Document public

Inventaire et analyse des solutions douces de gestion de l'érosion côtière et applicabilité au littoral corse

Rapport final

BRGM/RP-63034-FR
janvier 2014

Collectivité Territoriale de CORSE
Comunità Territoriale di CORSICA
Office de l'Environnement de la Corse
Ufficiu di l'Ambiente di a Corsica

Géosciences pour une Terre durable
brgm

Document public

Inventaire et analyse des solutions douces de gestion de l'érosion côtière et applicabilité au littoral corse

Rapport final

BRGM/RP-63034-FR
janvier 2014

Étude réalisée dans le cadre des opérations d'appuis aux politiques publiques du BRGM 2012-LITA-13

DE LA TORRE Ywenn
Avec la collaboration de
BELON Rémi, BALOUIN Yann et STEPANIAN Alexis

Vérificateur :	**Approbateur :**
Nom : Chateauminois	Nom : FRISSANT Nicolas
Date : 23/01/2014	Date :

Le système de management de la qualité et de l'environnement est certifié par AFNOR selon les normes ISO 9001 et ISO 14001.

Mots-clés : brise-vent, by-passing, Corse, dune, érosion, drainage, embouchure, géotextile, plage, littoral, récif artificiel, rechargement, sédimentation, solutions douces.

En bibliographie, ce rapport sera cité de la façon suivante :

De la Torre Y., Belon R., Balouin Y et Stepanian A. (2014) – Inventaire et analyse des solutions douces de lutte contre l'érosion côtière et applicabilité au littoral corse. Rapport final. BRGM/RP-63034-FR, 59 p.

© BRGM, 2014, ce document ne peut être reproduit en totalité ou en partie sans l'autorisation expresse du BRGM.

Synthèse

La Corse est sujette à une érosion de son littoral, due soit à des phénomènes naturels (tempêtes, diminution des apports solides des fleuves, etc.), soit à des phénomènes anthropiques (aménagements portuaires, enrochements, détérioration des dunes littorales…). Cette érosion, qui concerne principalement les cordons sableux (plages, dunes), peut avoir localement des conséquences économiques et/ou environnementales importantes.

Traditionnellement, la lutte contre l'érosion côtière s'est appuyée sur l'implantation d'ouvrages de défense (murs, épis, brise-lames, etc.) mais avec souvent une action protectrice très localisée et des effets aggravants l'érosion sur les secteurs adjacents. Afin de palier à ces effets contraires, plusieurs techniques alternatives ont vu le jour.

Cette étude, cofinancée par l'Office de l'Environnement de la Corse et le BRGM, dans le cadre de ses missions d'appuis aux politiques publiques, a pour objectif de réaliser l'inventaire des solutions dites « douces » de gestion de l'érosion qui offrent des alternatives méthodologiques et proposent des avantages certains en termes de réversibilité, d'intégration au paysage naturel et d'impact sur la biodiversité. Les solutions dites « dures » sont tout de même abordés afin de rappeler leurs impacts sur le littoral.
Sur les critères d'efficacité et d'applicabilité aux plages corses, les méthodes douces de rechargement artificiel en sédiment et de by-passing (mécanique ou hydraulique) associées à une reconstruction des cordons dunaires semblent les plus adaptées car elles réinjectent du sable dans la cellule hydrosédimentaire, augmentent l'espace récréatif et limitent l'exposition aux submersions marines. Ces méthodes présentent des coûts d'investissement et d'entretien (répétition programmée des rechargements) certes non négligeables, mais qui sont à mettre en perspective avec les coûts d'implantation et d'entretien des ouvrages de défense. Cet avis ne tient pas compte de la disponibilité de stock sableux qui reste à vérifier.

D'autre part, la présence des banquettes de posidonies sur une majorité des plages de Corse, qui jouent un rôle de protection face au phénomène d'érosion, peut être problématique pendant la saison touristique car ces feuilles mortes sont généralement perçues comme étant des déchets. Le nettoyage raisonné s'applique alors tout particulièrement aux plages balnéaires et à la problématique des banquettes de Posidonies lorsque ces plages sont très fréquentées lors de la saison touristique. Un ramassage différentié peut être mis en œuvre en fonction de la fréquentation (sites urbains ou naturels, saison estivale ou non). A ce titre, le ramassage manuel est à privilégier car il permet de faire le tri entre déchets anthropiques et biodéchets (piégeage des sédiments, atténuation des vagues) et limite les prélèvements de sable du ramassage mécanisé.

Les conteneurs géotextiles (type Géotube) présentent les mêmes inconvénients que les ouvrages lourds lorsqu'ils bloquent le transit sédimentaire. Leur application peut toutefois être envisagée s'ils sont enfouis afin de jouer le rôle de soubassement à une restauration du haut de plage et de la dune.

Les autres techniques (récifs artificiels, drainage, pieux hydrauliques…) semblent moins pertinentes soit en raison d'une applicabilité limitée aux spécificités des littoraux corses (faible hydrodynamisme, migration des barres d'avant-côte) soit en raison d'une efficacité faisant toujours débat au sein de la communauté scientifique.

A contrario, les méthodes douces de gestion de l'érosion éolienne des dunes (rideaux brise-vent de type ganivelles, plantations d'Oyat, …) ont fait leur preuve sur des littoraux microtidaux. Elles sont adaptées au littoral méditerranéen et bien maîtrisées par les opérateurs locaux. La canalisation des accès à la plage permet également de limiter le piétinement de la végétation qui fixe le sable dans le système côtier.

Pour les zones d'embouchures et de graus[1] bouchées par le transit sédimentaire, une solution douce consiste simplement en une réouverture mécanisée régulière du chenal afin d'éviter les blocages sédimentaires liés à l'endiguement. Ce procédé peut être appliqué à l'ensemble des embouchures de Corse dont la fermeture occasionnelle par le transit sédimentaire ne provoque pas de gêne majeure pour les activités économiques (navigation et activités aquacoles notamment) et la sécurité des populations (crue en amont).

Enfin, il convient de rappeler que pour toute implantation, expérimentale ou non, de solutions de réduction de l'aléa, le recours à un suivi morphologique permet de juger des effets du dispositif et que des solutions complémentaires de réduction des enjeux (maitrise foncière, relocalisation des activités et des biens, adaptation des aménagements) sont également à envisager afin de diminuer le risque lié aux phénomènes côtiers.

[1] Grau : terme d'origine méditerranéenne désignant un chenal d'échange des eaux entre une lagune et la mer.

Sommaire

1. Introduction 9

1.1. CONTEXTE 9

1.2. MODES DE GESTION DE L'EROSION 11
1.2.1. Rappels sur les solutions « dures » 11
1.2.2. Principe des solutions douces 15

2. Inventaire et analyse des solutions douces 17

2.1. LA GESTION DES PLAGES 17
2.1.1. Le rechargement artificiel en sédiment 17
2.1.2. Le drainage 20
2.1.3. Le by-passing 23
2.1.4. Les ouvrages en géotextile 26
2.1.5. Le nettoyage raisonné des plages 34
2.1.6. Autres systèmes 37

2.2. LA GESTION DES CORDONS DUNAIRES 39
2.2.1. La couverture de débris végétaux 40
2.2.2. Les brises-vents 40
2.2.3. Les plantations 41
2.2.4. Autres techniques 42

2.3. LA GESTION DES EMBOUCHURES ET DES GRAUS 43

2.4. SYNTHESE DES SOLUTIONS DOUCES 44

3. Applicabilité au littoral corse 47

3.1. RAPPEL DES SPECIFICITES DU LITTORAL CORSE 47

3.2. SYNTHESE DES SOLUTIONS DOUCES EN TERMES D'APPLICABILITE 47

4. Conclusion 51

5. Bibliographie 53

Liste des illustrations

Illustration 1 – Blocage sédimentaire lié à l'implantation d'un ouvrage longitudinal (mur, enrochement) – modifié d'après Paskoff, 2010 12

Illustration 2 – Blocage sédimentaire lié à l'implantation d'un ouvrage transversal (épi, jetée) – modifié d'après Paskoff, 2010..... 12

Illustration 3 – Effet des brise-lames sur la plage de Calvi (données du ROL). 13

Illustration 4 – Disparition de la plage au Nord du port de Campoloro en raison du blocage du transit sédimentaire (source ROL). A droite (en rouge), la position du trait de côte en 1948 avant la constuction du port. 14

Illustration 5 – Exemple des terrains de tennis présents sur le lido de la Marana 14

Illustration 6 – Exemple de gestion des dunes réalisée par le Conservatoire du Littoral sur la plage du Ricanto (Délégation Corse du Conservatoire du Littoral) 15

Illustration 7 – Exemple de rechargement en sable au moyen d'une drague en mer (à gauche – Virginia beach, USA) ou par camions (à droite- La Baule, France)..... 17

Illustration 8 – Rechargement massif de sable aux Pays-Bas – source Sand Motor. 19

Illustration 9 – Erosion de la plage de Calvi suite à la tempête de novembre 2001 (à gauche), malgré un rechargement de la plage couplé à des ouvrages de défense (à droite) – source SDAGE, 2009 et ROL 20

Illustration 10 – Principe d'un système drainant – Source Ecoplage 21

Illustration 11 – Installation du procédé Ecoplage à Dubai (à gauche) et à Sète (à droite) 22

Illustration 12 – Système de by-pass autour d'une embouchure artificialisée 23

Illustration 13 - Schéma du système de pompage et de pipelines à l'embouchure de la Tweed River en direction des plages du Sud de la Gold Coast australienne (http://www.tweedsandbypass.nsw.gov.au)..... 24

Illustration 14 – Rejet de sable sur la plage de la Savane au Sud de l'embouchure du Boucarot à Capbreton, France (source Mairie de Capbreton). 25

Illustration 15 – Contenneur géotextile placé longitudinalement en haut de plage pour armer et reconstituer le front de dune – source ©Géotube..... 26

Illustration 16 – Mise en place d'un atténuateur de houle en géotextile (lido de Sète, 2012 - source DREAL LR) 27

Illustration 17 – Récif artificiel en forme de V à Narrow Neck en Australie – source http://www.coastalmanagement.com.au..... 28

Illustration 18 - Implantation de Géotubes à Moriani sur la Costa Verde corse (source TRASOMAR) 28

Illustration 19 – Effet des Géotubes sur la position du trait de côte (données du ROL) à Moriani.29

Illustration 20 – Exemple d'un tel dispositif au nord de l'embouchure du Tavignano (ROL, 2010)30

Illustration 21 – Haut de plage végétalisé canalisant l'accès à la plage (ROL, 2012) 30

Illustration 22 – Effet du dispositif installé au nord de l'embouchure du Tavignano sur la position du trait de côte (données du ROL)..... 31

Illustration 23 – Rôle des laisses de mer et banquettes de bas de plage dans les échanges sédimentaires en contexte atlantique et méditerranéen (source Conservatoire du littoral/Rivage de France)..... 33

Illustration 24 – Exemple de plan de nettoyage raisonné de la plage issu du guide méthodologique (Conservatoire du littoral, Rivages de France) 34

Illustration 25 – Coûts enregistrés sur différents sites en France (source Conservatoire du littoral/Rivages de France) 35

Illustration 26 – Présence de bois et de mattes de posidonies au nord de l'enbouchure du Tavignano (photos prise le 04/12/2008, ROL) 35

Illustration 27 – Protection de la plage par la matte de posidonie à Porticciolo (Balouin et al., 2006) 36

Illustration 28 – Reprofilage du haut de plage à St Hilaire de Riez en Vendée (mai 2012 – source Ouest France) 37

Illustration 29 - Installation de pieux hydrauliques en équerre sur la plage des Eloux à Noirmoutier (Fatal et al., 2010) 38

Illustration 30 – Exemple d'algues artificielles fixées sur le fond de la plage submergée à La Barbade (Atherley, 1989) 39

Illustration 31 –Couverture manuelle et mécanisée de branches de Pins en Aquitaine (ONF) .. 40

Illustration 32 – Casiers de ganivelles installées sur des formations dunaires méditerranéennes (Flèche de La Gracieuse, SDAGE RM&C, 2005) 41

Illustration 33 – Plantation d'oyat sur les dunes méditerranéennes espagnoles (UICN, 2012) .. 41

Illustration 34 – Canalisation de l'accès à la dune au moyen de ganivelles, Ricanto - Corse (Conservatoire du Littoral) 42

Illustration 35 - Reconstruction de la dune sur le lido de Sète à Marseillan (source Thau Agglo) 43

Illustration 36 – Exemple de la plage de Lava nécessitant une ouverture mécanisée du grau pour éviter que le ruisseau ne viennent longer les établissements du haut de plage (ROL,2012) 43

1. Introduction

1.1. CONTEXTE

La Corse est sujette à une érosion de son littoral, due soit à des phénomènes naturels (tempêtes, diminution des apports solides des fleuves, etc.), soit à des phénomènes anthropiques (aménagements portuaires, enrochements, …). Cette érosion, qui concerne principalement les cordons sableux (plages, dunes), peut avoir localement des conséquences économiques et/ou environnementales importantes.

Depuis 1999, un partenariat entre l'Office de l'Environnement de la Corse (OEC) et le BRGM a été mis en place créant ainsi le Réseau d'Observation du Littoral de la Corse (ROL) afin de fournir les données nécessaires à la compréhension des modes d'évolution côtière des plages insulaires, à la quantification des évolutions observées et à l'identification des remèdes possibles. Des études complémentaires ont également permis d'identifier le rôle des tempêtes dans les phénomènes d'évolution du littoral de la Plaine orientale dans un soucis de mieux comprendre les processus responsables des évolutions côtières en vue de mieux les appréhender.

Dans ce contexte, l'OEC est régulièrement sollicité par les communes impactées par ces phénomènes d'érosion afin d'avoir des informations concernant les moyens existants pouvant être mis en place pour y faire face.

Traditionnellement, la lutte contre l'érosion côtière s'est appuyée sur l'implantation d'ouvrages de défense (murs, épis, brise-lames, etc.) mais avec souvent une action protectrice très localisée et des effets aggravants l'érosion sur les secteurs adjacents (Paskoff, 2004). Afin de palier à ces effets secondaires, plusieurs techniques alternatives ont vu le jour.

A ce titre, cette étude, cofinancée par l'OEC et le BRGM a pour objectif de réaliser l'inventaire des solutions dites « douces » de gestion de l'érosion en évaluant, sur la base des retours d'expérience existant, leur efficacité et leur applicabilité en fonction des caractéristiques locales des littoraux.

Ce rapport présente donc en première partie des éléments de contexte et de définition des modes de gestion de l'érosion côtière, un bref rappel sur les effets que peuvent avoir les solutions dures et le détail des solutions douces existantes. L'inventaire permet par la suite de dresser les avantages et limites de chaque dispositif avant d'évaluer, en dernière partie, leur applicabilité selon les spécificités morphosédimentaires et hydrodynamiques des littoraux sableux corses.

1.2. MODES DE GESTION DE L'EROSION

Avant d'en faire l'inventaire, ces solutions douces sont à replacer dans un contexte plus large relatif aux modes de gestion de l'érosion côtière. Pour rappel, le risque nait de la confrontation entre un aléa naturel et des enjeux. En l'absence d'enjeux, il n'y a pas lieu de vouloir remédier à l'érosion. Lorsque des enjeux (humains, économiques, patrimoniaux, écologiques) sont menacés, deux stratégies principales sont à considérer :

- la **réduction de l'aléa**, c'est-à-dire la protection vis-à-vis du phénomène naturel soit par des moyens « lourds » (ouvrages), soit par une intervention plus limitée (solutions douces) ;
- la **réduction des enjeux** soit en préservant (protection foncière) ou en redonnant au littoral l'espace nécessaire à son évolution naturelle (recul stratégique), soit en adoptant un aménagement adapté du bord de mer (installations provisoires, constructions sur pilotis, etc.).

Pour répondre à cette problématique, une stratégie nationale de gestion intégrée du trait de côte a été mise en place par le Ministère de l'Ecologie, du Développement durable et de l'Energie (Stratégie nationale de gestion intégrée du trait de côte, 2012).

La stratégie de gestion dépendant du contexte naturel et anthropique, il peut être considéré que la préservation de l'espace nécessaire à l'évolution naturelle du littoral est la première solution à retenir lorsque ce littoral n'est pas encore construit (démarche du Conservatoire du littoral et de son objectif du « tiers sauvage » par exemple). En cas d'occupation anthropique, la relocalisation des activités et des biens est la solution initiale à envisager en s'appuyant sur une analyse coût-bénéfice[2] et lorsqu'une réserve foncière le permet. Si la relocalisation des biens n'est pas possible, la protection (dure ou douce) doit être considérée.

1.2.1. Rappels sur les solutions « dures »

Les méthodes dites « dures » ou « lourdes » correspondent aux ouvrages de défense de type murs, enrochements, épis, jetées, brise-lames, etc. et ont pour objectif de maintenir et fixer le trait de côte. Si elles atteignent largement cet objectif, elles ont souvent pour conséquence d'accroitre l'érosion à proximité de la zone protégée.

En effet, l'implantation d'un ouvrage de manière transversale ou longitudinale à la plage a pour conséquence de créer un blocage du transit sédimentaire qui retient le sable d'un côté de l'ouvrage mais cause un déficit en aval du transit (Illustration 1et Illustration 2).

Il en résulte le plus souvent l'implantation de nouveaux ouvrages, ce qui conduit à une artificialisation progressive du littoral, pouvant entraîner une disparition totale de la plage aérienne.

Les ouvrages de défense sont très couteux (d'environ 2500€/ml pour un épi à 6200€/ml pour un brise-lame semi-émergé avec 3 à 5% du coût d'installation en frais d'entretien annuel – BCEOM, 2004) mais ont une grande durée de vie (plusieurs années à plusieurs dizaines d'années selon l'entretien).

[2] Une analyse cout-bénéfice (aussi appelée « cout-avantage ») permet de comparer le coût de la protection et des enjeux.

Illustration 1 – Blocage sédimentaire lié à l'implantation d'un ouvrage longitudinal (mur, enrochement) – modifié d'après Paskoff, 2010

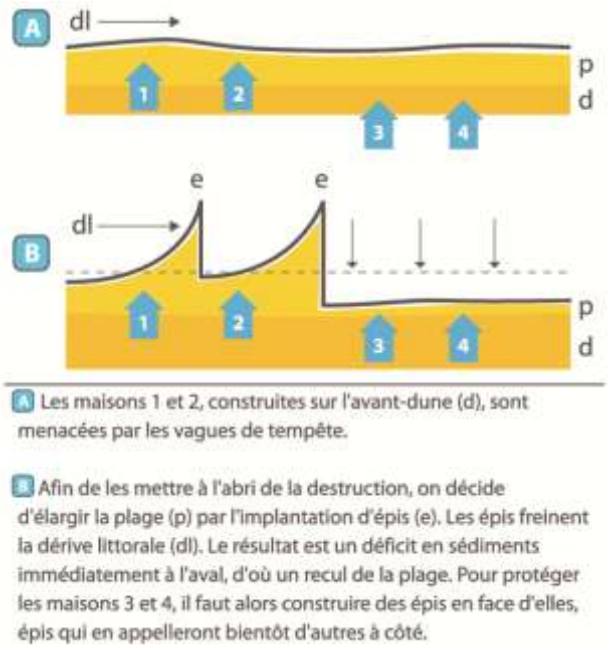

Illustration 2 – Blocage sédimentaire lié à l'implantation d'un ouvrage transversal (épi, jetée) – modifié d'après Paskoff, 2010

Les aménagements de type brise-lames, positionnés en mer parallèlement à la plage, sont parfois préconisés lorsque le transport du sable se fait principalement de manière perpendiculaire à la plage. Ces aménagements vont avoir tendance à créer une avancée du trait de côte au droit de l'ouvrage mais un recul de part et d'autre de celui-ci. Les relevés de la position du trait de côte dans le cadre du Réseau d'Observation du Littoral de la Corse (ROL) comparés au trait de côte digitalisé à partir d'une photo aérienne de 1996 (Oliveros, 1996) illustre bien ce phénomène (Illustration 3). La position du trait de côte de 2013 par rapport à celle de 1996 s'est avancée de plus de 15 m au droit de l'ouvrage positionné à l'est avec un recul du même ordre de grandeur de part et d'autre de celui-ci.

Illustration 3 – Effet des brise-lames sur la plage de Calvi (données du ROL).

En Corse, l'implantation du port de Campoloro a, par exemple, pour conséquence un blocage de la dérive littorale[3] et une érosion du secteur en aval de cette dérive (Illustration 4).

[3] La dérive littorale est le transport sédimentaire qui s'effectue parallèlement à la côte.

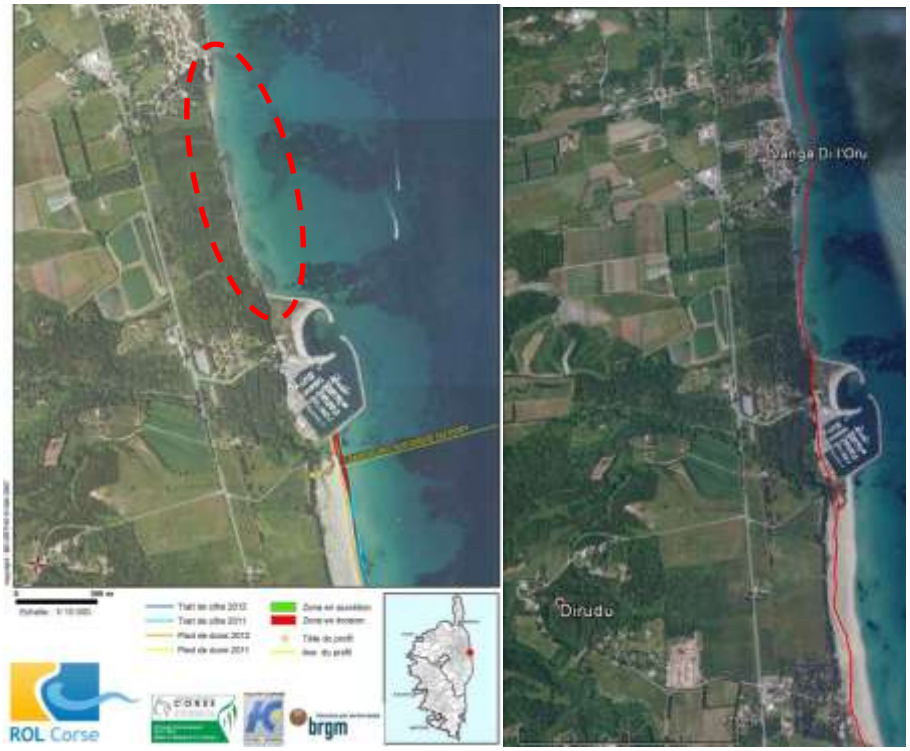

Illustration 4 – Disparition de la plage au Nord du port de Campoloro en raison du blocage du transit sédimentaire (source ROL). A droite (en rouge), la position du trait de côte en 1948 avant la constuction du port.

Des cas de disparition localisée de la plage sont également connus, comme au nord de l'embouchure du Tavignano avec des restaurants qui se retrouvent au bord de l'eau, mais également sur le secteur de la Marana avec la disparition de terrains de tennis (Illustration 5).

Illustration 5 – Exemple des terrains de tennis présents sur le lido de la Marana

1.2.2. Principe des solutions douces

Le principe des solutions dites « douces » ou « souples » (traduction de « *soft structures* ») a émergé en réaction aux effets contraires constatés suite à l'implantation d'ouvrages de défense.

Il s'agit non plus de se « défendre » de la mer mais de « composer avec » les phénomènes et processus naturels qui interviennent dans l'évolution du littoral. Dès lors, la démarche n'est plus d'envisager une « lutte » contre l'érosion mais une « gestion » continue du littoral intégrant la dynamique naturelle du littoral et la mobilité du trait de côte.

Les méthodes douces ont une durée de vie plus limitée mais sont généralement « réversibles ». La démarche environnementale concerne également le choix des matériaux afin qu'ils s'intègrent au mieux dans le milieu naturel. Il faut toutefois rappeler que ces méthodes ne sont pas totalement dénuées d'impacts sur le milieu, en particulier pendant la phase de travaux.

Illustration 6 – Exemple de gestion des dunes réalisée par le Conservatoire du Littoral sur la plage du Ricanto (Délégation Corse du Conservatoire du Littoral)

Cette étude s'attache donc à réaliser l'inventaire et à évaluer l'efficacité et l'applicabilité des techniques douces de gestion de l'érosion des cordons littoraux (plages et dunes) de Corse.

2. Inventaire et analyse des solutions douces

Ce chapitre s'attache à décrire les différentes solutions douces de gestion de l'érosion des plages, des dunes et des embouchures et à en détailler les principaux avantages et limites sous la forme d'un retour d'expérience à partir des sites où elles ont été expérimentées. Un tableau de synthèse est présenté en fin de chapitre.

2.1. LA GESTION DES PLAGES

Les principales solutions douces concernent le rechargement en sable, les systèmes drainants, le by-passing et les ouvrages en géotextile (ces derniers ne pouvant être considérés comme une méthode douce que dans certains cas). Un nettoyage adapté des plages constitue également un mode de gestion de l'érosion, en particulier lorsqu'elles sont recouvertes par des banquettes de posidonies. D'autres dispositifs plus marginaux sont enfin présentés.

2.1.1. Le rechargement artificiel en sédiment

Principe

Le rechargement artificiel en sédiment (généralement en sable) d'une plage constitue la méthode alternative la plus usitée (Rogers, 2000 ; Hamm et al., 2002 ; Matias et al., 2005 ; Finkl et Walker, 2005) car elle permet en outre d'augmenter potentiellement l'attractivité balnéaire des plages (Finkl, 1996 ; French, 2001 ; Cohen et Anthony, 2005). Le rechargement a pour but premier de compenser un budget sédimentaire déficitaire sans perturber le jeu naturel des processus en action sur une côte. L'alimentation de la plage doit se faire à partir d'un sable si possible exogène à la cellule hydrosédimentaire[4] ou alors situé dans les zones d'accrétion de la cellule (accumulation en aval transit par exemple) ou à des profondeurs trop importantes (au-delà de la profondeur de fermeture[5] ; Hallermeier, 1981) pour regagner la plage sous l'effet des processus hydrodynamiques naturels. Le transport du sable se fait au moyen de camions ou d'une drague en mer selon que le gisement source et que le dépôt soient à terre ou en mer (Illustration 7).

Illustration 7 – Exemple de rechargement en sable au moyen d'une drague en mer (à gauche – Virginia beach, USA) ou par camions (à droite- La Baule, France)

[4] La cellule hydrosédimentaire correspond à la zone à l'intérieur de laquelle le sédiment circule avec peu ou pas d'échanges avec l'extérieur. Les principales limites naturelles le long de la côte sont constituées par les caps rocheux et les embouchures de cours d'eau. Les jetées portuaires peuvent établir une limite d'origine anthropique.

[5] La profondeur de fermeture est la profondeur au-delà de laquelle la houle a un effet négligeable sur le transport sédimentaire.

Pour être efficace, c'est-à-dire obtenir un maintien du sable de manière la plus pérenne possible, le rechargement doit avant tout être adapté au matériel sédimentaire en place en fonction de la nature, de la granulométrie (taille des grains) et du tri des sables. Un sédiment légèrement plus grossier peut être utilisé (Berg et Duane, 1968 ; Newman, 1976). Afin d'optimiser l'intervention et de limiter les impacts sur le milieu, il convient en outre de prendre en considération la bathymétrie (l'évolution des barres prélittorales notamment) et le fonctionnement hydrosédimentaire du site en fonction du régime de houle et des courants littoraux ainsi que les peuplements benthiques (espèces vivant dans les fonds sableux).

Le rechargement peut également être affecté d'un facteur de sur-rechargement qui dépend de la compatibilité entre le sable présent sur la plage et celui qui servira pour le rechargement ainsi que de la saison pendant laquelle le rechargement sera réalisé. C'est-à-dire que pour obtenir un volume de X m^3 sur la plage il faudra en mobiliser cX m^3, c étant le facteur de sur-rechargement.

Le rechargement n'a donc pas pour objectif de stopper définitivement l'érosion mais d'en limiter les effets pour une période de temps qui doit être estimée en lien avec le volume à fournir.

Localisation des rechargements

La plage étant composée d'une partie émergée et d'une partie immergée, l'avant-côte, pouvant être constituée de corps sédimentaires communément appelés barres sableuses, la question de la localisation de ces rechargements se pose. Il est effectivement possible de recharger directement la plage émergée, permettant notamment de retrouver un espace de liberté et une largeur suffisant permettant d'accueillir à nouveau des usagers sur les sites touristiques.

C'est la méthode qui est couramment utilisée mais il est également envisageable d'effectuer ces rechargements plutôt sur l'avant-côte notamment en renforçant le volume sédimentaire présent sur les barres sableuse permettant ainsi une meilleure dissipation de la houle (programme LITEAU II, « Les rechargements sédimentaires d'avant-côte : une nouvelle méthode de lutte contre l'érosion côtière).

Ce sont les caractéristiques du site (type de sédiment, volume nécessaire, morphologie sous-marine, hydrodynamisme, fréquentation, la localisation du gisement, les moyens de transports utilisés…) qui vont jouer un rôle important dans le choix de la technique. Il est également à noter qu'un rechargement entièrement sous-marin n'aura pas d'impact immédiat sur la plage, la visibilité des effets en sera donc limitée.

Exemples connus

Le premier rechargement daterait des années 1920 à Coney Island, à New York (Farley, 1923). Les Etats-Unis y ont recours de manière quasi-systématique depuis les années 1980 (USACE, 2008) et cette technique s'est diffusée très largement en Europe (Hamm et al., 2002 ; Hanson et al., 2002), avec en particulier l'important projet « sand motor » (ou « sand engine ») en cours aux Pays-Bas (http://www.dezandmotor.nl).

Ce projet R&D, prévu de 2011 à 2032, est unique au monde de par son ampleur (21.5 millions de m3 sur 128 ha) et son coût (70 millions d'euros). Il a pour ambition de déposer le sable au large pour que la mer le ramène à la côte. Ce projet confirme le très fort investissement des Pays-Bas dans les mesures de gestion des risques côtiers. La majorité du pays se trouvant sous le niveau de la mer, il en va de la sécurité nationale de maintenir la protection offerte par

les cordons sédimentaires. Au plan opérationnel, des rechargements plus modestes mais réguliers sont réalisés par le *Rijkswaterstaat* (service du ministère des infrastructures et de l'environnement néerlandais) tous les 5 ans sur l'ensemble du littoral national. Il convient de rappeler que la mer du Nord contient d'importants gîtes de sables à de faibles profondeurs.

Illustration 8 – Rechargement massif de sable aux Pays-Bas – source Sand Motor.

En Méditerranée occidentale, selon Hanson *et al.* (2002), des rechargements ont été effectués en :

- Italie avec 50 rechargements sur 36 sites recensés en 1998 concernant essentiellement de petits volumes à l'exception des rechargements importants des lidos de Venise – 7.3M m3) ;

- Espagne sur pratiquement l'ensemble de la côte méditerranéenne espagnole soit 600 rechargements recensés sur 400 sites en 2002), y compris aux Baléares ;

- France avec 12 sites rechargés sur la côte méditerranéenne, ce qui est relativement peu, le recours aux rechargements s'étant généralisé dans le courant des années 2000 avec notamment le rechargement massif de 1M m3 du Golfe d'Aigues-Mortes en 2008[6].

En Corse, la côte de Balagne est également concernée. Le front de mer Calvi a en effet bénéficié de plusieurs phases de rechargements dont un rechargement important de 100 000 m3 à l'été 2001 en complément de l'implantation d'épis et de brise-lame (SDAGE, 2009). La tempête de novembre 2001 a par la suite fortement érodé la plage et menacé les infrastructures touristiques (Illustration 9).

[6] http://www.languedoc-roussillon.developpement-durable.gouv.fr/l-operation-de-rechargement-du-a525.html

Illustration 9 – Erosion de la plage de Calvi suite à la tempête de novembre 2001 (à gauche), malgré un rechargement de la plage couplé à des ouvrages de défense (à droite) – source SDAGE, 2009 et ROL

Bilan

Le rechargement de plage a comme double avantage de palier à l'érosion sans perturber la dynamique hydrosédimentaire ni les secteurs littoraux attenants et d'accroître l'espace touristique et récréatif. L'impact paysager est nul et l'élargissement voire la surélévation de la plage permet également de réduire la vulnérabilité aux submersions marines.

L'inconvénient principal consiste dans le manque de pérennité de cette méthode. Des rechargements successifs et réguliers sont en effet à prévoir et il est nécessaire de bien appréhender au préalable la dynamique hydrosédimentaire du site afin d'optimiser l'opération (Van der Wal, 2004 ; Finkl et Walker, 2005). Le recours à un rechargement massif suivi de rechargements plus modestes ou localisés les saisons suivantes est souvent à envisager. Le prélèvement des matériaux doit être proche afin de limiter les coûts et les nuisances liés au transport. Enfin, l'impact sur le benthos est important car les organismes vivants sur ou dans les petits fonds (herbiers de posidonies par exemple) se retrouvent enfouis.

Les coûts dépendent de la proximité et de l'exploitabilité du gisement (selon la profondeur, la nature du sédiment,…) et évidemment du volume de sable concerné. En 2004, le coût est estimé entre 20€ et 60€ HT/m3 avec un coût d'entretien très variable selon les rechargements postérieurs envisagés. Le coût des études préalables et des suivis morphologiques à mettre en place sont également à prévoir.

L'étude EUROSION (2004) recommande l'identification de « réserves stratégiques de sédiments » au large, à terre (dunes, carrières) ou sur le littoral (secteurs en accrétion). Le profil morphologique de la plage ainsi que la saison de rechargement sont également des facteurs importants.

L'identification des stocks sableux disponibles au plus proche de la zone de rechargement est indispensable pour la mise en œuvre de cette solution à moindre coût. Concernant la Corse, une première approche a été réalisée afin de réaliser un inventaire des principaux stocks sableux présents sur le plateau continental oriental de la Corse ainsi qu'une synthèse des contraintes majeures liées aux extractions en mer (Thinon et al., 2003).

2.1.2. Le drainage

Le drainage de la plage constitue une solution plus atypique que le rechargement car si le procédé est connu depuis les années 1940 (Bagnold, 1940), relativement peu de sites sont équipés de systèmes drainants.

Principe

Le principe du dispositif consiste à installer des drains dans la zone du jet de rive afin de faciliter l'infiltration de l'eau déposée par le flux des vagues et abaisser le toit de la nappe aquifère (Illustration 10). L'objectif est d'obtenir une dissipation de l'énergie de la nappe de retrait (reflux de l'eau) et de favoriser ainsi le dépôt de sable (qui ne repart pas avec le reflux).

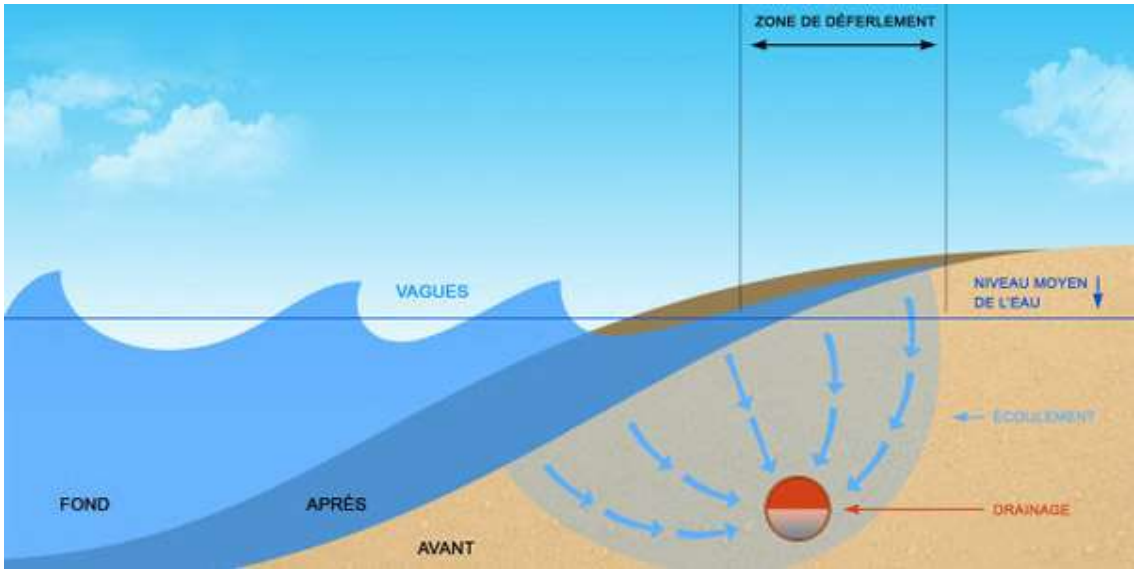

Illustration 10 – Principe d'un système drainant – Source Ecoplage

Concrètement, les drains sont installés en profondeur parallèlement au rivage et sont connectés à une station de pompage qui recueille et évacue l'eau vers la mer ou des stations de recyclage.

Exemples connus

Au plan international, d'après Turner *et Leatherman* (1997) les premières expérimentations ont été réalisées au Royaume-Uni (*Towan bay*), aux Etats-Unis (*Sailfish Point*, Florida) et au Danemark (*Thorsminde*). C'est au Danemark que le pompage d'eau de mer pour remplir des bassins en 1981 a provoqué une accrétion inattendue de la plage. Il en a résulté la promotion du système à des fins commerciales et notamment la création en France de la société Ecoplage.

Cette société a expérimenté le dispositif sur des installations pilotes de différent marnage (Sables d'Olonne sur la côte atlantique, Villers-sur-Mer en Manche et Saint Raphaël en Méditerranée), avant de l'installer sur des chantiers plus importants tel que la plage de Dubaï aux Emirats Arabes Unis en 2011 et plus récemment sur le lido de Sète (2012), en Languedoc-Roussillon.

A Sète, 3 rangées de drains sont enterrées 2 mètres sous le sable. Les drains sont reliés à un collecteur puis à une station de pompage rejetant l'eau récupérée à la mer, au niveau de la première digue. Avec linéaire côtier concerné de 700 mètres, c'est la première fois que le dispositif ©Ecoplage est testé en Méditerranée sur un linéaire aussi long et aussi frontal. Le coût de l'opération s'élève à 1,1 M€, pour 3 ans d'expérimentation.

Illustration 11 – Installation du procédé Ecoplage à Dubai (à gauche) et à Sète (à droite)

En Méditerranée occidentale, des drains ont également été installés sur le littoral italien, notamment sur la plage d'Alassio, à l'ouest du Golfe de Gêne (Bowman *et al.*, 2007).

Bilan

L'avantage principal du drainage consiste en un impact paysager réduit, excepté lors des travaux. Le sable, dans la zone de jet de rive, étant plus sec, il est plus apprécié pour les activités récréatives. Le coût est bien moindre que pour du rechargement (1300 €/m.l. d'après BCEOM, 2004) et il peut être amorti en réutilisant l'eau pompée (alimentation de bassin aquacole, piscine d'eau de mer, etc.).

La limite la plus évidente est que l'efficacité de ce procédé divise très largement la communauté scientifique car il est difficile d'évaluer la part d'accrétion liée au système de celle liée aux variations naturelles (Bruun, 2005). En effet, d'une part les scientifiques chargés du suivi morphologique de la plage tendent à mettre en exergue l'accrétion résultante (Fattal et Walker, 2008 ; Lambert *et al.*, 2007) tandis que d'autres la mette en doute (Turner et Leatherman, 1997 ; Bruun, 2005 : Bowman *et al.*, 2007). Des essais en laboratoire ont été conduits par Contestabile *et al.* en 2012 suivant différents régimes de houle. Il en résulte que pour les environnements à haute et moyenne énergie, l'efficacité des drains n'est pas démontrée. Cependant, pour les environnements à faible énergie, des effets positifs sont obtenus en fonction de la position des drains. Celle-ci est particulièrement importante dans les mers à faible marnage où la zone de jet de rive est étroite car une légère modification de la plage (avancée ou recul du trait de côte) induit un décalage spatial entre la zone de jet de rive et la zone de pompage.

Pour résumer, il est aujourd'hui encore difficile de déterminer exactement dans quel contexte ce système est efficace. La principale limite provient du fait que les drains n'apportent pas de sable supplémentaire mais ont pour objectif de fixer le sable en place, ce qui ne résout donc pas le problème initial de déficit sédimentaire. Il peut être retenu que la texture du sable (granulométrie, porosité) doit permettre l'infiltration de l'eau, ce qui en limite l'utilisation dans les sédiments sableux fins et les sédiments cohésifs. En outre, les plages très exposées aux vagues ou à des variations importantes de l'estran s'avèrent inadaptées. Pour autant, il faut une plage avec un régime de vague suffisant pour avoir une large zone de jet de rive (zone d'action du dispositif).

2.1.3. Le by-passing

Principe

Le by-passing, également appelé « pontage sédimentaire », est un dérivé du rechargement car il s'agit d'apporter le sable dont le transport le long de la côte (dérive littorale) est bloqué par un obstacle soit naturel (cap rocheux, débouché de cours d'eau) soit anthropique (épi, jetée).

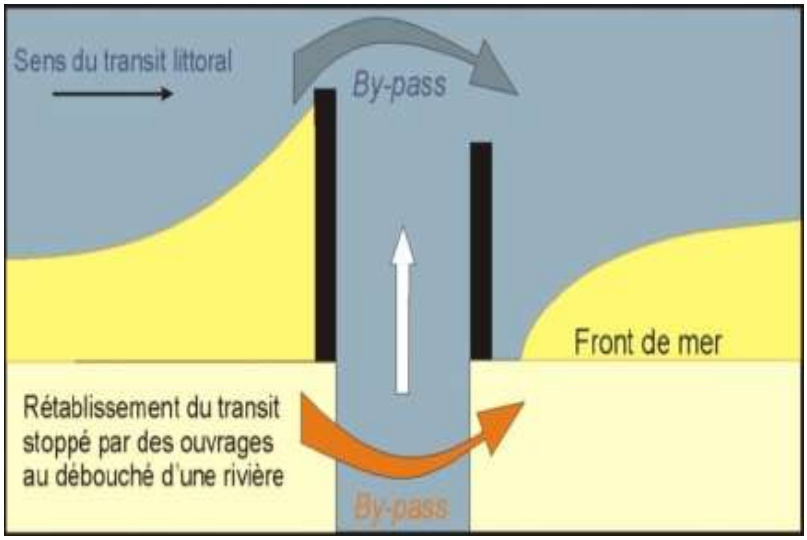

Illustration 12 – Système de by-pass autour d'une embouchure artificialisée

Le transfert de sédiment peut être opéré de différentes manières :

- soit par le biais d'un système hydraulique qui d'une part aspire un mélange d'eau et de sable et d'autre part refoule ce mélange de l'autre côté de l'obstacle ;

- soit de façon mécanique avec un acheminement par voie de terre (transport par camions) ou voie de mer (drague).

A noter que dans le cas d'ouvrages anciens ou dans les secteurs où la dérive littorale est forte, ce by-pass sédimentaire peut s'effectuer naturellement par contournement de la jetée ou de l'épi si la profondeur à l'extrémité de ce-dernier n'excède pas la profondeur limite de remobilisation des sédiments.

Exemples connus

Les applications les plus fréquentes concernent des systèmes permettant le transfert du sable de part et d'autre d'une embouchure, le plus souvent artificialisée pour des raisons de navigation, et pour des embouchures naturelles où le débit important constitue une barrière hydraulique au transit sédimentaire.

Les anglo-saxons ont été les premiers à développer ce type de procédé (Boswood et Murray, 2001) avec des chantiers importants aux Etats-Unis (*Indian River Inlet*, Delaware ; *Boca Raton*, Florida ; *Channel Island Harbour*, California,…), en Australie (*Nerang River Entrance*, Queensland ; *Tweed River Inlet*, New South Wales ; *Dawesville*, Western Australia,…) ou en Afrique du Sud (*Durban, East London Port*,…).

Pour reprendre le cas de la Tweed River (Dyson *et al.*, 2001, Acworth et Lawson, 2011, Patterson *et al*, 2011), les premiers dragages ont débuté en 1995 et le système de by-pass a été implanté en 2001 avec pour objectif de maintenir l'accès à l'embouchure de la rivière et d'approvisionner les plages du sud de la *Gold Coast* située à l'aval de la dérive littorale. Le sable est pompé toute l'année au sud de l'embouchure en fonction des arrivées de sables (préférentiellement avec les forts épisodes de houle) et est transporté hydrauliquement via de pipelines chaque nuit (voire si nécessaire pendant la journée) sur les trois plages plus au nord (Illustration 13). Les volumes pompés sont de l'ordre de 400 000 à 700 000 m3 par an. L'implantation du système a coûté 1.2 M € et les coûts de mise en œuvre sont estimés à 1.9 M € par an. Il en résulte un élargissement considérable des plages et la constitution d'importantes barres littorales connues mondialement sous le nom de *Superbank*.

Illustration 13 - Schéma du système de pompage et de pipelines à l'embouchure de la Tweed River en direction des plages du Sud de la Gold Coast australienne (http://www.tweedsandbypass.nsw.gov.au)

En Europe, d'après Boswood et Murray (2001), les premières implantations ont été réalisées au Danemark (*Torminde, Hvide Sande*), en Italie (*Marina di Carrara*) et en Espagne (*Huelva*). En France, un système hydraulique analogue a également été implanté pour 2.9 M€ à Capbreton en 2007 afin de transférer le sable pompé au Nord de l'embouchure du Boucarot et le redistribuer sur les plages du Sud de la commune (Mazeiraud et Viguier, 2004, Sogreah 2003, 2005). La première année 100 000 m3 ont été pompés permettant à des plages inaccessibles aux camions de bénéficier de ce sable. Par la suite, ce sont 60 000 m3 par an qui sont transférés, principalement de nuit.

Illustration 14 – Rejet de sable sur la plage de la Savane au Sud de l'embouchure du Boucarot à Capbreton, France (source Mairie de Capbreton).

Bilan

L'avantage principal consiste à recréer artificiellement la dynamique naturelle en transférant le sable piégé par les aménagements (le plus souvent des jetées ou épis). Il permet ainsi d'équilibrer les zones en accrétion et en érosion sans apport de matériaux exogènes. Le système fixe (pompe hydraulique) permet d'adapter le rendement en fonction des rythmes saisonniers et des besoins. La limite principale concerne le coût de réalisation et surtout d'entretien et de mise en œuvre annuelle qui est très important. Ce type d'installation n'est donc justifié que lorsqu'il y a une menace sur l'activité économique touristique et portuaire (analyse cout-bénéfice). A noter également que le système hydraulique n'est pas adapté au transit de galets.

L'acheminement mécanique s'avère donc préférable pour les projets plus modestes en raison de ses coûts moins élevés (Bruun, 2005). Attention toutefois, à Capbreton, la difficulté d'accès des plages pour les camions rendait le by-pass hydraulique plus rentable en termes de coût. Le coût est alors relatif à la distance entre la source et la zone de dépôt, avec en outre des nuisances pour les riverains. Il est adapté à tout type de matériaux.

D'un point de vue paysager, l'impact est faible (hormis pendant la phase d'installation) et celui sur le benthos équivaut au même type d'impact que pour les rechargements (enfouissement des espèces vivants sur ou dans le sable).

Il va sans dire qu'une bonne connaissance de la dynamique sédimentaire, en particulier de la dérive littorale et du charriage de sédiments induit, est un préalable indispensable à ce type de procédé.

Enfin, en termes de retour d'expérience, il convient de noter le retour des usagers. En Australie sur les plages du Sud de la *Gold Coast*, l'apport de sable a été tel que la plage est jugée comme trop large par les usagers qui rencontrent des difficultés pour parvenir à la mer. L'économie des sports nautiques étant très importante en Australie (cela est vrai également à Capbreton), l'enfouissement du récif de Kirra empêche la pratique du surf sur ce secteur (en compensation le *superbank* offre un nouveau site…).

2.1.4. Les ouvrages en géotextile

Ils ont été créés comme une alternative aux enrochements, ils ont l'avantage de pouvoir être détruit facilement mais la manière de les disposer peut entraîner les mêmes effets secondaires que les ouvrages en enrochements notamment s'ils sont utilisés pour intercepter le transit sédimentaire sous la forme de digues ou d'épis par exemple. Ils sont alors considérés au même titre que les ouvrages en enrochements comme des solutions dites « dures ».

Seuls les ouvrages tentant d'agir sur les forçages hydrodynamiques sans bloquer les transits sédimentaires peuvent être considérés comme une solution « douce ».

Principe

Les géotextiles sont des tissus, le plus souvent de fibre synthétique (géosynthétiques), qui ont pour propriété principale de laisser passer l'eau tout en étant imputrescible.

Ces géotextiles peuvent être utilisés pour la gestion de l'érosion côtière en recouvrement des zones érodées (tablier, tapis anti-affouillement) mais ils se sont surtout généralisés sous forme de conteneurs (appelés également« sacs » ou « tubes », voire plus communément « boudins » selon leur forme) remplis de matériaux sédimentaires, en principe avec le sable prélevé sur place par une pompe refoulante.

Ces conteneurs peuvent être placés sur la plage aérienne où ils sont soit disposés perpendiculairement à la côte (dans ce cas ils fonctionnent comme un épi rocheux), soit le long de la côte en haut de plage afin de reconstituer et d'armer la berme ou le cordon dunaire (Illustration 15). Dans ce dernier cas, ils sont disposés de manière à être recouverts naturellement par le sable ou alors directement enfouis, et souvent végétalisés.

Illustration 15 – Contenneur géotextile placé longitudinalement en haut de plage pour armer et reconstituer le front de dune – source ©Géotube

Les tubes peuvent enfin être immergés pour former un récif artificiel jouant un rôle d'atténuateur de houle (brise-lame immergé - Illustration 16). A noter toutefois que les récifs artificiels ne sont pas systématiquement en géotextiles et peuvent être réalisés en blocs rocheux ou ciments, voire uniquement en matériel sédimentaire (sable, tout-venant,…).

Illustration 16 – Mise en place d'un atténuateur de houle en géotextile (lido de Sète, 2012 - source DREAL LR)

Exemples connus des solutions dites douces

Le recours aux géotextiles pour la gestion de l'érosion remonte aux années 1970 par l'US Army Corps of Engineers à Galveston Bay (French, 2002). Depuis, des installations auraient été réalisés dans une cinquantaine de pays d'après la firme *Geosynthetics* qui commercialise leur produit *Geotube*.

Le récif artificiel en géotextiles de *Narrow Neck* en Australie (Illustration 17) constitue un cas d'étude emblématique. Construit en 1999, sa forme spécifique en V (400 conteneurs répartis sur deux récifs de 200 m de long disposés perpendiculairement à la côte) a pour double objectif de diminuer localement l'énergie de la houle, mais aussi de créer une zone récréative de surf (optimisation du déferlement). Depuis sa création 50 sacs supplémentaires ont été rajoutés et le coût global du projet est estimé à 1.6 M €.

Illustration 17 – Récif artificiel en forme de V à Narrow Neck en Australie – source http://www.coastalmanagement.com.au

Exemples connus des solutions dites dures

De nombreuses applications de diverses ampleurs ont été réalisées en Europe et en Méditerranée, y compris sur la Costa Verde corse avec l'implantation en 2010 d'épis en géotextile sur la plage de San Luciannu à Moriani (Illustration 18). Les 5 tubes installés correspondent au procédé Stabiplage commercialisé par la société Espace Pur. Ils sont espacés de 60 m et leur longueur, initialement de 50 m, a été diminuée par la suite en raison d'un blocage important de la dérive littorale. Accompagné d'un rechargement local en sable du haut de plage, les travaux ont coûté 820 000 €.

Illustration 18 - Implantation de Géotubes à Moriani sur la Costa Verde corse (source TRASOMAR)

Si les effets semblent concluants au niveau de l'implantation (Farnol et Lebunetel, 2011), ils restent toutefois limités avec une érosion qui perdure à proximité (secteur de la résidence Casa Marina) et une dégradation rapide des ouvrages. Les relevés de la position du trait de côte pendant les campagnes du Réseau d'Observation du Littoral (ROL) montrent une avancée de la plage en amont (au sud) du dispositif atteignant un maximum de 30 m mais une régression de l'ordre de 10 m en aval (au nord). Ceci illustre bien qu'un tel dispositif limite le phénomène d'érosion en amont du transit mais l'accentue en aval (Illustration 19).

Illustration 19 – Effet des Géotubes sur la position du trait de côte (données du ROL) à Moriani.

Une application d'un autre genre est réalisée au nord de l'embouchure du Tavignano (Illustration 20). Elle consiste à la mise en place de sacs de sables remplis sur place et disposés à la manière de plusieurs épis de faible longueur (quelques mètres) espacés d'une certaine distance (quelques dizaines de mètres) créant ainsi des « casiers » censés se remplir grâce à la dérive littorale. En général, la dérive littoral est accompagnée par une intervention anthropique aidant le remplissage de ces casiers par du rechargement mécanique. Une fois l'ensemble des casiers remplis, il est possible de répéter l'opération.

La mise en place d'un tel dispositif doit se faire en connaissance de l'hydrodynamisme local et si possible en dehors de la période hivernale pour éviter le risque de destruction durant un évènement de tempête. Ce type de dispositif nécessite un suivi régulier car il peut engendrer une érosion en aval transit.

Illustration 20 – Exemple d'un tel dispositif au nord de l'embouchure du Tavignano (ROL, 2010)

Les relevés de la position du trait de côte pendant les campagnes du ROL montrent sur ce secteur une avancée généralisée du trait de côte depuis 2010 pouvant atteindre près de 30 m (Illustration 22).

Contrairement au cas précédent, les effets indésirables pouvant être observés dans le cas de la mise en place d'ouvrages interceptant le transit sédimentaire semblent absents. Il faut savoir également que ce dispositif a été accompagné d'un recul des bungalows les plus exposés à la mer permettant la construction d'un bourrelet sableux végétalisé en haut de plage, protégé par des ganivelles et canalisant les accès à la plage pour les usagers (Illustration 21).

Illustration 21 – Haut de plage végétalisé canalisant l'accès à la plage (ROL, 2012)

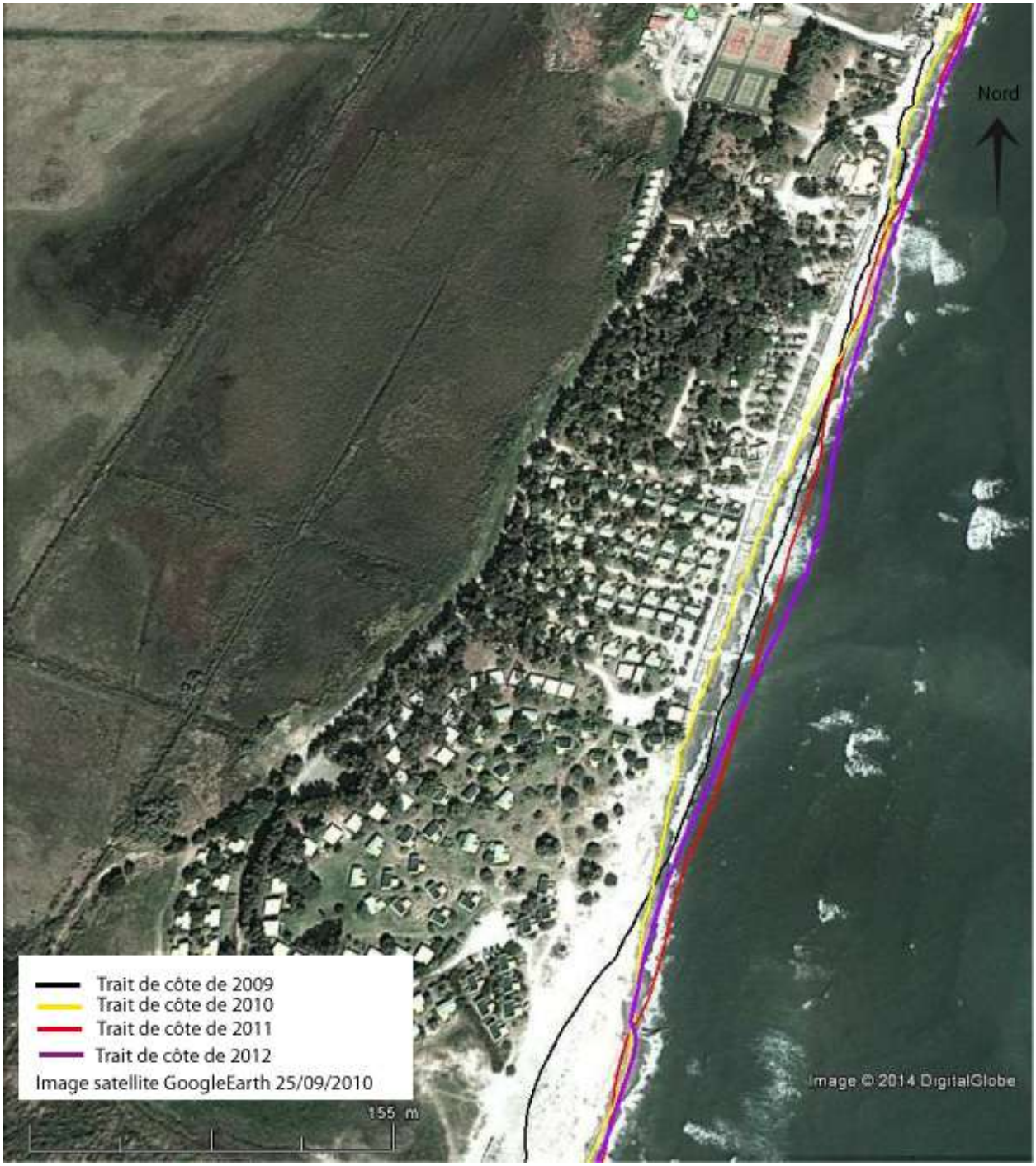

Illustration 22 – Effet du dispositif installé au nord de l'embouchure du Tavignano sur la position du trait de côte (données du ROL).

Bilan

Globalement les ouvrages en géotextile ont un impact paysager et un coût moins important que les ouvrages en enrochement même si parfois cela reste discutable. De manière immergée ou émergée, ils constituent en outre un « substrat » favorisant l'implantation de la flore (algues, végétation de haut de plage) et de la faune liée à l'habitat ainsi développé.

En ce qui concerne les récifs artificiels constitués de tube géotextile, l'efficacité dépend de leur profondeur et donc du marnage car seuls les récifs faiblement immergés sont à même de dissiper suffisamment l'énergie de la houle pour limiter les phénomènes érosifs. Il faut à ce titre rappeler que les récifs implantés à grande profondeur dans un but de restauration du milieu (repeuplement halieutique ou benthique par exemple) ne constituent pas une technique de gestion de l'érosion côtière. Il est à noter enfin que le récif de Chevron implanté dans la baie de Santa Monica en Californie en 2000 a été retiré en 2008 en raison de son inefficacité et de la détérioration des sacs géotextiles. L'opération d'enlèvement a été réalisée pour un coût non négligeable de 220 000 €, ce qui équivaut à plus de la moitié du coût d'implantation (Leidersdorf *et al.* 2011*)* et interroge sur la notion de réversibilité du dispositif.

L'atténuateur de houle installé sur le site de Sète est trop récent pour que son efficacité puisse être précisément évaluée. Toutefois, les résultats préliminaires montrent que le dispositif joue bien son rôle de dissipation de l'énergie de la houle. Cependant, il n'est pas encore possible d'évaluer si cette dissipation modifie le comportement hydrosédimentaire entre l'ouvrage et la côte (Balouin, 2013).

Les conteneurs géotextiles implantés sur la plage ne constituent une solution douce que dans la mesure où ils sont ensablés et végétalisés (cf. § sur la gestion des cordons dunaires). Implantés à l'air libre, ils présentent en effet les mêmes inconvénients que les ouvrages en enrochement, c'est-à-dire un blocage des échanges sédimentaires longitudinaux ou transversaux et une érosion sur les zones adjacentes. En outre, les géotextiles subissent dans ce cas une dégradation accélérée, en particulier par les usagers pendant la saison estivale.

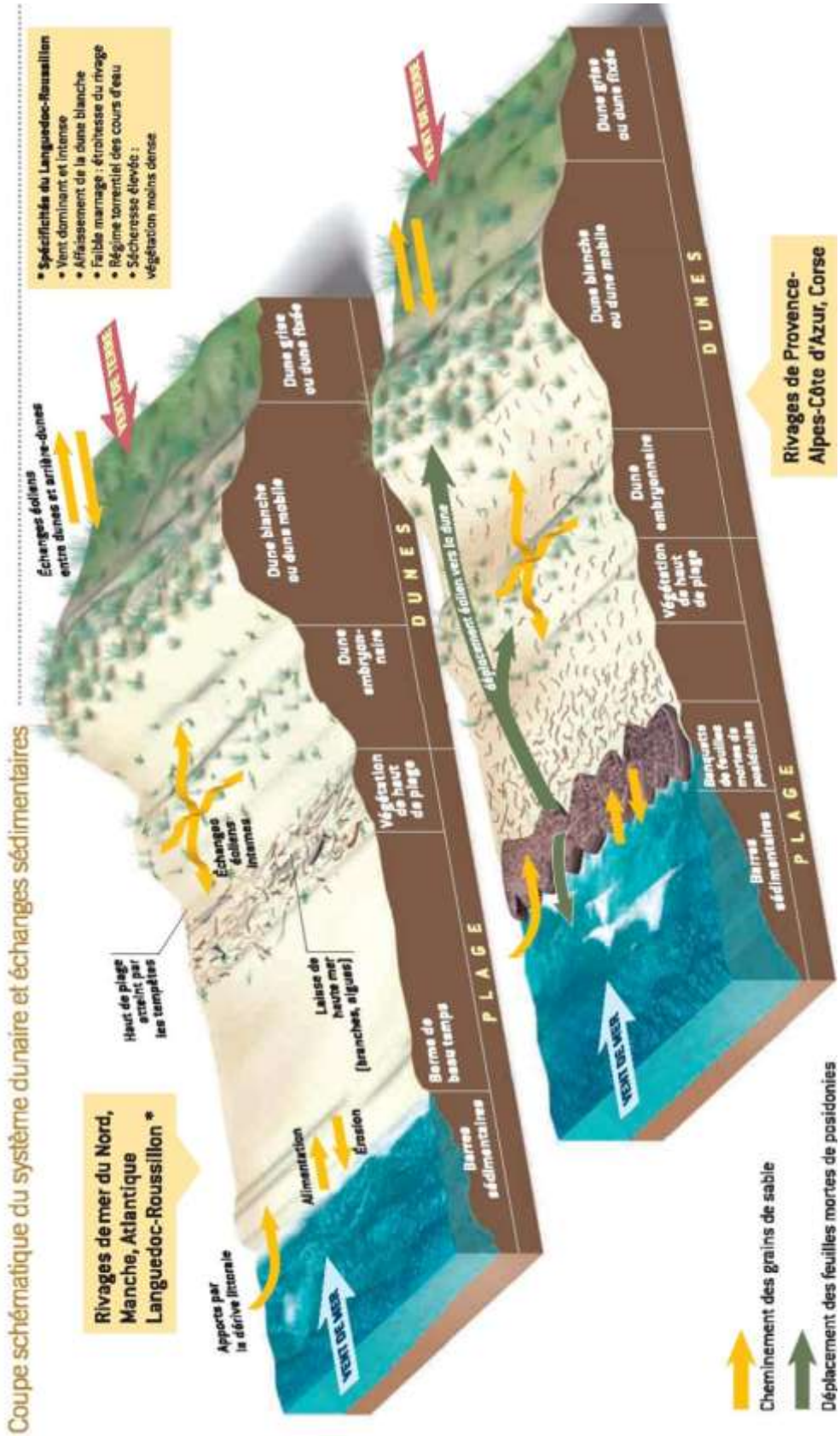

Illustration 23 – Rôle des laisses de mer et banquettes de bas de plage dans les échanges sédimentaires en contexte atlantique et méditerranéen (source Conservatoire du littoral/Rivage de France)

2.1.5. Le nettoyage raisonné des plages

Principe

Le nettoyage de plage ne constitue pas à proprement dit une technique de gestion de l'érosion mais un recours raisonné peut permettre d'en limiter les effets.

En effet, la mer dépose naturellement sur la plage toute sorte de déchets dont des macro-déchets issus de l'activité humaine (plastiques, verre, etc.) et des débris naturels ou bio-déchets (algues, bois flottés, coquillages, etc.). S'il est évident que les macro-déchets doivent être enlevés, les bio-déchets qui composent la laisse de mer ou la banquette de bas de plage contribuent à l'équilibre de la plage car elles permettent de piéger les sédiments et d'amortir les vagues. Plus indirectement, grâce aux éléments nutritifs apportés par leur détérioration naturelle, elles favorisent le développement de la végétation et des dunes embryonnaires (cf. guide méthodologique du nettoyage raisonné des plages du Conservatoire du Littoral et Rivages de France[7] - Illustration 23).

Il est donc important de mettre en œuvre un nettoyage raisonné (également appelé nettoyage « différencié ») permettant un tri sélectif, réalisable le plus souvent par un ramassage manuel. Le nettoyage mécanisé, certes plus rapide, a en revanche pour inconvénient de limiter le tri en prélevant outre les déchets tout type confondu, le sable piégé dans la laisse.

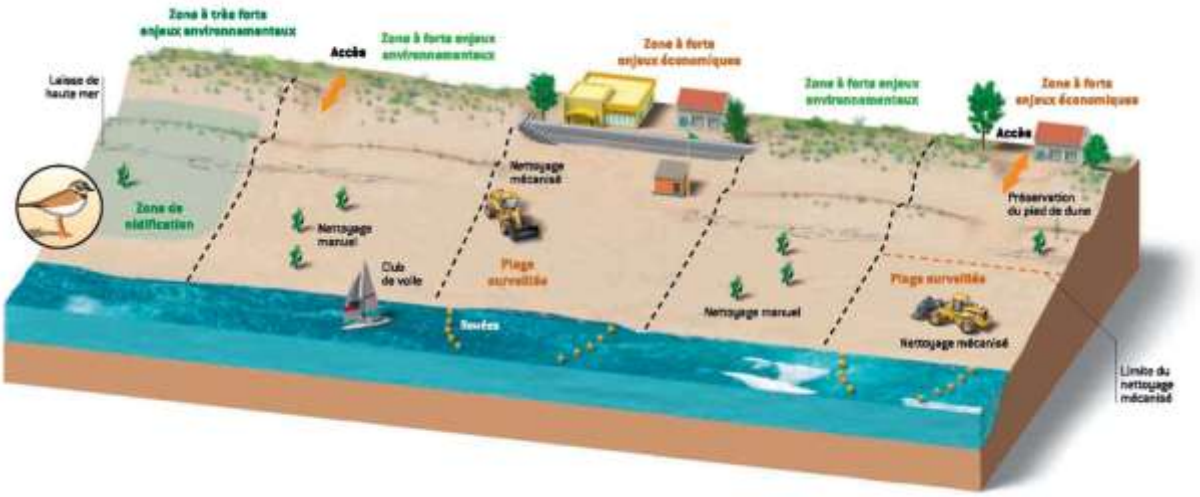

Illustration 24 – Exemple de plan de nettoyage raisonné de la plage issu du guide méthodologique (Conservatoire du littoral, Rivages de France)

Le guide méthodologique propose la mise en œuvre d'un protocole de nettoyage permettant de différencier les zones à fort enjeu touristique où le nettoyage mécanisé peut être maintenu pendant la saison estivale et les zones à fort enjeu environnemental où le ramassage manuel est à privilégier (Illustration 17). L'information au public et les échanges avec les agents et les acteurs locaux apparaissent comme un gage de réussite.

[7] http://www.conservatoire-du-littoral.fr/front/process/Contente655.html
http://www.rivagesdefrance.org/index.php/les-espaces-naturels-littoraux/dossiers-thematiques/le-nettoyage-raisonne-des-plages-guide-methodologique

Exemples connus

Le nettoyage des plages est réalisé, en France comme à l'étranger, sur toutes les plages à vocations récréative et touristique. En France, le principe s'est développé en Manche dans les années 2000 sous l'impulsion du Département. Depuis, de nombreuses collectivités l'intègrent à leur plan de gestion global de la plage (Loire-Atlantique, Vendée, Languedoc-Roussillon,…).

Les coûts du ramassage peuvent varier selon le type de structure réalisant le nettoyage (nombre d'agents recrutés et type de recrutement), les temps de passages et les activités de traitements qui y sont liés (Illustration 25).

SITES	PERSONNEL	LINÉAIRE NETTOYÉ	NOMBRE D'AGENTS MOBILISÉS	NOMBRE DE PASSAGES À L'ANNÉE	COÛT TTC À L'ANNÉE EN EUROS	COÛT PAR KM PAR PASSAGE EN EUROS
Berck (62)	Structure d'insertion	3 000 m	8	18	4 500	83
Sainte-Adresse (76)	Structure d'insertion	1 500 m	6	220	15 000*	45
Assérac (44)	Structure d'insertion	1 300 m	8 à 10	8	2 200	211
La Faute-sur-Mer (85)	Structure d'insertion	5 000 m	2 à 3	16	9 000	113
Mimizan (40)	Agents ONF	1 000 m	2	16	11375	758
Leucate (11)	Agents saisonniers	2000 m	2	56	6160	55
Portiragnes (34)	Contrats aidés	700 m	2	43	2 700	90

* La prestation réalisée par des structures d'insertion induit un coût de revient plus faible pour les collectivités. Le coût de revient est de 15 000 euros pour la commune de Sainte-Adresse alors que le coût réel de nettoyage correspond à 70 600 euros soit 213 euros/ km/ passage (source : Aquacaux).

Illustration 25 – Coûts enregistrés sur différents sites en France (source Conservatoire du littoral/Rivages de France)

Sur la façade atlantique, la problématique est surtout liée à l'échouage des bois flottés, en Méditerranée l'échouage de bois peut être associé aux banquettes (ou mattes) de posidonies notamment après une importante crue.

Illustration 26 – Présence de bois et de mattes de posidonies au nord de l'enbouchure du Tavignano (photos prise le 04/12/2008, ROL)

En automne, l'herbier de posidonie perd ses feuilles qui viennent s'échouer sous forme de banquette de bas de plage. Outre, le rôle joué par l'ensemble des laisses de mer, les posidonies en suspension dans l'eau contribuent à l'amortissement des vagues et participent à l'accumulation du sable au sein des différentes couches constituant la banquette.

En Sardaigne, De Falco *et al.* (2008) évaluent la concentration moyenne en sédiment à 92.8 kg/m3 de banquette de posidonie. Sur les 44 plages suivies, ils estiment que 106 180 m3 de banquette ont été prélevés en 2004. En Corse, comme à Porticciolo, le Réseau d'Observation du Littoral a mis en évidence le rôle des banquettes dans la protection et la dynamique sédimentaire de la plage (Balouin *et al.*, 2006 - Illustration 27).

Illustration 27 – Protection de la plage par la matte de posidonie à Porticciolo (Balouin et al.*, 2006)*

Bilan

Le nettoyage raisonné au moyen du tri sélectif par ramassage manuel a donc pour avantage principal de favoriser la protection naturelle de la plage par la laisse de mer ou la banquette de bas de plage et de ne pas prélever de sable. Les coûts pour les communes peuvent être réduits en ayant recours à des subventions (emplois aidés, chantiers d'insertion, travaux d'intérêt général).

En revanche, la limite essentielle consiste à l'acceptation de ces bio-déchets par la population qui l'assimile à de l'insalubrité. C'est pourquoi, la sensibilisation est aussi importante que le ramassage lui-même. De manière opérationnelle, un compromis est à trouver entre les périodes et les zones de nettoyage. En Méditerranée, il peut être conseillé de procéder à un déplacement des banquettes importantes de posidonies sur les parties de la plage moins fréquentées au mois de juin et à une réintroduction en bas de plage à l'automne. Des techniques alternatives comme le « mille-feuille »[8] (banquette recouverte de sable) ou l'enlèvement seulement des premiers mètres côté mer (banquette récente contenant moins de sable – projet ECOREM en Corse[9]).

[8] http://csil.free.fr/BilanGestionBanquettesPosidoniePACA20102011.pdf

[9] http://ecorem.fr/wakka.php?wiki=BanquettesDePosidoniesLexperienceDeLaC

2.1.6. Autres systèmes

Le reprofilage du haut de plage

Le reprofilage est souvent associé à d'autres formes d'intervention sur la plage, comme à l'occasion d'un rechargement en sable (Anthony *et al.*, 1998) ou de l'implantation de drains ou de tubes géotextiles. Il peut cependant être réalisé de manière indépendante afin de restituer artificiellement à une plage un profil « d'équilibre » suite à une tempête.

En effet, après un évènement météo-marin important les échanges sédimentaires transversaux depuis la plage émergée vers la plage immergée peuvent se traduire par la formation d'un front d'érosion sur le haut de plage (ou sur la dune bordière) qui rend la plage d'autant plus exposée à de nouvelles pertes sédimentaires en cas d'une tempête successive (davantage de réflexion et d'affouillement par les vagues). Afin de limiter la vulnérabilité de la plage en période de tempête, le profil peut donc être adouci au moyen d'un engin mécanique (Illustration 28) et ainsi favoriser la dissipation de l'énergie des vagues avec un transport sédimentaire moindre.

Illustration 28 – Reprofilage du haut de plage à St Hilaire de Riez en Vendée (mai 2012 – source Ouest France)

Il est à noter que la pente s'adoucit naturellement sans intervention de l'homme mais à des échelles de temps dépendant des conditions hydrométéorologiques qui suivent la tempête. Ce type d'intervention n'est donc à envisager que lorsque des enjeux situés en arrière de la plage se trouvent menacés par une nouvelle phase d'érosion. Il s'agit donc davantage d'une solution d'urgence ponctuelle que d'une gestion globale et pérenne du phénomène.

Les pieux hydrauliques

Les pieux hydrauliques correspondent à des pieux en bois plantés verticalement dans le sédiment suivant un espacement régulier et alignés le plus souvent de manière transversale à la plage comme pour un épi (Cap Ferret, St Malo). De récentes installations de manière longitudinale en haut de plage et en « équerre » (transversal et longitudinal) ont été réalisées sur l'île de Noirmoutier en 2007 (Illustration 29).

Le dispositif, dit « perméable », vise à une dispersion de l'énergie des vagues tout en évitant de bloquer le transit sédimentaire. Bien que certaines installations datent de plusieurs dizaines d'années, les retours d'expériences restent limités et ne permettent pas de statuer sur l'efficacité du procédé ni sur une doctrine particulière de mise en œuvre (MEEDM, 2010). Il est à noter toutefois que les exemples connus se limitent à des environnements littoraux à marées.

Leur avantage principal consiste en un coût relativement modéré mais ils ont pour inconvénient de constituer un obstacle pour les usagers de la plage et d'être dangereux pour la navigation s'ils sont arrachés et emportés au large (Ancorim, 2011).

Illustration 29 - Installation de pieux hydrauliques en équerre sur la plage des Eloux à Noirmoutier (Fatal et al.*, 2010)*

Ce dispositif est à différencier des systèmes bloquant l'accès aux véhicules sur la plage qui n'ont aucun effet sur le transport sédimentaire.

Les atténuateurs de courant à base d'éléments filiformes

Bien qu'existant depuis plus d'une trentaine d'années, ces procédés restent encore au stade expérimental. Dans la plupart des cas, il s'agit d'algues synthétiques fixées sur le fond afin d'atténuer (ou dévier) les courants de fond générés par la houle ou la marée. Plusieurs exemples existent de par le monde, particulièrement aux Etats-Unis (où la société *Seascape synthetic Seaweed* a été très active depuis le début des années 80) et dans la Caraïbe, y compris en France (plage des Prêcheurs en Martinique).

Illustration 30 – Exemple d'algues artificielles fixées sur le fond de la plage submergée à La Barbade (Atherley, 1989)

Les résultats en termes de remédiation de l'érosion côtière divisent la communauté scientifique (Charlier et De Meyer, 2000). Sans rentrer dans le débat, il peut être conclu que ce type de méthode reste peu pertinent dans les régions comme la Méditerranée où les algues naturelles abondent et où leur préservation doit être privilégiée.

Les solutions de biofixation

Une méthode non conventionnelle est diffusée par la société *EBS Technolog*y (http://www.ebs-technology.fr). Elle se base sur la dispersion de produits biologiques (protéines-polysaccharides) sur le sable ou dans l'eau afin d'améliorer la cohésion entre le sable et l'eau en inhibant les composés hydrophobes (qui repoussent l'eau).

A ce jour, il n'existe pas de référence ni de retour d'expérience de ce type de procédé dont il n'est, par conséquent, pas possible d'évaluer l'efficacité.

2.2. LA GESTION DES CORDONS DUNAIRES

Les dunes jouent un rôle de protection face aux phénomènes de fortes houles et la végétation qui les caractérise permet de fixer le sable en luttant notamment contre l'érosion éolienne afin que la dune puisse garder sa morphologie et constituer ainsi une source de sédiment pouvant réalimenter la plage. En plus d'avoir un rôle de protection face aux assauts de la mer, la dune représente également un habitat naturel intéressant.

A la différence des plages, les solutions douces de gestion de l'érosion des dunes ne constituent pas des techniques alternatives ou innovantes. Elles sont en effet généralisées depuis fort longtemps (certaines depuis le Moyen-Âge) et font l'objet de méthodes bien documentées, reconnues et bien maitrisées par les opérateurs français.

Le principe de base du contrôle de la mobilité des dunes est la modération de l'action éolienne par réduction de la vitesse du vent (Nordstrom, 2008 ; UICN, 2012). Les techniques principales utilisées en France par l'Office National des Forêts (ONF) ou l'Entente Interdépartementale de Démoustication (EID) concernent la pose de débris végétaux et de rideaux brise-vent ainsi que des plantations adaptées à ce milieu spécifique.

En Corse, la délégation régionale du Conservatoire du Littoral œuvre déjà en ce sens, que ce soit sur le lido de la Marana ou même la plage du Ricanto, avec la revégétalisation du haut de plage, la canalisation de la fréquentation, la mise en place de ganivelles…

2.2.1. La couverture de débris végétaux

Utilisée depuis le XIXème siècle, cette technique a pour principe de disposer des branchages issus des boisements alentours sur le sable afin de favoriser son accumulation en réduisant voire supprimant le vent au niveau du sol (Favenec, 1999). Il peut s'agir de branchages fins (buissons de Genêt, de Bruyère à balais,…) étalés manuellement ou de gros branchages (Pin maritime, Chêne vert) nécessitant le recours à des engins mécaniques.

Dans un souci de conservation du milieu, les branchages verts susceptibles de bouturer, les espèces exogènes indésirables et les branchages trop grossiers (points durs) sont à proscrire.

Illustration 31 –Couverture manuelle et mécanisée de branches de Pins en Aquitaine (ONF)

La couverture de branchage est particulièrement adaptée pour combler les zones déprimées et reconstituer un profil aérodynamique. Par ailleurs, elle constitue un apport de matière organique pour la reprise de la végétation et peut dans certains cas servir à canaliser la fréquentation. Leur extension doit être cependant limitée afin d'éviter les perturbations écologiques et paysagères.

2.2.2. Les brises-vents

Il existe diverses formes de rideaux brises-vents à base de matériaux végétaux (ganivelles de châtaignier, filet en fibres de coco) ou synthétiques (treillis plastiques). Leur utilisation est ancestrale pour lutter contre l'érosion éolienne et favoriser le dépôt des sédiments transportés en limitant la vitesse du vent.

Illustration 32 – Casiers de ganivelles installées sur des formations dunaires méditerranéennes (Flèche de La Gracieuse, SDAGE RM&C, 2005)

Les rideaux de brise-vent peuvent être disposés en alignement ou en maillage. Outre leur action contre le vent, ces barrières semi-perméables protègent les plantations qui peuvent être opérées sur la dune. Ils ne sont pas adaptés aux zones très chaotiques (pose difficile) ou de déflation intense (les branchages sont plus efficaces).

2.2.3. Les plantations

Des plantations sont souvent effectuées en complément des solutions de réduction de la vitesse du vent. Le principe est également de fixer le sable dans le tissu racinaire des plantes.

Le nombre de végétaux utilisés est relativement réduit. Il s'agit essentiellement de l'Oyat en France, dotée de grande résistance à l'ensablement et au mitraillage par le sable. D'autres végétaux indigènes peuvent être plantés, à l'instar de l'Agropyron est très adaptée à la salinité et particulièrement recommandé sur l'avant-dune.

Illustration 33 – Plantation d'oyat sur les dunes méditerranéennes espagnoles (UICN, 2012)

2.2.4. Autres techniques

La canalisation de la fréquentation

L'intense fréquentation pouvant avoir des effets dégradants sur le couvert végétal (piétinement) et la fixation du sable, il s'avère nécessaire de canaliser les flux de circulation des usagers sur la dune pour limiter l'érosion éolienne.

Il y a encore peu de temps, les vacanciers avaient pour habitude de se garer avec leur voiture directement sur le massif dunaire. Aujourd'hui si ces pratiques ont pour la plupart disparues, la fréquentation pédestre reste suffisamment impactante pour justifier le recours à des accès balisés le plus souvent par des ganivelles (Illustration 34).

Illustration 34 – Canalisation de l'accès à la dune au moyen de ganivelles, Ricanto - Corse (Conservatoire du Littoral)

L'utilisation de petits plots de 30 cm de hauteur dans la lande peut souvent suffire à orienter la majorité des usagers sur une même voie avec un impact paysager moindre. Dans la dune, il est recommandé de ne pas tracer les accès dans la direction du vent afin de limiter la déflation. Sur les accès, il est parfois possible de mettre en place des géotextiles pour éviter l'érosion par le vent et le piétinement. Lorsque les dunes sont courtes et haute, les accès peuvent se faire par le biais d'escaliers en bois faisant office de passerelle.

Il est évident que la circulation des engins motorisés sur la dune a un impact encore plus dégradant sur le couvert végétal. Sur la plage, leur impact est plus limité mais une trop grande fréquentation pourrait modifier le profil de plage, ce qui rendrait celle-ci plus vulnérable aux assauts de la houle.

Rechargement, reprofilage et conteneurs géotextiles

De même que pour les plages (cf. § 3.1.6), le rechargement en sable est parfois utilisé pour recréer la dune bordière (Illustration 35). La dune constitue en effet un réservoir de sable qui

maintient l'équilibre sédimentaire de la plage lors des tempêtes. Elle forme par ailleurs un obstacle (relief) qui limite les intrusions marines (création de brèches possible toutefois).

Illustration 35 - Reconstruction de la dune sur le lido de Sète à Marseillan (source Thau Agglo)

Dans le cas d'une érosion importante du front dunaire suite à une tempête ou dans le cas d'un massif dunaire dégradé par des années de pressions anthropique, des travaux de restaurations peuvent nécessiter l'utilisation d'engins de terrassement pour recréer un profil favorable à l'accrétion en sédiment. Le reprofilage est souvent un préalable à l'installation de brise-vents et à la plantation.

Pour la reconstruction de la dune bordière, le reprofilage peut s'accompagner de l'implantation de conteneurs géotextiles afin de conforter de manière longitudinale le pied de dune (cf. § 3.1.4).

2.3. LA GESTION DES EMBOUCHURES ET DES GRAUS

Les systèmes de by-passing ou pontage sédimentaire (mécanique ou hydraulique) présentés précédemment (cf. § 3.1.3) font état des solutions possibles pour rétablir le transit sédimentaire bloqué par des ouvrages, le plus souvent installés sur des embouchures (Tweed River en Australie, Boucarot à CapBreton, etc.) où sont implantées des activités portuaires.

A contrario, les embouchures et graus libres d'aménagement peuvent être naturellement ensablés du fait de la dérive littorale et provoquer des désordres (problèmes de navigation, débordement possible du cours d'eau à l'amont, insalubrité des eaux stagnantes,…) liés à la fermeture du cordon sédimentaire et à la non circulation des eaux (Illustration 36).

Illustration 36 – Exemple de la plage de Lava nécessitant une ouverture mécanisée du grau pour éviter que le ruisseau ne viennent longer les établissements du haut de plage (ROL,2012)

Traditionnellement, le recours à un endiguement de l'embouchure était pratiqué. Aujourd'hui, dans la mesure où l'ouverture permanente du cordon ne revêt pas un intérêt majeur en termes d'activités économiques et de sécurité des populations, il est conseillé d'avoir recours à une gestion de celle-ci plutôt qu'à sa fixation définitive. De ce fait, l'embouchure est ouverte régulièrement au moyen d'un engin de terrassement de manière préventive à l'annonce d'un évènement météorologique (prévention des crues) et curative lorsque l'embouchure a été naturellement fermée. Afin de ne pas générer de pertes sédimentaires, le sable doit être conservé sur place de part et d'autre de la tranchée réalisée.

2.4. SYNTHESE DES SOLUTIONS DOUCES

Un tableau de synthèse des différentes techniques douces de gestion des plages, des dunes et des embouchures est présenté ci-dessous :

Solutions douces	Avantages	Limites	Eléments de coût*
GESTION DES PLAGES			
Rechargement artificiel en sédiment	+ Compense le déséquilibre du littoral + Impact paysager nul (hors période de travaux) + Augmente l'espace récréatif + Limite les submersions marines + Non néfaste pour les plages avoisinantes	- Rechargements réguliers nécessaires - Entretien parfois couteux - Proximité de la source de sédiment nécessaire - Impact sur la faune/flore enfouie	Cout initial de 20 à 60 € HT/m3 avec en sus un cout variable selon la fréquence de l'entretien (DDE13, Paskoff et Pratt, 2004)
Système de drainage	+ Renforce l'accrétion en favorisant l'infiltration du jet de rive + Impact paysager nul (hors période de travaux)	- Efficacité faisant débat - Limité à certains types de plages, - Entretien régulier du système -nécessité de déploiement de réseaux (electricité + eau) -risque de devenir inopérant en cas de forte mobilité du trait de côte	1300€ / m.l. (BCEOM, 2004)
By-passing - **Mécanique** - **Hydraulique**	+ Rétablit le transit sédimentaire + Mêmes avantages que le rechargement	- Nuisances importantes si trafic par camions -usure des canalisations si transport hydraulique - Perturbation de la biodiversité enfouie	2.9 M € à Capbreton pour un système hydraulique (Sogreah, 2005)
Conteneurs géotextiles - **Plage émergée** Transversal Longitudinal	+ Fixation du trait de côte + Protection immédiate des enjeux + Soutènement longitudinal pour la recons-	- <u>N'est considéré comme solution douce que si enfoui (sinon même effet que les ouvrages de défense en enrochements)</u>	~ 2000 € / m. l. (BCEOM, 2004)

- **Récif artificiel**	truction du haut de plage (ou de la dune) + Diminution de l'énergie des vagues + Pas de dénaturation du paysage (hors période de travaux) + Enrichissement de la biodiversité (hors période de travaux)	- Fragilité des textiles (usure avec le temps ou vandalisme) - Efficacité faisant débat - Suivi et entretien régulier - Limité aux faibles marées - Réversibilité limitée (difficulté pour enlever les conteneurs)	~1300€ / m. l. (BCEOM, 2004)
Nettoyage raisonné	+ Conservation des biodéchets (laisse de mer et banquette de Posidonies) + Favorise la fixation des sédiments + Atténue l'effet érosif des vagues sur la plage + Favorise la biodiversité (apport d'éléments nutritifs) + Certaines techniques de nettoyage (utilisation de chevaux par exemple) apportent une attractivité au site et à la démarche	- Nettoyage manuel plus lent - Nécessite de prévoir un plan de nettoyage dans le temps (renforcement en saison estivale) et l'espace (mécanisé dans les zones urbaines et manuel dans les zones naturelles par exemple) - Biodéchets parfois mal perçus par les usagers et nécessite des actions de sensibilisation	Très variable (de 45 € à 758 € / km / passage) selon le type d'emploi des agents de ramassage (subventionné ou pas), leur nombre, et le temps de passage. + coûts liés au traitement/stockage des déchets Source Conservatoire du littoral/Rivages de France
Reprofilage	+ Accélère le retour à la pente d'équilibre (dissipe mieux l'énergie de la houle et limite la reprise de l'érosion) + Facilité de mise en œuvre et faible coût	- Nuisances pendant la période de travaux - Impact sur la biodiversité (enfouie) - Le reprofilage est peu efficace, il est dans la plupart des cas associé à une autre solution de gestion des plages (et des dunes)	~5 €/m² (BCEOM, 2004)
Pieux hydrauliques	+ Est censé atténuer l'énergie des vagues sans blocages sédimentaires (perméabilité) + Pas de fort impact paysager (bois)	- Efficacité faisant débat - Obstacles pour les promeneurs - Danger pour la navigation (dispersion au large)	Non connu (faible, ~ 20-30€ / m. l?)
Algues artificielles	+ Atténue ou modifie les courants de fonds générés par la houle (ou la marée)	- Efficacité faisant débat - Peu utile dans les environnements riches en algues naturelles ou herbiers (exemple Posidonies) - Détérioration et dispersion de matières synthétique dans le milieu	Non connu

Biofixation	+ Renforce la cohésion de l'eau et du sable	- Efficacité non connue (pas de retour d'expérience)	Non connu
GESTION DES DUNES			
Couverture de débris végétaux	+ Favorise le dépôt de sable en ralentissant la vitesse du vent au sol + Limite les dommages liés au piétinement + Favorise la reprise végétale (éléments nutritifs) + Simplicité	- Efficacité réduite aux zones de forte déflation - Extension limitée - Surveillance périodique	Non connu (faible)
Rideaux brise-vent	+ Limite érosion éolienne + Facilité de mise en place + Peut être combiné à d'autres méthodes + Peut servir également à canaliser la fréquentation	- Peu adapté aux secteurs chaotiques - Surveillance périodique - Matériaux synthétique polluants (si destruction)	25 € / m. l. (EID Med, 2006)
Plantation	+ Fixation du sable par les racines + Oyat bien adapté (résistant à l'ensablement, aux embruns, au mitraillage par le sable)	- Entretien régulier - Nécessite une fréquentation limitée ou de coupler avec une canalisation des accès	17 € / m. l. (EID Med, 2006)
GESTION DES EMBOUCHURES			
Ouverture mécanisée	+ Pas de blocage sédimentaire + Facilité de mise en œuvre	- Nécessite un usage régulier Nécessite du matériel disponible (pelle) - Anticipation en cas de crue	Non connu (faible ~5 €/m² ?)

*Il est à noter que les éléments de coût présentés se basent essentiellement sur la mise en place du dispositif et que des coûts additionnels d'entretien sont à prévoir. Les montants sont présentés en Euros constants et doivent être adaptés en fonction de leur date de publication. Il est possible qu'il y ait un surcoût de l'ordre de 20% en raison du caractère insulaire de la Corse.

A titre de comparaison pour des ouvrages en enrochement, un épi coûte 1500€ /m.l. ; un brise-lame 4000 à 6000 € /m.l. et une butée de pied 4000 €/m.l (BCEOM, 2004), avec en sus des frais d'entretien.

3. Applicabilité au littoral corse

3.1. RAPPEL DES SPECIFICITES DU LITTORAL CORSE

La géomorphologie du littoral de la Corse est caractérisée par des falaises, des cordons sédimentaires (plages, dunes, cordons de galets) et des marais maritimes (vases).

Ce littoral fait l'objet d'une attention particulière. Un partenariat entre l'Office de l'Environnement de la Corse et le BRGM a permis la mise en place du Réseau d'Observation du Littoral depuis 1999 permettant de suivre l'évolution côtière et de ce fait fournir des données nécessaires à une meilleure compréhension des processus responsables de cette évolution.

Concernant les formations sableuses qui nous intéressent principalement, deux ensembles principaux sont à différencier, à savoir les plages ouvertes et linéaires de la plaine orientale entre Bastia et Solenzara (~100 km) ; et les petites plages de poches de fond de baie (1 à 4 km) ou de crique (< 1 km) présentes sur le restant de l'ile.

La plage émergée est généralement d'extension limitée avec une pente assez raide (jusqu'à 5 % - Stépanian *et al.*, 2010). Du fait des faibles surfaces de déflation, les dunes associées sont de hauteur assez limitée (1 à 2 m max.). La plage immergée est le plus souvent composée de barres d'avant-côte et peut être influencée localement par la couverture d'importants herbiers de Posidonies.

Les plages de la Plaine orientale sont sujettes à une importante dérive littorale (transport de sable parallèle la plage), tandis que dans les plages de poche, ce sont les échanges perpendiculaires à la plage qui peuvent être prédominants.

La Corse se situe dans un contexte à faible amplitude de marée (0.4 m de marnage maximum en période de vive-eau selon le SHOM). Concernant le climat de houle, nous pouvons dissocier la côte Est de la côte Ouest qui sont soumises à des évènements de provenance différente.

Pour ce qui est de la côte Est, les conditions de faible agitation correspondant à des houles de hauteurs significatives inférieures ou égales à 1 m représentent environ 70% du temps. Les évènements les plus importants peuvent atteindre 7 à 8 m pour une période de pic de près de 11 s. Le reste du temps, dans 80% des cas, la période de pic reste comprise entre 3 et 6 s. Il est à noter une dominance des houles de secteur Sud-Est par rapport au secteur Nord-Est (Stépanian et al., 2011 et ANEMOC – point 4409).

La côte Ouest est un peu plus énergétique, les conditions de faible agitation (Hs ≤ 1 m) correspondent à environ 50% du temps alors que les évènements extrêmes peuvent atteindre 9 m avec une période de pic de l'ordre de 13 s. Le reste du temps, dans 70% des cas, la période de pic reste comprise entre 3 et 6 s. Les évènements en provenance de l'ouest et du sud-ouest prédominent devant ceux en provenance du Nord - Nord-Ouest (ANEMOC – point 8110).

3.2. SYNTHESE DES SOLUTIONS DOUCES EN TERMES D'APPLICABILITE

Compte-tenu de ces caractéristiques principales, l'applicabilité des solutions douces présentées sur le littoral corse est proposée dans le tableau suivant :

Solutions douces	Indice d'applicabilité	Justification
GESTION DES PLAGES		
Rechargement artificiel en sédiment	Fort	Procédé le plus « universel », dans la mesure où le sédiment réinjecté dans la cellule hydrosédimentaire a les même caractéristiques que celui en place
Système de drainage	Faible	Peu adapté aux environnements à faible hydrodynamisme (marée, vagues) car la zone de jet de rive où l'infiltration s'opère est très réduite
By-passing - **Mécanique** - **Hydraulique**	Fort	Adapté aux zones de forte dérive littorale bloquée par un aménagement, sur la plaine orientale notamment
Conteneurs géotextiles - **Plage émergée** • Transversaux et/ou longitudinaux • Enfouis - **Récifs artificiels (atténuateur de la houle)**	Faible à Modéré selon le cas de figure	- L'application est à proscrire pour les installations transversales ou longitudinales à même la plage car elles bloquent le transit sédimentaire et se détériorent rapidement. - Les installations de conteneurs enfouis en haut de plage/pied de dune peuvent être adaptées, en accompagnement de dispositifs de restauration complémentaires (reprofilage, plantations, brise-vent). - La pérennité des récifs en Géotubes est incertaine du fait de la migration des barres d'avant-côte et de la déstabilisation potentielle du dispositif
Nettoyage raisonné	Fort	Adapté à la problématique des banquettes de Posidonies et des plages balnéaires. Un plan de nettoyage est à mettre en œuvre en fonction de la fréquentation et du type de ramassage (manuel et/ou mécanisé)
Reprofilage	Modéré	Peut se suffire à lui-même (efficacité limitée) mais il est plus favorablement de le mettre en œuvre en accompagnement

		de dispositifs complémentaires (rechargement, pose de brise-vent,…)
Pieux hydrauliques	Faible	Peu adaptés aux environnements à faible hydrodynamisme (marée, vagues) car ils seraient surtout sollicités pendant les évènements fortement énergétiques lorsque l'agitation est trop importante pour permettre le dépôt de sédiment sur la plage émergée
Algues artificielles	Faible	En Corse, il est préférable de tenter de conserver les herbiers de Posidonies existants plutôt que de songer à implanter des algues synthétiques
Biofixation	Faible	Pas de retour d'expérience, rien n'indique que le renforcement de la cohésion du sable et de l'eau favorise la sédimentation
GESTION DES DUNES		
Couverture de débris végétaux	Modéré	Adapté mais dans les faits relativement peu appliqué car les brise-vents sont souvent préférés compte-tenu de leur facilité d'installation sur les petites dunes méditerranéennes
Rideaux brise-vent	Fort	Adapté pour la restauration des zones d'érosion éolienne et pour la canalisation des accès à la plage/dune (limitation du piétinement)
Plantation	Fort	L'Oyat est bien adapté aux littoraux méditerranéens et corses
GESTION DES EMBOUCHURES		
Ouverture mécanisée	Fort	Adapté pour l'ensemble des embouchures dont la fermeture occasionnelle ne provoque pas de gêne majeure pour les activités économiques (navigation notamment) et la sécurité des populations (crue en amont)

4. Conclusion

Les solutions douces constituent l'une des méthodes de gestion de l'aléa érosion côtière et proposent des avantages certains en termes de réversibilité, d'intégration au paysage naturel et d'impact sur la biodiversité.

Sur les critères d'efficacité et d'applicabilité aux plages corses, les méthodes douces de rechargement artificiel en sédiment et de by-passing (mécanique ou hydraulique) semblent les plus adaptées car elles réinjectent du sable dans la cellule hydrosédimentaire, augmentent l'espace récréatif et limitent l'exposition aux submersions marines. Ces méthodes présentent des coûts d'investissement et d'entretien (répétition programmée des rechargements) certes non négligeables, mais qui sont à mettre en perspective avec les coûts d'implantation et d'entretien des ouvrages de défense. Pour cela, il reste tout de même à identifier les sources potentielles de sable.

D'autre part, le nettoyage raisonné s'applique tout particulièrement aux plages balnéaires et à la problématique des banquettes de Posidonies. Ces banquettes mais également les bois échoués lors des crues jouent un rôle de protection face au phénomène d'érosion mais ne favorisent pas l'attrait touristique. Un ramassage différentié peut être mis en œuvre en fonction de la fréquentation (sites urbains ou naturels, saison estivale ou non). A ce titre, le ramassage manuel est à privilégier car il permet de faire le tri entre déchets anthropiques et biodéchets (piégeage des sédiments, atténuation des vagues) et limite les prélèvements de sable du ramassage mécanisé.

Les conteneurs géotextiles (type ©Géotube) présentent les mêmes inconvénients que les ouvrages lourds lorsqu'ils sont implantés à même la plage (blocage du transit sédimentaire). Leur application peut toutefois être envisagée s'ils sont enfouis afin de jouer le rôle de soubassement à une restauration du haut de plage et de la dune. La méthodologie mise en place au nord de l'embouchure du Tavignano au moyen de sacs de sables semble toutefois donner de bons résultats mais nécessite une intervention anthropique régulière.

Les autres techniques (récifs artificiels, drainage, pieux hydrauliques, etc.) semblent moins pertinentes soit en raison d'une applicabilité limitée aux spécificités des littoraux corses (faible hydrodynamisme, migration des barres d'avant-côte) soit en raison d'une efficacité faisant débat au sein de la communauté scientifique.

A contrario, les méthodes douces de gestion de l'érosion éolienne des dunes (rideaux brise-vent de type ganivelles, plantations d'Oyat, …) ont fait leur preuve depuis longtemps. Elles sont adaptées au littoral méditerranéen et corse et bien maîtrisées par les opérateurs locaux. La canalisation des accès à la plage permet également de limiter le piétinement de la végétation qui fixe le sable.

Pour les zones d'embouchures et de graus bouchées par le transit sédimentaire, une solution douce consiste simplement en une réouverture mécanisée régulière du chenal d'échange entre les eaux marine et lacustres afin d'éviter les blocages sédimentaires liés à l'endiguement. Ce procédé peut être appliqué à l'ensemble des embouchures de Corse dont la fermeture occasionnelle par le transit sédimentaire ne provoque pas de gêne majeure pour les activités économiques (navigation et activités aquacoles notamment) et la sécurité des populations (crue en amont).

Enfin, il convient de rappeler que pour toute implantation, expérimentale ou non, de solutions de réduction de l'aléa, le recours à un suivi morphologique permet de juger des effets du dispositif et que des solutions complémentaires de réduction des enjeux (maitrise foncière, recul stratégique, adaptation des aménagements) sont à envisager.

Pour rappel également, toute intervention sur le Domaine Public Maritime fait l'objet d'une instruction par les services de l'Etat, plus ou moins complexes selon le dispositif choisi et les impacts environnementaux attendus.

5. Bibliographie

Acworth C. and Lawson S. (2011) – The Tweed River Entrance Sand Bypassing Project – Ten years of managing operations in a highly variable coastal system - 20th NSW Coastal Conference 2012 Tweed Heads

ANCORIM (Atlantic Network for COastal RIsks Management) (2011) – Panormam des solutions douces de protection des côtes. Coord. BRGM et Région Aquitaine (France), 55 p.

ANEMOC Atlas Numérique d'Etats de Mer Océanique et Côtier - © CETMEF / EDF R&D-LNHE - http://anemoc.cetmef.developpement-durable.gouv.fr

Anthony E., Dubar M., Cohen O. (1998) - Les cordons de galets de la Baie des Anges : histoire environnementale et stratigraphique ; évolution morphodynamique récente en réponse à des aménagements. Géomorphologie : relief, processus, environnement. Juillet 1998, vol. 4, n°2. pp. 167-187.

Atherley K.A. (1989) - Seascape ® synthetic seaweed. A failed solution to erosion in Barbados. In: Coastal Zone '89: Proceedings of the Sixth Symposium on Coastal and Ocean Management, (Charleston, South Carolina, USA), pp. 285-99.

Bagnold R.A. (1940) - Beach formation by waves: some model experiments in a wave tank. *Journal of the Institute of Civil Engineers,*15. 27- 54 .

Balouin Y., Palvadeau E. et Bodéré G. (2006) – Réseau d'observation du littoral de la Corse. Sites sensibles à évolution forte et problématique. Rapport d'avancement. Lecture et exploitation des données des sites de Tavignano et de Porticciolo. Année 2006. Rapport BRGM RP-54997-FR., 37 p., 21 ill.

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. BRGM/RP-62594-FR, 60 p., 36 ill., 1 annexe.

BCEOM (2004) - Etude générale pour la protection et la mise en valeur du littoral des communes de Frontignan-La-Peyrade et de Villeneuve-lès-Maguelone.

Berg D.W., Duane D.B. (1968) – Effect of particule size and distribution on stability of artificially filled beach. Presque Isle Peninsular, Pennsylvania, Proceedings of the 11th Conference on Great Lakes research, Michigan, p. 161-178.

Boswood P.K. and Murray R.J. (2001) - World-wide Sand Bypassing Systems: Data Report (Compiled 1997) - Coastal Services technical report R20. Conservation technical report No. 15.ISSN 1037-4701.

Bowman D., Ferri S., Pranzini E. (2007) - Efficacy of beach dewatering — Alassio, Italy. *Coastal Engineering* vol. 54 issue 11 November, 2007. p. 791-800

Bruun P. (2005) - "Drains" dans Schwartz (M. L.) (dir.), Encyclopedia ofCoastal Science, Springer, The Netherlands, p. 147-161.

Bruun P. (2005) - « Bypassing at littoral drift barriers" dans Schwartz (M. L.) (dir.), Encyclopedia ofCoastal Science, Springer, The Netherlands, p. 147-161.

Charlier R.H. and De Meyer C.P. (2000) - Ask Nature to protect and build-up beaches. Journal of Coastal Re- search, 16(2), 385-390. Royal Palm Beach (Florida), ISSN 0749-0208.

Ciavola, P., Vicinanza, D., Fontana, E. (2008) – Beach drainage as a form od shoreline stabilization: case studies in Italy. Coastal Engineering, 2646-2658.

Cohen O., Anthony E.J. (2007) – "Gravel beach erosion and nourishment in Nice, French Riviera", *Méditerranée*, n° 108, p. 99-103.

Contestabile P., Aristodemo F., Vicinanza D., Ciavola C. (2012) - Laboratory study on a beach drainage system. Coastal Engineering 01/2012.

De Falco G., Simeone S., Baroli M. (2008) - Management of Beach-Cast Posidonia oceanica Seagrass on the Island of Sardinia (Italy, Western Mediterranean). Journal of Coastal Research 24-4C. pp69-75.

Dyson A, Victory S. and Connor T. (2001) - Sand Bypassing the Tweed River Entrance: An Overview. Proceedings of the 15th Australasian Coastal and Ocean Engineering Conference, the 8th Australasian Port and Harbour Conference 25 - 28 September 2001 Queensland, Australia.

EID-Méditerranée (2006) – Etude de définition des enjeux de protection du littoral sableux. Phase C : Définition des modes de gestion. 33 p.

Eurosion, 2004 – Vivre avec l'érosion côtière en Europe – Espaces et sédiments pour un développement durable. Conclusions de l'étude Eurosion, 21 p.

Farley P.P. (1923) - "Coney Island public beach and boardwalk improvements. Paper 136". *The Municipal Engineers Journal*

Farnol P. et Lebunetel J. (2011) - Les digues sous-marines en géotextiles pour la protection des plages : avantages et inconvénients. Conférence Méditerranéenne Côtière et Maritime, Tanger, Maroc.

Fattal P. et Walker P. (2008) - Le drainage de plage : une méthode douce de stabilisation d'un littoral meuble -Etude de cas aux Sables d'Olonne (Vendée). Xèmes Journées Nationales Génie Côtier – Génie Civil, 14-16 octobre 2008, Sophia Antipolis

Fattal P., Robin M., Paillart M., Maanan M., Mercier D., Lamberts C. et Costa S. (2010)- « Effets des tempêtes sur une plage aménagée et à forte protection côtière : la plage des Éloux (côte de Noirmoutier, Vendée, France) », Norois [En ligne], 215 | 2010/2, mis en ligne le 01 septembre 2012. URL : http://norois.revues.org/index3289.html

Favennec J. (1999) – Gestion des dunes littorales non boisées *in* Gérard B. (1999) – Le littoral. Editions BRGM, 352 p.

Finkl C.W. (1996). – "What might happen to America's shoreline if artificial beach replenishment is curtailed: a prognosis for Southeastern Florida and outer sandy regions along regressive coasts", *Journal of Coastal Research*, vol. 12, n° 1, p. iii-ix.

Finkl C.W., Walker H.J. (2005) – "Beach nourishment", dans Schwartz (M. L.) (dir.), Encyclopedia ofCoastal Science, Springer, The Netherlands, p. 147-161.

French P.W. (2001). – « *Coastal defences : processes, problems and solutions* », Londres, Routledge, 266 p.

Hallermeier,R.J.(1981). A profile zonation for seasonal sand beaches from wave climate, Coastal Engineering, 4, 253-277.

Hamm L., Capobianco M., Dette H.H., Lechuga A., Spanhoff R., Stive M.J.F. (2002) – "A summary of European experience with shore nourishment", Coastal Engineering, vol. 47, n° 2, p. 237-264.

Hanson H., Brampton A., Capobianco M., Dette H.H., Hamm L., Laustrup C., Lechuga A., Spanhoff R. (2002) - "Beach nourishment projects, practises and objectives – a european overview",Coastal Engineering, vol. 47, n° 2, p. 81-111.

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. Méditerranée n°108 : Risques littoraux en Méditerranée.

Leidersdorf C., Nelsen C., Richmond B. (2011) – The life and death of first America's surfing reef. In Magoon O., Noble R.,Treadwell D., Kim Y. (2011), Coastal Engineering Practice. ASCE.

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). *VII° Journées Nationales génie Côtier-Génie Civil, Compiègne*.

Ministère de l'Ecologie, de l'Energie, du Développement Durable et de la Mer (2010) – La gestion du trait de côte. Editions Quae, 290 p.

Newman D.E. (1976) – Beach replenishment : sea defenses and a review of the artificial beach replenishment, Proceedings of the Institution of Civil Engineers, vol. 6, n° 60, p. 45-60.

Nordstrom, Karl F. (2008). Beach and Dune Restoration. Cambridge University Press.

Oliveros C. (1996). Evolution du trait de côte de 1951 à 1996 des Agriates au Golfe de Ventilègne (Corse). Rapport BRGM R 39480.

Paskoff R. (2004) – Côtes en danger. Ed. Masson. 2nde édition. 250 p.

Paskoff R. (2010) - Les littoraux : Impact des aménagements sur leur évolution. Armand Colin. 3ème édition. 264 p.

Paskoff R. et Pratt M-C (2004) – Erosion et ré-ensablement des plages, gestion des dunes. Atelier des 31 mars et 1er avril 2004 à Châtelaillon-Plage et Île d'Oléron de l'EUCC-France.

Patterson D., Boswood P., Elias G. (2011) - Tweed River Entrance Sand Bypassing Long Term Average sand transport rate. Proceedings of the 20th NSW Coastal Conference 2012 in Tweed Heads, Australia.

SDAGE Rhône Méditerranée et Corse (2005) – Guide technique n°9 – Connaissance et gestion de l'érosion du littoral – Bassin Rhône Méditerranée et bassin de Corse.

SOGREAH (2003) - Etude de l'évolution du trait de côte du littoral de Capbreton. Phase 1: diagnostic de l'état actuel, 30 p. + annexes. Phase 2 : modélisation mathématique de l'évolution du trait de côte et incidence sur le risque littoral, 29 p + annexes. Phase 3 : recherche de solutions d'aménagement du littoral, 56 p. + annexes*. Rapport établi pour le compte de la municipalité de Capbreton*.

SOGREAH (2005) – Aménagement du littoral de Capbreton : avant-projet, rapport final.

Stépanian A., Balouin Y., Bacon A., Bodéré G., Danger Y., Hennequin V. (2010) - Atlas littoral de la plaine orientale de Corse - Rapport BRGM/RP-59058-FR. 82 p.

Stépanian A., Balouin Y., Belon R., et Bodéré G. (2011) – ROL – Etude complémentaire sur le littoral de la Plaine orientale de Corse – Etat des connaissances sur les impacts des tempêtes sur le littoral. Rapport final. Rapport BRGM/RP-59058-FR, 137 p., 64 ill., 4 ann..Turner I.L. and Leatherman S.P. (1997) - Beach Dewatering as a 'Soft' Engineering Solution to Coastal Erosion: A History and Critical Review. Journal of Coastal Research. Vol. 13, No. 4 , pp. 1050-1063

MEDDTL-Ministère de l'Ecologie, du Développement Durable, des Transports et du Logement, (2012) - *Stratégie nationale de gestion intégrée du trait de côte : vers la relocalisation des activités et des biens.* MEDDTL, 20 p.

Thinon I., Durand N., Palvadeau E. (2003) – Inventaire des stocks de sable sur le plateau continental oriental de la Corse. BRGM/RP-55366-FR, 55 p., 20 fig., 1 ann.

UICN (2012) - Conservation des dunes côtières - Restauration et gestion durables en Méditerranée occidentale. 126 p.

US Army Corps of Engineers (2008) – Beach Fill Design - Coastal Engineering Manual. EM 1110-2-1100 Part V Chap 4 (change 2).

Van der Wal D., 2004. – Beach-dune interactions in nourishment areas along the Dutch coast, *Journal of Coastal Research*, vol. 20, n° 1, 317-325.

Centre scientifique et technique
3, avenue Claude-Guillemin
BP 36009
45060 – Orléans Cedex 2 – France
Tél. : 02 38 64 34 34 - **www.brgm.fr**

Direction Régionale Corse
Immeuble Agostini,
ZI de Furiani
20600 Bastia - France
Tél. : 04 95 58 04 33