie Côtier- Génie Civil, 29-31 mai 2018, La Rochelle, pp. 805-804.
- Favennec J. (2002). Contrôle souple et réhabilitation des dunes littorales de la côte Atlantique, ONF, n°11, 394 p, pp. 205-223.
- Feilberg A. and Jensen F. (1992). Management and conservation of sand dunes in Denmark, Coastal dunes: geomorphology, ecology and management for conservation: Proceedings of the 3rd European Dune Congress Galway, Ireland, 17-21 June 1992, pp. 429-437.

- Fitzgerald D.M., Kraus N.C. and Hands E.B. (2000). Natural Mechanisms of Sediment Bypassing at Tidal Inlet, US Army Corps of Engineers, 10 p.
- Gabillard F. (2016). La réserve naturelle nationale du Platier d'Oye, Atelier EUCC-France, Dunkerque, pp. 26-27.
- Gervais M., Pham-Ham-Van-Bang D., Yates M., Vidal V. et Benoit M. (2016). Réduire l'érosion des plages lors des tempêtes grâce à des structures immergées : une étude expérimentale comparative en canal à houle. XIV<sup>èmes</sup> Journées Nationales Génie Côtier- Génie Civil, 29 juin-1<sup>er</sup> juillet 2016, Toulon, pp. 191-200.
- Ghesquiere G. et Bourlet L. (2014). Etude de faisabilité pour le réensablement de la partie centrale de la baie de Wissant, élaboration de scénarios et programme de réensablement, Rapport final, EGIS, 75 p.
- GMGL (2015). Résultats du suivi de la grande plage de Gâvres, laboratoire de Géosciences marines et géomorphologie du littoral, 10 p.
- Gouguet L. (2002). Organisation de l'accueil du public : exemple de Quiberon-Plouharnel, Publié dans « Favennec Jean, Connaissance et gestion durable des dunes de la côte atlantique », ONF, pp. 327-332.
- Gouguet L. (2018). Guide de gestion des dunes et des plages associées, guide piloté par l'ONF à la demande du ministère de la Transition écologique et solidaire, Collection savoir faire, édition Quae, 244 p.
- Goumard J.P. (2014). Projet de Protection de la plage nord de Châtelailon-Plage (17), Déclaration et autorisation générale des travaux.
- Granereau G. (2002). Recommandations en matière d'accueil du public en milieu dunaire, exemple de Seignosse (Landes), Publié dans « Favennec Jean, Connaissance et gestion durable des dunes de la côte atlantique », ONF, pp. 336-340.
- GRESARC (2007). Evolution d'une plage macrotidale sous l'effet d'un procédé de drainage, Université de Caen, 26 p.
- Grunnet N. et Tessier C. (2012a). Études hydrauliques et de conception d'un dispositif de confortement de la digue des Alliés, Partie 3 a & b : Choix et affinage du plan masse définitif et programme de réalisation des travaux, Rapport final, 63 p.
- Grunnet N. et Tessier C. (2012b). Études hydrauliques et de conception d'un dispositif de confortement de la digue des Alliés, Partie 3 c : Choix et affinage du plan masse définitif et programme de réalisation des travaux, Rapport final, 64 p.
- Guiraud D. (2013). Enquête publique portant sur la demande d'autorisation des travaux de rechargement massif sur le secteur de Villeroy-Listel, au titre de la Loi sur l'eau et à la Déclaration d'Intérêt Général, Rapport et conclusions du commissaire enquêteur, 26 p.
- Hallégouët B. (2002). Les dunes de Quiberon-Plouharnel : héritages et dynamique actuelle, Publié dans « Favennec Jean, Connaissance et gestion durable des dunes de la côte atlantique », ONF, pp. 65-82.
- Hamm L., Capobianco M., Dette H.H., Lechuga A., Spanhoff R. and Stive M.J.F. (2002). A summary of European experience with shore nourishment, Coastal Engineering, 47(2), pp. 237-264.
- Hanson H., Brampton A., Capobianco M., Dette H.H., Hamm L., Lastrup C. and Spanhoff R. (2002). Beach nourishment projects, practises and objectives, a european overview, Coastal Engineering, 47(2), pp 81-111.
- Hédou F., Roche A., Trmal C., Moraud S. et Deniaud Y. (2018). Élaboration de l'indicateur national de l'érosion côtière. XV<sup>èmes</sup> Journées Nationales Génie Côtier Génie Civil, 29-31 mai 2018, La Rochelle, pp. 647-654.
- Héquette A. (2006). Compte rendu. A. Lambert, Protection durable du littoral varois : fonctionnement hydrosédimentaire de plages micro-tidales équipées de systèmes de drainage, Revue Méditerranée 108, 3 p.
- IDRA Environnement (2011). Diagnostic sédimentologique : prélèvements et analyses granulométriques de sable en vue d'un rechargement des plages du Barcarès, 42 p.

- Ifen (2006). Un quart du littoral recule du fait de l'érosion, le 4 pages, lettre thématique mensuelle, numéro 113, septembre 2006.
- Ifremer (2013). Sextant, Granulats marins, volet Ressources minérales, résultats des phases de l'étude « Manche Est, Loire-Gironde » (2005-2009) et « Bretagne, Sud-Gascogne » (2010-2012).
- Kalaydjian R. (2012). Analyse économique et sociale d'utilisation de nos eaux marines et du coût de la dégradation du milieu marin, activités industrielles, extraction des granulats marins, Ifremer; 11 p.
- Koffler A., Zengerink E., Ascione J.-C. et Birukoff J.-M. (2009). Un atténuateur de houles en tube géosynthétique pour limiter l'érosion de la plage de la Capte à Hyères. Rencontres géosynthétiques 2009, 4 p.
- Lambert A., Rey V., Provansal M., Samat O. et Sabatier F. (2007). Lutte contre l'érosion littorale : efficacité des méthodes de stabilisation par drainage de plage, le cas de la baie d'Agay, Var, Revue Méditerranée n°108, pp. 105-117.
- Le Cornec E., Fiere M., Grunnet N. et Peeters P. (2008). Étude de connaissance des phénomènes d'érosion sur le littoral vendéen, Rapport de synthèse de la tranche ferme, Bureaux d'études GEOS et DHI, 65 p.
- Leduc P. (2016). Merlimont : le système ECOPLAGE a ses limites, Le journal de Montreuil.
- Leviel F. (2014). Merlimont : premier bilan encourageant pour le système ECOPLAGE, La Voix du Nord.
- Lewis D. (1992). The sands of time : Cornwall's Hayle to Gwithian Towans, Planning Department, Cornwall County Council, UK, Coastal dunes: geomorphology, ecology and management for conservation: Proceedings of the 3rd European Dune Congress Galway, Ireland, June 1992, 470 p.
- Mazeiraud V. et Viguier J. (2004). L'utilisation de systèmes hydrauliques de transfert de sables dans la réhabilitation d'une plage urbaine : le cas de Capbreton (Landes), VIIIèmes Journées Nationales Génie Civil Génie Côtier, Compiègne, 7-9 septembre 2004, 10 p.
- Mazières A., Gillet H., Castelle B., Guyot C., Mulder T. and Mallet C. (2013). Relationship between longshore drift and the head of the CapBreton Canyon (SW France) : descriptive and numerical approaches, Coastal Dynamics 2013, pp. 1160-1172.
- MEDDTL (2012). Stratégie nationale de gestion intégrée du trait de côte : programme d'action 2012-2015, 20 p.
- MEEDM (2010). La gestion du trait de côte, Collection savoir faire, édition Quae, 290 p.
- MEEM (2015). Développer la connaissance et l'observation du trait de côte, Contribution nationale pour une gestion intégrée, Document d'information synthétique, 24 p.
- MEEM (2017). Stratégie nationale de gestion intégrée du trait de côte : programme d'action 2017-2019, 28 p.
- Merlin O. (2016). Merlimont : la plage perd 20 000 tonnes de sable, le système ECOPLAGE remis en cause, La Voix du Nord.
- Michon D. (2017). Dispositif et système de protection contre l'érosion du littoral, European Patent EP 2585640 B1 2017-09-06
- Moulis D., Paskoff R. et Favennec J. (2001). Synthèse des recherches en restauration : réhabilitation des systèmes dunaires, Ministère de l'Aménagement du territoire et Muséum d'Histoire Naturelle, pp. 157-164.
- Natura 2000 (2007). Dunes du littoral girondin de la pointe de Grave au Cap-Ferret, Fiche de présentation du site Natura 2000, 4 p.
- Natura 2000 et Life Environnement (2009). Mise en place d'expérimentations en faveur du maintien de la dune fixée à Plouharnel afin de lutter contre les diverses formes d'érosion, Objectifs et protocole d'intervention, 25 p.
- Natura 2000 (2015). Massif dunaire Gâvres-Quiberon et zones humides associées, 23 p.

- Nordstrom K. (2008). Beach and dune restoration, Institute of Marine and Coastal Sciences Rutgers University, New Brunswick, USA, Cambridge University Press, 201 p.
- NSW Government (2016). Tweed River Entrance Sand Bypassing Project : Sand Pumping Details, Department of Primary Industries, 5 p.
- ONF (2009). Maintenir les dunes-digues sur l'Île de Noirmoutier, 1 p.
- Paskoff R. et Prat M.C. (2004). Le réensablement de la plage de Châtelailon, Charente-Maritime.
- Pedro L. (2008). Sand Bypassing Systems, Masters in Environmental Engineering, 106 p.
- Prat M.C. (2002). Le développement touristique sur le littoral sud landais : aménagement et protection de l'environnement, Publié dans « Favennec Jean, Connaissance et gestion durable des dunes de la côte atlantique, ONF, Paris, France, pp. 205-223.
- Prat M.C. et Clus-Auby C. (2006). Le rétablissement du transit sédimentaire par by-pass hydraulique, EUCC France, Atelier de Capbreton, Landes, 6-7 avril 2006, 2 p.
- Pye K., Saye S. and Blott S. (2007). Sand dune processes and management for flood and coastal defence, Part 4: Techniques for sand dune management, 89 p.
- Ruz M.H., Marin D. et Sipka V. (2016). Evolution du Platier d'Oye du 19ème siècle à nos jours, Atelier EUCC-France, Dunkerque, pp. 24-33.
- SAH (2016). Rapport d'activité technique 2015 du Syndicat d'Aménagement Hydraulique du Sud Loire, février 2016, 63 p.
- SAFEGE (2011). Recherche de gisement sableux, Phase 1 : recensement et analyse de faisabilité. 10MEN039, n°2.1, Perpignan Méditerranée Communauté d'Agglomération, 99 p.
- Scaph Pro (2009). Suivi des récifs artificiels du Cap Ferret par l'association Scaph Pro, Groupement de recherche océanographique du Lège-Cap-Ferret, Présentation, 77 p.
- Suanez S., Cariolet J.-M., Hénaff A. et Goudedranche L. (2006). Lutte contre l'érosion côtière, expertise scientifique du procédé StabiPlage® mis en place sur la plage des Sables Blancs – commune de Plobannaec-Lesconil (Finistère), novembre 2006, 17 p.
- Thau Agglo (2015). La réhabilitation du Lido de Sète à Marseillan, Service communication, Dossier de presse, 10 p.
- Secrétariat général de la mer (2006). Extraction de granulats marins. Document d'orientation pour une politique nationale (version 3.0), SGMer, 83 p.
- SOGREAH (2008). Maîtrise d'œuvre pour la conception et la réalisation d'ouvrages de protection des plages de la Croisette, Rapport n° 1711623 établi pour le compte de la Ville de Cannes.
- Spodar A. (2016). Analyse morphodynamique des rechargements de plage sur le littoral du nord de la France : vers une valorisation durable des sables de dragage, Atelier EUCC, Dunkerque.
- STABIPLAGE®, Société Espace Pur, Stabilité dynamique des milieux et protection du littoral, 12 p.
- TenCate (2008). Geotubes®, Géosystèmes pour les applications marines, brochure de présentation, 12 p.
- TenCate (2012). Geotubes®, Geosynthetics for coastal and marine engineering, brochure, 7 p.
- Tresca A. (2015). Etude de faisabilité d'un aménagement de stabilisation à court terme de la dune d'Aval à Wissant, Idra Ingénierie, 93 p.
- UICN France (2013). Panorama des services écologiques fournis par les milieux naturels en France - volume 2.2 : les écosystèmes marins et côtiers. Paris, France.

UICN France (2016). Des solutions fondées sur la nature pour lutter contre les changements climatiques. Paris, France.

UICN France (2018). Les Solutions fondées sur la Nature pour lutter contre les changements climatiques et réduire les risques naturels en France. Paris, France.

U.S. Army Corps of Engineers (2003). Coastal Engineering Manual, Engineering and design, CECW-EW, Manual n°1110-2-1100, Washington, DC 20314-1000.

Van Rijn, L.C. (2014). Beach Nourishment, article, [www.leovanrijn-sediment.com](http://www.leovanrijn-sediment.com), 28 p.

Vanroye C. (2009). La protection du littoral du Golfe d'Aigues-Mortes, DREAL du Languedoc-Roussillon, 10 p.

Vanroye C. et Barthaz B. (2010). Monitoring d'un rechargement massif : la plage de Carnon (Languedoc-Roussillon), XIèmes Journées Nationales Génie Côtier Génie Civil, Les Sables d'Olonne, 6 p.



**RÉPUBLIQUE  
FRANÇAISE**

*Liberté  
Égalité  
Fraternité*



**Cerema**

CLIMAT & TERRITOIRES DE DEMAIN