



Interreg



UNIONE EUROPEA

MARITTIMO-IT FR-MARITIME

MAREGOT

Fondo Europeo di Sviluppo Regionale

Enzo Pranzini

Mesurer la plage pour gérer la côte

Contributions de

Y. Balouin, N. Bateau, G. Bruschi, C. Cavallo, L.E. Cipriani,
M. Deriu, M. Farris, M. Ferrari, C.A. Garzonio,
M. Jolivet, B. Kulling, A. Lai, A. Ritossa

edifir
EDIZIONI FIRENZI



Enzo Pranzini

Mesurer la plage pour gérer la côte

Contributions de

Y. Balouin, N. Bateau, G. Bruschi, C. Cavallo, L.E. Cipriani,
M. Deriu, M. Farris, M. Ferrari, C.A. Garzonio,
M. Jolivet, B. Kulling, A. Lai, A. Ritossa

edifir
EDIZIONI FIRENZE

Ce volume a été produit dans le cadre du Projet MAnagement des Risques de l'Erosion côtière et actions de GOuvernance Transfrontalière – MAREGOT” (Coopération Interreg V-A Italie-France Maritime 2014/2020)

Édité par

Edifir Edizioni Firenze s.r.l.

Via de' Pucci, 4 – 50122 Firenze

Tel. 055289639 – Fax 055289478

www.edifir.it – edizioni-firenze@edifir.it

Responsabile del progetto editoriale

Simone Gismondi

Responsabile editoriale

Elena Mariotti

ISBN 978-88-7970-994-1

Prémisse	p.	5
Mesurer la plage pour gérer la côte	»	11
L'acquisition des données	»	23
Élaboration et représentation des données	»	35
L'utilisation des données pour la planification des interventions	»	53
Succès et échecs du suivi	»	65
Ligurie		
Le suivi de l'intervention de reconstruction de la côte de Ospedaletti	»	67
Rééquilibrage des plages d'Ameglia et Marinella di Sarzana	»	72
Toscane		
Le monitoring de l'intervention de rééquilibrage de la côte e Marina di Carrara	»	76
Érosion et défense du littoral de Capalbio	»	81
Corse		
Suivi du démantèlement du port de Porticciolo	»	85
Érosion et protection de la plage de Prunete	»	89
Var		
Les géotextiles de la Capte	»	92
Ecoplage® de la plage d'Agay	»	100
Sardaigne		
La mise en sécurité d'une partie du littoral de Santa Margherita di Pula (CA)	»	107
Réalisation d'une plage de gravier à Cala Gonone (Dorgali, NU)	»	113
Textes de référence	»	119



Prémisse

La connaissance de l'évolution récente et de l'état actuel d'un littoral, aussi bien dans ses traits de côte bas que hauts, est un élément clé de la gestion des risques liés à l'érosion côtière, aux inondations et à l'effondrement des falaises. Risques auxquels sont exposées - avec le déplacement des populations de l'intérieur des terres vers la côte, avec le développement rapide de cette partie du territoire et avec la croissance constante du tourisme balnéaire - des valeurs humaines, environnementales et économiques toujours plus importantes. De plus, la diminution de la résilience de cette bande du territoire, due à la cimentation des côtes, a entraîné une augmentation du risque auquel ces biens sont exposés.

Résilience côtière

La capacité intrinsèque de la côte à s'adapter aux changements induits par les variations du niveau de la mer, les événements extrêmes et les impacts anthropiques occasionnels, tout en maintenant les fonctions du Système côtier sur le long terme.

EuroSION, 2007

Parfois, le monitoring côtier a été effectué de façon non homogène et discontinue, ou a produit des données qui n'ont pas été ensuite utilisées pour la planification et la gestion des côtes. Ceci est dû à plusieurs facteurs : le manque de familiarité des acteurs avec les informations acquises, l'inadéquation des données elles-mêmes pour représenter les phénomènes se déroulant à l'échelle spatiale et temporelle appropriée, ou leur non-actualité.

Les plans de monitoring ont souvent été élaborés sans finalisation précise, avec l'idée que la "collecte" des données représente un moment initial pour poursuivre l'étude ; mais si les données n'ont pas été acquises avec des méthodes, protocoles et objectifs bien définis, et si l'utilisateur n'a pas été impliqué dès le début et a collaboré à la définition des objectifs, les documents produits seront rarement pleinement utilisés et efficaces pour la *Gestion Intégrée des Zones Côtières (GIZC)*.

Gestion Intégrée des Zones Côtières (GIZC) **Integrated Coastal Zone Management (ICZM)**

Ce concept est officiellement né en 1992 lors du Sommet de la Terre de Rio de Janeiro (Agenda 21, chapitre 17), mais il est présent depuis un certain temps dans la pensée scientifique et dans les fondements de l'aménagement du territoire, même s'il a rencontré, à l'époque comme aujourd'hui, des difficultés dans son application concrète.

La Commission européenne la définit comme suit : La GIZC est un processus dynamique, multidisciplinaire et itératif pour promouvoir la gestion durable des zones côtières. Elle couvre l'ensemble du cycle de collecte de l'information, de planification (au sens large), de prise de décision, de gestion et de suivi de la mise en œuvre. La GIZC utilise la participation éclairée et la coopération de toutes les parties prenantes pour évaluer les objectifs de la société dans une zone côtière donnée et pour prendre des mesures en vue de la réalisation de ces objectifs. La GIZC cherche à équilibrer, à long terme, les objectifs environnementaux, économiques, sociaux, culturels et récréatifs, le tout dans les limites fixées par les dynamiques naturelles. « Intégrée » dans la GIZC fait référence à l'intégration des objectifs et à l'intégration des nombreux outils nécessaires pour les atteindre. Cela signifie l'intégration de tous les domaines, secteurs et niveaux administratifs pertinents. Cela signifie l'intégration des composantes terrestres et marines du territoire de destination, dans le temps et dans l'espace.



Le premier objectif du projet MAREGOT a donc été d'analyser le suivi effectué dans les territoires transfrontaliers pour vérifier si et comment, dans le passé, les données produites avaient été utilisées pour la planification et la gestion du trait de côte, quels résultats positifs ils avaient déterminés et quels points critiques avaient émergé.

AMMINISTRAZIONE PROVINCIALE DI LIVORNO
DIPARTIMENTO DI SCIENZE DELLA TERRA DELL'UNIVERSITÀ DI FIRENZE
con il patrocinio della REGIONE TOSCANA

Corso di aggiornamento sulla gestione delle aree costiere

S. Vincenzo (Livorno), 14-19 Maggio 1984



Couverture du programme d'un cours de mise à jour sur la gestion des zones côtières à l'intention des techniciens et des administrateurs des Organismes locaux italiens, organisé en 1984, dans lequel le concept d'intégration des différentes composantes du trait de côte était déjà clair.

Cela a nécessité un travail de comparaison entre les connaissances acquises au moment de la planification et les choix effectués alors, tant en ce qui concerne les interventions de défense côtière, tant dans les outils de planification urbaine municipale, que dans les plans de gestion des plages. Pendant cette phase, une analyse du rapport coût/bénéfice du monitoring a également été tentée, mais les données disponibles n'ont pas permis d'obtenir des résultats significatifs.

Pour le suivi des interventions de défense, il a été évalué si les programmes adoptés avaient été spécifiquement conçus pour obtenir des réponses sur l'efficacité de l'intervention et sur ses effets sur les portions adjacentes du littoral, ainsi que si le monitoring avait ensuite été utilisé pour réduire toute criticité détectée.

Dans le cadre du projet MAREGOT, les monitorages de l'état des biocénoses côtières et de la stabilité des hautes côtes ont également été analysés, notamment pour évaluer le risque d'effondrement et délimiter les zones en amont et en aval concernées, avec une attention particulière pour la sécurité des personnes, en tenant compte également de la sécurité des accès. Cela a également conduit à une amélioration de ce qui avait été proposé avec le projet PERLA (et l'extension ultérieure de I-PERLA) pour l'analyse du danger des accès et la création d'une signalisation visant à accroître la sécurité dans l'utilisation de la plage.

Un point souligné est l'importance des données météorologiques marines dans l'analyse du territoire côtier, tant dans la définition du climat du projet que dans l'analyse des événements extrêmes, facteurs déterminants pour la définition des niveaux de risque.

Tous ces aspects sont traités dans d'autres documents du Projet.

Sur la base des résultats de la première phase de MAREGOT, des protocoles de suivis spécifiques ont été mis au point et appliqués à différentes zones d'échantillonnage (par exemple, des tronçons linéaires en érosion non défendus, des plages en poches, des zones à défenses consolidées, des zones à nouvelles défenses, des côtes hautes à falaises abruptes, des côtes hautes bordées au fond par des plages utilisables, etc.) Tout cela avec des contacts entre les techniciens, les planificateurs, les gestionnaires et les intervenants.

Dans la phase finale du projet, les résultats du suivi effectué avec ces protocoles seront analysés et leur utilité sera évaluée afin d'élaborer des plans d'intervention pour la stabilisation de la côte et de mettre en œuvre des interventions de programmation et de réglementation pour la Gestion Intégrée des Zones Côtières. Cela sera effectué à travers une confrontation entre tous les sujets impliqués.

Ce volume, afin de contribuer à cette comparaison, est publié dans une phase intermédiaire du projet et ne peut donc pas rendre compte de tous les résultats qui seront atteints. Il contient plutôt une réflexion sur ce qui a été acquis jusqu'à présent sur le thème du monitoring de l'évolution des côtes, réflexion à partager avec les différents sujets qui sont impliqués directement ou indirectement dans la Gestion Intégrée des Zones Côtières.

Il ne s'agit donc pas d'un manuel technique qui illustre les méthodes pertinentes, mais d'une voie idéale qui commence par l'analyse des raisons qui rendent le suivi indispensable, pour passer à la discussion sur la manière dont les données produites peuvent affecter la gestion des zones côtières, en terminant par la présentation des cas dans lesquels le suivi de l'évolution du littoral a porté sur des interventions de rééquilibrage et des cas dans lesquels l'absence ou l'insuffisance des données a empêché ou retardé l'adoption de solutions réglementaires, de planification, de conception et de gestion optimales.

Bibliographie

EuroSION, 2007. Vivere con l'erosione costiera in Europa. Risultati de l'étude EuroSION. Par Doody P., Ferreira M., Lombardo S., Lucius I., Misdorf R., Niesig H., Salam A., Smallegange M., Cipriani L.E., Lanza S., Pranzini E., Ranzazzo G., Communauté Européenne, Luxembourg, 39 pages.

United Nations, 1992. Protection of the oceans, all kinds of seas, including enclosed and semi-enclosed seas, and coastal areas and the protection, rational use and development of their living resources. Agenda 21, Chapitre 17, http://www.un.org/Depts/los/consultative_process/documents/A21-Ch17.htm

Carlo Alberto Garzonio



Mesurer la plage pour gérer la côte

Connaitre pour gouverner

L'observation de l'évolution du littoral est l'une des premières actions d'aménagement et de gestion des terres côtières. Les Lorrains le savaient bien quand, en 1829, ils firent placer trois cippes sur la côte de Pise avec une plaque sur laquelle était gravée la distance de la mer (Fig. 1.1).



[Figure 1.1. Parc de San Rossore (Toscane) : l'un des trois cippes avec une plaque indiquant la distance de la mer en 1829. Le plus proche de l'embouchure a été perdu à cause de l'érosion côtière.]

L'inquiétude n'était pas due à l'érosion qui frappe aujourd'hui cette côte, mais à la progradation du littoral, qui éloignait de la mer les tours de guet côtières et, surtout, qui avait déjà conduit à l'ensablement de

Sinus Pisanus, qui avait accueilli pendant des siècles le port de Pise (Piccardi et Pranzini, 2018).

Aujourd'hui encore, la gestion du littoral doit faire face à l'excès de sable qui se dépose en certains points, souvent à proximité des installations portuaires au point d'en interdire l'accès, forçant les gestionnaires à des travaux de dragage coûteux avec d'innombrables problèmes d'évacuation des sédiments, pas toujours appropriés aux engraisements des littoraux.

Mais c'est l'érosion côtière qui inquiète le plus les administrateurs, les opérateurs économiques et les citoyens ordinaires, qui voient leurs plages se réduire d'une année à l'autre.

Connaître l'histoire de ses propres côtes, leur dynamique, les tendances évolutives actuelles et prévoir leur structure future devient un impératif sous la pression d'une croissance continue de la population et des activités économiques et récréatives qui se concentrent sur cette mince bande de terre.

Ce qui, à première vue, semblait être un simple exercice de mesure, n'est rien d'autre qu'un aspect du « connaître pour gouverner », c'est-à-dire du fondement de l'action politique.

Pour une prise de décision éclairée

Une compréhension détaillée et une capacité de prédiction couvrant toutes les échelles de temps et d'espace permettraient de prendre des décisions en connaissance de cause de façon optimale. Cependant, cela dépasse les possibilités actuelles de la science côtière. Les changements côtiers se produisent dans le temps, de quelques secondes (p. ex. les vagues) à plusieurs décennies (p. ex. la variabilité du climat comme l'oscillation décennale du Pacifique) et dans l'espace, de quelques centimètres (p. ex. les ondulations) à plusieurs centaines de kilomètres (p. ex. les cellules côtières). Par conséquent, les efforts scientifiques doivent être explicitement orientés vers la compréhension des changements côtiers à une échelle pertinente pour la communauté des gestionnaires (décennies et dizaines de kilomètres). Des compromis économiques et scientifiques sont nécessaires afin de développer la connaissance la plus appropriée des systèmes côtiers pour la prise de décision. Une approche à ces compromis consiste à utiliser un plan d'échantillonnage imbriqué, où de multiples techniques sont utilisées pour mesurer le changement morphologique à diverses échelles.

Traduit par Ruggiero et al., 2000.

Ceci est d'autant plus important à l'heure où les défis posés par le changement climatique exigent des choix dont les coûts économiques et sociaux imposent des sacrifices immédiats en faveur des générations futures, ce qui devrait se traduire par le maintien ou, mieux encore, le renforcement de la résilience côtière.

Les acteurs

La Gestion Intégrée des Zones Côtières (GIZC) étant un processus participatif, la connaissance de l'état du littoral et des scénarios qui se dessinent pour les prochaines années / décennies doit être l'héritage de tous les acteurs de cette action : de ceux qui sont appelés à planifier le développement des territoires côtiers à ceux qui ont la tâche de planifier des interventions individuelles, mais surtout ceux qui vivent, développent des activités sociales, économiques et de loisirs dans cette partie du territoire (Williams et Micallef, 2009).



Southern Maine Beach Profile Monitoring Volunteer Manual
(foto K.A. Byron)

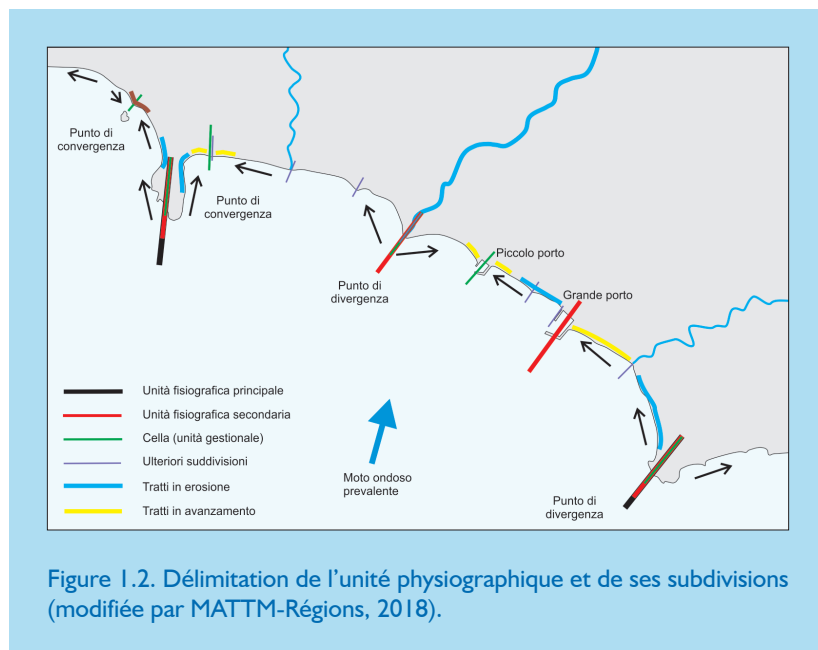
Aujourd'hui, c'est nous qui mesurons

Une forme de participation active des parties intéressées au processus de gestion côtière est leur implication dans le suivi de l'évolution de la plage. Dans de nombreux pays, comme les États-Unis et l'Australie, des groupes de volontaires sont actifs qui, après une phase d'apprentissage des simples méthodologies de levé et des processus qui façonnent le littoral, prennent en charge des mesures périodiques, en particulier des profils topographiques soutenus par des repères géoréférencés. Les données sont ensuite introduites dans une base de données à la disposition de la communauté locale et des organismes qui effectuent le suivi à longue distance. L'un des effets positifs de cette activité est que les bénévoles combrent le fossé entre les communautés locales et les chercheurs.

Si les autorités territoriales à différents niveaux sont chargées d'identifier les enjeux potentiels et critiques des territoires, de planifier les interventions, de trouver les financements et de réaliser les projets, les citoyens individuels ou associés ont le droit de connaître tous les éléments et de participer à tous les actes du processus de gestion, droit qui devient à tout moment un devoir, tant pour apporter leur propre contribution des idées que pour partager la responsabilité des choix.

La zone de suivi

Le suivi, dont la fréquence et la résolution varient en fonction des différents problèmes, doit être effectué sur toutes les côtes. Pour les plages, la zone de référence est l'unité physiographique, qui englobe le trait de côte à l'intérieur duquel les échanges sédimentaires peuvent avoir lieu et qui n'a aucun échange avec les traits adjacents (Fig. 1.2).



Du point de vue sédimentologique, il s'agit d'un système fermé, même si les pertes vers les grands fonds peuvent se produire au détriment des fractions fines, introduites par les rivières du système côtier ou produites par l'abrasion entre granules plus grossiers. Les limites le long de la côte sont généralement constituées de promontoires avec des eaux profondes devant eux ou de ports qui s'étendent au-delà de la profondeur à laquelle les vagues peuvent déplacer les sédiments de fond (profondeur de fermeture).

Pour évaluer l'efficacité et l'impact des ouvrages maritimes, le trait à surveiller peut être moins étendu, mais il doit néanmoins aller bien au-delà de la zone d'influence prévisible de l'ouvrage.

Les temps du suivi

S'il est finalisé à la connaissance pour gouverner, le suivi de l'évolution des côtes ne peut avoir de limites temporelles, mais peut accompagner, éventuellement avec une intensité différente, la vie sociale, économique et politique des communautés côtières (Fig. 1.3).

Alors que la collecte des données sur l'état actuel et futur du littoral peut être planifiée et mise en œuvre de manière structurée, l'« histoire » du littoral peut être reconstruite non seulement sur la base d'anciens levés et textes écrits, mais aussi avec l'aide de la « mémoire » des citoyens qui sont non seulement impliqués mais aussi partie active de cette reconstruction.

C'est une condition préalable et un élément essentiel pour toute participation future au processus décisionnel.

Les temps d'acquisition, de traitement et de diffusion des données seront définis en fonction des problèmes de chaque territoire, passant d'un suivi à long terme, pour connaître l'état et les tendances évolutives de chaque trait de côte, même celles apparemment stables ou en progradation, à un suivi à haute fréquence pour les traits de côte particulièrement exposés au processus érosif et pour ceux soumis à des interventions de défense et de rééquilibrage. Les *Directives Nationales pour la protection des côtes contre l'érosion et les effets du change-*

ment climatique produites par la Table Nationale sur l'Érosion Côtière (MATTM-Régions, 2018) fournissent des indications générales sur le calendrier des enquêtes en fonction des différents objectifs du suivi.

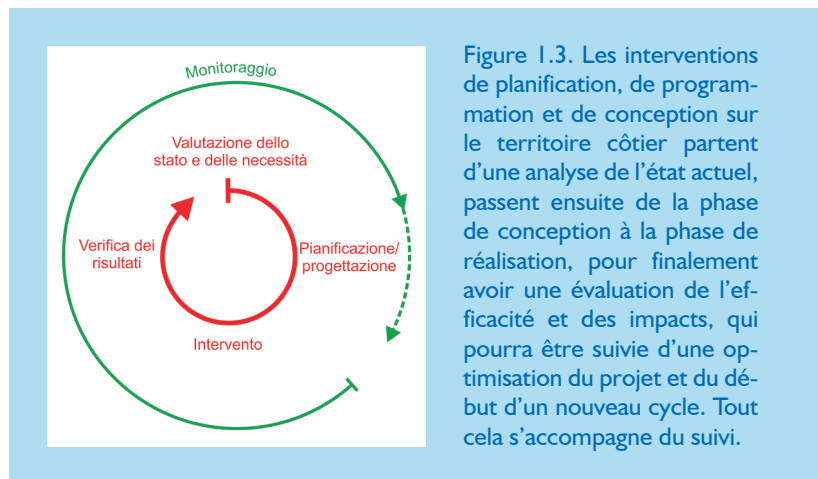


Figure 1.3. Les interventions de planification, de programmation et de conception sur le territoire côtier partent d'une analyse de l'état actuel, passent ensuite de la phase de conception à la phase de réalisation, pour finalement avoir une évaluation de l'efficacité et des impacts, qui pourra être suivie d'une optimisation du projet et du début d'un nouveau cycle. Tout cela s'accompagne du suivi.

La connaissance de l'état du littoral et de sa réponse aux interventions éventuelles doit toujours être partagée avec les différents acteurs impliqués dans le processus de gestion du territoire, à travers des rencontres ciblées, la mise à disposition des données sur des plateformes informatiques, mais aussi avec des méthodes traditionnelles (presse, télévision, brochures).

Défense, Adaptation ou Retrait

Hamlet avait déjà un choix difficile entre deux possibilités, le nôtre est encore plus difficile, qui nous voit devant trois chemins différents (Fig. 1.4). De plus, entre être et ne pas être, il n'y a pas de solutions intermédiaires, alors qu'entre *protéger* les côtes et les établissements humains que nous y avons construits, les *adapter* à des scénarios futurs, ou les *faire reculer*, nous pourrions choisir des solutions intermédiaires infinies.

Mais ce qui rend le choix que nous devons faire plus difficile, c'est que, contrairement au choix de Hamlet - qui n'avait de conséquences que pour lui-même - le nôtre concerne aussi les générations futures.



Figure 1.4. Défense - Adaptation - Retrait : Les trois stratégies développées pour répondre à l'élévation du niveau de la mer peuvent également être appliquées en réponse à l'érosion côtière causée par d'autres causes (par Williams et al., 2018).

Dans tous les cas, il y a une quatrième voie, qui est celle que nous aurions dû prendre lorsque le phénomène s'est manifesté, qui envisage l'intervention sur les causes de l'érosion côtière (Fig. 1.5).



Figure 1.5. Le triangle classique Défense - Adaptation - Ligne de retrait est en fait une pyramide avec un angle vif qui représente les interventions visant à réduire les causes de l'érosion (Williams et al., 2018).

Une lecture et une interprétation claires des processus en cours et la disponibilité de données et de modèles pour simuler des scénarios futurs est une condition préalable indispensable pour choisir la meilleure façon, tout en étant conscient que ce ne sont pas seulement les indicateurs physiques qui détermineront nos choix.

Maintenant nous savons que nous ne savons pas

Une enquête menée dans les territoires partenaires du Projet MARE-GOT a mis en évidence que le suivi de l'évolution du littoral n'a pas toujours bénéficié de l'attention nécessaire de la part des autorités territoriales responsables de la planification, de la programmation et de la gestion du territoire côtier.

Avant d'entreprendre un monitoring, s'assurer de disposer su capital	
Humain:	Personnel technique possédant une préparation adéquate
Organisationnel:	coordination entre les différents secteurs impliqués dans le processus de monitoring
Social:	confiance des intervenants
Technique:	outils adéquats d'acquisition des données et programmes pour leur traitement
Relationnel:	capacité de diffuser des données à divers niveaux de complexité selon les caractéristiques des différents utilisateurs
Financier:	ressources adéquates et garanties dans le temps

Ce n'est que récemment, et seulement dans certaines régions, que des études topographiques et bathymétriques sont prévues et réalisées avec des protocoles bien définis, alors que dans de nombreux territoires, on ne connaît même pas l'ampleur et l'intensité du phénomène érosif.

Au niveau central, on constate très souvent un manque de données synchrones et uniformes, en termes de méthodologie d'enquête et de traitement, qui permettent de fournir un cadre fiable afin de pouvoir quantifier le phénomène et trouver et destiner les ressources sur la base des besoins réels.

Indicateurs SMART

Simple Les indicateurs doivent être simples, faciles à comprendre et significatifs pour l'utilisateur. Il est inutile de recueillir des informations complexes pour lesquelles il n'existe aucune capacité d'analyse ou de volonté d'utilisation de la part de ceux qui doivent élaborer des plans d'adaptation.

Measurable Les indicateurs doivent être quantifiables et les mesures doivent garantir la répétabilité et l'exactitude ; il faut également tenir compte de la disponibilité des ressources (financières, techniques et temporelles) nécessaires pour les collecter à l'avenir.

Action-oriented Les indicateurs adoptés doivent être choisis en fonction de l'usage qui en sera fait. Des mesures spécifiques pourront être prises dans des situations sensibles. Par exemple, dans le cas des projets d'extension des plages, les activités économiques liées à l'engraissement des plages devraient être également surveillées ainsi que leur utilisation.

Relevant Les indicateurs et les mesures connexes doivent être pertinents par rapport aux objectifs, aux stratégies et aux critères de rendement. Ils doivent également refléter de manière adéquate les progrès réalisés en vue d'obtenir des résultats à long terme.

Time sensitive Les indicateurs doivent être sensibles aux changements dans le temps. Certaines conditions changent lentement, mais présentent une grande variabilité de fréquence (p. ex. les conditions climatiques) et les résultats sont difficiles à évaluer à court et à moyen terme. Dans de tels cas, il faut identifier des produits intermédiaires qui permettent d'obtenir des résultats à long terme.

*A Guide to Monitoring and Evaluating Coastal Adaptation
Australian Department of Climate Change and Energy Efficiency*

Lorsqu'elles sont disponibles, les informations sont rarement transmises aux parties prenantes de manière claire et en temps réel, ce qui peut conduire à s'opposer aux solutions proposées et à contester les données sur lesquelles les projets sont développés.

De tout cela découle la nécessité de faire du suivi une action concertée, partagée et fondée sur des méthodes certifiées.

Les coûts du monitoring

Les interviews réalisées dans le cadre du partenariat du Projet MARE-GOT n'ont pas permis d'estimer le coût de cette activité ni le montant dépensé chaque année dans les différentes régions. Cela dépend de nombreux facteurs, tout d'abord du fait que les suivis effectués au cours des dernières décennies ont été gérés par différentes autorités territoriales ou instituts de recherche, mais l'absence d'une méthodologie commune et les différents degrés de détail utilisés rendent également les rares données disponibles difficiles à comparer.

Le coût d'une analyse topo-bathymétrique *singlebeam* avec des trajets espacés de 50 m pour un kilomètre de littoral et une bande de 500 m est d'environ 2 000 € ; alors que la même analyse de couverture complète avec instrumentation *multibeam*, rendu avec une grille de 0,5 x 0,5 m, a un coût trois fois supérieur.

Évidemment, les coûts sont réduits ou augmentés en fonction de la longueur totale à mesurer. Il faut y ajouter environ 50 % pour le traitement et l'interprétation des données.

La partie sédimentologique, entre l'échantillonnage (par exemple $n = 50$), l'analyse en laboratoire, le traitement et l'interprétation coûte environ 10.000 €/km.

Pour surveiller les effets des ouvrages de défense et la stabilité des engraisements artificiels, la résolution spatiale et temporelle doit être nettement supérieure. En première approximation, on peut estimer qu'un bon suivi morphologique et sédimentologique, réalisé sur trois ans, coûte de 1% à 5% du coût de l'intervention.

Bibliographie

Maine Sea Grant, UM Cooperative Extension, Maine Geological Survey and Maine Coastal Program. Southern Maine Beach Profile Monitoring Volunteer Manual. Mapping the State of Maine's Beaches <http://www.seagrant.umaine.edu/files/pdf-global/06volman.pdf>

MATTM-Régions, 2018. Linee Guida per la Difesa della Costa dai fenomeni di Erosione e dagli effetti dei Cambiamenti climatici. Document préparé par la

Table Nationale sur l'Érosion Côtière MATTM-Régions avec la coordination technique de ISPRA, 309 pages.

Piccardi M. et Pranzini E., 2018. Il monitoraggio costiero mediceo-lorenese: le torri e i capisaldi per il controllo dell'avanzamento del litorale di San Rossore. Code harmonique, pages 186-192.

Ruggiero P., Voigt B., Kaminsky G., 2000. Beach monitoring for enhanced decision-making. Coastal Society 17th Conference, Coasts at the Millennium, 9-12 July 2000, Portland, Oregon.

Thomsen D.C., Smith T.F., Jacobson C., Mangoyana R.B., Preston B.L., Maloney M., Withycombe G., Armstrong I., Norrie E., 2014. A Guide to Monitoring and Evaluating Coastal Adaptation. Australian Department of Climate Change and Energy Efficiency, 2014. 2nd edition. <https://www.sydneycoastalcouncils.com.au/sites/default/files/A-Guide-to-Monitoring-and-Evaluating-Coastal-Adaptation.pdf>

Williams A. et Micallef A., 2009 (rédigé par). Beach management. Principles & Practice. Earthscan, Londres, 445 pages.

Williams A, Rangel-Buitrago N.G., Pranzini E., Anfuso G., 2018. The management of coastal erosion. Ocean and Coastal Management, 156 : 4-20.



L'acquisition des données

Prémisse

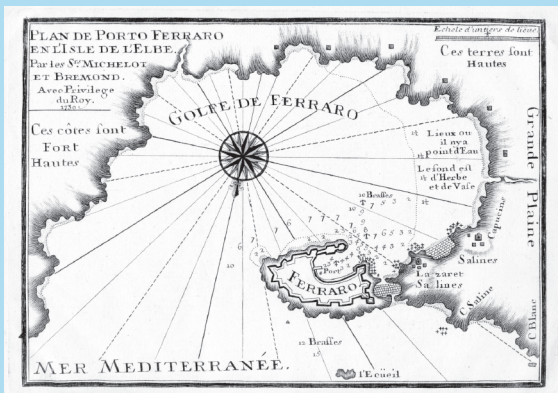
Le monitoring côtier, comme nous l'avons vu, a une longue histoire, même si au cours des siècles passés il visait davantage à évaluer l'avancée du littoral (avec perte d'efficacité des tours de guet et avec l'ensablement des ports) et la connaissance des fonds marins (pour les activités maritimes, tant commerciales que militaires) plutôt que de décrire le processus érosif.

La cartographie pré-géodésique nous donne des informations utiles sur la forme des côtes, mais ne permet pas de quantifier les variations morphologiques (Fig. 2.1). Il convient également de noter que l'utilisation de ces documents, sans une connaissance approfondie de leur contexte et des buts pour lesquels ils ont été produits, peut conduire à des évaluations erronées. L'utilisation de la copie des cartes précédentes en mettant à jour la date était assez fréquente et seul un expert en cartographie ancienne ne peut être induit en erreur.

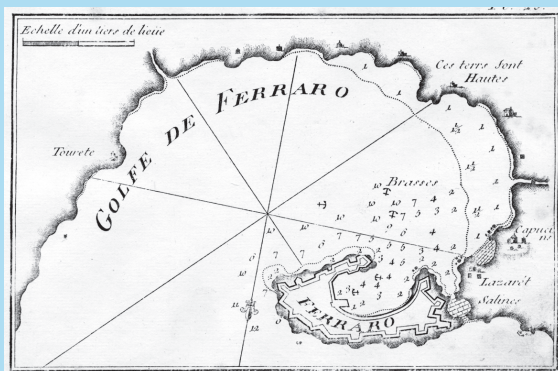
Les cartes « géométriques » sont le résultat d'une évolution significative des techniques de détection et de description du territoire et peuvent servir de base à une évaluation semi-quantitative des transformations subies par les bandes de côte.

Avec l'introduction des cartes cadastrales et des cartes topographiques à grande échelle (jusqu'à environ 1 : 25 000), la détermination de la position et de la forme de la ligne de rivage et d'autres éléments morphologiques côtiers (dunes, étangs, lagunes), ainsi que les structures anthropiques, atteignent les niveaux qui nous permettent d'évaluer les variations planimétriques avec une rigueur de l'ordre de quelques mètres.

Un autre problème est celui lié aux données que l'on pourrait définir comme « consolidées », c'est-à-dire celles collectées dans le passé et dont on utilise aujourd'hui les élaborations faites alors. Les méthodes d'analyse n'étaient pas aussi rigoureuses que les méthodes actuelles, et parfois l'auteur n'avait pas les mêmes intentions. De plus, les données pouvaient passer d'une publication à l'autre, dans laquelle de nouvelles données étaient ajoutées. Une révision des travaux des « anciens maîtres » peut conduire à une vision différente des processus décrits dans le passé.



Michel e
Bremond,
1730



Joseph Roux,
1795

Figure 2.1. Deux cartes du golfe de Portoferraio (île d'Elbe) dans lesquelles le cours de la ligne de rivage est significativement différent, mais les données bathymétriques presque toutes identiques, en position et en valeur, indiquent que la carte de 1795 dérive de celle de 1730.

Grande, moyenne et petite échelle : une grande confusion !

L'échelle d'une carte est définie comme le rapport entre la distance entre deux points dans la réalité et la distance qu'ils ont sur la carte. Une carte à grande échelle est donc une carte dans laquelle ce rapport est élevé et, en plaçant dans toutes les cartes le numérateur égal à 1, le dénominateur est petit (p. ex. 1 : 5 000). Au contraire, une petite échelle sera donnée par un plus grand dénominateur (p. ex. 1 : 1 000 000 000). Pour une même taille de feuille, une carte à petite échelle représente une très grande partie de la surface de la Terre, avec peu de détails, tandis qu'une carte à grande échelle représente une plus petite partie, mais avec plus de détails.

Malheureusement, dans l'usage courant, les termes sont souvent inversés.

Un exemple vient d'une nouvelle reconstruction de l'évolution de la ligne de rivage du nord de la Toscane, en partie en désaccord avec ce qui ressort des études menées avant la Seconde Guerre mondiale. La description qui avait été faite de l'évolution du littoral entre la fin du XIXe siècle et les premières décennies du XXe siècle est d'une grande richesse et constitue un bagage cognitif indispensable pour l'analyse de cette côte, mais l'attribution d'un état érosif à certains traits de côte ne soutient pas la comparaison entre les mêmes documents cartographiques utilisés alors mais réalisée de nos jours dans un environnement SIG après les avoir numérisés et géolocalisés (Piccardi, 2017).

En ce qui concerne la ligne de rivage, sa variabilité intrinsèque doit être prise en compte et il n'est pas possible de savoir dans quelle mesure les données recueillies en un instant peuvent être représentatives de sa position moyenne dans la période (jour, mois ?) de référence de ce levé.

Cependant, il reste le problème de la définition de ce que l'on entend par ligne de rivage et de la rigueur de son positionnement.

Parmi les différents indicateurs, on estime que l'intersection de la surface de la mer moyenne avec la surface topographique est l'élément géométrique le plus significatif (Fig. 2.2). D'autres références (*ligne de déchets, ligne de végétation, pied de dunes*, etc.), bien que plus faciles à identifier, ne s'appliquent pas à tous les traits de côte et souffrent des conditions météorologiques marines qui peuvent même précéder de quelques mois le moment du levé.

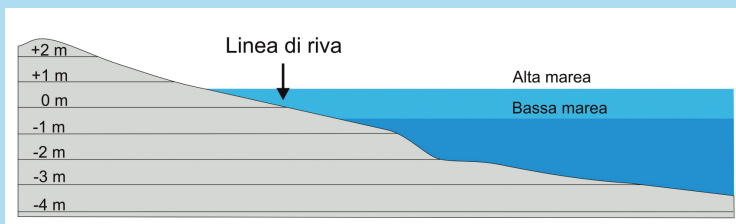


Figure 2.2. La ligne de rivage coïncide avec l'isohypse zéro (à savoir l'isobathe). Sa position est indépendante de la marée astronomique et barique et de la houle.

La méthode la plus rigoureuse aujourd'hui pour déterminer la position de la ligne de rivage à un moment précis (une position qui peut aussi être au-dessus ou en-dessous du niveau momentané de la mer) est le levé GPS en mode RTK, qui permet de suivre l'isohypse zéro et de définir la position planimétrique par points distincts correctement espacés.

Les images de télédétection (satellite, avion, hélicoptère, drone) permettent un levé rapide et dans certains cas moins coûteux, mais les changements à court terme du niveau de la mer (marée astronomique et barique) rendent difficile la détermination de la position de la ligne de rivage, qui dépend également de la pente de la plage. La limite terre-mer est par ailleurs difficile à reconnaître en présence de vagues et, en mer calme, à cause de la transparence de l'eau.

Les levés laser de la plage émergée et multibeam de la plage submergée (s'ils sont effectués respectivement à marée basse et à marée haute) permettent un positionnement acceptable de la ligne de rivage.

Ces deux méthodes, qui constituent une évolution des levés topographiques traditionnels sur terre et en mer, peuvent valablement remplacer le levé GPS si, en plus de la ligne de rivage, il est nécessaire d'acquérir la morphologie de la plage émergée et des fonds marins, même si la rigueur est légèrement inférieure.

Rigueur et précision : une autre confusion !

On entend par rigueur à quel point une mesure donnée (généralement la moyenne de plusieurs mesures) est proche de la valeur réelle (que cependant nous ne pouvons pas connaître exactement !).

La précision nous dit à quel point les mesures indépendantes d'un même élément sont proches les unes des autres (elles peuvent être proches les unes des autres mais loin de la valeur réelle !).

Aujourd'hui, la morphologie de la plage émergée, avec sa représentation à travers un modèle numérique du terrain, est facilement obtenue avec des levés au laser depuis le sol, des levés photogrammétriques à partir d'une antenne ou d'un drone, ou avec des levés Lidar depuis une plate-forme aérienne ou satellite.

Ce qui nous intéresse, ce n'est pas tant l'instrument utilisé ou l'endroit où il est installé, mais la rigueur des mesures en position (x, y) et en hauteur (z) des points détectés. La résolution spatiale des données, c'est-à-dire la densité des points acquis, est également importante.

En ce qui concerne le levé de la plage submergée, qui doit être effectué jusqu'à la profondeur de fermeture, il est à noter que les données collectées avec un levé *single beam* peuvent donner une morphologie avec rigueur (et économique) si le fond est plat ou avec des barres longitudinales (Fig. 2.3). En présence de barres festonnées, plus la fréquence est élevée, plus les profils doivent être rapprochés, tandis qu'avec des fonds rocheux et pour les ouvrages de défense submergés, le relief *multibeam* est la seule technique capable de donner une représentation fidèle.

Les levés aériens Lidar ont montré une rigueur à des profondeurs d'environ 30 cm, permettant de décrire la morphologie des fonds marins, mais non d'évaluer les variations volumétriques de la dépose sédimentaire.

L'importance d'étendre la zone de suivi jusqu'à la profondeur de la fermeture est donnée par le fait que la partie submergée de la plage est beaucoup plus grande que la partie émergée (Fig. 2.4) et une dé-

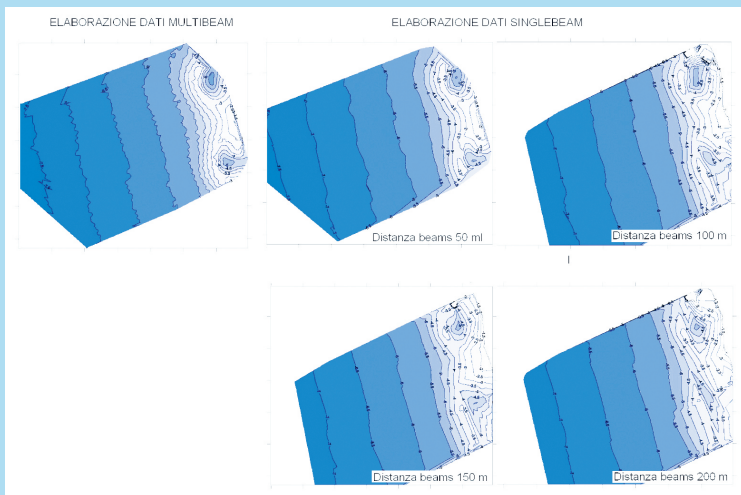


Figure 2.3. Carte bathymétrique d'un trait de mer au nord de Bocca d'Arno (Toscane) : à gauche d'après un levé bathymétrique *multibeam*, dans les autres images d'après des levés *single beam* avec des routes de 50, 100, 150 et 200 m (de Beachmed). On note comment la représentation de la morphologie du fond marin produite par un relief *single beam* avec un espacement réduit est très similaire à celle détectée avec un *multibeam*.

termination de la variation du volume des deux parties est fondamentale pour définir la tendance évolutive d'un trait de côte et l'efficacité des interventions d'engraissement des plages, ainsi que pour planifier les déversements d'entretien.

Il faut se rappeler que les données bathymétriques ont une rigueur estimée, dans le meilleur des cas, d'environ 5 cm. Cela signifie que deux levés consécutifs pourraient entraîner une augmentation ou une diminution d'environ 10 cm de la superficie de la plage submergée. Si la profondeur de fermeture est de 1 km de la rive, le volume apparemment manquant ou en excès est de 100 m³ par mètre de plage, soit l'équivalent d'un engraissement moyen.

C'est pourquoi les mesures bathymétriques doivent être effectuées avec la plus grande attention et, pour améliorer leur rigueur, des

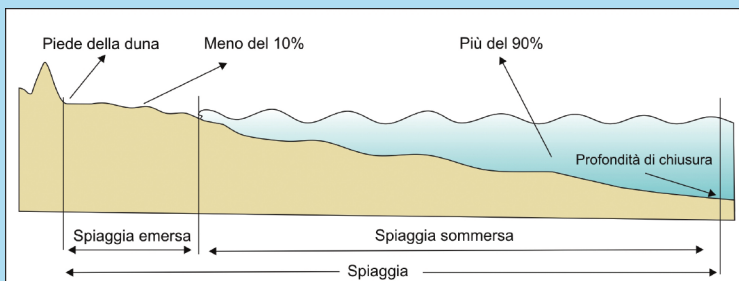


Figure 2.4. La profondeur de fermeture est définie comme la profondeur à laquelle les profils bathymétriques répétés dans le temps le long d'un même transept se « ferment », c'est-à-dire qu'ils ne présentent pas de variations significatives de profondeur.

Compte tenu de la rigueur des levés bathymétriques, il peut y avoir des variations apparentes de profondeur d'environ 10 cm même au-delà de la profondeur de fermeture, avec des valeurs encore plus grandes à mesure que la profondeur du fond marin augmente.

La profondeur de fermeture est considérée aussi comme la profondeur au-delà de laquelle les effets de la houle sur le transport sédimentaire sont négligeables. Sur cette base, elle peut être déterminée en fonction des caractéristiques de la houle selon la formule de Hallermeier (1981) : $dc = 2,28 H_{1,2} - 68,5 (H^2 / g T_p^2)$ où $H_{1,2}$ est la hauteur significative des vagues (H_m0) estimée au large et dépassée au maximum 12 heures par an) et T_p la période de pointe relative. Il est bon de la calculer sur une série historique non inférieure à 10 ans.

points de contrôle peuvent être insérés dans le fond marin, constitués par exemple de plaques métalliques installées sur des poteaux bien fixés dans le fond marin (Fig. 2.5). Au cours des levés, le navire devra ensuite traverser ces points de contrôle en mer (Sea Control Point) et utiliser la profondeur mesurée pour élever ou abaisser la bathymétrie de la quantité nécessaire pour faire coïncider les points de contrôle. Lors des levés effectués dans le cadre du projet BeachMed-e (2009), l'installation de trois points de contrôle (à -3m, -5m et -7m) a permis d'augmenter la rigueur des données bathymétriques à 3 cm.

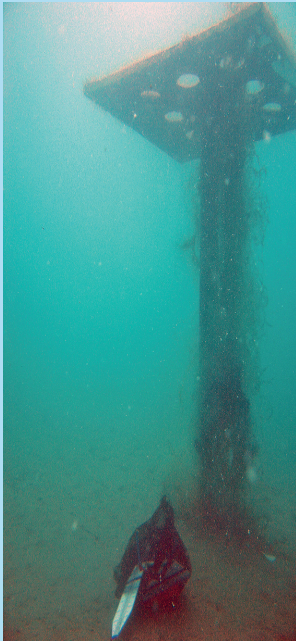


Figure 2.5. L'un des points de contrôle en mer installés sur la plage submergée au nord de l'embouchure du F. Arno. Le poteau doit être fixé au fond à l'aide d'un carottier à vibrations et la plaque doit avoir des trous pour réduire les forces de traction ascendantes et descendantes qui se produisent lors du passage des vagues. De plus, sa partie supérieure doit être nettoyée périodiquement, car les incrustations et les algues qui risquent de s'y développer peuvent augmenter sa hauteur. Il s'agit donc d'appareils à installer dans les cas où une grande rigueur des mesures bathymétriques est exigée.

Le monitoring des sédiments

Plus complexe encore est le suivi de l'évolution sédimentologique de la côte, qui doit être fait pour évaluer à la fois l'efficacité et l'impact des ouvrages de défense, et la stabilité des engraisements artificiels. Même dans ce cas, les *Lignes directrices pour la défense du littoral* (MATTM-Régions, 2018) fournissent des indications sur la manière de prélever des échantillons et de les analyser ; nous voudrions ici souligner l'importance de cette composante du suivi et expliquer quelles informations peuvent en résulter.

Les ouvrages de défense, quel que soit leur type, interagissent avec le transport des sédiments, soit en modifiant les niveaux d'énergie de la houle, soit en interceptant les sédiments en transit.

Dans les deux cas, toutes les fractions granulométriques ne donnent pas une réponse égale, donnant ainsi à la plage des caractéristiques de texture différentes de celles d'origine (Fig. 2.6).



Figure 2.6. Follonica (Grosseto) : *tombolo* constitué de sable très fin formé à l'abri d'une falaise parallèle. Un projet récent a consisté à modifier la falaise en amenant la crête sous le niveau de la mer, déterminant ainsi une régularisation de la ligne de rivage avec l'élimination des *tombolos*, une légère augmentation des dimensions du sable et une amélioration de la qualité de l'eau.

Une réduction de l'énergie incidente favorise la sédimentation des particules les plus fines, ce qui peut rendre la plage poussiéreuse et les eaux de baignade turbides, le tout au détriment de la valeur touristique et balnéaire de la plage. Cela peut également être le signe d'une protection excessive du littoral, à tel point qu'une réduction du nombre d'ouvrages construits doit être envisagée.

Au contraire, les épis, qui interceptent les sédiments en transit, se comportent comme une série de tamis, faisant passer les sables les plus fins qui se déplacent vers le large et freinant les granules les plus grossiers, en particulier le gravier, qui se rapproche du littoral (Cipriani et Pranzini, 1990). En plus d'une asymétrie granulométrique entre la plage au-dessus du flux et en dessous du flux (Fig. 2.7), on vérifie aussi un engravement progressif de toute la côte parce que le gravier ralentit dans sa course le long de la côte. Une racine des épis à une altitude plus basse pourrait réduire ce phénomène.



Figure 2.7. Gravier accumulé du côté au-dessus du flux d'un épi sur la plage au sud de Marina di Cecina (Livourne).

Dans le cas d'engraissements artificiels, l'analyse de l'évolution des textures des matériaux déversés peut permettre d'évaluer l'adéquation du choix et de définir les caractéristiques granulométriques des sédiments à utiliser pour les prochains rechargements. Si des matériaux très hétérogènes ont été utilisés (avec une mauvaise classification, par ex. sable + gravier), l'action de la houle déterminera leur sélection avec séparation des différents composants (Fig. 2.8).

Ceci, en plus d'orienter le choix des sédiments les plus appropriés pour effectuer les rechargements, peut également suggérer une gestion appropriée de la plage pour assurer la meilleure utilisation du tourisme. Il sera alors possible d'établir un plan de gestion de la plage qui implique une redistribution, horizontale ou verticale, des matériaux plus grossiers qui peuvent rendre le séjour sur la plage moins agréable ou difficile d'accès à la mer.

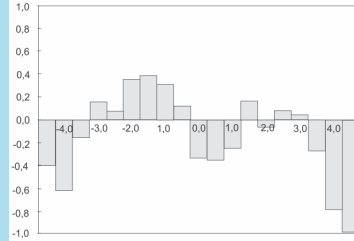


Figure 2.8. Engraissement de la plage de Cala Gonone (Sardaigne)
 Le graphique montre l'augmentation et la réduction des différentes fractions granulométriques des matériaux d'engraissement un an après l'intervention. Les matériaux plus grossiers sont restés submergés, tandis que les plus fins se sont éloignés ; les granules de dimensions comprises entre -3,0 et 1,0 phi (8-0,5 mm) ont nettement augmenté et sont ceux recommandés pour des éventuels rechargements sur la plage.

Bibliographie

BeachMed-e. 2009. La gestione strategica della difesa dei litorali per uno sviluppo sostenibile delle zone costiere del Mediterraneo. 3° Cahier Technique Phase C, GIER Graphic Srl - Rome (Italie), 164 pages.

Cipriani L.E., Pranzini E., 1990. Differenziazione granulometrica dei sedimenti di spiaggia emersa e sommersa quale conseguenza della costruzione di opere a mare alla foce del fiume Cecina (Toscana centrale). Bulletin Société Géologique Italienne, 109 : 471-480.

Hallermeier R. J., 1981. A Profile Zonation for Seasonal Sand Beaches from Wave Climate, Coastal Engineering, Vol. 4, 1981, pages 253-277.

MATTM-Régions, 2018. Linee Guida per la Difesa della Costa dai fenomeni di Erosione e dagli effetti dei Cambiamenti climatici. Versione settembre 2018 – Document préparé par la Table Nationale sur l'Érosion Côtière MATTM-Régions avec la coordination technique de ISPRA, 304 pages.

Piccardi M., 2017. L'erosione delle spiagge toscane nel XIX secolo: una revisione dei dati della letteratura. Études côtières, 27 : 123-124.



Élaboration et représentation des interventions

Prémisse

Le suivi de tout processus ne consiste pas seulement dans l'acquisition des données, mais aussi dans leur traitement, leur représentation et leur interprétation.

Pour que cette dernière puisse fournir des informations utiles pour la planification des zones côtières, leur gestion et la conception et la validation des interventions de défense, un plan de monitoring doit, dès sa définition initiale, tenir compte des objectifs qu'il fixe, des méthodes d'acquisition et de traitement des données et des formes sous lesquelles elles seront diffusées et utilisées.

La combinaison et la comparaison de données collectées occasionnellement et avec différentes méthodes permet rarement une évaluation claire des processus en place et ne peut donner les réponses exigées par le concepteur ou le planificateur.

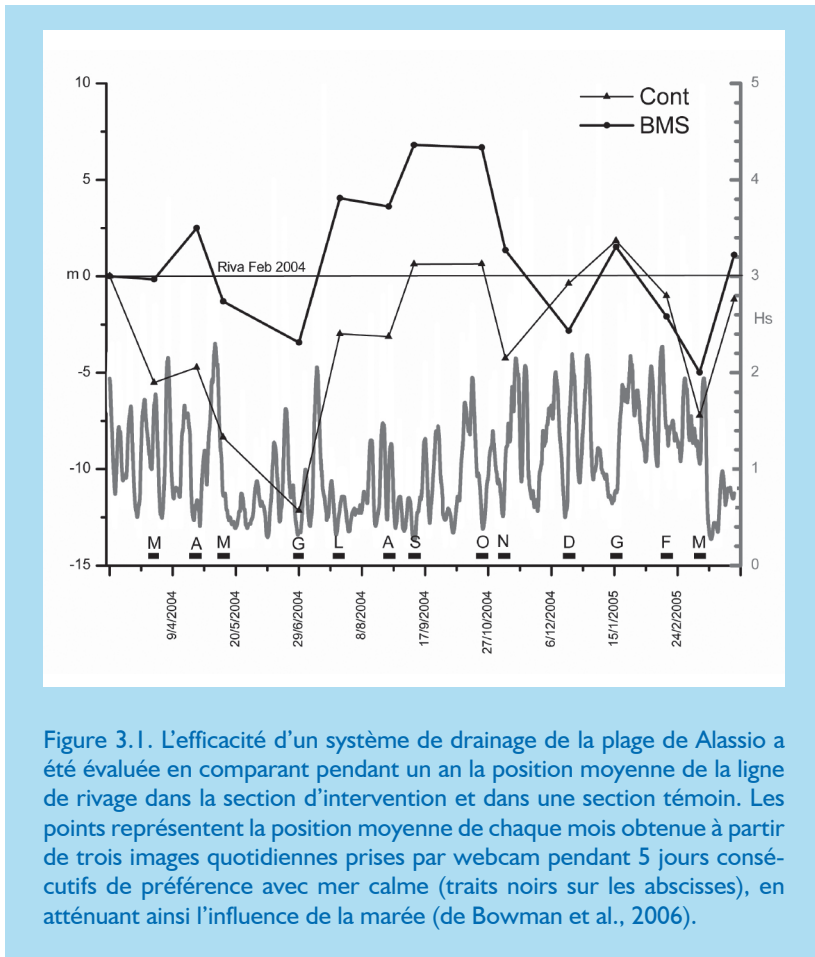
La ligne de rivage

L'un des principaux problèmes rencontrés dans l'élaboration et l'interprétation des données est lié à la variabilité des morphologies côtières (à la fois de la ligne de rivage et de l'ensemble de la plage émergée et submergée) qui se superpose aux évolutions à long terme.

La largeur d'une plage peut en effet varier de quelques mètres d'un jour à l'autre, sans que cela signifie que le taux annuel soit 365 fois plus élevé.

C'est pourquoi les levés doivent être réalisés dans des conditions comparables, dans la même saison (s'il y a une variabilité saisonnière dans la zone d'étude) et à une certaine distance des événements météorologiques marines, même d'ampleur modeste, à moins de vouloir vraiment évaluer leur impact.

La disponibilité de levés à haute fréquence (par exemple quotidiens) permet de tracer une ligne de rivage moyenne d'une période donnée, filtrant ainsi le signal dû à la variabilité intrinsèque de la plage (Fig. 3.1).



Le ligne de rivage d'une certaine année serait alors celle représentée par sa position moyenne obtenue à partir de celle des 365 jours relatifs. Il est clair que cela n'est possible qu'avec l'acquisition et l'extraction automatiques de l'information, possible avec des webcams et des logiciels dédiés.

Quel que soit la méthode pour obtenir le tracé de la position de la ligne de rivage, l'analyse de l'évolution du littoral partira d'une carte sur laquelle apparaissent les lignes relatives aux différentes périodes pour lesquelles

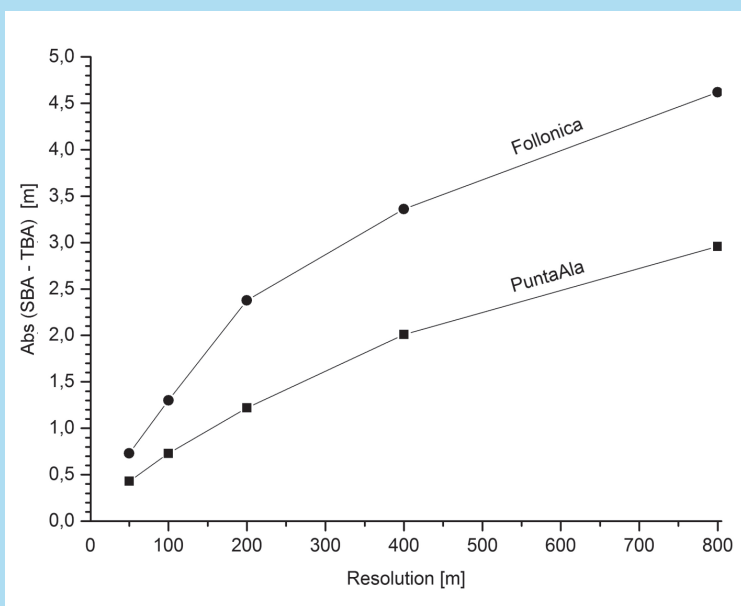


Figure 3.2. Différence entre les valeurs absolues de déplacement de la ligne de rivage obtenues en effectuant une analyse sur des transects (TBA) espacés de 50 à 800 m et celles résultant de la variation de surface calculée sur des portions de littoral de même longueur et centrées sur les mêmes transects (SBA).

Les valeurs indiquent de combien la mesure des transects s'écarte de celle qui tient compte de la superficie perdue ou gagnée sur chaque trait de la côte. Le littoral de Punta Ala a un développement régulier sans ouvrages de défense, tandis que le littoral de Follonica présente de nombreux éléments saillants derrière les falaises parallèles (Anfuso et al., 2016).

les données sont disponibles. Mais un faisceau de lignes de rivage dessinées sur une carte topographique n'est pas d'une grande aide pour lire les phénomènes, à moins que la tendance ne soit pas très marquée et régulière ; c'est pourquoi nous avons tendance à synthétiser l'information en graphiques qui permettent une lecture plus facile des processus.

Cette synthèse conduit à représenter le déplacement de la ligne de rivage sur chaque trait de côte (secteur) avec une valeur unique.

Les secteurs peuvent avoir des longueurs différentes, pour contenir des sections morphologiquement homogènes ou délimitées par des ouvrages maritimes, ou des longueurs égales, afin d'avoir des représentations graphiques équivalentes.

L'évolution subie par chaque secteur peut être représentée par celle enregistrée sur un transept orthogonal sur le rivage (un transept centré sur chaque secteur) ou par la variation de la superficie de la plage émergée sur l'ensemble du secteur.

L'analyse effectuée pour les profils ne fournit pas d'indications fiables à moins que les profils ne soient extrêmement denses et que la plage ne présente pas une tendance régulière (par exemple, absence de cuspidés). La disponibilité de logiciels libres fonctionnant dans un environnement SIG et analysant les mouvements de la ligne de rivage le long des profils (Digital Shoreline Analysis System, SDAS) a rendu cette méthode extrêmement répandue et conduit à son utilisation même dans les zones côtières sur lesquelles elle ne peut fournir des résultats rigoureux) (Fig. 3.2).

La représentation classique consiste en des histogrammes montrant le déplacement moyen (ou taux moyen de déplacement) de la ligne de rivage dans un intervalle de temps donné. Dans ce cas, la définition de la longueur des secteurs sur lesquels calculer cette valeur doit être faite avec soin, afin d'exclure les changements morphologiques « non pertinents », tels que la migration des pics, sans filtrer trop d'informations, ce qui effacerait les *points chauds* érosifs (Fig. 3.3).

Il est peut-être banal (mais nécessaire !) de rappeler que dans les graphiques se référant à des périodes différentes, l'échelle verticale doit être maintenue constante. Certains logiciels étendent l'échelle afin que toute la hauteur disponible soit occupée par la colonne qui affiche

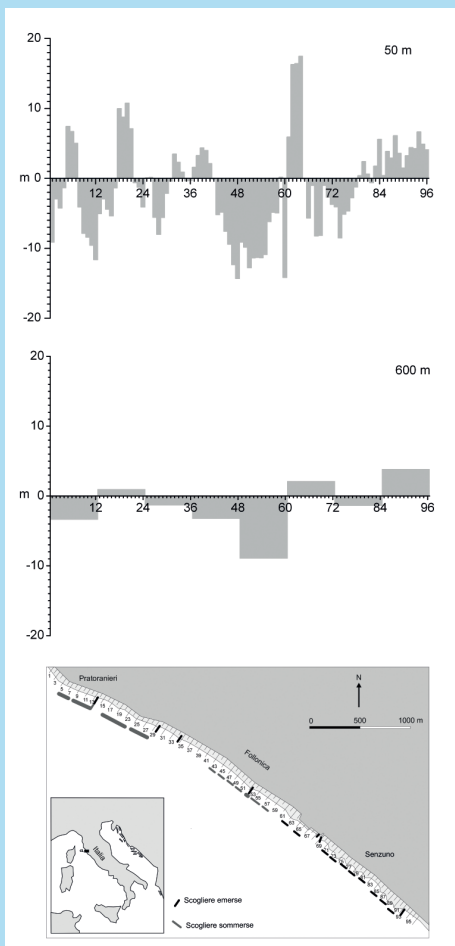
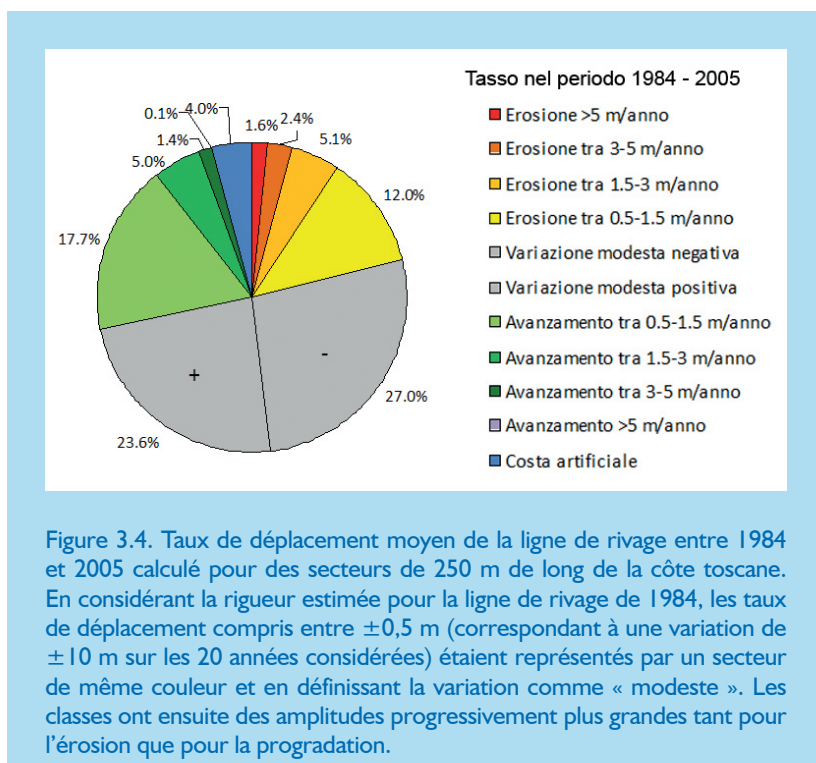


Figure 3.3. Représentation de l'ampleur et de l'intensité des processus d'érosion/sédimentation sur un trait du golfe de Follonica, calculées sur des secteurs de 50 m et 600 m pour la période 2000-2005 (extrait de Pranzini et Simonetti, 2008, modif.).

la valeur la plus élevée de ces données : c'est ainsi que dans tous les graphiques, le processus d'érosion ou d'accumulation semble toujours aussi intense. Si un changement d'échelle est nécessaire, il doit être expliqué dans la légende ou sur la cartouche.

Dans la représentation graphique et cartographique des données classées par intensité des processus, il convient de tenir compte de leur rigueur, en évitant de faire des classes trop étroites qui pourraient donner l'impression

d'une majeure rigueur. Il sera donc nécessaire de partir d'une classe dans laquelle les variations positives et négatives d'un même ordre de grandeur de rigueur sont regroupées (par exemple de +0,5 m à -0,5 m ; Fig. 3.4) qui représentera des traits de côte dont la tendance ne peut être déterminée avec certitude (autrement définis, incorrectement, comme stables).



En effet, étant donné le grand nombre de facteurs qui influencent le bilan sédimentaire d'une plage et le fait que les processus qui agissent ne sont pas liés par feed-back (par exemple, si la côte est en érosion, elle ne peut pas envoyer au fleuve le message « apporte plus de sable ! »), la stabilité de la plage peut être considérée statistiquement impossible. Même dans les relations avec les parties prenantes, donner l'impression qu'il s'agit d'un élément statique du territoire, peut induire des comportements qui entravent la gestion du trait de côte sur des périodes plus longues.

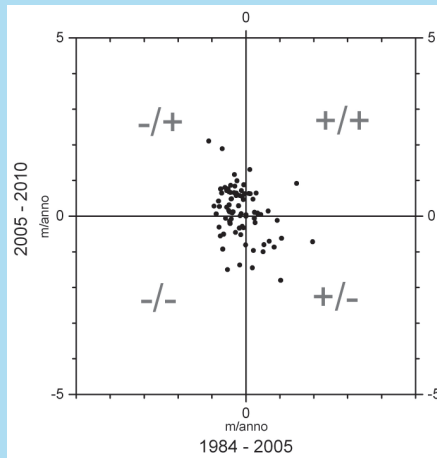


Figure 3.5. La comparaison entre l'évolution subie par les différents traits de côte au cours de deux périodes successives peut également fournir des informations utiles sur la fiabilité des données. Les points contenus dans les secteurs $-/+$ et $+/-$ ont eu des comportements opposés dans les deux intervalles de temps considérés. Cela peut correspondre à la vérité, mais souvent, si les variations sont modestes, cela peut être l'effet d'une rigueur inférieure à la tendance générale. Ce type d'erreur ne peut pas s'accumuler dans le temps : autour d'une ligne fixe si le premier relief donne un décalage dans un sens, il est probable que dans la période suivante il y aura un décalage inverse. Seuls les points contenus dans les secteurs $-/-$ et $+/+$ ont le même comportement dans les deux périodes et cela peut démontrer l'existence d'une tendance consolidée (Cipriani et al., 2013).

La plage submergée

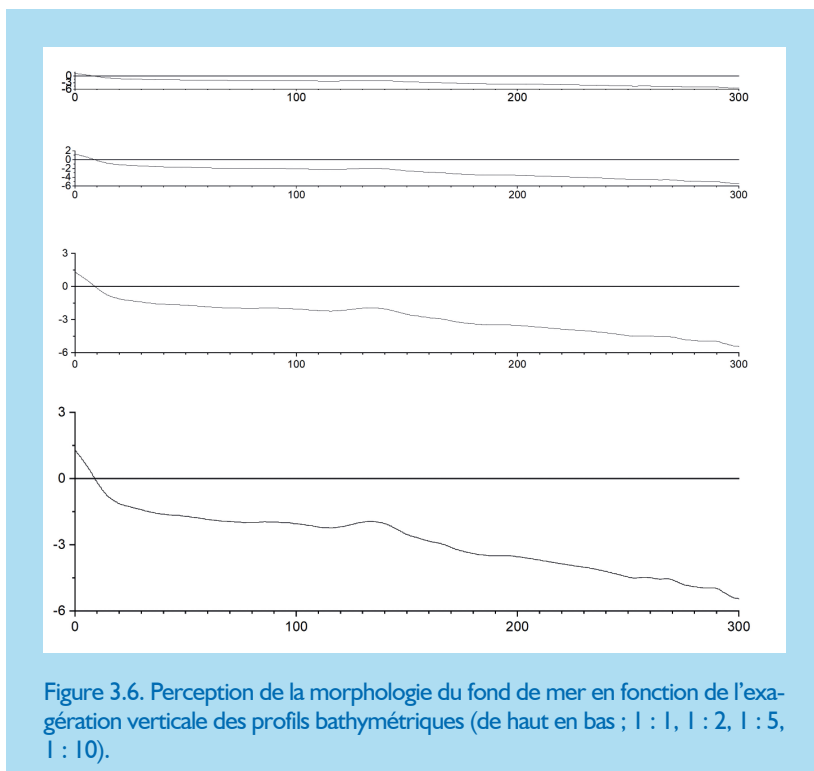
Le calcul du bilan sédimentaire doit tenir compte à la fois de la plage émergée et de la plage submergée, les deux plages constituant un unicum morphologique (voir Fig. 2.4). En effet, les variations de la ligne de rivage à haute fréquence sont presque exclusivement dues à la migration du sable le long du profil en raison des conditions météorologiques marines différentes. L'érosion côtière doit donc être entendue comme un déficit sédimentaire d'un trait de côte précis, plutôt que

comme la simple perte de surface de la plage émergée, même si, à moyen et long terme, les deux phénomènes sont liés.

La rigueur obtenue en mesurant les élévations de la plage submergée est bien inférieure à celle concernant la plage émergée, et sur de grandes étendues – qui s’étendent jusqu’au large – les données obtenues doivent être prises avec une grande prudence.

La représentation graphique du profil d'une plage

À l’exception de quelques points particuliers, comme la dune, les diverses crêtes de la berme et le step, la pente d’une plage est généralement modeste, surtout si elle est constituée de sable fin. Dans sa représentation par



profils, il n'est donc pas possible d'utiliser un rapport d'échelle de 1 : 1 pour les longueurs et les hauteurs, ce qui rendrait ces morphologies invisibles.

Une barre peut donner lieu à une différence de niveau de 1 ou 2 mètres, et même beaucoup plus sur certaines côtes, mais elle s'étend sur une distance de plusieurs dizaines, voire centaines de mètres. Si la longueur du profil, qui va généralement du pied de la dune jusqu'à la profondeur de fermeture, est de plusieurs centaines de mètres, une dune est une ondulation légère et presque imperceptible. Une exagération verticale est donc utilisée, qui ne peut toutefois pas dépasser certaines valeurs qui rendraient le profil complètement illisible (Fig. 3.6).

Le monitoring des fonds marins

La représentation classique des reliefs est donnée par le papier bathymétrique, dont la réalisation a des méthodes bien établies et dispose maintenant de logiciels très sophistiqués, malgré cela il est courant de trouver des documents dont la lecture peut conduire à des considérations erronées.

Tout d'abord, il convient de rappeler que lors du traçage des données isobathiques, il est nécessaire de tenir compte de la rigueur des données à représenter, et l'équidistance doit en être l'expression.

Une attention particulière doit être portée à l'interpolation des données dérivant de levés *single beam*, surtout s'ils sont effectués automatiquement. Comme la distance entre les routes est toujours plus grande que la distance entre les points acquis le long de celles-ci, des courbes bathymétriques ondulées sont souvent générées en phase avec les lignes de balayage.

De telles ondulations sont souvent présentes dans les anciens levés où le positionnement du navire se faisait depuis la terre, avec des tachéomètres et des théodolites, ou même en mer avec des cercles, et un opérateur donnait l'arrêt par radio à celui qui gérait le sondeur ; ce dernier marquait une ligne verticale le tracé. Le retard entre l'arrêt de l'opérateur au sol et celui du navigateur générait une traînée du point de mesure dans le sens de la navigation (de ou vers la terre) (Fig. 3.7). Cela peut aujourd'hui se vérifier lorsqu'il y a un déphasage entre l'instrument qui détermine la position et celui qui mesure la profondeur.

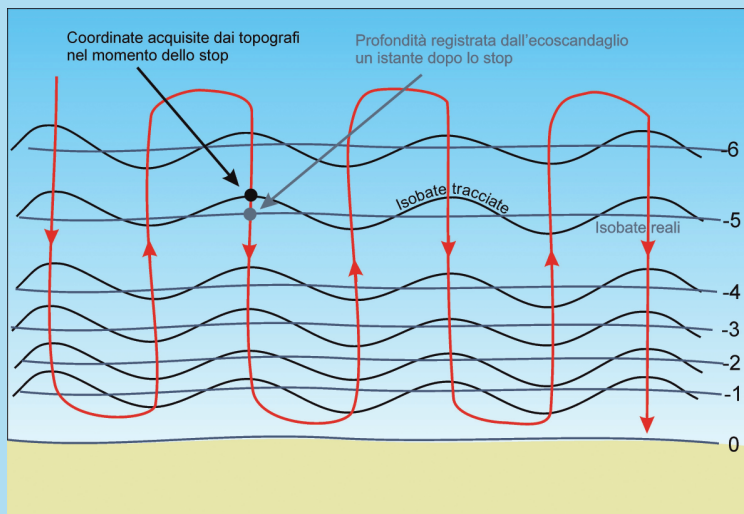


Figure 3.7. Ondulations des isobathes produites par le retard dans l'acquisition de la profondeur par rapport au positionnement du navire.

D'autres points critiques où l'interpolation est difficile sont ceux situés près des ouvrages de défense, où l'acquisition est interrompue. Dans ces cas, le cerveau aide plus que l'ordinateur !

Des artefacts peuvent également être générés lors de la production de cartes bathymétriques ou de modèles numériques des fonds marins à travers des levés *multibeam*. Le plus classique est constitué de barres « fantômes » parallèles aux voies de navigation, particulièrement visibles sur un fond marin régulier : sur les côtés du balayage, la distance entre le transducteur et le fond marin est déformée et est toujours plus ou moins grande sur les voies parallèles (Fig. 3.8). Dans certains cas, la présence de barres peut suggérer un état morphodynamique de la côte très différent de l'état réel.

Mais c'est certainement dans la comparaison entre les levés bathymétriques que le suivi montre toutes ses faiblesses, alors qu'il devrait être l'outil principal pour évaluer l'évolution d'un trait du littoral.

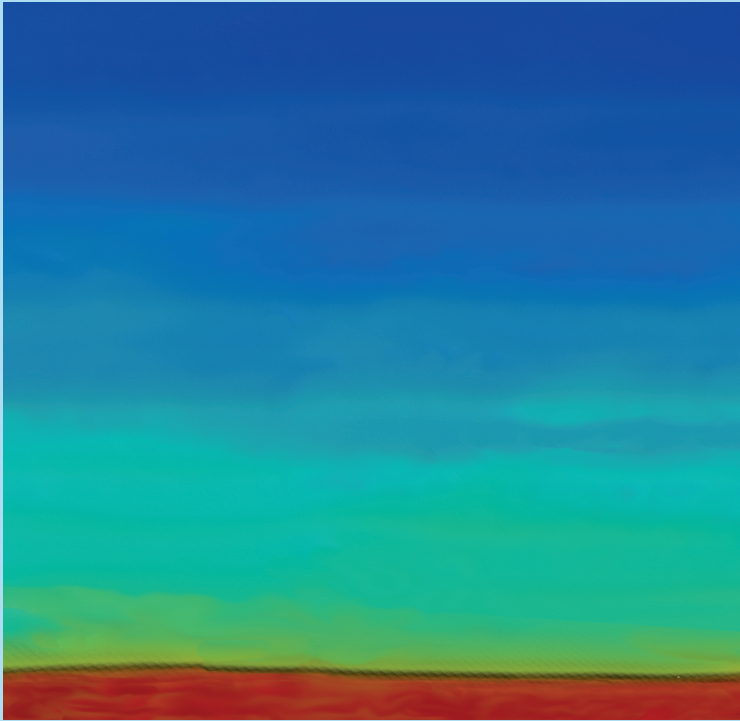


Figure 3.8. Barres « fantômes » formées dans un levé multibeam du fait de la non-verticalité du transducteur.

Nous avons déjà vu que la rigueur de chaque levé est d'environ 5-10 cm qui peuvent être un peu réduits avec des mesures spéciales mais rarement utilisées. Cela signifie que des variations de volume de 100 m³ par mètre de littoral peuvent être enregistrées si la profondeur de fermeture est d'un kilomètre de la côte : il serait donc possible de ne pas voir un volume de 100 000 m³ déversés sur un trait de côte d'un kilomètre de long !

Très souvent, les variations bathymétriques supérieures à la rigueur de la comparaison sont dues à des variations morphologiques de haute et moyenne fréquence, telles que la migration des barres depuis et vers la côte.

Volumes qui viennent et Volumes qui vont

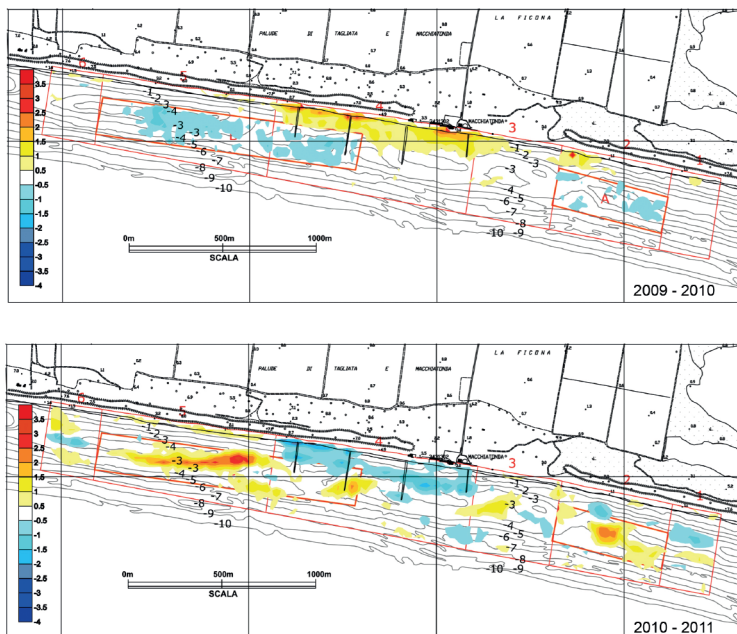


Figure 3.9. Suivi de l'intervention de rééquilibrage de la plage de Capalbio (Grosseto) avec la réalisation de 4 septas submergés en géoconteneurs et le rejet de 140.000 m³ de sable depuis la barre extérieure (GeoCoste s.n.c.).

2009-2010 : dans la zone du déversement, on remarque une augmentation de la plage émergée et des fonds marins immédiatement en face, alors qu'il est clair que les deux zones de dragage A et B ont été approfondies.

Le budget sédimentaire de l'ensemble de la zone de monitoring est négatif sur environ 87 000 m³, malgré le fait qu'il n'y a eu qu'une redistribution des matériaux d'un point à l'autre. L'évolution érosive d'environ 52 000 m³/an enregistrée au cours des 4 années précédentes n'explique que partiellement le déficit enregistré. Le secteur qui a reçu l'engraisement est toujours en excédent de 143 000 m³, ce qui prouve que l'erreur dans le calcul des volumes est induite par la grande extension de la zone considérée.

2010-2011 : dans le secteur d'intervention, on enregistre un déficit d'environ 95.000 m³, tandis que dans les zones de dragage, la barre a été reformée avec un dépôt d'environ 158.000 m³ de sable.

L'ensemble de la zone surveillée présente un excédent de 156 000 m³. C'est une valeur élevée, mais si elle est répartie sur les 1 529 605 m² de plage considérés, elle se traduit par une élévation moyenne de 10 cm, c'est-à-dire égale à l'erreur intrinsèque de ces comparaisons. Sur les deux cartes, la plupart des surfaces présentent des variations de hauteur de ± 50 cm, mais qui, en raison de leur extension, ont une influence considérable sur le volume total.]

Quelle que soit la valeur que nous calculons en termes de volume, ce sont précisément les variations de forme qui guideront l'interprétation des effets induits sur la plage par ce qui a été réalisé. De cette façon, il sera possible d'observer l'affouillement à la base des structures réfléchissantes, l'approfondissement en tête des épis ou sur les points où la formation de *courant de rupture* a été induite.

En ce qui concerne les engraisements artificiels, les données de monitoring pourraient d'abord contredire les estimations de pertes produites par les modèles numériques, ce qui pourrait entraîner une surestimation ou une sous-estimation des volumes nécessaires aux rechargements périodiques (Fig. 3.9). Étant donné que la rigueur des levés, et des comparaisons, est majeure sur la plage émergée et sur les fonds marins plus proches de la côte, où se déroule en fait l'engraisement de la plage, on peut envisager la possibilité d'estimer le bilan sédimentaire même s'il se limite à cette bande côtière.

Le suivi des engraisements artificiels pose moins de problèmes lorsqu'il s'agit d'interventions réalisées avec du gravier, dont la dispersion vers la haute mer est généralement modeste, voire inexistante. Un exemple en est la plage de Cavo (île d'Elbe), où la province de Livourne a réalisé un projet qui comprenait aussi un engraisement en gravier (Bartoletti et al., 2008) et qui, plusieurs années plus tard, a montré une grande stabilité (Fig. 3.10).

En dehors de la zone transfrontalière du projet MAREGOT, le cas de Pellestrina (Venise) est significatif, où le suivi a été programmé pour guider les interventions de rechargement, après avoir estimé qu'une plage trop large ou trop étroite aurait entraîné des pertes plus importantes. Il aurait donc été nécessaire d'intervenir avec des déversements supplé-

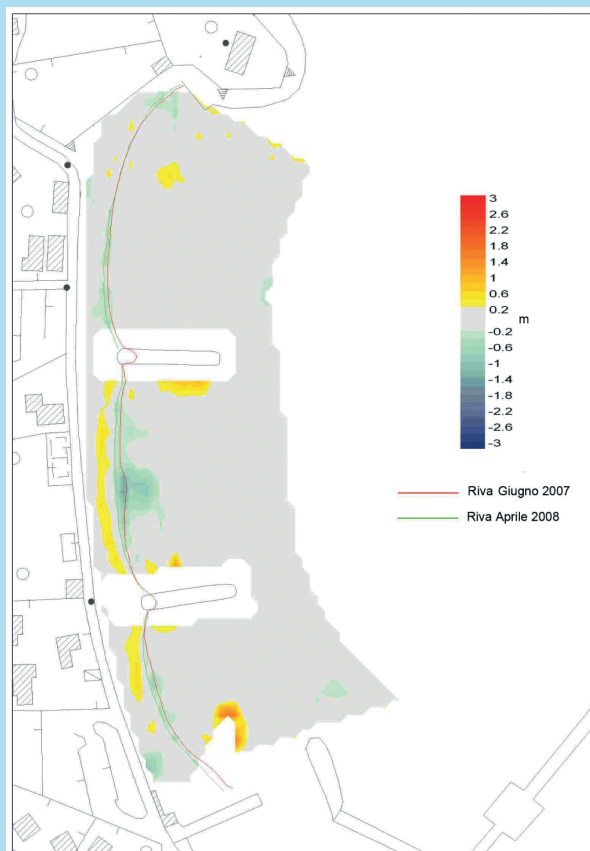


Figure 3.10. La reconstitution de la plage de Cavo (île d'Elbe)

La comparaison entre les levés topo-bathymétriques a montré le comportement des matériaux graveleux déversés : dans les 10 mois qui ont suivi l'intervention, il n'y a pas eu d'élévation significative des fonds marins, au contraire, les matériaux grossiers ont migré vers l'intérieur de la plage en créant une crête de berme de tempête assez forte.

Sur un point où le déversement s'était fait à l'aide d'un épi de rechargement (dans la partie centrale de la plage), les sédiments se sont déplacés vers la rive, laissant une pseudo-dépression dans le fond marin. Sur la base de ces informations, il a été possible de ne pas envisager d'opérations de rechargement périodique, même si le monitoring s'est poursuivi avec une fréquence décroissante. Variations bathymétriques intervenues entre juin 2007 et avril 2008

mentaires pour la maintenir dans ses dimensions optimales, mais la stabilité de l'engraissement était supérieure à celle fournie par les modèles, et jusqu'à présent il n'a pas été nécessaire d'intervenir.

La houle

Les conditions météorologiques marines ont une grande variabilité sur des échelles de temps de jours, de mois et d'années et déterminent substantiellement l'évolution naturelle d'une plage ainsi que sa réponse à toute intervention, qu'elle soit structurelle ou d'engraissement.

Si, pour la conception, il est fait référence au climat houleux représentatif des conditions moyennes, éventuellement au moins trente ans, même en considérant les tempêtes extrêmes, pour évaluer l'efficacité de l'intervention il faut nécessairement se référer aux événements survenus pendant la période de suivi.

Dans le cadre du projet MAREGOT, un protocole de levé de la houle au large et en dessous de la côte a été élaboré, mais il est important de souligner l'importance de ces données et la nécessité de les partager, sous les formes appropriées, avec les intervenants.

Il est clair que l'efficacité des ouvrages doit tenir compte de la correspondance entre les conditions météorologiques marines et le climat houleux de projet. Malheureusement, les séries historiques disponibles n'ont pas une extension temporelle suffisante pour permettre la dérivation de prévisions avec un haut degré de fiabilité, et des événements « anormaux » peuvent se produire tant pendant l'exécution des travaux qu'après.

Les intervenants doivent en être bien conscients et évaluer les résultats en tenant compte de toutes les variables qui rendent toute prévision complexe dans un système côtier. Une marée haute après une tempête avec un temps de retour élevé qui se vérifie après un engraissement de la plage peut entraîner une redistribution des matériaux au large et le long de la côte bien supérieure à celle prévue dans le projet. L'inverse peut se produire si des périodes avec des conditions météorologiques marines favorables se succèdent, ce qui permet de prédire une durée plus longue de l'engraissement de la plage.

Objectifs du suivi de l'état de la mer Extrait du projet MAREGOT, Protocole méthodologique, contenant des indicateurs communs, pour la conception de plans de monitoring morphosédimentologique et biologique de la bande côtière. Contribution technique du Consortium LaMMA		
Actions	Données requises sur la houle.	Autres données requises sur la physique de la mer.
Méthodologie bilan sédimentaire	Séries historiques de la houle (spectres et paramètres intégrés des vagues) à utiliser pour les modèles de transport des solides côtiers. Ressac	Séries historiques de données sur le niveau de la mer le long de la côte. Estimation de l'élévation du niveau de la mer. Courants côtiers. Vent. Courants côtiers à l'échelle régionale (pour les études de dispersion des sédiments).
Hautes Côtes	Séries historiques du mouvement des vagues à l'échelle de la côte, à utiliser pour les études d'impact sur les hautes côtes. Statistiques sur les extrêmes de vagues	
Habitats et écosystèmes marins et côtiers	Séries historiques du mouvement des vagues côtières, à utiliser pour les études d'impact sur l'habitat et l'interaction avec les caractéristiques biologiques et écosystémiques de la côte.	Séries historiques de données sur le niveau de la mer le long de la côte (excursion de marée estimée). Courants côtiers.
Gestion des risques côtiers	Prévisions météorologiques marines pour les paramètres de vagues intégrés et non intégrés. Statistiques sur les extrêmes de vagues Ressac.	Prévisions des courants côtiers et des courants d'arrachement. Données sur le niveau de la mer le long de la côte.

Il y a un aspect qui s'oppose à une extension excessive des séries historiques pour dériver le climat météorologique marin de la mer, ce qui rendrait théoriquement plus fiable la prévision des événements extrêmes : celui lié aux variations climatiques.

Dans une phase de changement climatique rapide, même de la houle, se référer à des données trop anciennes ne permet pas d'estimer la situation actuelle.

Une attention particulière doit être portée à l'augmentation de l'intensité des événements extrêmes, déjà observée dans certaines zones (Ruggiero, 2013), mais à cela s'ajoute un changement dans la direction et de l'intensité des vents, et donc des vagues.

Cela influence non seulement le dimensionnement des structures, mais aussi leurs effets sur l'évolution des côtes. Le Projet MAREGOT cherche à confirmer l'hypothèse selon laquelle ce phénomène aurait pu déplacer la position d'une zone de convergence du transport côtier, au point que les impacts sur le transport sédimentaire attendus pour la construction d'un port sur la base des séries historiques disponibles au moment de la conception se sont produits dans une moindre mesure. Certains ouvrages de défense interceptant le transport côtier, comme par exemple les épis, pourraient donner une réponse différente si la distribution directionnelle de l'énergie de la houle devait changer.

C'est l'une des raisons qui devraient conduire à une plus grande plasticité des interventions de défense, afin qu'il soit possible de les adapter aux nouvelles conditions climatiques.

Bibliographie

Anfuso G, Bowman D., Danese C., Pranzini E., 2016. Transect Based Analysis versus Area Based Analysis to quantify shoreline displacement: spatial resolution issues. *Environmental Monitoring and Assessment*, 188 : 568.

Bartoletti E., Bini A., Marasco I., Mercantelli A., Boninsegni G., 2008. La spiaggia "urbana" in ghiaia di Cavo: interventi di protezione e ripascimento. Actes de la Conférence "Costa, prevenire, programmare, pianificare". Maratea 15-17 Mai 2008. Autorité du Bassin de la Basilicata, p. 1-12.

Bowman D., Bresci D., Danese C., Ferri S., Pranzini E. e Rossi L., 2006. Risposta di una spiaggia all'applicazione di un drenaggio artificiale: il BMS di Alassio. *Études côtières*, 11 : 133-144.

Cipriani L.E., Pranzini E., Vitale G., 2013. Coastal erosion in Tuscany: short vs. medium term evolution. In L.E. Cipriani Ed. *Coastal erosion monitoring*, Nuova Grafica Fiorentina, pages 135-155.

Ruggiero P., 2013. Is the intensifying wave climate of the U.S. Pacific Northwest increasing flooding and erosion risk faster than sea-level rise? *J. Waterw Port Coast Ocean Eng*, 139 : 88-97.

Simonetti D., Pranzini E., 2008. Influenza del fattore scala sulla classificazione delle spiagge in base alla loro tendenza evolutiva. *Études côtières*, 14 : 14-38.

L'utilisation des données pour la planification des interventions

Prémisse

L'un des principaux objectifs de l'activité de suivi de l'évolution des côtes est d'identifier les causes, de localiser et de quantifier les processus érosifs, ainsi que d'analyser leur évolution dans le temps en fonction des interventions humaines réalisées dans les bassins versants, sur les hautes côtes et sur les plages elles-mêmes.

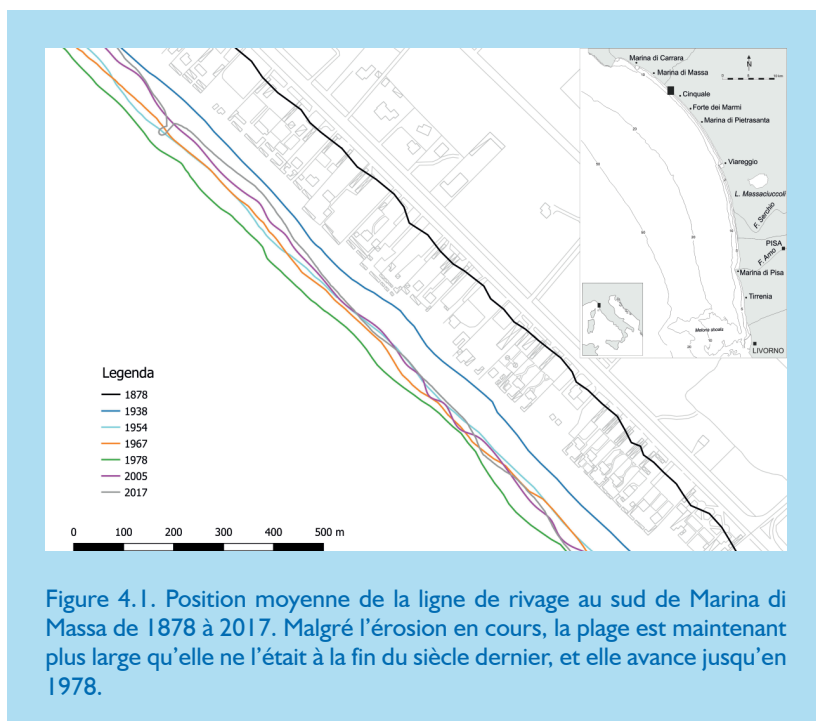
Cette analyse doit être menée au niveau national, régional et local, afin que les décideurs puissent non seulement planifier le développement spatial à grande échelle, et donc choisir de défendre, d'adapter ou de faire reculer, mais aussi de fournir les ressources nécessaires aux interventions et aux priorités de mise en œuvre.

Cela exige que les données à comparer soient homogènes en termes de résolution temporelle et spatiale, de rigueur, de méthodes de traitement et de critères d'interprétation.

La période d'observation est décisive, car le suivi doit décrire les processus en cours, mais à travers ceux que nous avons vus être dus à la variabilité intrinsèque de chaque plage.

Un intervalle trop long entre les enquêtes pourrait englober des phases évolutives opposées, annulant peut-être les effets, tandis qu'un intervalle trop court pourrait conduire à une surestimation des phénomènes.

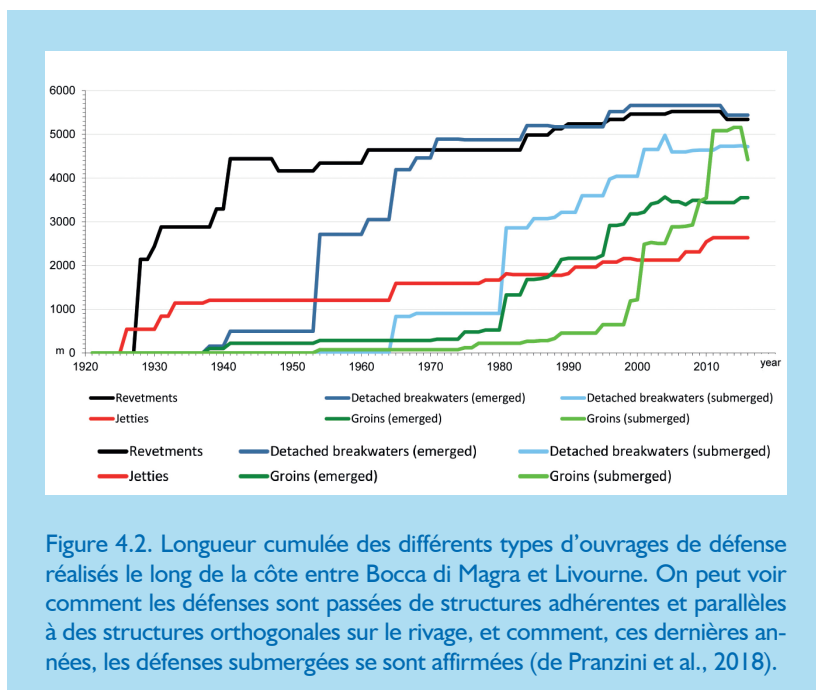
Le littoral italien est passé d'une phase de progradation générale, jusqu'au milieu du XIXe siècle, à une phase d'érosion prédominante, qui le caractérise aujourd'hui. Le passage d'une phase à l'autre n'a été ni instantané ni synchrone sur l'ensemble du territoire. C'est pourquoi un trait de côte peut aujourd'hui apparaître en progradation si la comparaison est faite avec des données très anciennes, simplement parce que l'érosion en cours n'a pas encore enlevé tout le territoire qui s'est formé dans la phase précédente d'accumulation (Fig. 4.1).



L'analyse des variations morphologiques de la côte doit nécessairement prendre en compte les interventions effectuées le long de la côte afin d'évaluer leur effet, d'où la nécessité de disposer d'archives précises des structures sur chaque trait de côte et des changements qui y ont été apportés au fil du temps.

Cela permettra d'évaluer l'efficacité et l'impact des différents ouvrages de défense dans le secteur côtier spécifique et de développer des projets sur la base de l'expérience passée.

Une vue synoptique de la construction des ouvrages, associée à une analyse du processus d'érosion, permet également d'évaluer leur efficacité et leur impact sur les plages situées sous le flux, ainsi qu'une analyse approfondie de l'évolution des principes et des méthodes à la base de la définition du type de travaux réalisés au cours des années (Fig. 4.2).



De toute évidence, les priorités d'intervention ne sont pas seulement liées à la vitesse du processus d'érosion, mais souffrent également de la valeur économique, paysagère et sociale des différents traits du littoral.

Si d'une part il est facile de calculer la valeur de la plage limitée à la composante liée aux activités exercées sur les plages données en concession pour la location de parasols et de cabines, d'autre part, l'analyse des revenus indirects obtenus par les gestionnaires pour les services de restauration est déjà plus complexe.

Mais l'impact économique de la plage s'étend à une large bande de territoire et est également généré par les plages dites libres (ou plutôt sociales). Les hôtels et les maisons à louer bénéficient d'une part substantielle du produit économique de la plage, ainsi que tous les secteurs commerciaux destinés aux touristes, ainsi que la partie de la population qui vit sur le territoire grâce aux activités réalisées sur la plage. Cette composante de la valeur de la plage n'est pas facile à évaluer, et il est encore plus difficile d'évaluer combien et dans quelle proportion elle s'étend et se réduit au fur et à mesure qu'on s'éloigne de la côte. Une recherche menée dans le cadre du projet CAMP-Italy a permis d'estimer à quel point les gestionnaires des différents magasins considèrent la plage comme essentielle pour leur activité, et comment cette valeur est réduite en s'éloignant de la mer : la présence de la plage étant donc essentielle pour de nombreuses activités et également pertinente au sein de celle-ci (Perna et al, 2017).

Une étude réalisée dans le cadre du projet BEACHMED a indiqué que le chiffre d'affaires annuel moyen réalisé par une plage pour le gestionnaire de la concession était d'environ 30 euros/m², mais que celui des différentes activités commerciales indirectes du territoire était d'environ 1.000 euro. De toute évidence, de nombreux facteurs entraînent des écarts par rapport à ces valeurs, notamment la grandeur et la qualité de la plage.

Dans le cadre d'une Composante du Projet MAREGOT, le réseau d'activités économiques directement ou indirectement liées à la plage a été analysé, allant ainsi au-delà des enquêtes traditionnelles sur l'économie de la mer et celle de la plage. Le thème a ensuite été approfondi pour la zone d'échantillonnage du delta du fleuve Ombrone (municipalité de Grosseto), obtenant un chiffre significatif : 2,4% du produit intérieur brut du territoire, qui donne sur la mer dans une petite partie, est généré par les activités liées à la plage. En l'absence d'études similaires menées dans d'autres domaines, on peut se référer au PIB global de l'économie maritime européenne (Shipping, Oil & Gas, Fishery, Aggregates, etc.) qui atteint 5% du PIB global.

Dans la gestion de l'érosion côtière, cela représente aussi un aspect à prendre en considération, que l'on souhaite maintenir ou renforcer l'offre touristique et balnéaire traditionnelle (3S = Sea, Sun, Sand), ou qu'il faille évaluer un retrait stratégique, qui devra en tout cas offrir des opportunités économiques similaires aux populations locales.

Encore sur la valeur de la côte

La valeur du paysage, même si l'on ne veut pas la corrélérer uniquement à la valeur purement économique, a encore besoin d'une évaluation, non seulement pour définir les priorités d'intervention, mais aussi pour identifier les problèmes critiques qui pourraient être résolus par une meilleure gestion.

Le Système d'évaluation des paysages côtiers (Buitrago, 2018) va dans cette direction et, sur la base de 18 paramètres physiques et 8 paramètres anthropiques, définit un indice qui permet d'estimer la qualité du paysage des différents traits de côte. En analysant la valeur des paramètres individuels, il est également possible d'identifier ceux qui abaissent le *rating* et d'évaluer l'effet que les interventions de requalification auraient.

Toutes ces données doivent être mises à disposition et discutées avec les différentes parties prenantes, afin qu'elles aient une vision holistique des enjeux essentiels à la réalisation d'un partage des choix.

Un autre aspect important de la planification des interventions de défense (ainsi que des interventions d'adaptation ou de retrait) est fourni par l'analyse coûts/bénéfices réalisée en parallèle entre différents projets : différents traits de littoral soumis à une érosion tout aussi intense peuvent être défendus par des solutions d'engagement économique différent qui découlent de leurs différentes caractéristiques socio-économiques, paysagères et environnementales. En présence de ressources économiques limitées, cette analyse peut influencer le choix de la zone d'intervention ou, en tout état de cause, le type de réponse au problème dans les différents secteurs.

Il faut également considérer que la valeur d'une plage défendue par des ouvrages structuraux est inférieure à celle d'une même plage en conditions naturelles.

Dans de nombreux cas, un retrait planifié est la solution la plus avantageuse sur le plan environnemental et économique. Il existe de nombreux cas dans le monde où les défenses qui empêchaient l'érosion ou la submersion du littoral en augmentant sa résilience ont été abandonnées, comme à Abbotts Hall Farm dans l'Essex, au Royaume-Uni, où une défense vieille de

200 ans a été abandonnée. Dans ce cas, la mise en œuvre du projet a été précédée de trois ans de monitoring et suivie de cinq ans pour évaluer si les effets étaient conformes aux attentes (Williams et al., 2017).

En France, après la tempête Xynthia, qui a fait 41 morts sur la côte atlantique française en février 2010, l'Etat a acheté les maisons au-delà de la ligne de set back, plusieurs centaines, et procède actuellement à leur démolition.

Set back

Le monitoring, accompagné d'une modélisation numérique, est le principal outil de définition des lignes de set back.

Celles-ci délimitent la bande côtière sur laquelle aucune structure stable ne doit être construite, ou des programmes de démolition ou de délocalisation doivent être mis en œuvre.

Les zones de set back sont généralement destinées à un usage public avec libre accès et la valeur sociale qui en résulte justifie, au moins en partie, l'engagement économique requis.

Cependant, il existe des outils qui peuvent minimiser le coût immédiat de l'intervention, comme l'allègement fiscal et l'octroi d'une superficie de construction plus grande que celle laissée.

La distance de la ligne de set back par rapport à la mer varie d'un pays à l'autre et même dans un même pays, il peut y avoir des indications différentes selon la morphologie de la côte. Les pays qui l'ont adopté sont le Canada, les États-Unis, Cuba, la Pologne, le Danemark, l'Allemagne, l'Espagne, la Turquie, l'Australie et le Sri Lanka ; les valeurs les plus fréquentes se situent entre 50 et 300 mètres.

La loi Galasso (n. 431, 8 août 1985), qui portait à 300 m de la côte la limite d'interdiction de construire, était absolument clairvoyante ; malheureusement, elle a été presque partout ignorée.

Les Plans d'allocation territoriale de certaines régions, publiés récemment ou sous peu, tentent de redéfinir les zones tampons.

Au lieu de fixer les mêmes limites géométriques au sein d'un Pays ou d'une Région, il serait plus approprié de définir la ligne de set back sur la base de la morphologie du littoral et des taux d'érosion à moyen terme et des résultats des modèles, mais cela expose les planificateurs à une négociation continue, cette action exigeant la pleine participation des parties prenantes.

La valeur sociale des zones abandonnées doit également être incluse dans l'analyse économique du retrait, car elles peuvent rester à la disposition de la communauté pour des activités qui ne nécessitent pas de structures, ou seulement de structures mobiles.

La planification des interventions de défense se développe, non seulement sur la base de l'état actuel et des besoins, mais surtout dans le contexte du scénario identifié pour l'avenir. Cela se caractérise par une incertitude considérable, qui s'accroît encore lorsqu'il n'est pas possible de prédire avec précision l'effet des interventions elles-mêmes, avec les processus de feed-back positifs ou négatifs qu'ils peuvent générer dans un scénario qui ne sera pas celui du moment.

Selon le scénario utilisé, certains effets d'un processus (par exemple, élévation du niveau de la mer, réduction des apports sédimentaires, affaissement, etc.) se réalisent à différents moments (Fig. 4.3). Un bon modèle, calibré sur les résultats du suivi, permet de faire les choix appropriés avant que l'intervention ne devienne tardive ou plus coûteuse en termes environnementaux, sociaux et économiques.

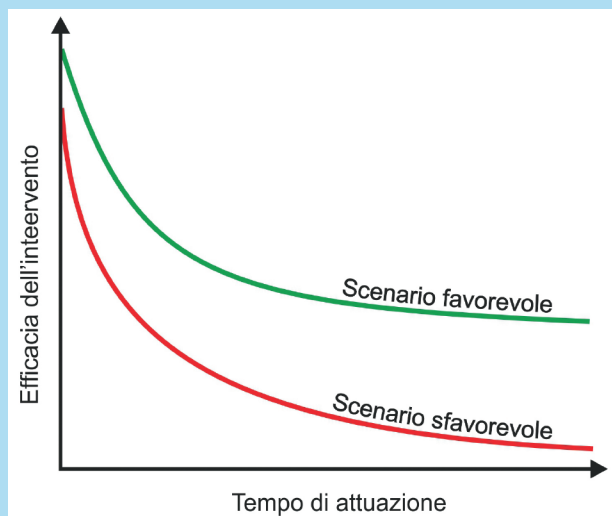


Figure 4.3. L'efficacité d'une intervention pour gérer le processus érosif (défense, adaptation ou retrait) dépend du moment de l'application, avec un rapport coût/bénéfice qui devient progressivement plus défavorable.

Par conséquent, la planification (mais on pourrait aller jusqu'à dire la conception) doit être extrêmement flexible, afin de pouvoir s'adapter aux conditions qui se présenteront avec le temps.

Par conséquent, l'une des caractéristiques des interventions à réaliser, qu'il s'agisse de planification, de gestion ou de conception, devrait être la possibilité de les adapter à des conditions différentes de celles qui sont envisagées. Des interventions que l'on pourrait qualifier de « résilientes », dont la modification, si nécessaire, sera techniquement et économiquement durable.

Cette caractéristique est également requise pour les projets individuels, car pendant la construction de ouvrages en mer, les conditions environnantes peuvent changer (à la fois en raison de la variabilité du système et de l'effet de ce que nous construisons). Le projet doit donc être adapté aux nouvelles conditions. Construire un ouvrage de défense côtière n'est pas comme construire un gratte-ciel : ce dernier est beaucoup plus complexe, avec des composants structurels, électriques, hydrauliques, mais s'il est bien conçu, il peut être construit sans variations pendant les travaux, puisque les conditions physiques environnantes ne changent pas (mais celles dictées par le marché pourraient changer, comme cela peut arriver pour les plages !).

Un ouvrage de défense côtière est conçu sur une certaine morphologie de la côte et des fonds marins, mais entre le moment de la conception et celui de la construction il peut passer beaucoup de temps, ou les conditions météorologiques marines avant le début des travaux peuvent avoir changé la forme de la plage, de sorte que le projet devrait être changé à la dernière minute sur la base des nouveaux relevés. Mais même pendant les travaux, et souvent précisément à cause de ceux-ci, les conditions du trait de côte concerné peuvent changer et le projet devra donc être adapté à la nouvelle configuration du littoral.

Il est à noter que même la façon dont un projet est réalisé peut influencer la réponse de la plage et rendre nécessaire un changement de conception, ce qui n'est pas facilement possible en raison de problèmes administratifs et financiers. Il convient donc d'évaluer cette possibilité et de rédiger le projet de manière à la minimiser. C'est une pratique établie dans le domaine de l'ingénierie maritime que d'effectuer des ouvrages structuraux à partir du point non encore affecté par l'érosion et de se diriger vers la zone la plus touchée.

Un exemple d'étapes de construction erronées

La construction d'une série d'épis s'étendant comme des septas submergés sur la côte nord de la Bocca d'Arno a été réalisée par phases successives, dans lesquelles, après la création d'une partie de chaque élément, la construction des autres a commencé. L'extrémité de ces épis courts était située dans la bande la plus dynamique de la côte, et des trous profonds se formaient à leur tête. Lors de leur allongement, des profondeurs beaucoup plus importantes ont été trouvées, ce qui a nécessité un volume de récifs plus important que celui prévu dans le projet exécutif, ce qui n'a pas permis d'achever les travaux.

Tout cela ne peut s'accompagner que d'un suivi permettant d'évaluer les variations qui se sont produites et d'expliquer les processus déclenchés par les nouveaux travaux, avant qu'ils ne deviennent ingérables.

Un bon suivi et de bons modèles de prévision des scénarios futurs permettront également de calibrer les interventions en fonction des besoins réels.

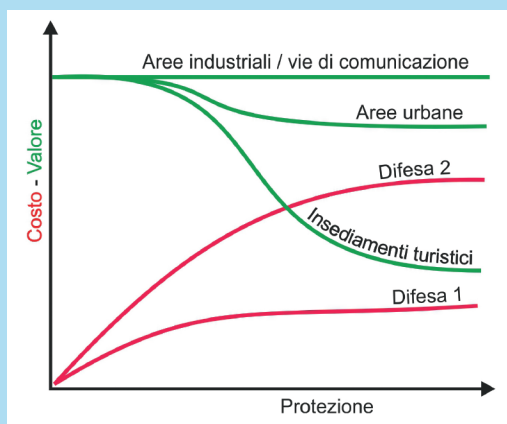


Figure 4.4. Perte de valeur des actifs côtiers à mesure que le niveau de protection côtière augmente. Dans certains cas, le coût de l'intervention peut dépasser la valeur résiduelle de l'actif défendu.

En effet, une protection excessive, en plus d'être coûteuse, détermine une diminution de la valeur des biens présents le long de la côte (Fig. 4.4). Si cette diminution peut être insignifiante pour les structures industrielles et les voies de communication, elle devient pertinente pour les zones urbaines, dont la bande côtière perd sa valeur paysagère et souvent son exploitation. Mais les traits de côte les plus pénalisés sont ceux à vocation touristique, où le paysage, la qualité de l'eau et l'accessibilité sont des exigences fondamentales (Fig. 4.5).

De plus, une protection excessive peut rendre plus difficile, voire impossible, le changement de stratégie si les conditions environnantes changent.



Figure 4.5. Chiavari (Ligurie) Une plage touristique excessivement protégée perd la valeur de son paysage et sa valeur économique.

Il convient également de considérer que les mesures de protection des côtes, ainsi que les mesures d'engraissement des plages, peuvent encourager les particuliers ou les groupes économiques à réaliser des investissements qui, tout en produisant des emplois et des flux de capitaux, rendent de plus en plus difficiles les délocalisations à l'avenir.

Bibliographie

Mercier D., Chadenas C., 2012, La tempête Xynthia et la cartographie des « zones noires » sur le littoral français : analyse critique à partir de l'exemple de La Faute-sur-Mer (Vendée). *Noris*: p. 45-60.

Perna M., Brandini C., Cipriani L., Grasso V., Mammì I., Pelliccia F., Pranzini E., Vitale G., 2017. La percezione dell'impatto dell'erosione costiera da parte degli esercenti del litorale compreso tra la foce del F. Magra e Marina di Carrara. *Études côtières*, 27 : 17–34.

Rangel-Buitrago N. (Ed.), 2018. *Coastal Scenery. Evaluation and management*. Springer, Gewerbestrasse, Suisse, pages 247.



Succès et échecs du suivi

Le suivi du suivi

Au cours des dernières décennies, le suivi de l'évolution côtière a occupé les différents niveaux de l'administration publique, qui lui ont également destiné d'importantes ressources économiques.

Souvent, les données recueillies et les élaborations qui en ont été faites ont permis d'établir correctement les plans de défense côtière ou d'évaluer l'efficacité des interventions réalisées, et aussi d'apporter des changements pour leur optimisation.

Dans d'autres cas, le suivi ne nous a pas permis de saisir les aspects de l'évolution du littoral dont la connaissance aurait permis une meilleure gestion de la bande côtière. Mais il y a aussi des projets qui ne sont élaborés qu'à partir d'études réalisées pour l'occasion, sans connaissance de l'évolution du littoral et, très souvent, sans même connaître les causes du processus d'érosion. Sans parler des cas où le suivi, souvent limité au levé topographique, a été oublié dans les tiroirs d'un bureau !

L'analyse des succès et des échecs de cette activité permet de mettre en évidence les raisons de l'atteinte ou non des objectifs fixés.

Dans les pages qui suivent, deux études de cas sont présentées pour chaque territoire transfrontalier : une étude dans laquelle le suivi a permis de mettre en place de bonnes pratiques de gestion du processus érosif ou d'évaluer l'efficacité d'une intervention de protection côtière ; l'autre dans laquelle les données disponibles, préalablement

collectées ou spécifiquement collectées, se sont avérées insuffisantes pour définir les plans d'intervention ou optimiser les structures à peine réalisées.

Il est à noter que les évaluations qui seront indiquées dans les pages suivantes concernent le suivi de l'évolution du trait de côte et l'efficacité des interventions éventuelles, et non celle des projets réalisés.

Dans un cadre national, et pas seulement, on observe que les informations sur l'efficacité des interventions, surtout lorsqu'elles sont négatives, ont eu une circulation limitée et souvent enfermée dans le monde académique, ce qui empêche la répétition d'erreurs par d'autres sujets prédisposés à la défense et à la protection du milieu littoral.

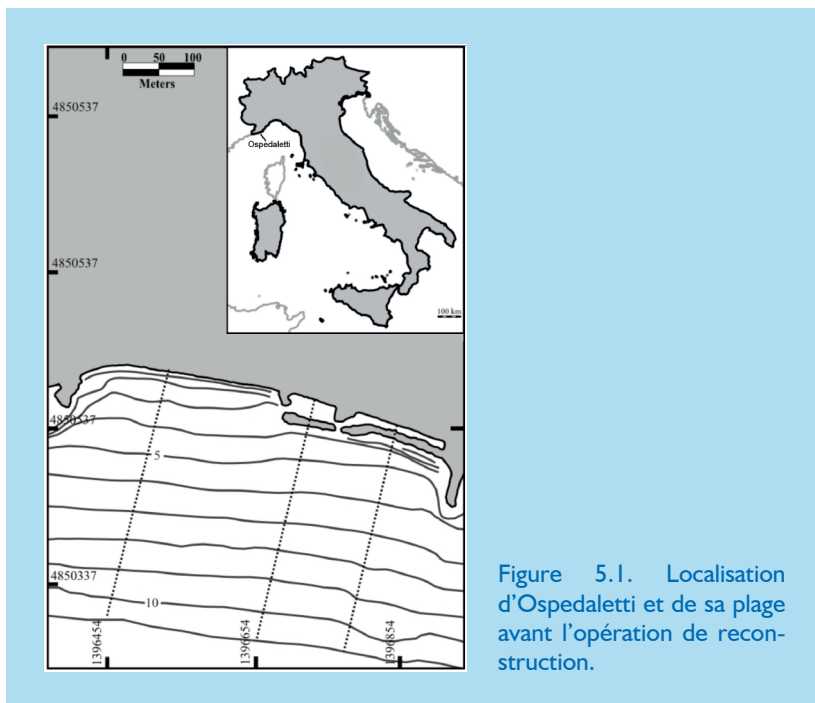
Il existe par ailleurs de nombreuses solutions qui nécessitent encore une évaluation indépendante sérieuse et qui sont proposées comme innovantes alors qu'elles devraient être considérées comme expérimentales. Les suivis de ces solutions, si effectués, sont souvent réalisés par les mêmes personnes qui favorisent leur commercialisation, ou, s'ils sont effectués par des instituts de recherche, ils rencontrent une opposition de la part de commettant pour leur publication.

Ligurie



Le suivi de l'intervention de reconstruction de la côte de Ospedaletti

La plage de Ospedaletti est située sur la Riviera Ligure occidentale (Fig. 5.1). Ce trait de côte, dès les premières années du XXe siècle, a été affecté par de nombreuses mesures de défense, en particulier dans le but de protéger la ligne de chemin de fer, réalisée dans la seconde moitié du XIXe siècle, et dans de nombreux endroits construite directement sur la plage.



La municipalité d'Ospedaletti, avec le soutien de la Région Ligurie, dans la période 2008-2010, a effectué une récupération d'une section d'environ 250 mètres de littoral.

Le projet comprenait l'élimination des récifs parallèles et le déversement d'environ 65 000 m³ de matériaux contenus latéralement par deux structures orthogonales. Les travaux ont été réalisés en deux phases distinctes. Au cours du premier hiver 2008-2009, les structures préexistantes ont été enlevées et celles prévues dans le projet ont été construites, par ailleurs un premier engraissement d'environ 30 000 m³ a été réalisé. Dans la phase suivante, en hiver 2009-2010, l'engraissement a été complété avec les 35 000 m³ restants. Le déversement dans les deux phases a été effectué en utilisant la méthode des épis de rechargement.

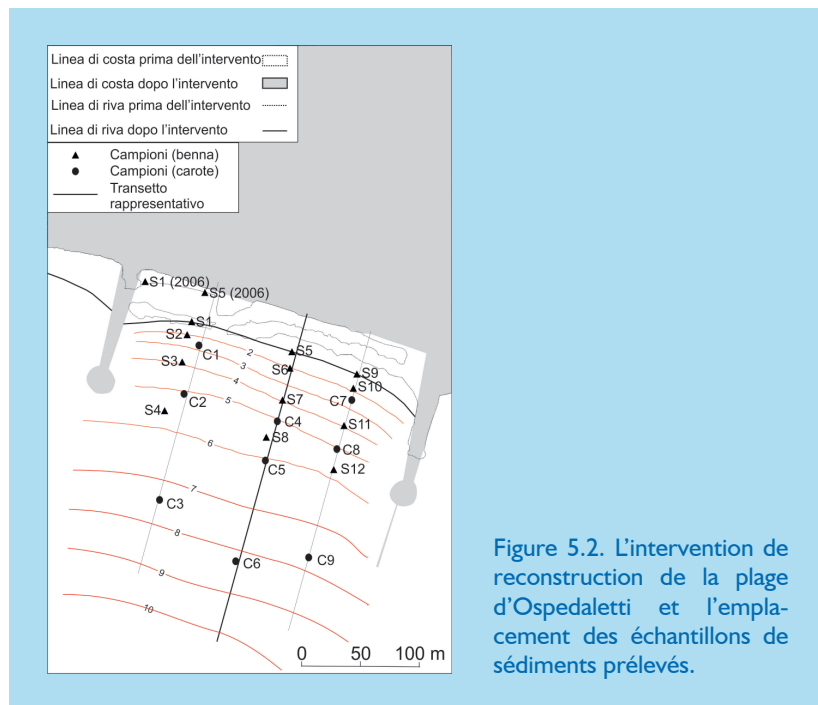
La plage d'Ospedaletti est constituée de gravier et de galets dans la partie émergée et jusqu'à la zone de déferlement ; plus au large, ces sédiments sont remplacés par du sable moyennement fin. Même le matériau utilisé pour l'engraissement, provenant du débordement du Torrent Nervia, était composé d'une fraction graveleuse et d'une fraction sableuse, qui n'est généralement pas utilisée pour les engraisements car elle est considérée comme instable. Dans ce cas, on a plutôt utilisé les deux fractions granulométriques, en supposant que la composante sableuse, redistribuée par la houle, aurait contribué à alimenter la plage submergée au-delà de la zone de déferlement.

La stabilité du déversement dans la zone la plus profonde a été garantie par un septum géotextile submergé placé en continuité avec l'épi sous le flux.

Afin d'évaluer si ce choix de conception était approprié, un plan de monitoring a été préparé et lancé en même temps que le projet (Fig. 5.2). Le suivi, à fréquence annuelle, comprenait des levés topographiques et bathymétriques, la collecte de sédiments à l'aide de bennes et de carotteuses manuelles, ainsi que le levé de la ligne de rivage.

Les enquêtes ont donc été effectuées au cours des périodes suivantes : 2006 - enquêtes de campagne préparatoires à l'intervention ;

2008 - enquêtes de campagne menées à la fin de la première phase ;
 2009 - enquêtes de campagne menées à la fin de la deuxième phase ;
 2010 - enquêtes de campagne menées un an après l'intervention.



Le suivi intermédiaire - effectué à la fin de la première phase - a montré, à travers les profils topo-bathymétriques, un avancement d'environ 25 mètres de la plage émergée, tandis que la plage submergée a montré une accumulation de sédiments concentrés principalement entre la rive et la zone de déferlement, située entre 3 et 5 mètres de profondeur (Fig. 5.3). Les fonds marins du large ont également connu une hausse modeste mais significative, ce qui indique que la fraction sableuse avait atteint la partie la plus externe de la plage submergée.

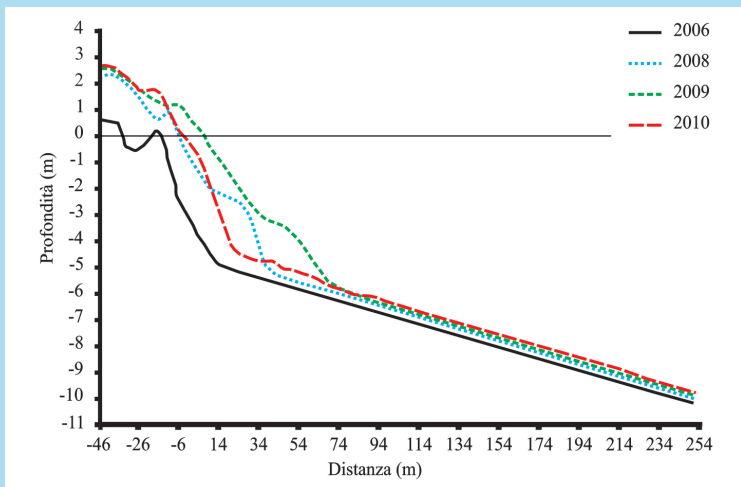


Figure 5.3. Évolution du profil de la plage pendant la période monitorée.

Les analyses sédimentologiques ont confirmé cette hypothèse en identifiant des sédiments se référant aux graviers et cailloux situés jusqu'à la zone de déferlement et des sédiments sableux dans le secteur externe. De plus, les carottes prélevées ont montré une différence texturale marquée entre la partie supérieure et la partie inférieure, indiquant la présence de sédiments provenant du déversement.

Le levé successif, effectué à la fin des travaux, a confirmé lui aussi cette répartition des sédiments déposés, confirmant ainsi l'efficacité du choix de projet (Fig. 5.4). Dans ce cas, la progression enregistrée était d'environ 35 mètres et l'accumulation principale dans la plage submergée se trouvait dans une position plus externe et plus profonde. Les données sédimentologiques ont également confirmé la configuration décrite précédemment.

La dernière enquête, réalisée un an après la fin de l'intervention, a montré une plage qui avait terminé la phase de redistribution des sédiments et de rééquilibrage du profil transversal, et qui s'était fixée sur les positions prévues dans le projet.

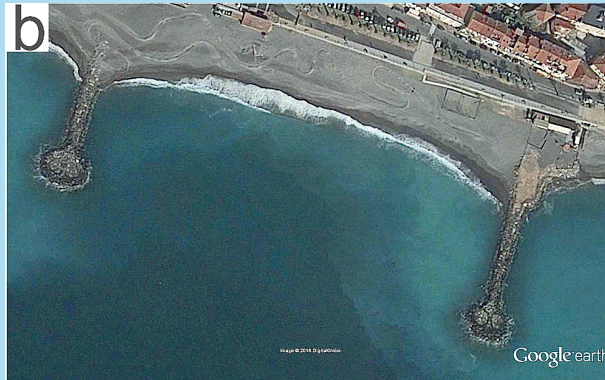
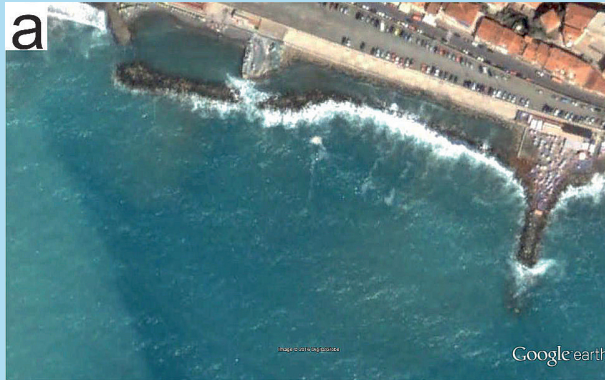


Figure 5.4. La plage de Ospedaletti avant et après l'opération de reconstruction.

En particulier, il a été possible d'observer l'élévation d'environ 0,5 mètre de la plage extérieure, qui avait donc pris une structure morphodynamique plus dissipative. Au cours des années suivantes, la plage est restée sensiblement stable et n'a enregistré aucun phénomène érosif.

Marco Ferrari

Ligurie



Rééquilibrage des plages d'Ameglia et Marinella di Sarzana

Ce trait du littoral, qui constitue la partie nord de l'unité physiographique qui va de Bocca di Magra à Livourne (Fig. 5.5), est en érosion depuis la fin du XIXe siècle, à la fois pour l'abandon de l'agriculture dans le bassin versant de ce fleuve et pour les fouilles intenses menées dans son lit après la guerre.



Figure 5.5. La côte de Fiumaretta et Marinella di Sarzana avec au premier plan l'épi sur l'embouchure de F. Magra.

Déjà la table IGM de 1938 indiquait une falaise parallèle pour défendre le point où la route qui vient de Sarzana fait un virage pour se placer parallèlement à la côte. Des îles artificielles et des épis ont été construits par la suite, tandis qu'à l'embouchure du fleuve, une jetée de protection a été construite, coupée, fermée puis prolongée ; le

ruissellement des sédiments s'est fait depuis la tige terminale de F. Magra. Tout cela sans que l'effet de ces travaux ne soit jamais surveillé, à tel point qu'il n'était pas facile de comprendre l'efficacité et les éventuelles faiblesses de ces interventions. Ce n'est qu'au cours des dernières années (1999-2002) que l'Autorité de Bassin du fleuve Magra a commandé un suivi afin d'évaluer si la construction de nouveaux épis aurait des conséquences négatives sur la côte de Marina di Carrara placée immédiatement sous le flux. Les résultats ont indiqué que l'efficacité de ces travaux était limitée et que, par conséquent, leurs effets sur la côte toscane ne se sont pas fait sentir.

En 2005, avec des fonds européens, les municipalités d'Ameglia et de Sarzana ont lancé un nouveau projet pour résoudre les problèmes d'érosion sur leurs plages, qui constituent une base économique importante de ce territoire.

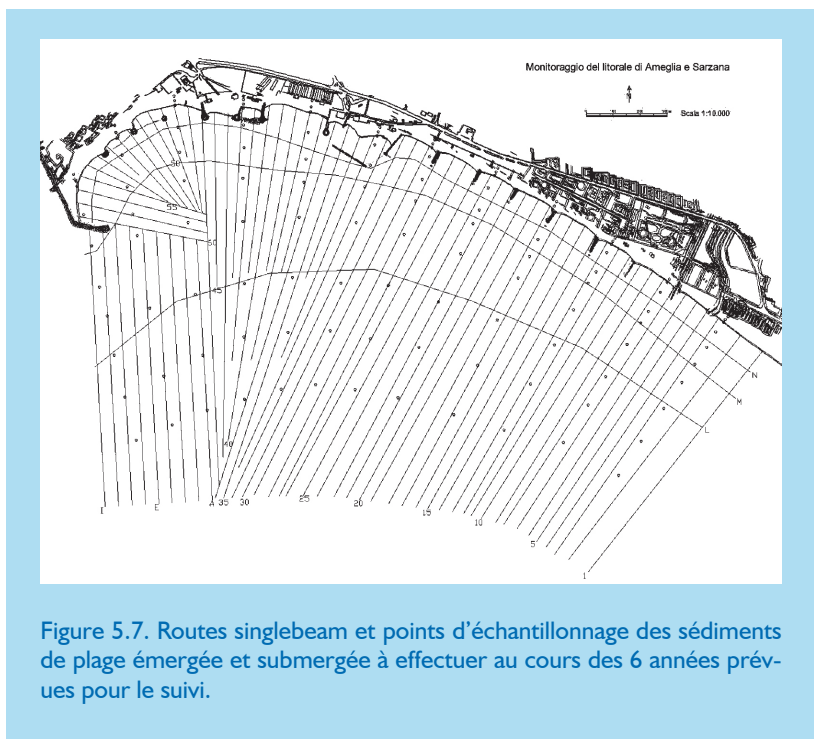
Les travaux comprenaient la modification des structures existantes, l'extension en septas submergés de certains épis (Fig. 5.6) et l'engraissement de la plage avec du sable et du gravier provenant du dragage de la tige terminale de la rivière Magra.



Figure 5.6. Éléments préfabriqués pour la construction de septas submergés prêts à être installés (février 2005).

On a également procédé à des engraisements artificiels avec environ 54 000 m³ de sable provenant des dépôts alluviaux du Pô, tandis que 5 000 à 8 000 m³ ont été drainés de l'accumulation formée à l'abri de la jetée de l'embouchure. Un engraissement d'environ 100 000 m³ a ensuite été réalisé en prélevant les matériaux des fonds marins en amont.

Au départ, trois campagnes de levés topo-bathymétriques étaient prévues ainsi qu'un levé sédimentologique (Fig. 5.7) à réaliser au début des travaux, à la fin des travaux et 6 mois à compter de la date de leur achèvement ; par la suite, la Région Ligurie a demandé de prolonger le suivi pour 3 ans après la clôture des travaux.



En 2005, les travaux ont commencé par la rotation d'un épi et, entre 2005 et 2007, quatre septas submergés en éléments préfabriqués en béton ont été construits, pour lesquels un suivi détaillé était prévu (Fig. 5.8). En raison de problèmes techniques liés à la gestion du financement, les travaux n'ont pas été achevés et le suivi a également été interrompu.

Les données acquises ont permis d'évaluer positivement les effets immédiats de la rotation de l'épi et de l'interaction des septums submergés avec la dynamique côtière, mais il n'a pas été possible d'analyser la réponse globale à l'intervention, même si celle-ci a été réalisée de manière partielle.

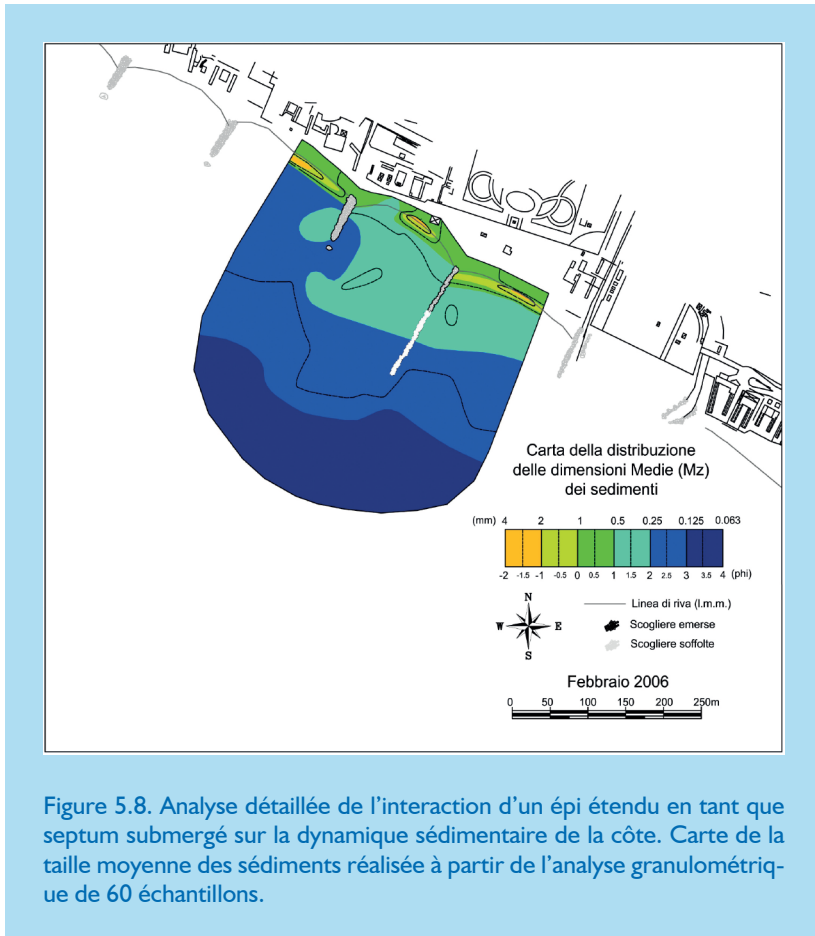


Figure 5.8. Analyse détaillée de l'interaction d'un épi étendu en tant que septum submergé sur la dynamique sédimentaire de la côte. Carte de la taille moyenne des sédiments réalisée à partir de l'analyse granulométrique de 60 échantillons.

Par la suite, de grandes quantités de sable et de gravier ont été drainées depuis la tige terminale de F. Magra vers les plages de ce secteur et il est donc impossible d'évaluer les effets à moyen et long terme des travaux réalisés, ce qui serait essentiel pour achever le projet ou pour le modifier afin de le rendre plus efficace.

Carlo Cavallo et Marco Ferrari

Toscane



Le suivi de l'intervention de rééquilibrage de la côte de Marina di Carrara

La côte située au nord du port de Marina di Carrara (Fig. 5.9) a utilisé l'effet brise-lame de la jetée au-dessus du flux qui, en interceptant les sédiments provenant du nord (de l'embouchure du fleuve Magra et, plus que tout, de l'érosion des plages ligures de Fiumaretta et Marinella di Sarzana), a inversé sa tendance évolutive qui au début du XXe siècle menaçait ces plages à cause de l'érosion. La progradation de la plage a atteint son apogée au milieu des années 80, avant de passer à un état d'équilibre relatif (Cipriani et al., 2001).

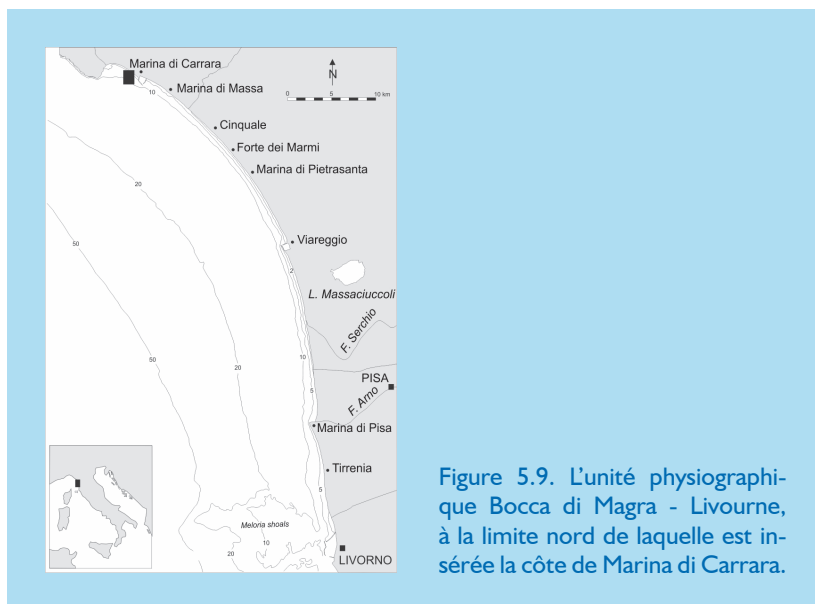


Figure 5.9. L'unité physiographique Bocca di Magra - Livourne, à la limite nord de laquelle est insérée la côte de Marina di Carrara.

Les études promues par la Région Toscane dans les années 1998-2000 sur l'unité physiographique Bocca di Magra - Livourne, et visant également à identifier les causes de l'érosion et à planifier des interventions sur le littoral situé sous le flux du port (en particulier la plage de Marina di Massa) ont montré que l'apport de sédiments du nord avait diminué et que la plage de Marina di Carrara était destinée à une réduction progressive.

En conséquence, cette partie du littoral a été incluse par la Région Toscane dans le Plan Général de Défense des côtes, transférant directement à la Municipalité de Carrare l'engagement de concevoir les interventions nécessaires à son rééquilibrage.

Le projet s'est développé en trois phases : dans la première phase (réalisée entre décembre 2005 et mai 2006), seule un engraissement artificiel a été réalisé avec environ 60 000 m³ de sable provenant d'une carrière située dans la plaine du Pô ; dans la deuxième phase (réalisée entre 2007 et 2008), un engraissement d'environ 40 000 m³ plus au nord, à la frontière avec la Ligurie a été réalisé ; enfin dans la troisième phase, environ 34 000 m³ ont été versés dans les mêmes secteurs entre mars et juin 2011 et 10 000 autres m³ entre mars et mai 2012. Le projet prévoyait la possibilité de stabiliser l'engraissement au moyen d'ouvrages submergés.

La première intervention comprenait également la rotation d'un épi à l'embouchure qui délimite la plage au nord et qui induisait une réflexion des vagues de façon à créer un *point chaud* érosif.

Dès avant le début des travaux, un système de suivi a été mis en place qui comprenait le levé mensuel de la ligne de rivage, le levé semestriel des fonds marins (Fig. 5.10) et annuel des caractéristiques de texture des sédiments des plages émergées et submergées (Fig. 5.11). De plus, il était prévu de surveiller les structures submergées et les biocénoses qui pourraient se développer sur elles (Ferri et al., 2008).

Le suivi de la première phase a indiqué que les sédiments déposés n'avaient pas la stabilité optimale pour garantir une dispersion réduite (indice de stabilité égal à 0,439 ; Pranzini et al., 2018). Il a donc été décidé d'augmenter légèrement la taille du deuxième déversement (indice de stabilité moyen de 0,456) et de le stabiliser avec une structure en T submergée à réaliser en géoconteneurs (Fig. 5.12).

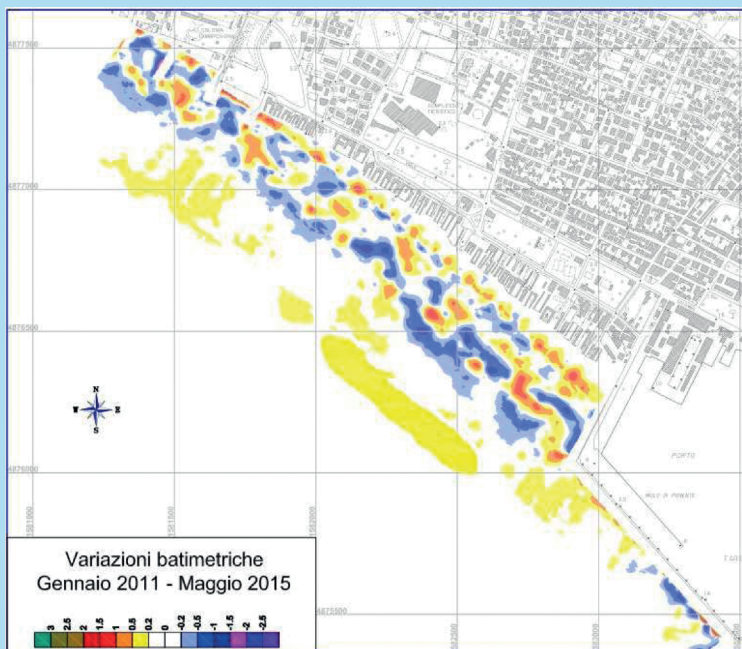


Figure 5.10. Variations topo-bathymétriques entre janvier 2011 et mai 2015

La poursuite du suivi, qui a duré au total 6 ans, a montré une plus grande stabilité du littoral et a permis de détecter une mauvaise disposition de certains géoconteneurs, ainsi que de mettre en évidence certaines de leurs ruptures ultérieures. Cela a permis la correction de l'ouvrage et le remplacement immédiat des segments endommagés.

Le suivi biologique a montré une augmentation significative de la biodiversité en correspondance des structures submergées.

Les données de suivi sont maintenant utilisées pour un plan de gestion à long terme de l'intervention.

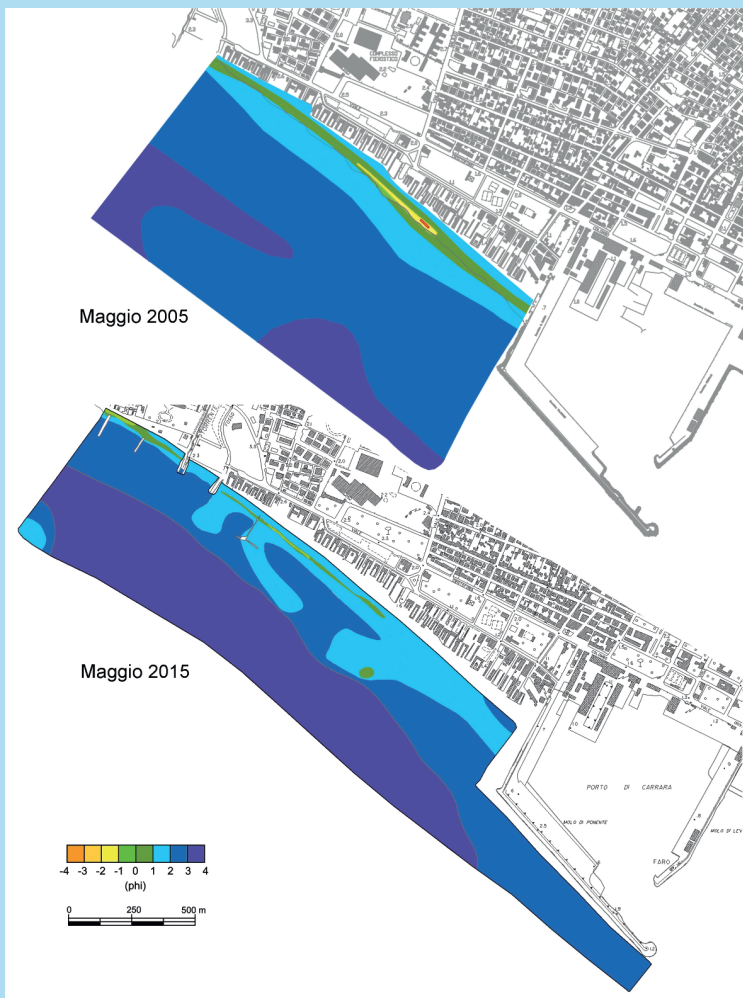


Figure 5.11. Variation de la taille moyenne des sédiments entre mai 2005 et mai 2015.

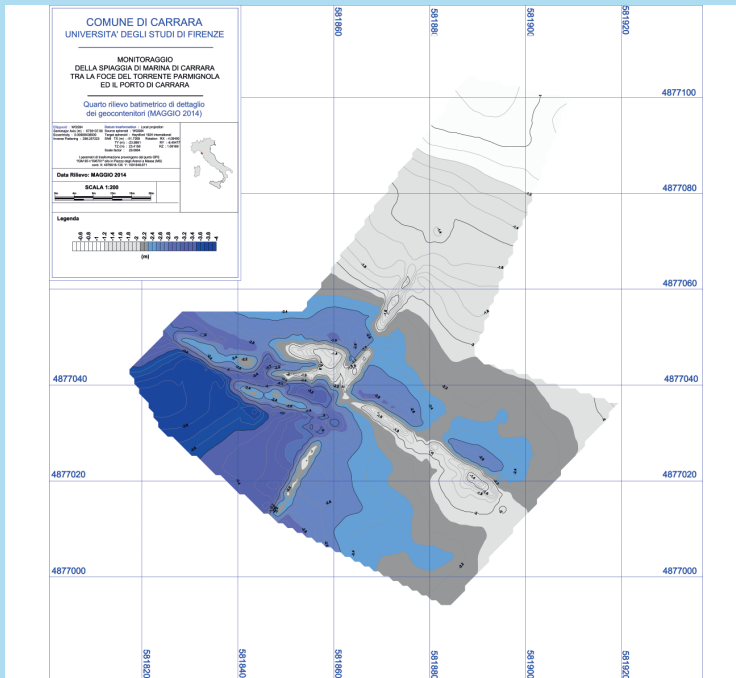


Figure 5.12. Levé multibeam autour de la structure submergée.

Bibliographie

Cipriani L. E., Ferri S., Iannotta P., Paolieri F., Pranzini E., 2001. Morfologia e dinamica dei sedimenti del litorale della Toscana settentrionale. *Études côtières*, 4: 119-156.

Ferri S., Pelliccia F., Pranzini E., Rizzo M., Vitale G., 2008. Prima risposta della spiaggia di Marina di Carrara ad un ripascimento artificiale non protetto. *Études côtières*, 15: 3-20.

Pranzini E., Anfuso G., Munoz-Perez J.J., 2018. A probabilistic approach to borrow sediment selection in beach nourishment projects. *Coastal Engineering*, 139: 32-35.

Giuseppe Bruschi

Toscane



Érosion et défense du littoral de Capalbio

La première carte de l'évolution récente du littoral de la Région Toscane a été produite par le Département des Sciences de la Terre de l'Université de Florence en 1989 et, sur la base de la Carte Technique Régionale (échelle 1 : 5 000), indiquait la position de la ligne de rivage des années 1938, 1954, 1973/79 et 1983/84. Pour le littoral nord on disposait également de la ligne de 1967, tandis que celle de 1938 manquait pour la côte de la province de Grosseto.

Il s'agit des données à l'échelle régionale sur lesquelles le Plan d'intervention pour la défense côtière a été formulé en 2000, qui a obtenu un financement en 2003 et qui est à la base de la plupart des interventions réalisées à ce jour.

Après 1984, de nombreuses études et mises à jour ont été effectuées pour les traits d'érosion, tandis qu'un véritable suivi (morphologique et sédimentologique) a été effectué là où des interventions de défense côtière avaient été réalisées.

La côte de Capalbio (Fig. 5.13), qui va de Ansedonia jusqu'à l'embouchure du torrent Chiarone - à la frontière avec le Latium - et qui se nourrit des rivières de cette région, ne présentait pas de problèmes particuliers à cette époque.

On vérifiait alors des oscillations de la ligne de rivage (Fig. 5.14), en partie à cause de la migration des grandes pointes qui caractérisent cette plage, mais il n'y avait aucune préoccupation qui justifierait des interventions de défense.

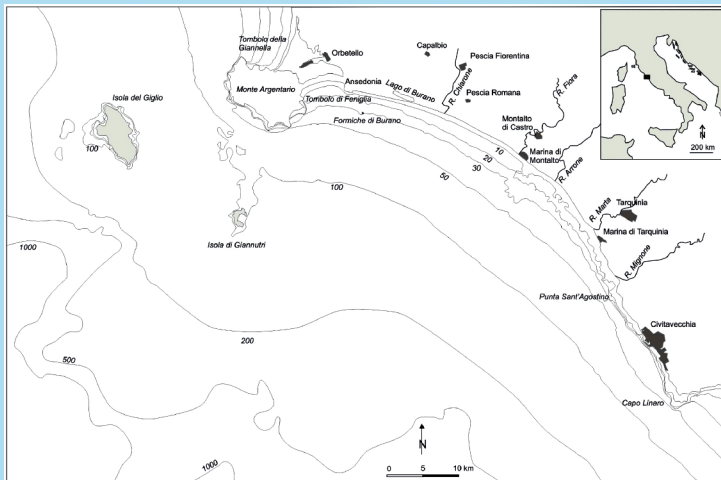


Figure 5.13. L'Unité physiographique Toscane-Latiale à la limite nord de laquelle s'étend la plage de Capalbio.

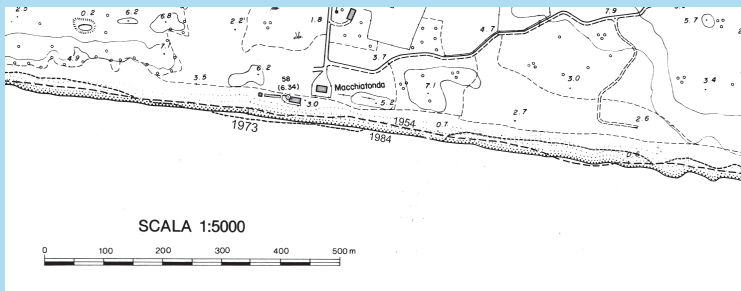


Figure 5.14. Extrait de la Carte des lignes de rivage de la Région Toscane (1989). Ce trait correspond aux Secteurs n. 4, 5 et 6 du graphique suivant.

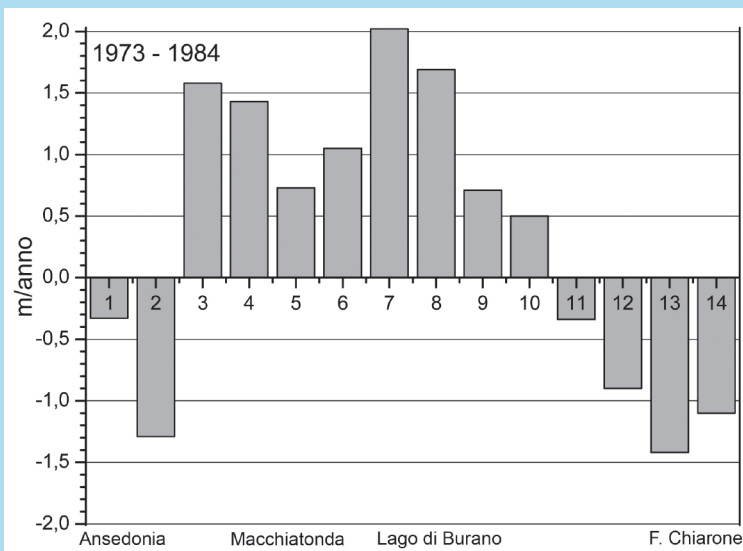


Figure 5.15. Taux moyen de déplacement de la ligne de rivage entre 1973 et 1984 sur la côte de Capalbio.

Toutefois, la situation était en train de changer et à Macchiatonda, deux établissements balnéaires qui, après une légère progradation entre 1973 et 1984 (Fig. 5.15), se trouvaient à environ 40 mètres de la mer, se rapprochaient toujours davantage des vagues, de sorte que des défenses avec des rochers avaient été réalisées pour protéger les structures. De toute évidence, les données disponibles n'ont pas permis de mettre en évidence ce point critique.

En 2004, la Région Toscane inclut ce littoral dans le Plan de Défense et la Province de Grosseto prévoit une intervention dans le cadre de laquelle un nouveau levé fut effectué également en 2005. Le projet était basé sur la construction de trois septas submergés en géoconteneurs et sur un déversement de 140 000 m³ de sédiments provenant de la barre externe à la rive, travaux qui ont été réalisés entre novembre 2009 et juillet 2010 sur 1 km de côte.



Figure 5.16. La plage de Macchiatonda en 2007 (à gauche) et 2012 (à droite) deux ans après l'engraissement de la plage.

L'effet de l'intervention fut positif et durable (Fig. 5.16), mais malheureusement, dans ce cas aussi, un véritable plan de suivi n'a pas été mis en place pour évaluer son efficacité, car le montant disponible pour les travaux ne pouvait pas être utilisé pour des actions successives au test. Des levés ponctuels furent effectués, une au début et une à la fin des travaux par la société chargée de la réalisation des travaux (octobre 2009 et juillet 2010), suivies d'un levé réalisé par une autre société pour le compte de la Province en mai 2011.

Dans le cadre du projet CAMP-Italy, ce trait de littoral fut inclus dans les zones d'étude et, en 2016, un nouveau levé de la ligne de rivage, des fonds marins et de l'état des géoconteneurs fut effectué.

Bien qu'une analyse précise de ce qui s'est passé ne soit pas facile, les données permettent une évaluation positive de l'intervention. Cependant, il est clair qu'il y a un manque d'information pour bien comprendre, d'abord comment cette érosion s'est développée, et ensuite comment l'intervention a changé la dynamique en place. Cela ne permet pas d'établir un plan de maintenance et de tirer pleinement parti de cette expérience pour mettre en place des plans de défense similaires dans d'autres zones.

Luigi E. Cipriani



Suivi du démantèlement du port de Porticcio

La plage de Porticcio est située sur la côte Est du Cap Corse. Il s'agit d'une plage de poche très indentée. La plage est étroite, et présente une forte vulnérabilité. Suite à une tempête en 2003 ayant détruit la route littorale en arrière-plage, le site est suivi dans le cadre du ROL (Réseau d'Observation du littoral de Corse). La plage forme une baie étroite et jusqu'en 2008, le petit port au sud de la baie constituait une modification profonde de l'équilibre entre l'hydrodynamique incidente et la géomorphologie de la plage.

Le littoral présentait une variabilité interannuelle forte (Fig. 5.17) liée à la présence de banquettes à posidonies qui jouent vraisemblablement un rôle important d'atténuation de l'érosion côtière sur ce site.

Depuis 2003 et jusqu'en 2008, la plage de Porticcio (Fig. 5.18) a été marquée par une grande variabilité morphologique et une vulnérabilité croissante à l'érosion du talus de la RD80 du fait :

- du recul important de la ligne d'eau entre 2005 et 2008;
- de la disparition progressive de la banquette de posidonies accolée au talus de la RD80 (ramassage); en 2008, les posidonies étaient quasi-absentes de la plage;
- de la très faible mobilité sédimentaire sur l'avant-plage qui peut avoir pour conséquence des difficultés de reconstruction naturelle de la plage après des épisodes érosifs;
- d'un abaissement des petits-fonds (0 à -2 m), et de l'apparition d'un stock important sur les fonds de 3 à 5 m en 2008.

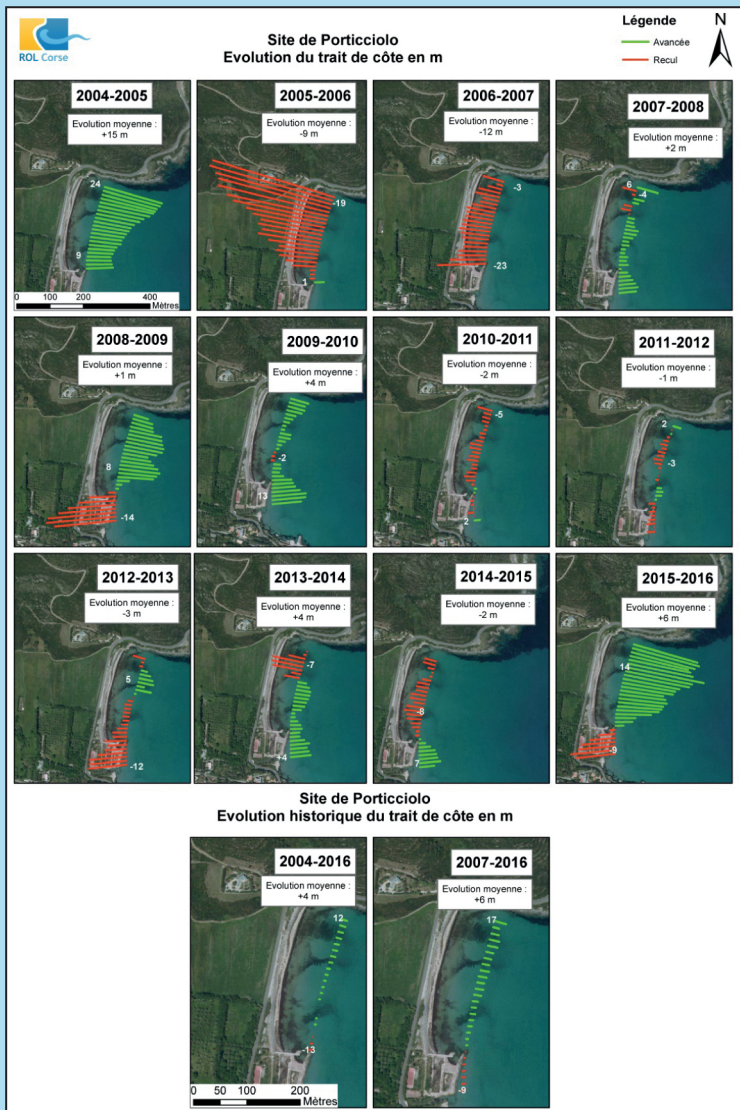


Figure 5.17. Le site de Porticcio: Evolution du trait de côte en mètres.

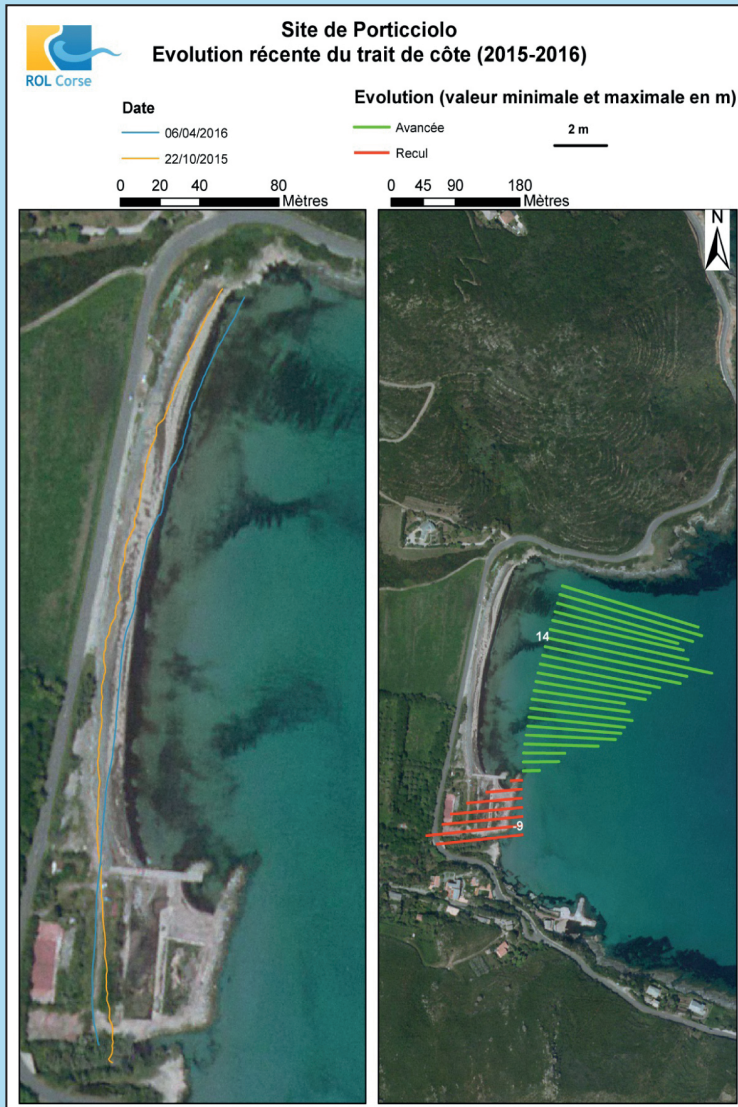


Figure 5.18. Le site de Porticcio: Evolution récente du trait de côte.

En 2008, un projet d'aménagement a été mis en œuvre pour restaurer l'aspect naturel du site, et retrouver un trait de côte en fond de baie plus stable. Le port a été totalement démantelé.

Depuis 2008, le site est suivi annuellement dans le cadre du ROL. Le suivi a permis de mettre en évidence une meilleure stabilité du littoral, suite à une phase d'adaptation caractérisée par l'avancée du trait de côte dans toute la baie.

Les suivis réalisés sont également utilisés pour faire des préconisations de gestion du site, notamment en ce qui concerne la gestion des banquettes à posidonies.

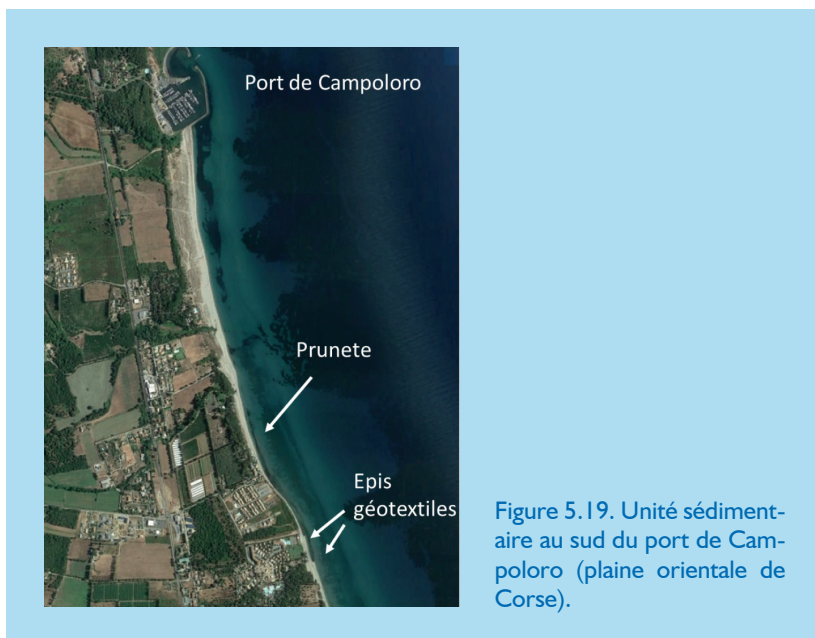
Les données sur les 15 dernières années de position du trait de côte et d'évolution de la bathymétrie sont à disposition pour toute stratégie d'aménagement à plus ou moins long terme de la plage de Porticciolo et des enjeux situés en arrière plage.

Yann Balouin



Erosion et protection de la plage de Prunete

La plage de Prunete est localisée sur la plaine orientale de Corse, au sud du port de Campoloro (Fig. 5.19). Le site est suivi dans le cadre du ROL depuis 2002. Historiquement, ce secteur, en amont-transit du port de Campoloro, bénéficie d'un piégeage par le port des sédiments transportés par la dérive littorale sud-nord. Les levés réalisés au début des années 2000 mettaient en évidence une bonne stabilité du site, avec une plage très large au sud du port de Campoloro (Fig. 5.20).



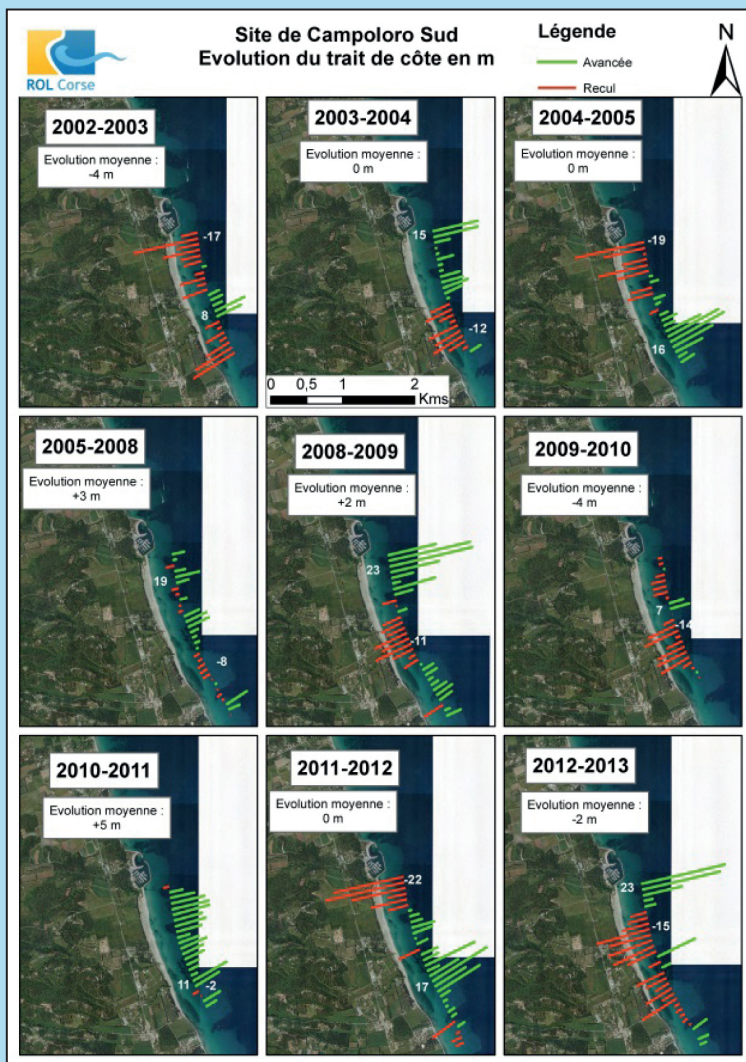


Figure 5.20. Evolution du trait de côte dans le secteur au sud du port de Campoloro.

En 2007, des épis en géotextiles ont été implantés au sud du site devant les campings qui connaissent une variabilité interannuelle de leur largeur de plage, sans toutefois présenter d'érosion alarmante. Deux épis transverses ont été construits pour limiter le transit sableux vers le nord, sans qu'une étude globale à l'échelle de la cellule sédimentaire soit réalisée.

Bien que le suivi spécifique de ces ouvrages n'est pas été réalisé, les suivis du ROL ont permis d'apprécier l'évolution du trait de côte à l'échelle de la cellule hydrosédimentaire.

Au niveau de Prunete, le site ne bénéficie plus de l'accumulation amont-transit du port, et le trait de côte, après un fort engraissement jusqu'à la fin des années 90 a progressivement reculé ces 10 dernières années et se situait en 2008 à sa position de 1948. En 2009, il a légèrement progressé vers le large, en relation peut être avec l'inefficacité de l'épi en géotextile implanté plus au Sud. Celui-ci, implanté en 2007, a bloqué le transit vers le Nord (effet visible sur le trait de côte 2008 ; Stépanian *et al.*, 2010, 2011). Les années suivantes, son efficacité a vraisemblablement décliné, ce qui a entraîné la régularisation locale du trait de côte en 2009 et le rétablissement du transit vers le Nord et l'alimentation du secteur de Prunete.

Bien qu'une analyse spécifique ne soit pas disponible, les données obtenues dans le cadre du ROL mettent en évidence une efficacité relative des aménagements en épis géotextile. Ceux-ci ont été rapidement dégradés par les tempêtes, ce qui a permis de limiter le piégeage sédimentaire et de réalimenter la plage de Prunete. Toutefois, la racine des épis, toujours en place, semble avoir eu un effet positif sur la plage au sud, en maintenant une certaine largeur de plage. Il reste toutefois évident que les informations manquent pour comprendre comment la dynamique a pu être modifiée par ces aménagements ou quel aurait été le dimensionnement le plus adapté de ces ouvrages. Il reste difficile, sur cet exemple de tirer des leçons pour l'aménagement d'autres secteurs aux problématiques d'érosion identiques.

Yann Balouin



Les géotextiles de la Capte

Les premières structures de maintien du trait de côte en géotextile sont inspirées d'une expérience réalisée sur les berges du Lac Michigan (USA) à la fin des années 1970. La méthode a ensuite été exportée dans une cinquantaine de pays. En France, ces structures ont été installées pour protéger plusieurs plages; sur le littoral varois, deux projets d'atténuateurs de houle en géotextile ont vu le jour:

- En 2008, une double structure de tubes en géotextile est installée au large de la plage de la Capte (Hyères);
- En 2013, des sacs en géotextile sont disposés de façon à créer une digue sous-marine à l'est de la plage de Cavalière (Lavandou).

Les géotextiles : description et objectifs de la méthode

Les tubes géotextiles sont des structures d'ingénieries côtières et fluviales composées d'une membrane (double ou simple) en géotextile remplies de sédiments. Cette technique encore récente est plébiscitée pour sa forte réversibilité environnementale et son coût de mise en place plus faible qu'une structure classique, en béton ou enrochement. Ces critères présentent aussi des avantages dans un contexte de changements climatiques avec un environnement en mutation et des installations qui deviendront obsolètes dans le futur. Basés sur le même principe de fonctionnement que les structures classiques, les brise-lames en géotextile ont cependant des caractéristiques qui divergent des structures conventionnelles et nécessitent donc leurs propres études et retours d'expériences pour en comprendre le fonctionnement.

Du fait de sa forme circulaire et d'un matériau composite plus léger que les traditionnels enrochements, la question de la stabilité des tubes en géotextile face aux éléments est développée dans plusieurs études. Elle peut être éprouvée avec des phénomènes de retournement, glissement et enfouissement. Des modélisations ont démontré qu'une double ligne de tubes en géotextile présente une meilleure stabilité mais aussi une plus grande absorption de l'énergie de la houle. La stabilité est aussi influencée par les propriétés du matériel composant le tube, la tension de la toile et sa perméabilité, plus que la forme du contenant lui-même. La pression exercée sur le géotextile (relative à son taux de remplissage) est aussi un élément à prendre en compte, pour éviter d'éventuelles déchirures. En outre, la forme quasi-circulaire du tube en géotextile implique des phénomènes de réflexion; et de et dissipation, mais aussi d'affouillement.

Les retours d'expériences sur les tubes en géotextile sont encore faibles. Certaines études recommandent leur installation dans des zones à faible énergie et faible marnage. Et qu'un certain temps d'adaptation morphologique est nécessaire avant de parvenir à des conclusions.

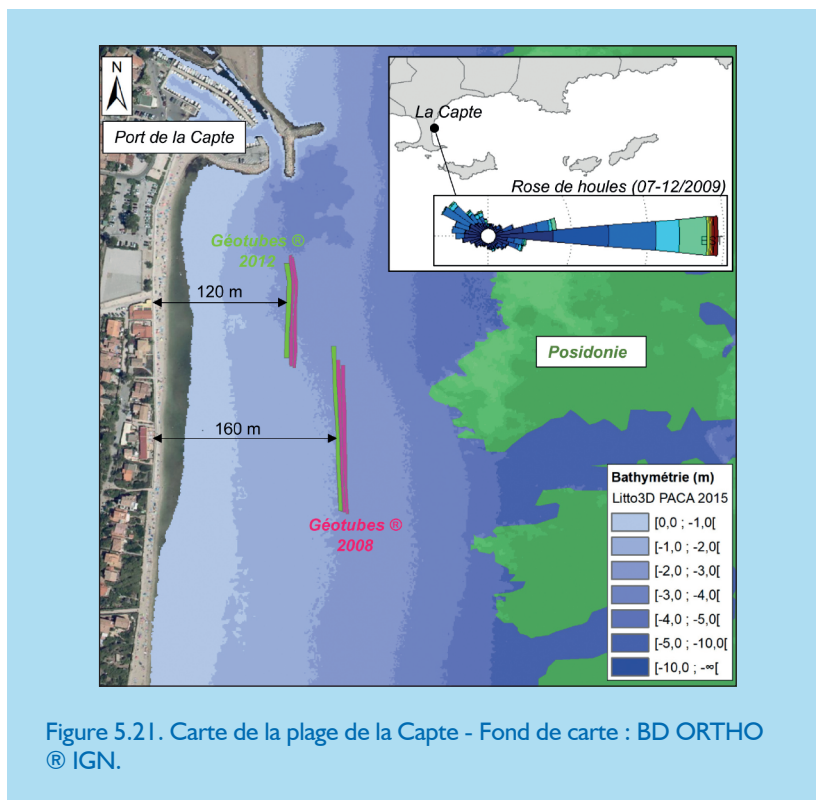
Les géotextiles ont, à forme égale, la même efficacité que les enrochements, mais permettent de limiter considérablement les coûts d'installation et d'entretien. Les opérations de mise en place demandent en effet moins de moyens matériels : peu d'équipements sont nécessaires et les matériaux sont transportables grâce à des camions de faible tonnage.. Enfin, les géosystèmes s'installent rapidement en situation d'urgence et permettent de minimiser les dommages causés à la plage en cas de fortes intempéries.

Pourtant, ces ouvrages sont sensibles aux déchirements, notamment lors des tempêtes. Les inspections peuvent révéler des entailles de moindre envergure, volontaires ou non, comme ce peut être le cas avec les hélices de bateau.

Enfin, s'il est plus simple de retirer des géosystèmes que de structures en béton ou enrochement, le coût des travaux peut néanmoins se révéler important : selon le BRGM, ils pourraient être équivalents à la moitié des coûts d'installation.

Description du site de la Capte et enjeux

La plage de la Capte est située sur le bras est, très urbanisé, du double tombolo de la presqu'île de Giens. Elle s'étend sur environ 2 km, entre le port de plaisance de la Capte, au nord, et la plage de la Bergerie au sud (Fig. 5.21). C'est une plage sableuse à pente faible et dissipative, qui présente sur son profil une légère barre d'avant-côte. Elle est cependant fragilisée par l'absence de cordon dunaire et d'espace de mobilité: elle est en effet bornée par un mur de soutènement protégeant des maisons ayant directement accès à la plage. Elle est en outre particulièrement exposée aux houles venant de l'est (direction associée aux houles de tempêtes).



La plage de la Capte appartient au site classé de la presqu'île de Giens et se situe à proximité immédiate de la « Pinède de la Capte », espace protégée en tant que zone naturelle d'intérêt écologique faunistique et floristique (ZNIEFF). Une importante concentration d'herbiers de posidonie est également présente à plusieurs centaines de mètres au large du rivage: il s'agit du site Natura 2000 de la Rade d'Hyère, abritant l'un des 5 récifs barrière en posidonie de Méditerranée.

La presqu'île est un lieu à haute fréquentation touristique pendant la saison estivale. Elle bénéficie d'un environnement régional attrayant sur la côte d'Azur et de la proximité des réserves naturelles de Port-Cros et Porquerolles. Ce tourisme s'appuie donc sur des points forts naturels, notamment les plages, majoritairement sableuses et donc propices à une utilisation récréo-touristique.

Dynamiques sédimentaires antérieures

Au 19^e siècle, l'actuel port de la Capte n'était qu'un canal permettant l'alimentation en eau de mer des salins des Pesquiers. L'activité des salins n'a aujourd'hui qu'une vocation pédagogique et ornithologique. Meulé (2010) rappelle que « le port de la Capte, construit entre 1950 et 1955, au sud du canal d'alimentation des salins des Pesquiers va ainsi participer au blocage du transit sédimentaire littoral. De 1971 à 1978; un bras perpendiculaire au bout de l'épi de calibrage de la Capte (80m) est ajouté (Courtaud, 2000) ». L'accès au port est protégé par deux digues en enrochement qui ont entraîné une importante érosion de la plage au sud du port, et une accumulation sédimentaire au nord. En effet, le long du bras est du tombolo, le transit sédimentaire dominant s'effectue du nord vers le sud (Capanni, 2011).

L'érosion se manifeste année après année par un rétrécissement de la partie émergée de la plage, avec une étendue minimale en fin de saison hivernale. Les vents d'est induisent un déplacement des sédiments vers le port de la Capte, à proximité des géotubes, tandis que plus au sud, hors de l'influence du port, le sédiment se stocke un peu plus au large et peut, en période estivale, revenir vers la plage. En revanche,

les vents de nord-est accentuent la dérive littorale, déplaçant le sable vers le sud, qui est ainsi définitivement perdu pour la Capte.

De 1999 à 2007, au mois de mai la commune procédait à des rechargements en sable, ce dernier provenant de l'accumulation sédimentaire à l'est du port de la Capte (12000 m³/an). Toutefois, le sable de ce stock est plus fin, avec un D_{50} à 0,12 mm, que celui naturellement présent sur la plage, dont le D_{50} s'établirait autour de 0,25 mm.

Mise en œuvre des tubes en géotextile

En 2006, le bureau d'étude BCEOM réalise une étude pour le compte de la commune afin de proposer une alternative durable aux rechargements de plage, avec comme objectif de:

- Limiter les impacts des opérations de maintien du trait de côte sur l'herbier de posidonie;
- Rechercher un gain économique par rapport aux rechargements annuels de la plage;
- Réduire les nuisances dues aux travaux de rechargement pour les zones résidentielles avoisinantes;
- Stabiliser le trait de côte.

En raison du caractère expérimental des tubes en géotextile proposés par BCEOM, la ville d'Hyères a souhaité impliquer une structure scientifique afin de mieux appréhender la modification des processus hydrosédimentaires liée à la mise en place de cette solution. D'où le financement par la Ville du projet IMAHGEO (Implantation d'Atténuateur de Houle en GEOTextile) impliquant le CEREGE¹.

Des travaux de recherches et des campagnes de terrain ont été effectués avant la mise en place des tubes, entre 2007 et 2008, complété par un suivi post-installation entre 2008 et 2009 : le rapport

¹ Centre Européen de Recherche et d'Enseignement en Géosciences de l'Environnement (CNRS, Aix-Marseille Université).

final d'IMAHGEO a été publié en 2010 (Meulé, 2010). En complément de cette collaboration, le projet comprend aussi un suivi régulier de l'évolution des herbiers effectué par le GIS Posidonie.

Lors de la mise en place des brise-lames, la plage de la Capte a bénéficié d'un rechargement massif en sable de carrière, roulé et lavé, au D_{50} égal à 0,44 mm (conformément aux préconisations émises par BCEOM). Toutefois, le bilan dressé en 2015 montre que ce sable est rapidement évacué vers le large par les phénomènes de surcote : seule la part de rechargement présente sur le haut de plage, hors d'atteinte par les houles de tempête, reste en place.

Les caractéristiques initiales du géosystème installé sont détaillées par Meulé (2010) comme suit: «Les Géotubes® se composent de deux sections de longueur différentes (section nord de 100 m; section sud de 150 m). Chaque section est elle-même composée de 2 tubes de géotextiles côte-à-côte d'1,80 m de diamètre et de hauteur finale d'environ 1,00 m. L'ensemble des tubes repose sur un tapis anti-affouillement [de 10,50 m de large bordé de tubes d'ancrage de 0,50 m de diamètre]» (Fig. 5.22) La côte d'arase est en moyenne d'1,15 m (nord) et 1,50 m (sud). Les ouvrages sont remplis avec des sédiments provenant de la plage au nord du port de la Capte.

Le monitoring topo-bathymétrique réalisé en 2009 a permis de constater l'efficacité de ce tapis anti-affouillement, puisque les côtes d'arase constatées des deux structures de 1,12 m (nord) et 1,36 m (sud) en moyenne, démontrant ainsi une très grande stabilité des tubes (Meulé, 2010).

Le monitoring hydrodynamique met en évidence que « les structures géotextiles ont des conséquences différenciées selon l'intensité des houles. [Celles] supérieures à 80 cm vont connaître un phénomène de shoaling suivi d'une dissipation, conduisant à une baisse de la hauteur significative de 25 cm. Les houles inférieures [à 80 cm] vont être faiblement impactées. En conséquence, le tube géotextile pourra exercer son action d'atténuateur lors de tempêtes décennales et centennales, mais son action sur les tempêtes annuelles sera limitée. » (Hyères, 2017).

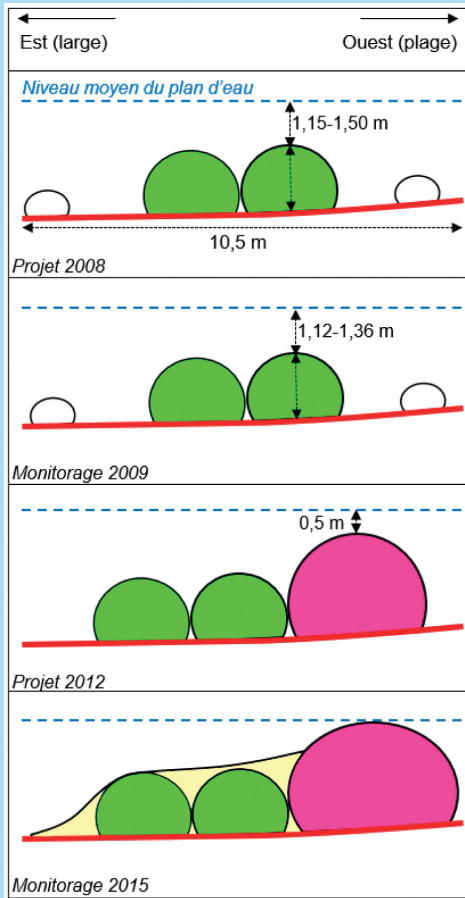


Figure 5.22. Coupe schématique des Géotubes[®] de la Capte : comparaison entre état projeté et monitoré.

Suite à différentes études, la ville décide de procéder en 2012 à un redimensionnement du géosystème en ajoutant une troisième rangée de tubes en géotextile, plus imposante : des tubes de 3,00 m de diamètre viennent doubler côté plage les tubes positionnés en 2008 sur 250 m (100 + 150 m). La hauteur de colonne d'eau recherchée au-dessus des tubes est de 50 cm (alors qu'elle est supérieure à 1,00 m pour le géosystème initial).

Une inspection en 2015 révèle que cette troisième rangée de tubes est affleurante et que leur hauteur après pose est d'1,80 m, pour une largeur de 3,80 m (Bessières et al., 2015). Mais surtout, les tubes en géotextile initiaux installés en 2008 sont enfouis à 95 % sous une couche de sédiment.

Le suivi des herbiers n'a pas montré d'impact du géosystème : il n'y a pas de régression de leur surface, et la stabilité temporelle des paramètres de vitalité mesurés semble indiquer l'absence d'atteintes structurelles.

En définitive, le système de tubes en géotextiles de la Capte fait l'objet d'un monitoring complet (topo-bathymétrie, biocénoses, hydrodynamisme): bien qu'il soit évidemment perfectible, ce suivi permet d'apprécier l'impact des Géotubes[®] sur la plage de la Capte.

Nastassia Bateau, Morgane Jolivet, Benjamin Kulling



Ecoplage® de la plage d'Agay

Le drainage de plage: description et principes de la méthode

Le drainage de plage a été conçu aux États-Unis dans les années 1970, puis breveté en 1991 au Danemark. En France, plusieurs projets pilotes d'Ecoplage® ont été implantés à partir de la fin des années 1990. Deux sont situés sur le littoral varois : sur la plage d'Agay à Saint-Raphaël et sur la plage de la Garonnette à Sainte-Maxime.

Objectifs

Le procédé Ecoplage® consiste à enterrer un drain parallèle au rivage sous la zone du jet de rive, à une profondeur qui varie selon les conditions du site. Le drain est connecté à une station de pompage qui capte l'eau et la reverse vers le large (Fig. 5.23). La désaturation en eau favorise le maintien des sédiments. Ce procédé permet de répondre à plusieurs objectifs:

- Accroître la largeur de la plage émergée, en favorisant le dépôt de sable au niveau de l'estran;
- Limiter l'érosion du jet de rive, en diminuant la surface d'impact de la vague par un abaissement du niveau de la nappe;
- Favoriser la formation naturelle du profil de plage, sans apport extérieur de sédiments.

Champs d'application

Comme tous les systèmes souples de lutte contre l'érosion, le drainage de plage ne peut pas être appliqué sur tout type de plage.

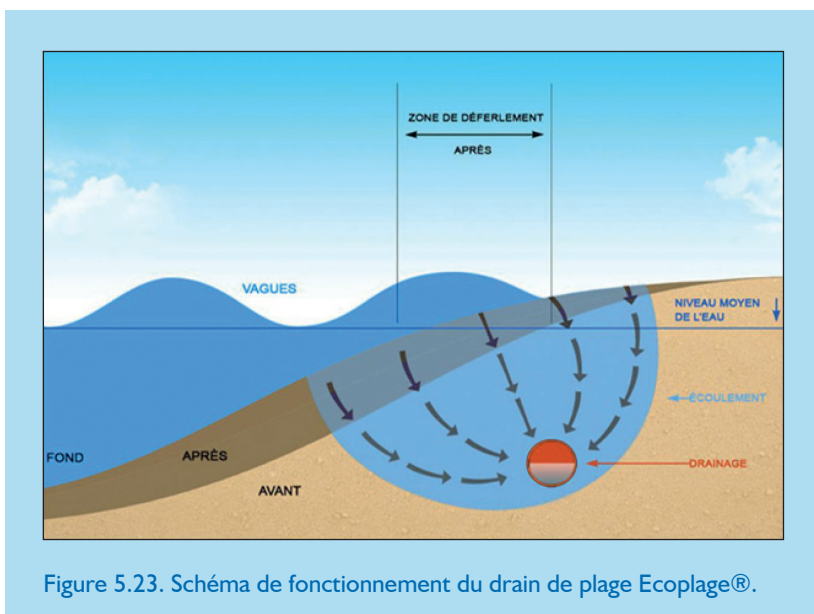


Figure 5.23. Schéma de fonctionnement du drain de plage EcoPlage®.

Les conditions suivantes doivent être rassemblées pour permettre la réussite du projet:

- Exposition aux vagues faible à modérée ;
- Régime de marée microtidal;
- Faibles variations saisonnières du profil de plage;
- Erosion mineure à long terme.

Ainsi, le procédé ne peut être instauré que sur une plage subissant une érosion lente mais dont les enjeux économiques, environnementaux ou humains imposent que des mesures soient prises pour la protéger.

Apports et limites de la méthode

Les systèmes de drainage sont dépendants d'une alimentation électrique : en cas d'évènement météo-marin extrême, une coupure de courant entraîne l'arrêt du système, quand il n'est pas directement détérioré. De plus, pendant les travaux de mise en place, la tranchée formée pour positionner le drain peut entraîner une fragilisation de la plage et une érosion à court terme. Ce problème n'est cependant pas inhérent à l'EcoPlage®: toute mesure de protection entraîne des effets de chantiers.

Le principal avantage de ce système de maintien du trait de côte réside dans l'absence totale d'impact visuel, préservant ainsi la qualité paysagère et l'attractivité du site.

Description du site d'Agay et enjeux

Lambert *et al.* (2007) donnent cette description du site: «La plage d'Agay présente une forme en arc de cercle caractéristique des plages de fond de baie. Elle est orientée O-E. et donc ouverte au sud. Elle est limitée à l'est et à l'ouest par des formations rocheuses qui empêchent toute extension latérale et bloquent la redistribution des sables de plage. Elle s'étend sur environ 1 km de long, soit une distance de bord à bord de 825 m. La plage émergée est également fixée sur la totalité de la zone par des limites rigides : des bâtiments à l'ouest de l'embouchure, le mur de soutènement de la [route département 559], qui longe la plage sur 650 m d'ouest en est, puis un escarpement rocheux doléritique à l'est. Ces éléments rigides limitent la largeur de la plage émergée, qui présente un gradient négatif d'Ouest en Est: plus de 35 m à l'ouest de l'embouchure, 2 m à l'extrémité. L'Agay, qui borde la plage à l'ouest, procure l'essentiel des apports sédimentaires mais possède une faible capacité de charge solide» (Fig. 5.24).

Les caractéristiques hydrodynamiques du site sont *a priori* idéales pour la mise en place d'un système Ecoplage®: la position en fond de baie tend à atténuer l'action des houles et le régime de marée est de type microtidal, avec un marnage de 0,4 m au maximum. De plus, la plage subit une importante pression anthropique à cause de sa position en zone urbaine et de son attractivité touristique.

A ces enjeux humains et économiques, viennent se superposer des contraintes environnementales: en effet, la rade d'Agay est inscrite en site classé Natura 2000; elle abrite notamment des spécimens de Grande Nacre ainsi qu'un récif-barrière de posidonie : il s'agit de «la cinquième structure de ce type connue en Méditerranée et constitue l'une des mieux conservées»².

² <http://esterel.n2000.fr/site-natura-2000-de-l-esterel/cap-au-large>.

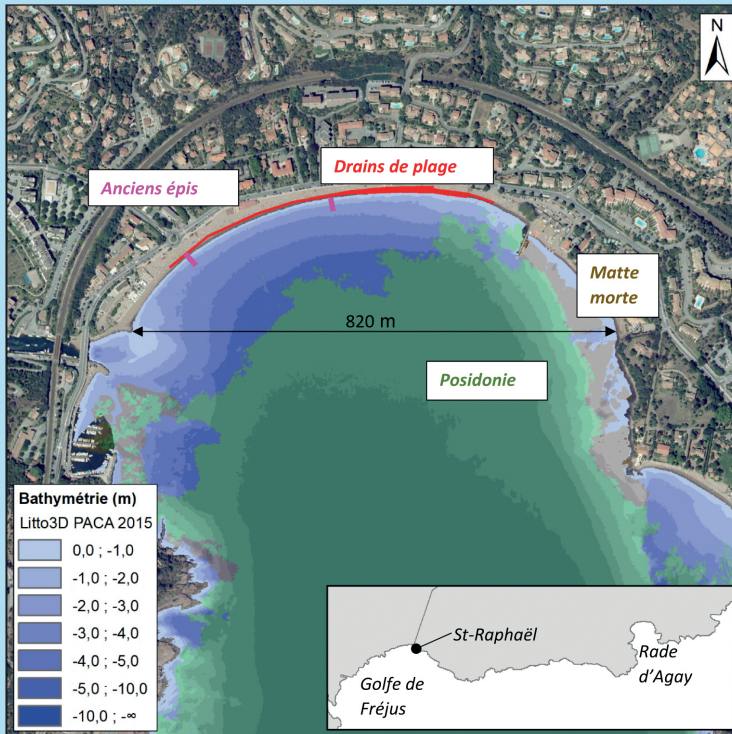


Figure 5.24. Carte schématique de la rade d'Agay – Fond de carte : BD OR-THO ® IGN.

Cependant, la végétation sous-marine est détériorée par les mouillages de plaisance et par les opérations successives d'engraissement de la plage depuis les années 1970.

La plage d'Agay est donc un site idéal pour l'Ecoplage®: elle ne subit pas une érosion critique mais ses atouts économiques et environnementaux incitent à la préservation.

Dynamiques sédimentaires antérieures

C'est au cours des années 1970 que les premiers aménagements ont été implantés sur le rivage de la rade afin de contrer une dynamique érosive importante : de 1950 à 1975, l'ensemble de la plage a reculé de 5 m à l'est de baie, et 25 m à l'ouest (Lambert *et al.*, 2007). Ce constat a encouragé la création de deux épis en 1976 et la mise en place d'opérations de rechargement à hauteur de 3 000 m³/an en moyenne.

Entre 1976 et 1998, le trait de côte a progressé vers le large d'en moyenne 1,5 m par rapport à 1950. Ce chiffre masque cependant des irrégularités : l'ouest et le centre de la plage, où les épis ont été installés, ont avancé de 7 m. Mais à l'est, la tendance érosive se poursuit, avec un recul de l'ordre de 2 m (Lambert *et al.*, 2007).

Les aménagements et les rechargements ont partiellement compensé l'érosion, mais ils ont eu une efficacité très localisée et à court terme uniquement. En effet, sur l'ensemble de la période 1950-1998, on constate un recul moyen de 5 m.

Mise en œuvre de l'Ecoplage®

Le système, installé en février 2004, est composé comme suit :

- Un drain inerte en PVC de 600 m enfoui à une profondeur de 2 m sous l'estran, associé à un collecteur gravitaire;
- Une pompe hydraulique, pour assurer le rejet de l'eau à 50 m de la côte *via* une conduite sous-marine.

L'implantation de l'Ecoplage® a coûté 710 K€ (hors étude de faisabilité, étude d'impact environnemental et suivis); l'entretien annuel de la structure (hors travaux de réparation) devrait revenir à 5-6 € (Lambert *et al.*, 2007). A titre de comparaison, le coût annuel du rechargement de plage est estimé à 80-120 €. Il faudrait ainsi approximativement 6 à 10 ans avant que le système soit rentable par rapport au rechargement classique.

Un monitoring topo-bathymétrique est réalisé pendant 2 ans, avant et après l'installation du drain (de janvier 2003 à janvier 2005) : 19 profils de plage sont levés chaque mois. Ce monitoring de l'ensemble de la plage est complété par une campagne de terrain très localisée, d'une durée de 4 jours, où des MNT haute résolution sont réalisés pour analyser finement l'impact du drain sur les microformes sédimentaires et la nappe phréatique.

La particularité du système de drainage par rapport aux autres techniques souples est que ses effets sur le positionnement du trait de côte sont visibles très rapidement. En effet, à l'aide de MNT haute résolution, Lambert *et al.* (2007) observent qu'en seulement 24h « la zone de l'estran présente une accrétion verticale d'une quinzaine de centimètres, alors que le talus pré-littoral est érodé durant cette période. Cela se traduit par une avancée d'environ un mètre à un mètre cinquante du trait de côte vers le large ». Dans le même temps, le niveau de la nappe phréatique dans la plage a baissé de 10 cm. Selon Lambert *et al.* (2007), « il existe donc bien une relation physique entre rabattement de la nappe et position du trait de côte ». Mais « ces conclusions ont cependant été obtenues sur une période de temps relativement homogène du point de vue des dynamiques marines : la hauteur significative des houles enregistrées à l'entrée de la baie est comprise entre 0,4 et 0,8 m sur les 4 jours de mesures, le marnage étant quant à lui inférieur à 0,25 m ».

En 2007, Lambert *et al.* concluent que « la poursuite du suivi (...) reste cependant nécessaire durant quelques années encore avant de statuer sur l'efficacité à long terme de ce procédé ».

Malgré les recommandations, le monitoring topo-bathymétrique *in-situ* de la plage d'Agay n'a pas été poursuivi au-delà de janvier 2005. Toutefois, l'analyse des variations du rivage par photo-interprétation entre 1998 et 2014 montre que la dynamique érosive naturelle est à nouveau dominante, avec une accrétion de la partie ouest de la plage aux dépens de la partie est, en recul.

En outre, les observations sur la mise en œuvre du système Ecoplage® dans la rade d'Agay sont potentiellement biaisés par :

- Le retrait concomitant des épis en enrochements perpendiculaires au rivage;
- Une opération de dragage réalisée accidentellement près du rivage avant les travaux.

Il est donc difficile d'évaluer précisément l'impact du drain de plage d'une part, et le retrait des épis perpendiculaires au rivage d'autre part. Par ailleurs, l'analyse des tendances évolutives du rivage réalisée pour l'étude de faisabilité comporte elle aussi des biais potentiels en raison des «interventions régulières des municipalités» (Lambert et al., 2007). Quant à l'aspect paysager, il est complexe de quantifier la plus-value apportée par cette opération, d'autant que les épis sont souvent considérés comme faisant partie du paysage littoral. Enfin, il est à noter qu'en 2011 le système a subi de graves dommages suite à une tempête: le coût des travaux de réparation, effectués deux ans plus tard en 2013, n'est pas connu.

Nastassia Bateau, Morgane Jolivet, Benjamin Kulling

Bibliographie

BCEOM, 2006. *Étude pour la protection de la plage de la Capte, rapport phase 3 : définition des scénarios de protection.*

Bessières M., Chabran-Poete E., Fort G., Messineo G., Ortelli M., Paoli E., 2015. *Etude d'impact suite au rehaussement des Géotubes® en 2012 sur la plage de la Capte à Hyères (83).* Mémoire de master 1, Aix-Marseille Université.

Capanni R., 2011. *Étude et gestion intégrée des transferts sédimentaires dans le système Gapeau / rade d'Hyères.* Thèse de doctorat, Université Aix-Marseille.

Courtaud, J., 2000. *Dynamiques géomorphologiques et risques littoraux. Cas du Tombolo de Giens (Var, France méridionale).* Thèse de doctorat, Université de Provence Aix-Marseille I.

Hyères, Commune de, 2017. *Plan triennal de rechargements des plages de la cellule hydrosédimentaire La Badine – La Capte, 2017-2019.* Dossier de présentation (Annexe demande d'examen cas par cas F09317P0107).

Lambert A., Rey V., Provansal M., Samat O., 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, pp. 105-117.

Meulé S., 2010. *IMplantation d'Atténuateur de Houle en GEOtextile: Suivi scientifique de la plage de La Capte, Hyères, Var: Instrumentation, Modélisation.* Rapport final, 230 p.



Le projet pour la mise en sécurité du littoral devant le Forte Village Resort, à S. Margherita di Pula (Cagliari), a été commandé par M.I.T.A. Resort S.r.l., la société qui gère cet établissement touristique, pour remédier à la réduction de la plage qui lui fait face.

Afin d'atténuer l'énergie de la houle du Sud-Est incident sur le littoral, un système de barrières submergées constituées de géoconteneurs remplis de sable à placer dans les miroirs d'eau en face de la structure hôtelière a été étudié.

Le projet, après avoir obtenu toutes les autorisations requises, a été réalisé à partir du 19 mars 2009 et s'est achevé le 9 juin 2009.

Les hypothèses du projet ont été supportées par des analyses préliminaires, notamment :

- le levé direct et le suivi de la houle et du courant au moyen d'un capteur acoustique automatique réalisé du 1er décembre 2005 au 16 juin 2006 ;
- le levé bathymétrique et morphologique des fonds marins, ainsi que le levé topographique de la plage émergée ;
- la caractérisation des textures littorales avec des analyses directes des sédiments ;
- la caractérisation bionomique des fonds marins ;
- la simulation par modèle numérique des processus hydrodynamiques caractérisant le littoral, calibrée avec les données recueillies aux points d'échantillonnage ;
- la simulation par modèle numérique d'alternatives de conception afin de déterminer la meilleure condition d'équilibre.

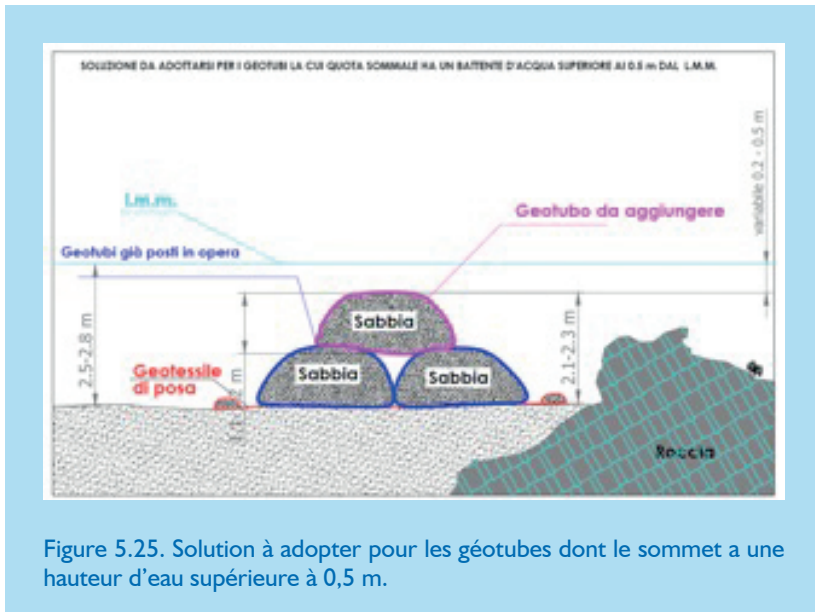


Figure 5.25. Solution à adopter pour les géotubes dont le sommet a une hauteur d'eau supérieure à 0,5 m.

Après avoir examiné différentes alternatives, la meilleure solution a été de protéger le littoral avec des barrières submergées orientées perpendiculairement au flux énergétique de la houle annuelle moyenne (137° Nord) à une distance moyenne de 125 mètres de la ligne de rivage et à une profondeur moyenne de 3 mètres (Fig. 5.25). Elles ont été positionnées pour compléter le système d'affleurements rocheux qui créent en partie une protection naturelle du littoral. Dans la mesure du possible, elles ont été placées sur les fonds sablonneux afin de ne pas perturber l'écosystème marin, comme l'indique le biologiste du projet, et en tout cas près des affleurements rocheux pour limiter les phénomènes d'érosion qui se créent au pied des barrières et qui peuvent compromettre leur stabilité et donc leur efficacité.

Entre une barrière et l'autre, des passages étaient prévus pour permettre le passage des bateaux, la circulation de l'eau pour éviter les phénomènes de stagnation, l'accumulation de sédiments fins et un bon équilibre entre le taux de débordement et le taux de retour à travers les passages.

Le positionnement des levés topographiques de la plage émergée, de la ligne de rivage, des points de captage des sédiments et des levés marins a été réalisé grâce à l'utilisation du GPS en mode RTK. L'acquisition de la bathymétrie des fonds marins s'est déroulée en deux phases distinctes qui ont nécessité l'utilisation de deux types de sonars différents. La première, en raison de la présence de nombreux affleurements secs et d'eaux peu profondes, a été le levé de l'amplitude bathymétrique entre 1,0 m et 2,5 m effectué avec un petit bateau équipé d'un sondeur haute fréquence *single beam* ; la seconde consistait en un levé de la plage submergée avec un sondeur *multibeam*, à partir de l'altitude précédente jusqu'à l'amplitude bathymétrique de 25 m.

Le levé de la ligne de rivage a été effectué en même temps que la surveillance de la houle et des courants induits par celle-ci, et a été répété plusieurs fois durant l'hiver dans un espace-temps d'environ 6-7 mois.

Par référence à la résolution n° 33/7 du 5.9.2007 relative à la « Procédure de vérification » aux termes de l'art. 31 de la loi régionale 18.1.1999 n. 1 et amendements et ajouts ultérieurs et de la résolution du Conseil Régional du 15.2.2005 n. 5/11 et amendements et ajouts ultérieurs relatifs au « Projet pour la sécurité du littoral face à Forte Village Resort » proposant MITA Resort, un plan de suivi triennal a été réalisé sur la morphologie de la plage émergée et submergée, la *Posidonia oceanica* et les caractéristiques granulométriques des sédiments.

La zone de monitoring détaillé comprenait, pour la plage émergée, le tronçon de 300 m de long directement défendu par les barrières submergées, un tronçon oriental d'environ 300 m et un autre tronçon occidental d'environ 400 m pour un total d'environ 1000 m ; pour la plage submergée, une bande d'environ 600 m, de manière à inclure la limite de fermeture de la plage, à savoir pour s'étendre à tout le profil dit actif. Le choix de cette superficie a été fait sur la base des résultats des simulations numériques effectuées et de la comparaison de la situation ex ante et ex post de l'intervention.

La conclusion de la campagne de suivi, qui a débuté en mars 2009 et a duré 3 ans avec de multiples activités menées à intervalles de 3 mois, nous a permis de fournir des informations fiables sur l'effet que l'inser-

tion de barrières submergées a eu sur le milieu environnant. L'objectif principal du suivi était de détecter d'éventuelles interférences négatives sur l'équilibre du littoral pour permettre, si nécessaire, des changements rapides ou des interventions de rétablissement. Par ailleurs, le but du suivi était de vérifier l'efficacité des barrières submergées afin de permettre la définition d'autres interventions futures.

L'examen de toutes les données enregistrées a permis d'établir qu'il n'y a eu aucune altération dans la prairie de Posidonie : son état de conservation n'a jamais montré de variations significatives dans sa densité à proximité des ouvrages submergée. Les variations présentes, comme l'ont démontré les levés précédents, montrent une tendance principalement due à la variabilité spatiale de la densité de la prairie elle-même.

Des preuves similaires sont apparues pour la sédimentologie : la comparaison entre les données acquises montre que le diamètre moyen a toujours été inclus dans les valeurs des sables, tandis que pour la classification il y a une légère réduction entre la première et les autres campagnes pertinentes, tout en restant toujours dans les limites « mal ou moyennement classée ». Il est important de noter que le pourcentage de sédiments fins (fraction < 63 microns) est plus faible dans les campagnes successives à la première. Les paramètres biologiques enregistrés avec DBO5 et DCO ont constamment montré une absence substantielle de phénomènes prolifératifs d'origine biologique.

Les levés bathymétriques et topographiques effectués à la fin des trois années ont montré, bien qu'il y ait un recul et une progression cycliques en raison du caractère saisonnier des événements météorologiques et maritimes, une amélioration substantielle des conditions de stabilité du trait du littoral protégé par les barrières.

L'analyse topographique réalisée en juin 2012 montre, dans l'ensemble, un retour à la position enregistrée au début de la campagne de suivi, c'est-à-dire un avancement du trait de littoral protégé par les barrières d'environ 8 mètres par rapport à la situation avant les travaux.

L'accumulation de sédiments enregistrée en 2010 dans les zones environnantes s'inscrit dans les valeurs précédentes, c'est-à-dire aux niveaux de 2009.

Les inspections visuelles effectuées sur les barrières existantes avaient révélé certaines déchirures et des défaillances structurales conséquentes qui nécessitaient un entretien urgent et le rétablissement des conditions de conception, peut-être par l'installation de nouveaux géoconteneurs au-dessus de ceux déjà en place.

La non-réalisation de cette intervention a progressivement conduit à l'atténuation, d'abord, puis à la disparition, des résultats bénéfiques déjà obtenus. Abstraction faite de l'effet saisonnier favorable, les barrières, qui ont été désormais largement remaniées, ont conclu leur fonction.

L'expérience opérationnelle acquise, les données recueillies et la durabilité des géotubes conduisent la direction de Forte Village à une nouvelle intervention par phases, qui prévoit d'abord un *rechargement* saisonnier de sable selon une logique de *maintenance* qui, après un suivi complémentaire, si celui-ci n'est pas suffisant, sera ensuite intégré avec des systèmes plus stables tels que ceux déjà réalisés.

Alessandro Lai et Andrea Ritossa

Bibliographie

Atzeni A., De Muro S., Di Gregorio F., Piras G., 2002. Carta del Rischio Geo-ambientale nelle coste della Sardegna. Univ. Cagliari, C.N.R., M.I.U.R., R.A.S. échelle 1 : 300.000, SELCA Cagliari.

Komar, P. D., 1998. Beach Processes and Sedimentation, Ch. 04 – The Changing Level of the Sea, Prentice Hall.

Lucarini M., Del Gizzo M., Iadanza C., Cerri C., Berti D., Ligato D., Brustia E., Vittori E., Pasanisi F., Ferruzza G., Conti M., Cappucci S., Corsini S., 2007. Atlante delle opere di sistemazione costiera. APAT, Manuels et Lignes Directrices 44, 169 pages.

MarTech Srl (2007). Progetto per la messa in sicurezza del litorale antistante il Forte Village Resort in località S. Margherita di Pula (Ca).

MarTech Srl (2007). Relazione Monitoraggio – FASE 10 (2012) relativa al Progetto per la messa in sicurezza del litorale antistante il Forte Village Resort in località S. Margherita di Pula (Ca).

Masselink, G., Hughes M.G., Knight J., 2011. Introduction to Coastal Processes & Geomorphology, 2nd edition ed., Hodder Education, Londre.

MATT & MEF, 2005. Analisi delle caratteristiche meteomarine al largo e a riva e valutazione dei processi evolutivi costieri. Rédigé par Noli A. & Mita M. pages 367. I.P.Z.S. Rome

MATTM-Régions, 2017. Linee Guida per la Difesa della Costa dai fenomeni di Erosione e dagli effetti dei Cambiamenti climatici. Document préparé par la Table Nationale sur l'Érosion Côtière MATTM-Régions avec la coordination technique de ISPRA.

Programme Action Côtes (2013) – Département de la Défense de l'Environnement RAS.

Tilocca G., Murrau A., 2003. Linee Guida per l'individuazione dei criteri generali per la difesa dei litorali. Ministère des Travaux publics, Service Défense du Sol, R.A.S. (avec fiches type jointes pour la création d'une banque de données)

Valloni R., Ferretti O., 2002. Rassegna tipologica e statistica degli interventi di ripascimento artificiale dei litorali italiani. Rel. inédite, ENEA-Université de Parme.

Sardaigne



Réalisation d'une plage de gravier à Cala Gonone (Dorgali, NU)

A Cala Gonone, dans le Golfe de Orosei, entre 1994 et 1997, un des premiers projets connus en Italie pour la construction d'une plage de gravier a été réalisé. Cette intervention a inspiré d'autres engraisements de plages similaires réalisés dans d'autres régions au cours des années suivantes, mais malheureusement le manque de suivi (qui était fréquent dans ces années-là) n'a pas permis de profiter pleinement de cette expérience.

Cala Gonone est un petit hameau de la municipalité de Dorgali où, après la guerre, une intense activité touristique et balnéaire s'est progressivement développée malgré la rareté des plages à proximité du centre-ville. De nombreux touristes se sont déplacés, avec un service de bateaux partant du port, vers d'autres plages du Golfe, dont certaines, comme Cala Luna, s'inscrivent dans un environnement d'une valeur naturelle et paysagère exceptionnelle qui ne pouvait résister à une pression touristique aussi forte.

La Région Sardaigne a donc financé une étude du littoral, la conception et la mise en œuvre d'une intervention qui pourrait donner au pays une plage pour soutenir le tourisme et permettre une meilleure gestion des zones les plus sensibles.

L'impossibilité de réaliser une plage de sable stable sans structures défensives lourdes a orienté le projet, élaboré par le Studio Volta de Savone, vers la construction de plages de gravier stabilisées par des hauts-fonds semi-naturels (Fig. 5.26). Elles furent construites avec des blocs de basalte arrondis, souvent prélevés dans les champs, qui simulaient ceux qui s'effondrent souvent des falaises voisines. La fonction

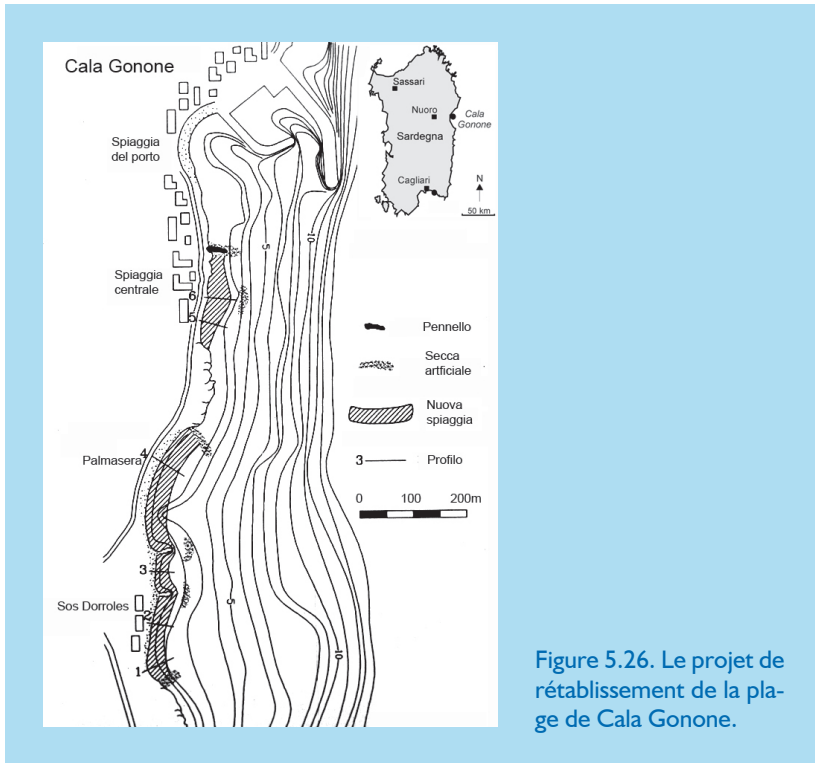


Figure 5.26. Le projet de rétablissement de la plage de Cala Gonone.

des hauts-fonds était de modeler la ligne de rivage en fonction de la morphologie de la falaise située à l'arrière. Trois épis courts ont également été construits pour le confinement latéral du matériau.

Entre l'automne 1994 et le printemps 1995, les 23 000 premiers m³ de sédiments ont été déposés, provenant principalement d'une carrière de calcaire et dans une moindre mesure du dragage d'un port. Le matériel déchargé sur la plage a été poussé en mer à l'aide d'une pelle mécanique, afin que les vagues puissent ensuite le ramener sur le rivage en donnant à la plage un profil naturel, tandis que les granulés subissaient un premier arrondissement.

Les travaux ont été interrompus en raison de problèmes avec l'entreprise contractante et la plage est restée pendant plus de deux ans avec les structures achevées mais avec un engraissement inférieur à celui du projet.

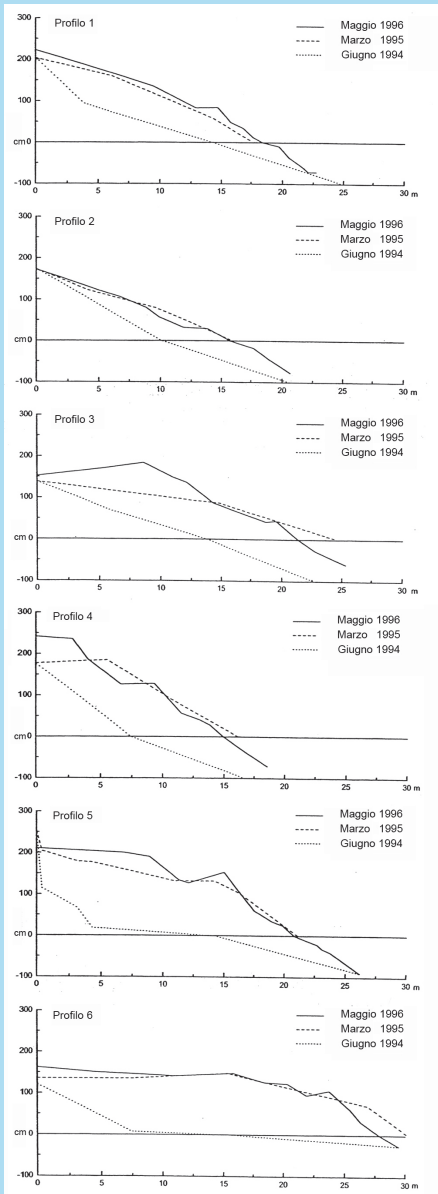


Figure 5.27. Évolution du profil de la plage émergée entre le début des travaux, leur interruption et après plus d'un an (pour la position des profils, voir Fig. 5.26).

Bien qu'aucun suivi n'ait été prévu, certains levés de la plage émergée ont été effectués avant le début des travaux (juin 1994), à leur achèvement (mars 1995) et en mai 1996.

Les levés ont démontré combien le matériau s'était déplacé vers la rive, à tel point que le relief de mai 1996 indiquait une plage plus haute qu'à la fin des travaux (Fig. 5.27) ; de plus, les granules étaient bien arrondis et la plage montrait une excellente utilisabilité (Pacini et al., 1999). En septembre 1997, des mesures du profil de la plage ont été effectuées jusqu'à une profondeur de 1 m, sur la base desquelles des estimations de la perte de sédiments sur les différentes plages ont été faites (Atzeni, 1999).

Après l'interruption des travaux, l'engraissement a repris à l'automne 1997 et s'est terminé en juin 1997 après la pose et la distribution de 57.000 m³ supplémentaires, cette fois de granite rose (Fig. 5.28).

En novembre 1997, une tempête de mer avec un temps de retour estimé à 50 ans a frappé la côte de Cala Gonone, causant des dégâts d'environ 1 million d'euros au port, mais la plage en sortit indemne.

L'analyse de la côte a été poursuivie par Arba et al. (2002), qui ont montré la bonne stabilité de l'engraissement de la plage et mis en évidence le comportement différent des matériaux carbonatés par rapport aux matériaux granitiques. Les premiers ont subi un fort arrondi, tandis que les seconds se sont heurtés à une séparation des monocristaux avec une réduction de leurs dimensions.



Figure 5.28 : La plage centrale de Cala Gonone au début des travaux (on peut voir en arrière-plan le début du déversement du gravier calcaire) et après l'engraissement avec du matériel granitique.

Toutes ces études furent réalisées dans le domaine universitaire en raison du grand intérêt scientifique du projet, mais elles ne faisaient pas partie d'un plan de suivi prédéfini et ne disposaient pas des ressources financières appropriées. L'ensemble des données recueillies sont fragmentaires, inégales et parfois contradictoires, et font référence à des intervalles de temps courts.

Aujourd'hui, il n'est donc pas possible de reconstituer complètement l'évolution morphologique et sédimentologique de cet engraissement de plage et il n'existe pas d'éléments valables pour évaluer son état effectif de stabilité et établir un plan de gestion à moyen terme de la plage.

Pour les plages de Cala Gonone, la Région Sardaigne a récemment financé une intervention, actuellement en phase d'étude de pré faisabilité, visant à l'entretien extraordinaire des engraissements réalisés entre 1994 et 1997, afin d'assurer l'importante fonction de protection exercée au pied des falaises derrière les plages et le réaménagement de la ligne de rivage. Le projet comprend des interventions pour la mise en valeur des hauts-fonds artificiels et de nouveaux apports de sédiments sur les plages. Des levés détaillés fourniront des informations plus précises sur les besoins réels.

Mario Deriu et Mauro Farris

Bibliographie

Arba P., Arisci A., De Waele J., Di Gregorio F., Ferrara C., Follesa R., Piras G. e Pranzini E., 2002. Environmental impact of artificial nourishment of beaches of Cala Gonone (Central-East Sardinia). Littoral 2002, 6th Int. Symp., Porto, Portugal. Pages 465-468.

Atzeni A., 1999. Sul ripascimento di spiaggia con miscele composite di sedimenti: il caso delle spiagge di Cala Gonone (Dorgali, Sardegna). Études côtières, 1 : 57-73.

Pacini M., Pranzini E. et Siritto G., 1999. La ricostruzione delle spiagge di Cala Gonone. Études côtières, 1: 43-55.

Pacini M., Pranzini E. et Sirito G., 1997. Beach nourishment with angular gravel at Cala Gonone (Eastern Sardinia, Italy). MEDCOAST '97, Qawra, Malta, 11-14 Nov. Pages 1043-1058.

Pranzini E., 2009. Protection studies at two recreational beaches: Poetto and Cala Gonone beaches, Sardinia, Italy. En : Beach Management, Allan Williams and Anton Micallef Eds., Earthscan publishers, Pages 287-306.

Textes de référence

La littérature sur la gestion des bandes de côte s'est enrichie ces dernières années du fait de l'aggravation de l'état des littoraux, des pressions auxquelles ils sont soumis et des scénarios prévus du fait du réchauffement climatique.

Parallèlement, les institutions et les citoyens sont de plus en plus sensibilisés aux questions environnementales.

Cela a incité de nombreux chercheurs à réduire leur engagement dans la recherche, en accordant plus d'attention à la diffusion des connaissances déjà acquises par la communauté scientifique internationale et aux expériences menées, avec plus ou moins de chance, dans différents pays.

Des raisons de marché ont poussé l'industrie de l'édition vers la production de textes en anglais, même s'il existe des exemples d'excellente littérature dans les différentes langues nationales.

Nous indiquerons ci-dessous quelques textes plus faciles à consulter et dont les thèmes intéressent les acteurs de la gestion de l'érosion côtière, bien conscients du caractère limité de cette liste et, peut-être, de son caractère aléatoire. Cela signifie qu'il existe certainement d'autres excellents textes que nous avons oubliés ou que, par notre faute, nous ne connaissons pas !

Il existe également des revues scientifiques qui contiennent exclusivement ou principalement des articles sur la morphologie, la dynamique, la protection et la gestion du littoral. Même cette liste est décidément réductrice par rapport à ce qui est publié dans le monde.

Géomorphologie côtière et dynamique des littoraux

Bird E., 2016. Coastal cliffs : morphology and management. Springer, Dordrecht, 92 pages.

Carter R.W.G., 1988. Coastal environments. An introduction to the physical, ecological and cultural system. Academic Press, Londres, 616 pages.

Ciavola P., Coco G. (Eds.), 2017. Coastal storms. Processes and Impacts. John Wiley & Sons, Chichester, UK, 266 pages.

Davidson-Arnott R., Introduction to Coastal processes and Geomorphology. Cambridge University press, Cambridge, 442 pages.

Dean R.G., Darymple R.A., 2002. Coastal processes with engineering applications. Cambridge University press, Cambridge, 475 pages.

Hslett S.H., 2001. Coastal systems. Routledge, Londres, UK, 218 pages.

Pranzini E., 2004. La forma delle coste. Geomorfologia costiera, impatto antropico e difesa dei litorali. Zanichelli, Bologna, 246 pages.

Pranzini E. and Williams A.T., 2013. Coastal erosion and protection in Europe. Routledge, Londres & New York, pages 476.

Shwartz M.L. (Ed.) 2005. Encyclopedia of Coastal science. Springer, Dordrecht, 1211 pages.

Simeoni U., Corbau C., Pranzini E., Ginesu S., 2012. Le Pocket beach. Dinamica e gestione delle piccole spiagge. Franco Angeli, Milan, 176 pages.

Woodroffe C.D., 2002. Coasts. Form, processes and evolution. Cambridge University press, Cambridge, 623 pages.

Monitorage

Cipriani L.E. (Ed.), 2013. Coastal erosion monitoring. Nuova Grafica Fiorentina, 244 pages.

Milli M., Surace L., 2011. La linea di costa. Definizioni, riferimenti altimetrici e modalità di acquisizione dei dati. Alinea Editrice, Florence, 79 pages.

Pranzini E., Wetzel L. (Eds), 2008. Beach Erosion Monitoring. BeachMed-e/OpTIMAL Project, Nuova Grafica Fiorentina, Florence, 230 pages..

Défense des littoraux

Aminti P. et Pranzini E. (Eds.) 1993. L'erosione e la difesa dei litorali. In: La difesa dei litorali in Italia. Edizioni delle Autonomie, Rome. Pages 326.

Bird E., Lewis N., 2015. Beach renourishment. Springer, Dordrecht, 137 pages.

Bruun P (Ed.) 2005. Port and coastal engineering. Journal of Coastal Research S.I. 48, 553

Cooper J.A., Pilkey O.H. (Eds.), 2012. Pitfalls of shoreline stabilization. Selected case studies, Springer, Dordrecht, 333 pages.

Dean R.G., 2002. Beach nourishment. Theory and practice. World scientific, New Jersey, USA, 399 pages.

French P.W., 2001. Coastal defences. Processes, problems and solutions. Routledge, Londre, pages 366.

Goudas C., Katsiaris G., May V., Karambas T. (Eds.) 2003. Soft Shore Protection, Coastal Systems and Continental Margins. Kluwer Academic Publishers, 398 pages.

Herbic J.B., (Ed.), 1999. Handbook of coastal engineering. McGraw-Hill, New York, 1152 pages.

Schwartz M.L. (Ed.), 2005. Encyclopedia of coastal science. Springer, Dordrecht, 2111 pages.

Silvester R., Hsu J.R.C., 1993. Coastal stabilization. Innovative concepts. Prentice-Hall Inc., Englewoof Cliffs, N.J., 578 pages.

Sunamura T., 1992. Geomorphology of rocky coasts. John Wiley & Sons, Chichester, USA, 302 pages.

USACE, 2002-2015. US Army Coastal Engineering Manual. <http://chl.erdc.usace.army.mil/cem>

Gestion Intégrée des Zones Côtières

Botero C. M., Cervantes O. D., Finkl C.W. (Eds.), 2018. Beach Management Tools – Concepts, Methodologies and Case Studies, Springer, Dordrecht, 960 pages.

Cicin-Sain B., Knecht R.W., 1998. Integrated coastal and ocean management. Island Press, Washington, USA, 515 pages.

Clark J.R., 1996. Coastal Zone Management Handbook. Lewis publishers, Boca Raton, Floride, 694 pages.

Doody P., Ferriera M., Lombardo S., Lucius I., Misdorp R., Niesig H., Salman A., Smallegange, Cipriani L.E., Lanza S., Pranzini E., Randazzo G. (2007). Vivere con l'erosione costiera in Europa. Risultats de l'étude Érosion. Commission Européenne, 38 pages.

French P.W., 1997. Coastal and estuarine management. Routledge, Londre, UK, 251 pages.

Kay R., Alder J., 2000. Coastal planning and management. Spon press, Londre, 375 pages.

Nordstrom K.F., 2000. Beach and dune restoration. Cambridge University press, Cambridge, UK, 187 pages.

Nordstrom K.F., 2000. Beaches and dunes of developed coasts. Cambridge University press, Cambridge, 338 pages.

Pranzini E. (Ed.), 1986. La gestione delle aree costiere. Edizione delle Autonomie, Rome. 237 pages.

Rangel Biutrago N., 2018. Coastal scenery : evaluation and management. Springer, Dordrecht, 247 pages.

Williams A., Micallef A., 2009. Beach management. Principles & practice. Earthscan, Londre, 445 pages.

Revue scientifique

Coastal Engineerin

<https://www.journals.elsevier.com/coastal-engineering/>

Estuarine, Coastal and Shelf Science

<https://www.journals.elsevier.com/estuarine-coastal-and-shelf-science/>

Journal of Coastal Conservation

<https://www.springer.com/earth+sciences+and+geography/geography/journal/11852>

Journal of Coastal Research

<http://cerf-jcr.org/>

Ocean and Coastal Management

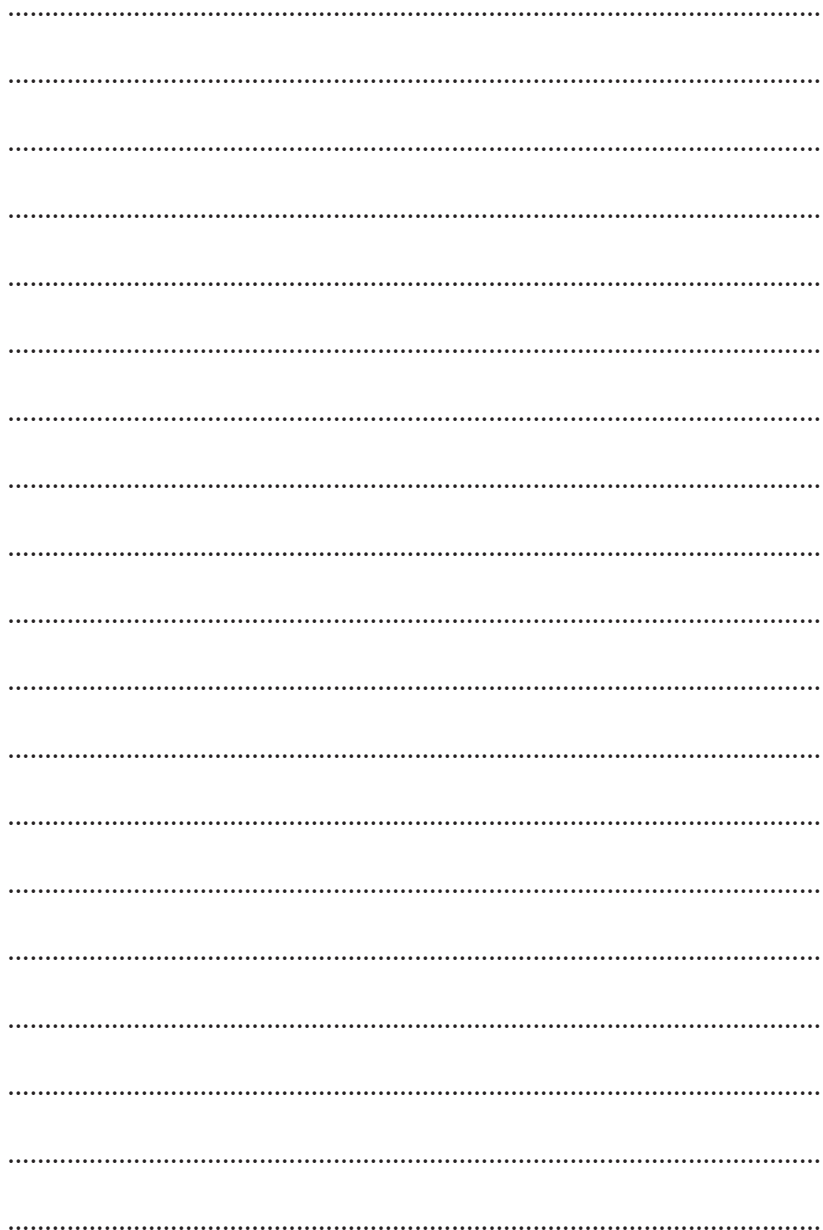
<https://www.journals.elsevier.com/ocean-and-coastal-management/>

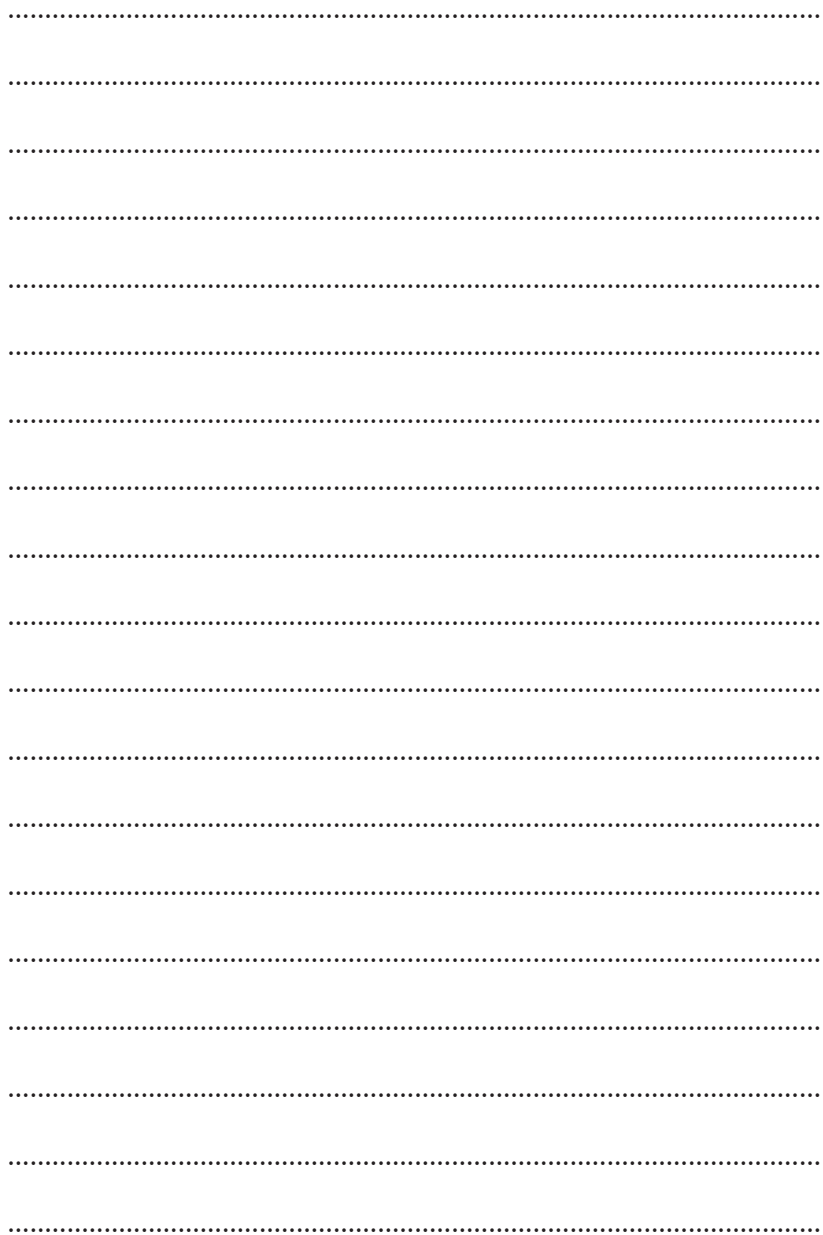
Shore & Beach

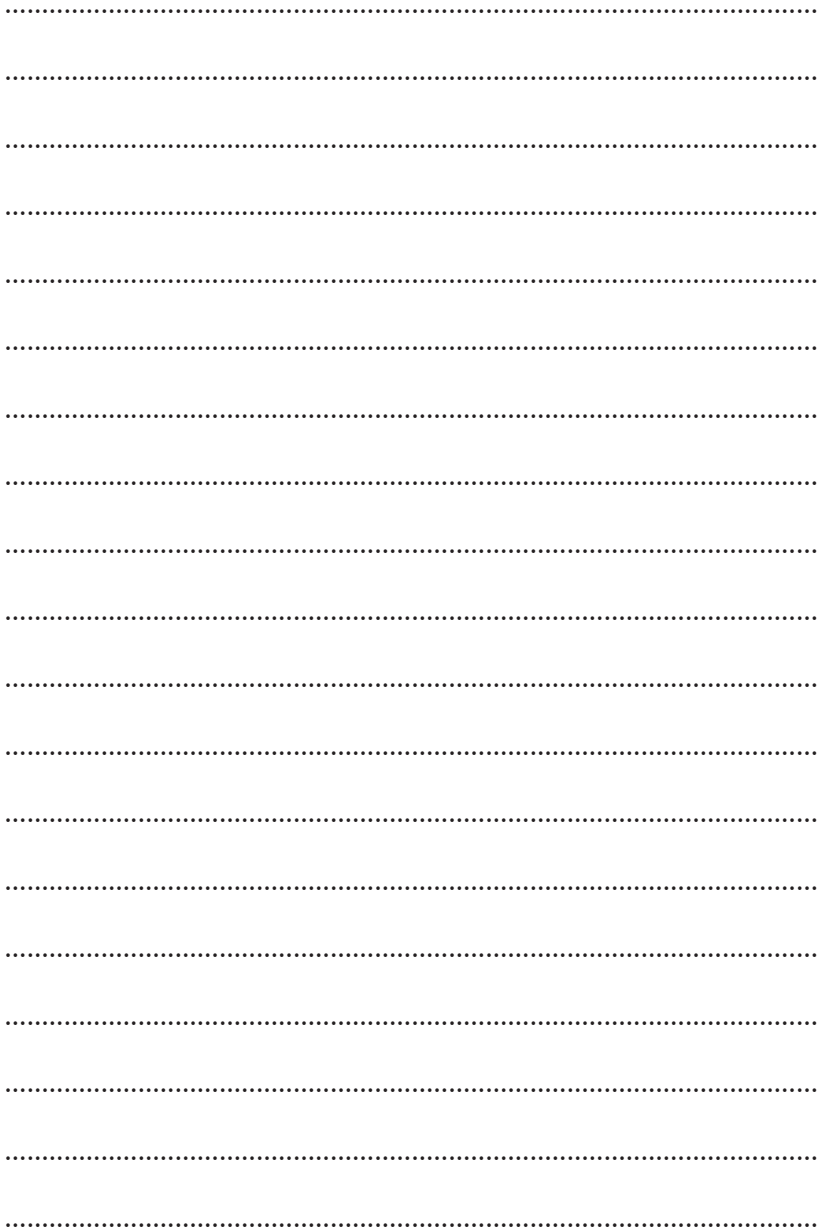
<http://asbpa.org/publications/shore-and-beach/>

Études côtières

<http://www.gnrac.unifi.it/rivista/rivista.htm>









Fini d'imprimer au mois de novembre 2019

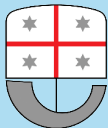
ISBN 978-88-7970-994-1



9 788879 709941

MAREGOT

MANagement des Risques de l'Erosion
côtière et actions de GOUVERNANCE
Transfrontalière



REGIONE LIGURIA



LE DÉPARTEMENT

REGIONE
TOSCANA



REGIONE AUTONOMA DE SARDIGNA
REGIONE AUTONOMA DELLA SARDEGNA



Office de l'Environnement
de la Corse
Utilità di l'Ambiente di a Corsica



Conservatoire
du littoral



PARCO
NAZIONALE
DELLE
CINQUE TERRE
Aree Marine Protette delle Cinque Terre



Geosciences pour une Terre durable

brgm



Università degli Studi

Cagliari



UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
FIRENZE

DST
DIPARTIMENTO DI
SCIENZE DELLA TERRA



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI
DI GENOVA



REGIONE AUTONOMA DE SARDIGNA
REGIONE AUTONOMA DELLA SARDEGNA
AGENZIA REGIONALE PRO S'AMPARU DE S'AMBIENTE DE SARDIGNA
AGENZIA REGIONALE PER LA PROTEZIONE DELL'AMBIENTE DELLA SARDEGNA
ARPAS



S.D.I.S. 2B



CONSORZIO
LaMMA