



OPERATION BEACHMED - e

SOUS-PROJET OpTIMAL (MESURE 2.1)

**« OPTIMISATION DES TECHNIQUES INTEGREES DE
MONITORAGE APPLIQUEES AUX LITTORAUX »**

RAPPORT DE CONCLUSION - PHASE A

2^{ème} Edition

Février 2007



OpTIMAL

**OPTIMISATION DES TECHNIQUES INTEGREES DE
MONITORAGE APPLIQUEES AUX LITTORAUX**

Phase A – Revue Bibliographique

Mots clés : évolution côtière, Méditerranée, techniques de monitoring

PARTENARIAT

P (1) – Dipartimento di Scienze della Terra (DST) – Università degli Studi di Firenze - Toscana, Italia (Chef de file)

P (2) – Dipartimento di Ingegneria delle Strutture, dei Trasporti, delle Acque, del Rilevamento, del Territorio (DISTART) – Università di Bologna Alma Mater Studiorum – Emilia Romagna, Italia

P (3) – Dipartimento per lo Studio del Territorio e delle sue Risorse (DIPTERIS) - Università degli Studi di Genova – Liguria, Italia

P (4) – Dipartimento di Scienze della Terra (DST) - Università degli Studi di Roma « La Sapienza » – Lazio, Italia

P (5) – Agenzia Regionale Prevenzione e Ambiente dell'Emilia-Romagna (ARPA Ingegneria Ambientale) – Emilia Romagna, Italia

P (6) – EID Méditerranée – Hérault, France

P (7) – Eastern Crete Development Organisation (OANAK) – Crète, Grèce

P (8) – Institute of Applied Computational Mathematics (IACM) – Foundation for Research and Technology (FORTH) – Crète, Grèce

P (9) – Laboratoire de l'Hydraulique et des Travaux Hydrauliques – Université Democritus de Thrace – Macédoine de l'Est, Grèce

P (10) – Instituto de Ciencias del Mar (ICM) – Catalunya, Espagne

Collaborateurs

Enzo Pranzini¹, Eugene Farrell¹, Lilian Wetzel¹, Lorenzo Rossi¹, Paolo Aminti¹, Sara Carli¹, Eleonora Torricelli², Renata Archetti², Chiara Francesca Schiaffino³, Marco Ferrari³, Nicola Corradi³, Elisabetta Petrocchi⁴, Giovanni Battista La Monica⁴, Maria Cristina Salvatore⁴, Paolo Tortora⁴, Rosa Maria Salvatori⁴, Ruggero Casacchia⁴, Matteo Monti⁵, Maurizio Morelli⁵, Mentino Preti⁵, Nunzio De Nigris⁵, Hugues Heurtefeux⁶, Nans Bujan⁶, Evangelos V. Koutandos⁸, Nikolaos A. Kampanis⁸, Theofanis V. Karambas⁸, Nikos Kotsovinos⁹, George Xeidakis⁹, Anastasios Georgoulas⁹, Dimitris Petridis⁹, Petroula Delimani⁹, Ana Barnabeu¹⁰, Belen Alonso¹⁰, Gemma Ercilla¹⁰, Ruth Duran¹⁰.

¹ Dip. Sc. della Terra, Università degli Studi di Firenze

² DISTART, Università degli Studi di Bologna

³ DIPTERIS, Università degli Studi di Genova

⁴ Dip. Sc. della Terra, Università degli Studi di Roma “La Sapienza”

⁵ ARPA, Ingegneria Ambientale

⁶ EID Méditerranée

⁷ OANAK

⁸ IACM, FORTH

⁹ School of Engineering, Democritus University of Thrace

¹⁰ ICM

SOMMAIRE

<u>Introduction</u>	8
<u>Techniques</u>	16
1. Techniques de télé-détection par satellite	16
2. ALB/LIDAR	36
3. Sismique	63
4. Réseau de Points de Contrôle en Mer	72
5. Analyse de la Variabilité Intrinsèque des Plages	83
6. Modèles Numériques	93
7. Systèmes Vidéo/Webcams	129
<u>Références</u>	148
Annexe I - Visualisation par contour d'un MNT sur l'étang de Pierre Blanche	186
Annexe II - Références additionnelles	187

FIGURES

Figure 1 - Extraction de la ligne de rivage de la zone située entre Bocca di Magra et Marina di Carrara (Toscane, Italie), prise d'une image satellite Quickbird, d'Août 2004, dans la bande panchromatique

Figure 2 - Plan des lignes du vol test effectué le 17 Mars 2006.

Figure 3 - Visualisation de la donnée recueillie par les lignes de vols

Figure 4 - Exemple d'une zone couverte et de sa représentation tridimensionnelle grâce aux mesures LIDAR

Figure 5 - Emplacement des points de mesures de la turbidité par la méthode du disque de Secchi

Figure 6 - Localisation d'un extrait du MNT étudié - Lido de l'étang de Pierre Blanche

Figure 7 - Représentation tridimensionnelle des données (résolution de 20 m)

Figure 8 - Schéma de la réfraction et de la réflexion que subissent les ondes sismiques (modifié de McQuillin et al, 1984)

Figure 9 - Schéma du système de sismique de réflexion (modifié de McQuillin et al, 1984)

Figure 10- Schéma de la résolution et de la pénétration des différents appareils sismiques selon la fréquence de la source (modifié de l'Ifremer – <http://www.ifremer.fr>)

Figure 11- Schéma de l'érosion sur une côte linéaire, provoquée par la présence d'infrastructures côtières

Figure 12 - Concepts des modèles morphologiques composés

Figure 13 - Changements morphologiques dus à un système des brise-lames isolés (après 60 jours d'action de vague)

Figure 14 - Circulation derrière les brise-lames isolés (après 28 jours d'action de vague)

Figure 15 - Changements morphologiques dus à un système d'épis imperméables (après 90 jours d'action de vague)

Figure 16 - Circulation autour d'un système d'épis imperméables (après 60 jours d'action de vague)

Figure 17 - Circulation autour d'un système d'épis immergés

Figure 18 - Changements morphologiques dus à un système d'épis immergés (après 90 jours d'action de vague)

Figure 19- Structure du SMC

Figure 20 - Image *time-exposure* et image *time-exposure* rectifiée de Levanto, Italie

Figure 21 - Image *snapshot* F280905-1201_01_01 du littoral de Levanto, Italie

Figure 22 - Image *time-exposure* F280905-12_mean du littoral de Levanto, Italie

Figure 23 - Image *variance* F280905-12_var du littoral de Levanto, Italie

Figure 24 - Images *Snapshot*, *Time exposure* et *Variance* à Lido di Dante

Figure 25 - Image *day-timex* F280905_mean du littoral de Levanto, Italie

Figure 26 - Exemple de *time-stack* relatif à un lanceur de pixel perpendiculairement disposé au bord représentable sur l'image de Littoral de Dante le 14 novembre 2004 heures 14.12 (Archetti et al, 2004)

TABLEAUX

Tableau 1 - Méthodologies de monitoring de la ligne de rivage/*nearshore* actuellement utilisées

Tableau 2 - Données de base sur la position de la ligne de rivage/sur le *nearshore* (à échelle régionale) disponibles et participation des partenaires à des projets précédents

Tableau 3 - Caractéristiques Principales – Quickbird

Tableau 4 - Caractéristiques Principales - IKONOS

Tableau 5 - Caractéristiques Principales - EROS

Tableau 6 - Caractéristiques Principales - IRS

Tableau 7 - Caractéristiques Principales - SPOT

Tableau 8 - Caractéristiques Principales – Landsat 7

Tableau 9 - Caractéristiques Principales – ERS

Tableau 10 - Caractéristiques Principales – RADARSAT

Tableau 11 - Caractéristiques du système SHOALS T1000

Tableau 12 - Caractéristiques du système LADS MkII

Tableau 13 - Amplitude de la bande selon les modalités de relevé

Tableau 14 - Caractéristiques du système Hawk Eye II

Tableau 15 - Caractéristiques des relevés ALB et *single-beam*

Tableau 16 - Ecart entre résultats ALB et *single-beam*

Tableau 17 - Paramètres du relevé ALB avec le système SHOALS T1000

Tableau 18 - Caractéristiques des principaux appareils sismiques (modification de Judd et Hovland, 1992)

INTRODUCTION

La bande côtière comme tous les milieux de transition est caractérisée par une sensibilité considérable à chaque intervention anthropique. Ceci, associé aux forts conflits d'intérêts existant dans cette partie du territoire, déterminés par sa valeur élevée (économique, paysagère et sociale), rend les zones côtières extrêmement vulnérables. Justement pour ce motif, une approche intégrée à la gestion de cette partie du territoire (Integrated Coastal Zone Management/ICZM) s'est développée, laquelle tient compte de tous ses composants et de leurs rapports réciproques. Dans ce contexte l'analyse de l'évolution de la ligne de rivage a une importance spéciale, étant donné que les plages sont un des lieux plus sensibles en attractant au même temps des intérêts différents. L'analyse du déplacement de la ligne de rivage dans le temps, soit en conditions naturelles, soit en suite aux interventions structurales ou aux rechargements artificiels, constitue donc un aspect fondamental dans l'ICZM.

Il est opportun de relever aussi que la définition de "zone côtière", de "littoral" et de "ligne de rivage" est une matière extrêmement complexe, parce qu'ils peuvent prendre des aspects différentes comme référence: morphologiques, politiques, administratifs et économiques. N'importe quel soit le contexte dans lequel il s'opère, l'aspect morphologique devient prioritaire puisque il est associé aux variations de surface de la plage, la distance de la mer aux autres éléments naturels du paysage (dunes, zones humides, etc.) et aussi à des infrastructures routières, urbaines et industrielles.

Il est donc opportun procéder d'abord à une définition univoque de "ligne de rivage" et connaître la variabilité intrinsèque de cet élément morphologique pour pouvoir isoler les oscillations périodiques ou casuelles des tendances évolutives de moyen et long terme, qui sont celles d'intérêt à qui doit planifier et aménager des interventions sur la bande côtière.

Une définition "morphologique" qui est généralement acceptée, considère la ligne de rivage comme l'ensemble des points où l'air, l'eau et la terre se rencontrent. Si ceci peut satisfaire les nécessités sémantiques, il n'aide pas beaucoup dans la phase opérationnelle, quand cet élément géographique doit être identifié sur le territoire et géo-codifié dans un système précis de coordonnées, pour qu'on puisse étudier son déplacement dans le temps, avec des identifications-localisations successives.

Une fois que l'objet du suivi (la ligne de rivage) est identifié, il est opportun de définir des critères opérationnels pour sa reconnaissance soit sur le terrain, avec les différentes méthodes topographiques, soit sur les images analogiques ou digitales qui seront utilisées pour la télésurveillance.

L'exactitude de la détermination et du positionnement cartographique de la ligne de rivage devront considérer soit les fautes caractéristiques et prévisibles des méthodes utilisées, soit sa variabilité intrinsèque; tout ça à fin d'optimiser la fréquence des acquisitions en terme de coût-bénéfices, en évitant de cette façon des sur-échantillonnages, qui sont très coûteux en phase d'acquisition et d'élaboration et qui sont aussi inutiles, car les informations qu'ils auraient porté seraient liées aux oscillations de haute fréquence qui constituent le bruit dans le trend général de l'évolution de chaque littoral.

Pour satisfaire la nécessité d'un suivi de l'évolution côtière à l'échelle régionale, et de l'évaluation de l'efficacité des stratégies de défense côtière locales, le projet OpTIMAL développera l'application des méthodologies basées sur des données télé-détectées (avion et satellite avec senseurs optiques et LIDAR) validées avec des systèmes de bathymétrie single et multibeam, DGPS et caméras pour l'acquisition de données de haute résolution spatiale et temporelle. On développera aussi des méthodes pour géo-codifier et calibrer les données d'élévation, dans la plage émergée et immergée (Points de Contrôle en Mer) et pour caractériser le littoral selon sa variabilité morphologique et sédimentologique. La définition de l'exactitude spatiale et temporelle doit être considérée aussi en fonction de la nécessité et des outputs des modèles numériques; en plus on considérera la vraisemblance des décors produits par ces modèles dans la résolution spatiale et temporelle des données d'input. Le projet appliquera ces méthodologies sur des zones pilotes jusqu'à la réalisation d'un prototype de modèle de suivi directement utilisable par les administrations locales, au niveau méditerranée, aux zones naturelles et protégées ou avec des rechargements artificiels. La formation d'un large partenariat permettra la validation croisée des méthodologies qui seront appliquées sur les différentes typologies côtières.

Pendant la Phase A du sous-projet OpTIMAL les 10 partenaires ont suivi les activités prévues sur l'organisation du partenariat, préparation de la proposition, démarrage de l'opération, réunion avec les régions, réalisation des travaux préliminaires de terrain, réunions inter-partenariat et l'échange des premières expériences et données entre les partenaires.

La Phase A s'est caractérisée par une synthèse de l'Etat d'Art, basée sur la littérature scientifique des technologies de monitoring des littoraux et l'étude de son évolution.

Nous pouvons grouper les systèmes de monitoring selon leur type de technique. Le projet OpTIMAL se base sur l'étude, de façon intégrée, des technologies suivantes, directes et indirectes, d'étude de l'évolution des littoraux:

1. Techniques de télé-détection par satellite
2. ALB/LIDAR
3. Sismique
4. Analyse de la Variabilité Intrinsèque des Plages
5. Réseau de Points de Contrôle en Mer
6. Modèles numériques
7. Systèmes Vidéo/Webcams

Ces technologies seront appliquées, au cours du projet, en combinaison ensemble (par exemple images satellites et modèles mathématiques), et avec d'autres techniques, comme photogrammétrie, multibeam, GPS, et analyse des sédiments. Cela permettra de calibrer leur utilisation et d'évaluer leur exactitude.

A ce propos, on doit distinguer des termes qui sont quelques fois utilisés de façon peu claire: précision et exactitude. Même si on peut voir le terme précision utilisé dans la littérature dans un sens général, dans la conception technique il y a une importante différence entre précision et exactitude: les données géospatiales peuvent être enregistrées avec beaucoup de précision mais être totalement inexactes (Devilleers, 2004):

Précision des mesures

La précision peut avoir deux définitions (Longley et al, 2001). Une première se réfère à la capacité que certains outils de mesure ont d'obtenir des mesures successives les plus similaires possibles pour un certain phénomène observé (ex. positions d'un même site enregistrées par GPS). La seconde, plus générale, se réfère au nombre de décimales fournies par un appareil de mesure; plus la mesure aura de décimales et plus elle sera précise. La précision se réfère à la répétitivité de la mesure. Il n'est pas nécessaire de connaître la valeur vraie. Un instrument de mesure est plus précis au fur et à mesure que les résultats de mesure qu'il indique coïncident

avec la vraie valeur (par définition théorique) : un appareil est précis s'il est à la fois juste et fidèle. La précision d'un appareil de mesure peut également être entaché par des causes extérieures : erreur opératoire, erreur provoquée par les facteurs externes (température, pression etc.), erreur de référence ou d'étalonnage, etc. La précision se réfère à la qualité de l'opération à travers laquelle un résultat est obtenu et elle est conventionnellement exprimée par le déchet quadratique moyen (précision standard ou déviation standard) qui caractérise l'instrument considéré, dans certaines conditions de mesure et en utilisant un opérateur moyennement expert, c'est-à-dire capable d'éviter deux erreurs grossiers.

Exactitude d'un levé

L'exactitude peut être définie comme l'approximation d'une mesure à la réalité (David et Fasquel, 1997; Mowrer, 1999). L'exactitude donc il se réfère à la qualité d'un résultat d'une série de mesures, c'est-à-dire à la précision globale avec laquelle une part du territoire est représentée, dans notre cas une partie de la plage.

Pour l'analyse de l'évolution de la ligne de rivage et des profils bathymétriques, l'importance de l'obtention de données avec une exactitude élevée peut être vérifiée à travers l'estimation des volumes et des coûts relatifs au rechargement des plages, et leur comparaison avec le volume sous-évalué, ou le volume surévalué à cause d'une exactitude insuffisante.

Dans l'estimation de l'exactitude nécessaire pour qu'on puisse assurer le *design* correct d'un projet et la correcte évaluation économique des levés des plages émergées et submergées, avec l'objectif de suivre des phénomènes évolutifs et planifier des opérations de rechargement artificiel, il faut bien distinguer entre a) les erreurs accidentels dans la mesure de chaque point qui constitue le levé de la surface, et b) les erreurs dans le positionnement, dans les levés qui seront déroulés successivement, de la surface de référence des cotes de tous les points qui sont relevés de fois en fois. Le premier erreur, en général, peut être toléré avec deux ou même trois ordres de grandeur supérieures (c'est-à-dire supérieures jusqu'à 1000 fois) en comparant avec le second; naturellement l'analyse de chaque cas doit affronter aussi d'autres aspects, comme la densité des points qui composent le levé, leur distribution planimétrique plus ou moins uniforme, la morphologie de la plage, etc.

Pour clarifier synthétiquement avec un exemple, supposons un levé pour le calcul du volume de plage d'un littoral qui est 5 km long, étendu à une bande de largeur de 1 km, c'est-à-dire

une surface de 5.000.000 m² : considérons un levé de points plutôt denses, avec environ 1 point/10 m², c'est-à-dire environ 1000 points par hectare, et que chaque point aie un erreur (déchet quadratique moyen) de ± 10 cm ; l'erreur sur le calcul du volume total résulterait (Aminti et Aminti, 1997) d'environ 700 m³, donc du tout acceptable (environ 0,14 m³/m de plage). D'autre part, si un erreur de la même valeur, ± 10 cm, était présent dans la définition des cotes de référence de deux reliefs successifs, cela aurait influencé avec le même signal tous les points, en déterminant un erreur dans l'évaluation du volume (indépendant de la densité des points de levé) d'environ 700.000 m³ (correspondant à environ 140 m³/m de plage). En termes économiques, si on considère un coût moyen de 15 €/m³ pour le sable d'un rechargement hypothétique, dans le premier cas on aurait une approximation dans l'évaluation du coût de ± 10.500 €, pendant que dans le second cas, on aurait une variation du montant 1000 fois plus grande (c'est-à-dire de 10.500.000 €, clairement pas tolérable).

Après ces considérations synthétiques, on peut voir clairement l'importance de la définition univoque et hautement fiable des surfaces de référence des cotes des levés, liée habituellement aux réseaux de points de contrôle et donc à la leur exacte matérialisation et conservation dans le temps, comme on verra souligné dans les nombreuses contributions dessous. D'autre part, pour optimiser le rapport coût/bénéfice du monitoring et la prévision de l'évolution du littoral à court et moyen termes, il faut considérer aussi la variabilité intrinsèque des systèmes littoraux, ce qui permet de mieux définir l'exactitude nécessaire au suivi de la côte.

Antécédents régionaux

Le Tableau 1 indique d'une façon schématique les méthodologies de monitoring de la ligne de rivage/*nearshore* actuellement utilisées dans les Régions qui participent au sous-projet OpTIMAL.

Le Tableau 2 présente les données de base sur la position de la ligne de rivage/sur le *nearshore* (à échelle régionale) disponibles pour chaque région participant au sous-projet OpTIMAL et la participation des partenaires à des projets précédents dans cette thématique.

Tableau 1 - Méthodologies de monitoring de la ligne de rivage/*nearshore* actuellement utilisées

	Satellite	Photographies Aériennes	Webcam	LIDAR M – Marin T- Terrestre	GPS	DGPS	Multibeam	Single-beam	Sismique réflexion	Analyse Granulométrique	Topographie Traditionnelle
Toscana	X	X	X	T (test)	X	X	X	X	X	X	X
Lazio	X	X			X	X	X	X	X	X	X
Emilia-Romagna	X	X	X	M/T	X	X	X	X		X	
Liguria		X	X		X	X	X	X	X	X	X
Catalunya						X	X	X	X	X	X
Hérault	X SPOT 5	X		X	X	X		X	X	X	
Crète		X			X						X
Macédoine de l'Est		X									X

Tableau 2 - Données de base sur la position de la ligne de rivage/sur le *nearshore* (à échelle régionale) disponibles et participation des partenaires à des projets précédents

	Données de base existantes Couverture régionale/année	Projets Internationaux / Européens			
		EUROSION	Beachmed	CoastView	Autres projets Internationaux
Toscana	1938-2006	X	X		
Lazio	1943-2005		X		
Emilia-Romagna	(1)		X	X	DELOS
Liguria	BEACHMED 2002 (2)		X		TIGRA, TEMRAP, Leonardo da Vinci
Catalunya	ICM, 2006 (3)				
Hérault	SMNLR 1984 et EID, 2000		X		
Crète	N/A				
Macédoine de l'Est	N/A				

- (1) Topographiques et bathymétriques (dune jusqu'au profondeur de fermeté) (1984-1993-2000-2006), données sur la position de la ligne de rivage prises avec photographie aérienne (1943-44; 1977-78, 1983, 1991, 2000 e 2005); données sur la subsidence prises avec niveau géométrique de haute précision (1984, 1987, 1993, 1999 e 2005), et données granulométriques (1971 e 1993)
- (2) Position de la ligne de rivage avec des levés aérophotogrammétriques (2004)
- (3) Les données de base existantes se réfèrent aux données de marées et vagues, prises Generalitat of Catalunya et les ports nationaux. Ce projet est en train de développer une nouvelle base de données sur la position de la ligne de rivage, avec photographies aériennes, et campagnes topographiques et bathymétriques.

On peut vérifier que chaque partenaire a une expérience particulière, et que les régions ont développé cette thématique selon leurs différents scénarios environnementaux et historiques. Par exemple, dans la région de la **Macédoine de l'Est** on n'a pas de base de données; on a commencé à approcher cette question en utilisant des méthodologies comme photographies aériennes et topographie traditionnelle, et maintenant on expérimente des alternatives technologiques qui puissent aider dans le futur ce travail d'une façon plus systématique. Dans l'**Hérault**, depuis le début des années 1980 le SMNLR réalise des profils bathymétriques, disponibles sur le serveur du SMNLR. Depuis le début des années 2000, l'EID Méditerranée réalise des profils topographiques et bathymétriques. Le suivi diachronique du trait de côte (érosion/accrétion) par l'étude historique de photographies aériennes verticales géoréférencées et incluses dans un SIG est aussi disponible. Dans les études précédentes, on a vérifié que les levés topographiques et bathymétriques au moyen de profils ont un maillage trop lâche (distance minimale entre deux profils d'au moins 150 mètres) pour permettre une bonne extrapolation du modelé entre chaque profil. L'interpolation est trop forte et ne permet pas de quantifier le volume global de la plage émergée et immergée sur l'ensemble de son linéaire, ce qui pose un problème en matière de gestion fine des stocks sableux - d'où l'intérêt pour le LIDAR.

Dans la **Catalunya**, l'expérience du group ICM sur le *nearshore* (plateforme continental, surtout) est complétée avec l'expérience de l'expertise externe de l'Université de Vigo dans les zones côtières. L'information disponible sur la zone de Masnou et les rapports et articles publiés, scientifiques et techniques, permettent d'élaborer une base de données qui servira de point de départ à cet étude. La base de données inclue l'information sur les dragages (années 1988-2006), bathymétries de détail (2006), données sédimentologiques (2006), photos aériennes (2006) et données de climat météo-marin (2002-2006). Les données de base existantes se réfèrent aux données de marées et vagues, prises par Generalitat of Catalunya et les ports nationaux. Ce projet est en train de développer une nouvelle base de données sur la position de la ligne de rivage, avec photographies aériennes, et campagnes topographiques et bathymétriques. La Région **Emilia-Romagna** et plusieurs communes de la côte dépensent, désormais, beaucoup de ressources financiers pour le suivi topographique et bathymétrique de la plage émergée et submergée, avec GPS, *multibeam* et systèmes sonar : il y a une base de données avec des données topographiques et bathymétriques (d'une jusqu'au profondeur de fermeté) (1984-1993-2000-2006), des données sur la position de la ligne de rivage prises avec photographie aérienne (1943-44; 1977-78, 1983, 1991, 2000 e 2005); des données sur la

subsidence prises avec niveau géométrique de haute précision (1984, 1987, 1993, 1999 e 2005), et des données granulométriques (1971 e 1993). Pour réduire les temps de suivi et obtenir une restitution complète de la morphologie de la plage émergée et submergée dans la zone d'intérêt, le levé avec systèmes à scansion laser placés sur un avion paraît être la technologie la plus appropriée à développer.

La Région **Liguria** a une base avec données sur la position de la ligne de rivage prises avec des levés aérophotogrammétriques (2004), et a initié dans le 2004-2005 le projet « Suivi d'un trait de côte ligurienne à travers l'emploi d'une *web-cam* » à Liguria di Levante, la plage de Levanto. En **Crète** il n'y a pas de base de données systématique pour toute la côte. Dans la région **Toscana**, nous avons une base de données complète sur la position de la ligne de rivage 1938-2006, obtenues avec aérophotogrammétrie et levés directes. Pour la région **Lazio**, il est disponible auprès l'Università di Roma « La Sapienza » le résultat de la variation de la ligne de rivage entre 1954-1979, sur une base cartographique et pour toute la région, en utilisant l'aérophotogrammétrie. Pour la partie centrale de la côte du Lazio, correspondant à quelques parties ou à tout le delta de la fleuve Tevere, il y a aussi des données sur la position de la ligne de rivage de 1873, 1931, 1950 (toutes dérivées de la cartographie) et 1974, 1979, 1983, 1987 (toutes dérivées de la photographie aérienne). Auprès le Centro di Monitoraggio, pour certaines parties du littoral de la région Lazio, il y a des données sur la position de la ligne de rivage (obtenues dans les dernières années en analysant des photographies aériennes) et sur le bilan sédimentaire. Ces données ont été obtenues pendant des recherches effectuées dans le Projet Beachmed, et des recherches faites par la Région Lazio et plusieurs institutions.

TECHNIQUES

1. TECHNIQUES DE TELE-DETECTION PAR SATELLITE

* **Dip. Sc.Terra/Univ. degli Studi di Firenze**

* **School of Engineering/Univ. Democritus**

* **Dip. Sc.Terra/Univ. degli Studi di Roma « La Sapienza »**

Les données de télédétection fournissent un outil unique pour surveiller des secteurs côtiers. L'observation des changements de la zone côtière a commencé depuis 1930, avec les photographies aériennes. A partir de ce moment-là, l'observation de la Terre a augmenté jusqu'au développement de nouvelles technologies, comme les satellites à haute résolution.

L'utilisation des images satellites et des photographies aériennes dans l'étude et le monitoring des variations de la ligne de rivage fait l'objet de nombreux ouvrages de la littérature scientifique (Baily et Nowell, 1996). Déjà à partir de 1927 les photographies aériennes et les techniques de photogrammétrie ont été employées dans le but de fournir des informations à caractère topographique pour les zones côtières en permettant, historiquement parlant, de réaliser les bases cartographiques utiles au relevé des lignes de rivage (Crowell et al, 1991). Collier et al (1995) mettent l'accent sur les avantages de l'utilisation de photographies aériennes par rapport aux données cartographiques, ils mettent notamment en évidence l'importance de la multi-temporalité des prises de vue et de leur caractère répétable. Dolan (1973) met en avant les avantages du rôle des photographies aériennes dans l'étude de la dynamique côtière pour le nombre d'informations qu'elles contiennent et pour l'exactitude de ce genre de données qui est étroitement liée à la résolution au sol.

L'évolution technologique dans le domaine des pellicules et des objectifs des caméras photogrammétriques permet aujourd'hui d'obtenir des photographies aériennes même à petite et moyenne échelle mais avec une haute résolution au sol (50 cm dans les meilleures conditions de contraste) avec l'avantage d'une photo-interprétation meilleure et plus détaillée (Biasini, 1995). Favretto et al (2004), reconnaissent dans la télédétection de données multispectrales un instrument approprié à l'identification des variations de la ligne de rivage, à l'évaluation des causes et à la prévision des tendances évolutives possibles tandis que Erkkila

et Kalliola (2004) soulignent l'importance de l'utilisation d'images multi-temporelles ETM+ pour le monitoring de la ligne de rivage ainsi que pour l'évaluation de la qualité des eaux.

Bergamasco et Pesaresi (1997) soulignent les avantages de l'utilisation des images Landsat-TM en ce qui concerne le comportement spectral à l'interface eau-sable mais ils mettent aussi en évidence les problèmes liés à la basse résolution spatiale (30 m) pour le relevé et le monitoring de la ligne de rivage.

L'exactitude de la mesure de l'étendue de l'érosion dépend de nombreux paramètres naturels comme, par exemple, l'état de perturbation de la mer et les oscillations de la marée mais aussi de la méthode adoptée pour le relevé de la ligne de rivage (Leatherman, 1983) et de la résolution de la source de données. Les instruments que les progrès technologiques nous mettent à disposition dans le domaine des capteurs et de l'informatique permettent de remédier en partie à ces problèmes par la vérification de la donnée à l'aide de relevés au sol par GPS (*Global Positioning System*) et par la gestion des images (aérophotographiques ou satellite) avec le système GIS (*Geographical Information System*). La résolution des capteurs des satellites commerciaux Landsat (TM et ETM) et SPOT bien que plus haute que celle des précédents (c-à-d MSS) ne se prête pas vraiment à un positionnement exact de la ligne de rivage (Beachmed, 2004c).

Actuellement, les capteurs des satellites commerciaux de nouvelle génération permettent de disposer d'images multispectrales à haute résolution spatiale. Par exemple, les images IKONOS et Quickbird se révèlent, grâce à leur haute résolution spatiale, particulièrement utiles également pour la discrimination non seulement de la ligne de rivage mais aussi pour le classement de la végétation qui lui est associé (Fromard et al, 2004).

L'utilisation des satellites a permis l'obtention d'images virtuelles de toute la terre. La télédétection avec satellite s'est révélée un système fiable et ayant un bon rapport coût/bénéfice pour l'analyse territoriale à une échelle moyenne et petite. Le développement des satellites à haute résolution IKONOS et Quickbird a ouvert de nouvelles perspectives dans ce domaine, même s'il n'y a pas assez d'études pour la validation des données. L'observation de la côte et de la ligne de rivage avec l'aide d'images satellites (Fig. 1) a permis de maintenir actualisées les cartes et les données statistiques d'érosion et accrétion, ce qui permet l'analyse

et la recherche des changements des levés et l'extraction d'information directement de l'image (Loos, 2002).

Parmi ces derniers, le capteur monté sur le satellite Quickbird-2 se prête tout particulièrement aux enquêtes finalisées au monitoring de la ligne de rivage. Lancé en orbite le 18 octobre 2001, il acquiert en même temps des images ayant une résolution panchromatique au nadir de 0,61 m (intervalle de longueurs d'onde 0,45-0,90 μm) et 2.44 m dans la multispectrale (Bleu 0,45-0,52 μm ; Vert 0,52-0,60 μm ; Rouge 0,63-0,69 μm ; Proche IR 0,76-0,9 μm) (Gomasasca, 2004). La résolution spatiale a un degré de définition au sol pouvant être comparé aux capteurs transportés par avion (MIVIS) et c'est pourquoi ces images sont tout à fait valables pour les études ayant comme objectif le monitoring de l'environnement (Chadwick et al, 2005; Yang et al, 2006).

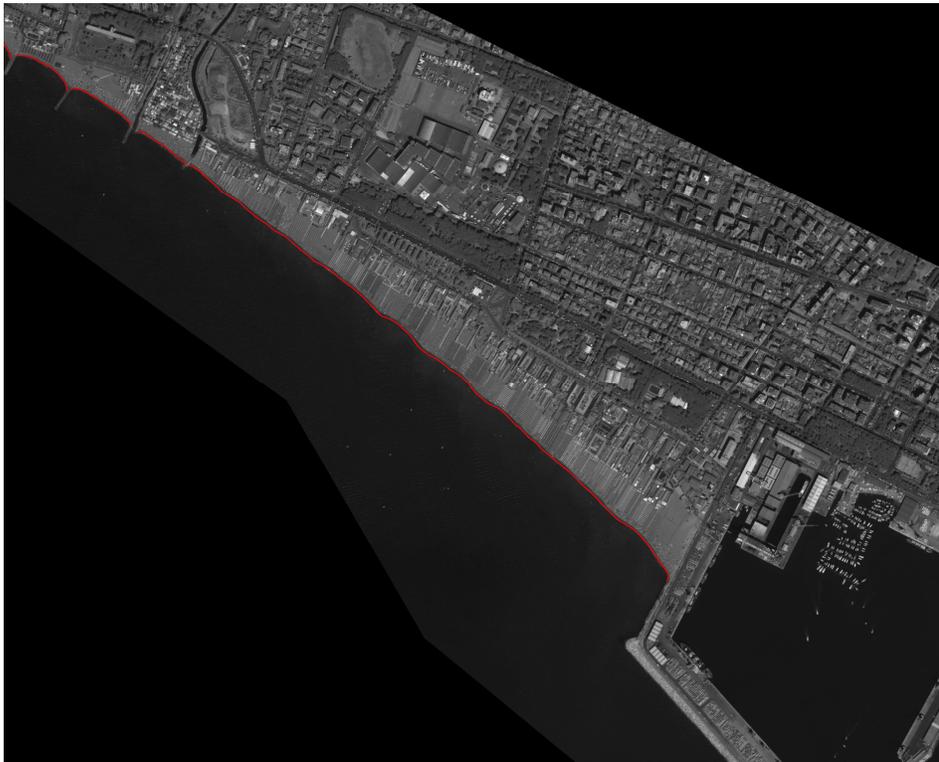


Figure 1 - Extraction de la ligne de rivage de la zone située entre Bocca di Magra et Marina di Carrara (Toscane, Italie), prise d'une image satellite Quickbird, d'Août 2004, dans la bande panchromatique.

Niu et al (2004) et Srivastava et al (2005) ont dérivé le rivage tridimensionnel des images de Quickbird. Ils rapportent une exactitude au sol d'environ 0,65 m. Un certain nombre de conclusions peuvent être tirées:

- Il n'y a aucun logiciel indiqué pour la détermination du rivage avec images prises à distance à cause de la variété des différents types de rivage et de situations : rocheux, arénacé ou artificiel, avec ou sans la marée.
- Quand on utilise des sondes satellites, les difficultés pour la détermination de rivage qui peuvent apparaître, dépendent du type de la sonde qui est utilisée dans chaque cas. Dans le cas de sondes couleurs ou multispectrales, c'est simplement un problème de discrimination de réflectivité entre l'eau de mer et le rivage avec des problèmes liés à la confusion du sable inférieur si l'eau devient très peu profonde. Dans le cas des sondes radar, la discrimination entre la mer et la côte peut être difficile dans le cas des marées.
- Le logiciel standard de traitement d'image peut être employé pour obtenir une détection solide de changement de rivage des images satellites.
- Les nouvelles approches pour l'extraction automatique et semi-automatique de rivage à partir des images satellites de haute résolution peuvent produire de hauts rivages précis jusqu'à l'ordre de grandeur d'un mètre.
- Les paquets visuels peuvent être un outil puissant pour étudier le changement d'un rivage qui est soumis à l'érosion (ou à l'augmentation) spatiale et temporelle élevée.

L'un des problèmes qui ressort de l'utilisation des données à distance est la difficulté de bien discerner la ligne de rivage sur les images et lors de la vérification de la donnée au sol (Battiau-Queney et al, 2003). Un autre problème est celui du transfert fidèle sur les bases cartographiques (Crowell et al, 1991; Thieler et Danforth, 1995; Biasini et Salvatore, 1995).

L'extraction des données d'une image satellite est le point principal pour son utilisation. L'utilisation de techniques de classification visant l'identification de pixels mixtes et des composants de couverture du sol au niveau sub-pixels, se révèle très importante lorsque l'on intervient sur des images relatives à des contextes naturels où la combinaison entre les signatures spectrales de classes différentes est dominante (Binaghi et al, 1999), comme dans le cas de l'interface sable-eau. Dans les recherches pour l'identification de la ligne de rivage, il y a plusieurs procédures d'élaboration déjà consolidées et d'autres qui sont en train d'émerger. Très souvent, les méthodes d'extraction sont focalisées sur l'unique identification de la limite

entre pixels de mer et de terre, et par conséquent il y a une discrimination des pixels mixtes (Bo et al, 2001 ; Lin et al, 2001).

On sait que la procédure d'extraction de la ligne de rivage est passée, dans les dernières années, de la digitalisation manuelle à celle semi-automatique et automatique. Ce passage a permis d'éliminer plusieurs erreurs et imprécisions causées par l'opérateur qui suivait la digitalisation. Di et al (2003b) présentant les résultats de tracé semi-automatique d'un secteur côtier en utilisant des images d'IKONOS. Une vue d'ensemble du traitement géométrique de l'image d'IKONOS est faite. Une nouvelle approche pour l'extraction automatique d'un rivage 3D des images d'IKONOS est décrite. Les résultats d'essai prouvent que l'approche proposée est capable d'extraire des rivages à partir des images d'IKONOS avec peu d'interaction humaine.

Les cartes existantes souvent ne sont pas exactes et mises à jour, et peuvent ne pas pouvoir suivre les changements rapides de littoral. Afin d'extraire exactement le rivage à partir des images de télédétection il est essentiel de suivre une méthode de transformation appropriée d'image en utilisant le logiciel et les algorithmes indiqués de traitement d'image. Les méthodes semi-automatiques et automatiques se basent essentiellement sur la création d'algorithmes mathématiques qui permettent d'identifier la séparation entre les pixels mixtes. Pour certains d'entre eux, l'approche consiste à combiner des informations spatiales et radiométriques d'images associées à des élaborations qui permettent la segmentation morphologique de l'image (Bagli, 2004). Plusieurs algorithmes de segmentation morphologique sont développés par plateformes GIS pour évaluer leurs prestations dans l'extraction de la ligne de rivage.

La base de beaucoup de technologies concerne aussi une typologie particulière d'image comme celles faites dans la longueur de l'infrarouge. Lors des relevés de la ligne de rivage moyennant de telles images, la bande proche infrarouge (NIR) se révèle particulièrement utile: en effet, dans cette région du spectre électromagnétique, le réfléchissement de l'eau est pratiquement nul (Drury, 2001; Sabins, 1987), ce qui facilite énormément le repérage de la ligne de rivage. Dans cet arc de variations, les corps hydriques absorbent presque toute la radiation incidente, tandis que la surface terrestre reflète seulement les longueurs d'onde à infrarouge moyen et proche. Lin et al (2001), présentent un modèle simple en déterminant l'endroit du rivage sur des zones côtières. Elles emploient la différence de réflectivité entre la terre côtière et ses eaux adjacentes.

Il n'est pas indispensable que les images soient seulement dans l'infrarouge, mais les caractéristiques de ces longueurs d'onde associées aux résolutions élevées des images IKONOS et Quickbird sont un bon point de départ pour l'extraction détaillée des données territoriales ; tout est basé sur l'identification de zones caractérisées par pixels avec des valeurs de réflectivité le plus homogène possible, parce qu'un changement rapide dans la plupart des cas identifie un bord, une ligne entre deux régions non similaires. La méthode essaie d'appliquer un opérateur de gradient comme le Sobel ou le Roberts selon lesquels les hautes valeurs offrent des données pour identifier les contours des zones homogènes (Adams et Bischoff, 1994).

De plus, la possibilité de combiner les différentes bandes et d'intervenir sur l'image avec des méthodes d'*image processing* permet d'exploiter, d'un côté la haute résolution de la bande du panchromatique, ce qui permet une meilleure « visibilité » en phase d'interprétation et, simultanément dans les bandes du multispectral, d'agrandir la position de la ligne de rivage. Ces méthodes d'étude ainsi que l'intégration avec des données à distance de natures diverses (par ex. des photographies aériennes) ont donné d'excellents résultats dans de nombreuses zones côtières et a également permis l'élaboration de cartes de la végétation dunaire (Grignetti et al, 2005).

L'identification de la ligne de rivage avec l'utilisation d'images satellites est une procédure utilisée également avec des images optiques parce que dans ce cas-là il s'agit d'effectuer une simple opération de *Thresholding* de l'image, et la ligne de rivage est facilement localisée, en déterminant la valeur supérieure de l'histogramme égal à la valeur de la moyenne plus deux fois le *standard deviation* de l'histogramme coupé de l'image. Cette opération met clairement en évidence la séparation terre-mer (Della Rocca et Fortunato, 2002). Aly et al (2005) ont effectué une recherche en utilisant l'interférométrie synthétique du radar d'ouverture (SAR) comme outil pour surveiller les changements côtiers du delta du fleuve du Nil de l'Egypte. Selon les auteurs, le delta du fleuve du Nil a des changements côtiers rapides. Le taux de retraite côtière et d'augmentation dans le delta oriental du Nil exige la détection et la mesure régulières et précises. Les techniques courantes employées pour surveiller les changements côtiers du delta sont des mesures de point et, ainsi, elles fournissent une vue dans l'espace limité des changements côtiers continus. L'interférométrie de radar est utilisée dans leur étude pour détecter des segments d'érosion et d'augmentation pendant la période 1993-2000. Les

taux moyens d'érosion et d'augmentation dans le delta oriental du Nil sont mesurés pour être de -1.64 mètres par an et de + 5.12 mètres par an, respectivement.

D'autres types d'images considèrent le problème, et utilisent des filtres et modifications des histogrammes des images, qui identifient des limites dans les niveaux de gris essayant d'éliminer, de toute façon, le bruit de l'image et exalter la présence de linéarité (Lee et yang, 1989 ; Lin et al, 2001).

De toute façon, les procédures classiques d'élaboration d'images sont encore valides (Wang, 2003), et la recherche des meilleurs composites, soit dans la longueur d'onde du visible soit celle de l'infrarouge moyen et proche. De cette façon, on réussit à opérer une classification des zones homogènes de terre et mer, mais seulement avec l'infrarouge proche on peut arriver à une certaine exactitude d'extraction de ligne de rivage.

La littérature illustre bien souvent les procédures pour l'élaboration des images multispectrales finalisées au traitement des images pour l'amélioration de la donnée satellitaire: les techniques adoptées sont multiples et, parmi elles, la correction atmosphérique, les techniques d'agrandissement (*enhancement*) et l'application de filtres (Gomasasca, 2000; Drury 2001). Floreaa et Caramizoiu (2005), dans un travail utilisant la TACHE HRV, Landsat TM et données d'image de SAR au-dessus de la zone côtière de la Mer Noire, on fait le traitement des données d'image avec le logiciel d'ERDAS 8.7, d'ARC/INFO et d'ARC/VIEW. Pour obtenir une détection solide de changement, des facteurs environnementaux et les variables ont été pris en compte, tel que des conditions atmosphériques, des caractéristiques de sol, des cycles de végétation, des cycles hydrologiques et autres.

Afin d'extraire un rivage plus précis, il rapport de Yeremy et al (2001) discute des études appliquant des méthodes polarimétriques pour extraire des pentes de rivage et la frontière entre la terre et l'eau dans la région côtière. Il était difficile d'extraire des rivages à partir des signatures d'image des régions côtières, où la dynamique de vague d'océan était haute. Dans les régions où l'action de marée est douce, la sédimentologie de plage est souvent sensiblement différente d'une région où l'activité de marée est intense. Ces différences physiques ont comme conséquence des signatures d'image pour un type particulier de rivage. Les données entièrement polarimétriques ont produit de meilleurs résultats qualitatifs pour des régions côtières où l'action de vague était plus intense.

Les nouvelles procédures sont en train d'utiliser la capacité des DTM (*Digital Terrain Models*) obtenus par images satellites qui donnent, comme on peut voir de l'étymologie des termes, l'élévation du terrain. A cela, il est possible d'associer une série historique de lignes de rivage ayant une origine différente de celle des images satellites. De cette façon, les variations de la ligne de rivage peuvent être étudiées en comparant des lignes de plusieurs années dans une image finale qui représente l'évolution historique. On peut y additionner les corrections de marée et pression dans cet intervalle de temps. L'idée proposée signifierait réaliser une modèle de ligne de rivage tridimensionnelle (Chen et al, 1998 ; Di et al, 2003).

Récemment, on commence à voir dans la gestion côtière l'intégration des données comme ceux décrits ci-dessus, avec des *software* GIS, ce qui permet de contrôler également les changements dans un scénario futur. Il est important que le scénario des résultats obtenus soit une référence pour tous ceux qui investissent dans ce type de recherche, comme les responsables pour la gestion côtière, les investisseurs, les administrations publiques, les politiciens locaux, les scientifiques, pour identifier les méthodes qui, à un coût plus bas, puissent être utilisés pour une meilleure gestion de la zone côtière (Makota et al, 2004).

Pour pouvoir effectuer des analyses même quantitatives sur l'érosion, il faut géoréférencer les images pour éliminer l'effet de distorsion géométrique particulièrement important dans le cas d'images à haute résolution (Palazzo et Vasanelli, 2004; Boccardo et al, 2005). Il est clair qu'il y a une certaine sectorisation de plusieurs études. Une petite partie des études considèrent, ensemble, le problème de la procédure d'extraction de la ligne de rivage et l'exactitude de leur positionnement géographique (Beachmed, 2004c). La question de l'exactitude est en fait plus liée aux procès de géoréférencement qui, dans les dernières années, utilisent les propriétés de la petite quantité d'images satellite stéréoscopiques. Cela permet d'obtenir des données à terre avec une exactitude photogrammétrique mais en utilisant la résolution très haute que possèdent ces images. Pour les études (peu) qui considèrent le problème il est évident l'utilisation de récepteurs GPS pour l'acquisition des GPC (*Ground Control Points*; points de contrôle) utilisables successivement pour le géoréférencement des images satellites (Immordino, 2002). Cette procédure offre un meilleur résultat pour ce qui concerne la position réelle de la ligne de rivage. En effet, l'utilisation des cartes techniques régionales en Italie (CTR/*Carte Technique Regionali*) ou d'une autre typologie de carte topographique auxquels on peut faire référence pour le géoréférencement conduit à des erreurs

de graphisme qu'on ne peut pas sous évaluer dans les calculs des estimations d'érosion ou accrétion d'une plage.

Di et al (2003a), rapportent les résultats de l'amélioration d'exactitude d'IKONOS. Ils signalent que l'exactitude 1-2 mètre peut être réalisée, des images IKONOS de la résolution de 1 m. L'expérience a indiqué qu'un modèle simple d'ajustement, est efficace pour éliminer les erreurs systématiques et pour améliorer de manière significative l'exactitude de 3D géopositionnement. Les auteurs ont étudié l'extraction automatique des rivages de l'image de haute résolution d'IKONOS. L'approche est examinée en utilisant des images d'IKONOS avec la résolution 4 mètres et 1 mètre, dans un secteur de projet pilote le long du rivage de lac Erie. Une méthode pour la génération 3D-rivage est également discutée.

L'exactitude du positionnement de la ligne de rivage doit considérer le rapport coût- bénéfice : combien il peut être intéressant investir de l'argent pour faire des levés in situ, ou utiliser des images satellites, selon l'étude qu'on fait et des résultats attendus.

On peut obtenir des résultats satisfaisants même avec des images non stéréoscopiques, et une bonne procédure du type *image to image* pour le positionnement des GCP et avec l'algorithme de réchantillonnage *nearestneighbor* qui, où il n'est pas possible d'avoir une bonne distribution des points sur l'image (ou quand ils sont en petit nombre), ne modifie pas les valeurs digitales de l'image. Cela est causé par l'association de la valeur du pixel de l'image « déformée » à celle plus voisine de l'image de départ. C'est relevant le type *warping* de l'image. Dans beaucoup de cas, on préfère utiliser la polynomiale de première ordre parce que, même si le géoréférencement à une erreur moyenne plus basse pour les transformations d'ordre supérieur comme celle du 2ème et 3ème degré, on obtient une distorsion plus grande dans les zones loin des GCPs avec lesquels on a fait le *warping* de l'image (Beachmed, 2004c).

Il est difficile de trouver des points de contrôle dans la zone voisine à la ligne de rivage, et en particulier en mer. A cause de cela, les images géoréférencées avec polynomiales de 2ème et 3ème ordre sont plus précises dans les zones très urbanisées, où la probabilité de positionner les points de contrôle est plus haute, et moins précise où on cherchait une exactitude plus haute (sur la côte).

La comparaison des lignes de rivage prises en utilisant plusieurs méthodes montre que l'utilisation des récepteurs GPS porte à une erreur moyenne acceptable pour son utilisation dans un monitoring de longue terme en littoraux sujets à des variations morphologiques consistantes. La possibilité théorique des répétitions fréquentes de mesure, en considérant les temps de nouveau passage par les satellites, pourrait porter à une position moyenne sur un court intervalle de temps avec une exactitude majeure, mais cela aurait un coût élevé. La fréquence d'acquisition des images utiles, est plus haute que le temps de nouveau passage, soit à cause de la présence de nuages, soit à cause de l'inutilité des images prises pendant des phénomènes météo-marins modestes (Beachmed, 2004c).

Plusieurs travaux sont faits en utilisant différentes sources de données. Victorov et al (2004) utilisent une base de données qui inclut des images pour la période 1973 - 2003 des satellites de l'USSR/Russia, Etats-Unis, France, Inde, Japon, ESA du MÉTÉORE, KOSMOS, RESURS-F, RESURS-01, OKEAN, NOAA, NIMBUS-G, la TACHE, IRS, JERS, série d'ADEOS, d'IKONOS, de Quickbird et de PROBA. L'étude de cas du Centre du Canada pour la télédétection (Canada Center for Remote Sensing, 2006) montre les résultats primaires d'un projet dans lequel des images satellites ont été employées pour tracer la dynamique du littoral Canadien de mer de Beaufort de 1973 à 1999. L'étude a appliqué les données 1973, les données 1986 de Landsat MSS, les données 1991 de Landsat TM, les données 1999 de TACHE et images de RADARSAT. Ils détectent des régions de mer et de terre sur la base d'une valeur de niveau gris. Les littoraux extraits ont été transférés à un environnement de GIS. De façon générale, l'approche a eu comme conséquence une bonne évaluation de la position de littoral dans les différentes images.

Le développement d'une enquête cognitive sur les images de haute résolution disponibles pour des traits de côte des régions Macédoine de l'Est, Lazio et Toscana permettra la choix de traits où il y a une grande disponibilité d'images, de photographies aériennes et de travaux précédents ainsi que pour leur particularité physiographique. En utilisant comme critère de sélection des images la date d'acquisition (la plus récente disponible) et l'absence de couverture nuageuse, on vérifie la disponibilité de photographies aériennes à haute résolution prises au cours de la même année, comme des orthophotographies couleurs.

Une comparaison en secteurs échantillons (test site) entre les lignes de rivage relevées par ces images et par les senseurs à haute résolution contribuera à l'évaluation de l'estimation de

l'exactitude du levé de la ligne de rivage à travers les deux typologies de données à distance et leur validité, en vue également de relevés sur le terrain par GPS.

Satellites disponibles et leurs caractéristiques

Satellites de Haute Résolution

Quickbird

Digital Globe a lancé avec succès le satellite de Quickbird le 18 octobre 2001. Le satellite rassemble l'image multispectrale et panchromatique de VHR (très haute résolution) de 450 km d'altitude. Le satellite de Quickbird de DigitalGlobe (Tab. 3) offre en même temps la plus grande largeur de bande, la plus grande capacité de stockage à bord, et la résolution la plus élevée actuellement disponible pour les satellites commerciaux. Quickbird a été conçu pour imager de grands secteurs, avec un grand degré d'exactitude pour le géoréférencement. Le satellite Quickbird est capable d'acquérir annuellement des données couvrant plus de 75 millions de km² (plus de trois fois la taille de l'Amérique du Nord). Quickbird recueille des images multispectrales à 2,4 m de résolution et des images panchromatiques à 0,61 m de résolution. Des composés *pan-sharpened* vrais ou faux couleurs à 70 cm de résolution peuvent être obtenus. Les deux modes d'acquisition des images, *strip mode* et *area mode* sont utilisés. En un seul passage, des bandes d'une longueur équivalente à 10 scènes (165 km) et des surfaces équivalentes à 2 x 2 scènes peuvent être recueillies. Les images Quickbird sont disponibles selon 3 niveaux de traitement: *Basic*, *Standard* et *Orthorectified*.

Tandis que Quickbird fait le tour du globe à une altitude de 450 km au-dessus de la Terre, son capteur (une caméra haute résolution) recueille des images de la surface de la Terre durant les heures du jour. Le système recueille des données panchromatiques de 61 cm et des données stéréoscopiques multispectrales de 2,5 m. Quickbird a été mis au point pour couvrir de vastes étendues avec efficacité et exactitude. Le satellite Quickbird est capable d'acquérir plus de 75 millions de km² de données d'imagerie par an (plus de trois fois la taille de l'Amérique du Nord). Ces données sont ensuite exploitées pour la cartographie, la planification agricole et urbaine, la recherche météo et la surveillance militaire.

Des produits d'image sont conçus pour des clients ayant avancé des possibilités de traitement d'image. Les produits sont des sondes corrigées, mais pas géométriquement corrigées, ni tracées à un ellipsoïde cartographique de la projection.

Tableau 3 - Caractéristiques Principales – Quickbird

Orbit Altitude	450 km (circular, sun-synchronous orbit)
Spectral Band	Panchromatic (0.45 - 0.90 microns)
	Multispectral - Blue (0.45 - 0.52 microns) Multispectral - Green (0.52 - 0.60 microns) Multispectral - Red (0.63 - 0.69 microns) Multispectral - Near IR (0.76 - 0.90 microns)
Pixel Size	0.61 m Panchromatic (at nadir) / 2.44 m Multispectral (at nadir)
Swath Width	16.5 km
Radiometric Resolution	11-bits (2,048 gray tones)
Stereo Pairs	Available
Camera Model	Available
Orbit Duration	93.5 min
Orbits / Day	15.4
Mode of Operation	Push Broom Scanning
Scanning Mode	Asynchronous
Sensor Type	CCD (Charge Coupled Device)

Les produits standard d'image conviennent aux utilisateurs ayant besoin de l'exactitude absolue modeste (ou de la grande assurance de secteur).

Image d'orthorectifié. Les produits d'image d'orthorectifié sont des GIS prêts et idéalement appropriés comme carte de base d'image à créer des bases de données de tracé et de GIS. Ces produits peuvent également être employés pour la détection de changement et d'autres applications analytiques qui exigent un degré élevé d'exactitude absolue. Elle est disponible comme panchromatique avec la résolution de 70 cm, multispectral avec la résolution de 2,8 m ou casserole-affilé avec la résolution de 70 cm et son exactitude change de 3 à 14 m de RMSE.

IKONOS

IKONOS est le premier satellite commercial de VHR (très haute résolution). Il a été lancé le 24 septembre 1999 dans un soleil-synchrone, l'orbite circulaire. Avec le satellite IKONOS (Tab. 4) on peut distinguer des objets d'une surface inférieure à 1m² au sol. On peut donc faire la différence entre une voiture et un camion. Cette capacité, depuis une altitude orbitale de 680 km, représente une nette amélioration de la résolution des images par rapport à tous les systèmes commerciaux de télédétection qui l'ont précédé. L'assemblage de télescopes optiques capture les images à travers une fauchée de 11 à 13 km de la surface de la Terre et les renvoie aux capteurs d'images numériques. Les images produites par IKONOS comptent parmi les images satellite les plus détaillées qu'il soit possible de se procurer dans le cadre d'applications civiles. A son bord, IKONOS transporte également un capteur multi spectral d'une résolution de 4 m avec 3 canaux visibles et un canal proche infrarouge, semblable à l'équipement embarqué à bord de Landsat 4 et 5. Il permet ainsi de réaliser une cartographie de l'utilisation du sol.

Tableau 4 - Caractéristiques Principales - IKONOS

Orbit Altitude	681 km (circular, sun-synchronous orbit)
Spectral Band	Panchromatic (0.45 - 0.90 microns) Multispectral - Blue (0.45 - 0.52 microns) Multispectral - Green (0.52 - 0.60 microns) Multispectral - Red (0.63 - 0.69 microns) Multispectral - Near IR (0.76 - 0.90 microns)
Pixel Size	1m Panchromatic / 4m Multispectral
Swath Width	11km
Radiometric Resolution	11-bits (2,048 gray tones)
Stereo Pairs	Available
Camera Model	Not Available
Orbit Duration	98 min
Orbits / Day:	14.7
Mode of Operation:	Push Broom Scanning
Scanning Mode	Asynchronous
Sensor Type	CCD (Charge Coupled Device)

Les images sont géométriquement corrigées. Elles sont fournies en tant que bandes orientées par carte en gamme dynamique de 11 ou de 8 bits. Les produits d'ortho rectifié sont traités et sont disponibles dans trois niveaux d'exactitude de 25,4 m à 6 m.

Le satellite d'EROS

Le satellite de l'EROS A1 d'ImageSat est un satellite commercial de télédétection de VHR (très haute résolution). Il a été lancé avec succès le 5 décembre 2000 et c'est le premier d'une série de six satellites à haute résolution de formation image à lancer jusqu'en 2006 par ImageSat International. Les données de l'EROS A1 (Tab. 5) sont au commencement disponibles en tant que scènes complètes 12,5 x 12,5 km, pour le centre d'intérêt d'un client particulier. La résolution 1,8 m des données panchromatiques permet à des utilisateurs de distinguer de petits dispositifs sur la terre. L'exactitude de l'image le rend idéal pour tracer et analyser. Le satellite est fortement agile et offre la flexibilité maximum dans l'acquisition spécifique d'images d'emplacement. Ces possibilités sont combinées avec un réseau global de la terre recevant des stations. L'EROS A1 soutient l'acquisition d'image en mode de 1,8 m ou de 1 m.

Tableau 5 - Caractéristiques Principales - EROS

Orbite Altitude	480 km (circular, sun-synchronous orbit)
Spectral Band	Panchromatic (0.45 - 0.90 microns)
Pixel Size	1m / 1.8m
Swath Width	6km / 12.5km
Pixels per Line	7,800
Radiometric Resolution	11-bits (2,048 gray tones)
Stereo Pairs	Available
Camera Model	Available
Satellite Position Accuracy	<100m
Orbit Duration	94 - 96 min
Orbits / Day	15
Mode of Operation	Push Broom Scanning
Scanning Mode	Asynchronous (750 lines/sec)
Sensor Type	CCD (Charge Coupled Device)

Le Système A corrigé (Exactitude Ortho-) : La correction est exécutée avec les points de maîtrise des terrains (GCP) des cartes ou des mesures de GPS. La qualité des points de commande affecte directement l'exactitude de l'image satellite rectifiée. Les erreurs locales de déplacement de terrain dues à l'angle et au terrain d'enregistrement sont réduites en employant le meilleur modèle numérique disponible d'altitude (DEM).

Satellites de Résolution Moyenne

IRS-1C/1D

Le satellite Indien de télédétection (IRS-1C) a été lancé avec succès dans l'orbite polaire le 28 décembre 1995. Ce satellite a été suivi d'un semblable (IRS-1D) qui a été lancé avec succès dans l'orbite polaire le 29 septembre 1997. Un des objectifs des satellites de IRS est de fournir l'acquisition systématique et réitérée des données de la surface de la terre dans des conditions presque constantes d'illumination. IRS-1C (Tab. 6) fonctionne dans un circulaire, soleil-synchrone, près de l'orbite polaire à une altitude de 817 km. Le satellite prend 101,35 minutes pour accomplir une révolution autour de la terre et accomplit environ 14 orbites par jour. La terre entière est couverte par 341 orbites pendant des 24 cycles de jour.

SPOT

Le Système Probatoire d'Observation de la Terre (SPOT) comporte le satellite SPOTVair exemple. Lancé le 21 février 1986, ce satellite peut opérer dans trois bandes spectrales (vert, rouge et quasi-infrarouge) avec une résolution de 20 m. Les satellites SPOT (Tab. 7) ont des orbites réitérées, circulaires, soleil-synchrones, proche-polaires. Le cycle de répétition de la SPOT 4 est de 26 jours et sa largeur de bandage (visionnement vertical) est 60 km de large. En outre, il est équipé d'un scanner panchromatique. Autrement dit, il balaye dans une bande qui comporte les plages vertes et rouges, de la lumière visible. La résolution spatiale de ce capteur est de 10 m, la résolution la plus élevée pendant des années pour un capteur non militaire. SPOT comporte une fonctionnalité spéciale : il peut être programmé pour « regarder de côté » et balayer la même bande deux fois lors de deux survols consécutifs. Les deux angles visuels différents sur la même zone produisent un effet stéréoscopique, qui permet de cartographier les conditions de niveau. SPOT ayant deux canaux visuels et un canal proche infrarouge, il constitue l'outil idéal pour la cartographie de la végétation de petites surfaces locales

Tableau 6 - Caractéristiques Principales - IRS

Orbit Altitude	817 / 874 km (circular, sun-synchronous orbit)
Spectral Band	PAN (0.50 - 0.75 microns) LISS-III - Green (0.52 - 0.59 microns) LISS-III - Red (0.62 - 0.68 microns) LISS-III - NIR (0.77 - 0.86 microns) LISS-III - SWIR (1.55 - 1.70 microns) WiFS - Red (0.62 - 0.68 microns) WiFS - NIR (0.77 - 0.86 microns)
Pixel Size	PAN: 5.8 m (resampled to 5 m) LISS-III (Green, Red, NIR): 23 m LISS-III (SWIR): 70 m WiFS: 188 m
Swath Width	PAN: 63 – 70 km LISS-III: 127 – 141 km WiFS: 728 – 812 km
Radiometric Resolution	PAN: 6 bits (64 gray tones) LISS-III: 7 bits (128 gray tones) WiFS: 7 bits (128 gray tones)
Orbit Duration	101.35 min
Orbits / Day	14
Orbits / Cycle	341 / 358
Revisit at Equator	24 / 25 days

Tableau 7 - Caractéristiques Principales - SPOT

Orbit Altitude	822 km (circular, sun-synchronous orbit)
Spectral Band	PAN (0.61 - 0.68 microns) Xi - Green (0.50 - 0.59 microns) Xi - Red (0.61 - 0.68 microns) Xi - NIR (0.79 - 0.89 microns) Xi - SWIR (1.58 - 1.75 microns)
Pixel Size	PAN: 10m Xi: 20 m
Swath Width	60 km
Radiometric Resolution	8 bits (256 gray tones)
Orbit Duration	101.4 min
Orbits / Day	14
Orbits / Cycle	369
Revisit at Equator:	26 days

Landsat 7

Le premier satellite de Landsat a été lancé en 1972, et ensuite, cinq satellites ont encore été lancés avec succès. Landsat 5 et 7 sont maintenant opérationnels.

Les trois premiers étaient équipés de scanners multispectraux (MSS) d'une résolution spatiale de 80 m et d'une résolution spectrale de 4 canaux dans la zone du spectre visible et presque infrarouge. En outre, les satellites LANDSAT 4 et 5 (Tab. 8) sont équipés d'un *Thematic Mapper* (TM), qui possède sept canaux, dont un dans l'infrarouge thermique. La résolution spatiale est de 30 m. Autrement dit, chaque pixel correspond à une surface de 30 m x 30 m, dans les bandes réfléchies, sur la surface de la Terre.

Les satellites de Landsat ont des orbites réitérées, circulaires, soleil-synchrones, proche-polaires. Le cycle de répétition pour Landsat 7 est de 16 jours et son faisceau est de 183 km de large.

Tableau 8 - Caractéristiques Principales – Landsat 7

Orbit Altitude	705 km (circular, sun-synchronous orbit)
Spectral Band	PAN (0.52 - 0.90 microns) Multispectral - Blue (0.45 - 0.52 microns) Multispectral - Green (0.52 - 0.60 microns) Multispectral - Red (0.63 - 0.69 microns) Multispectral - NIR (0.76 - 0.90 microns) Multispectral - SWIR (1.55 - 1.75 microns) Multispectral - Thermal IR (10.42 - 12.50 microns) Multispectral - SWIR (2.08 - 2.35 microns)
Pixel Size	PAN: 15 m Multispectral (Blue, Green, Red, NIR, SWIR): 30 m Multispectral (Thermal IR): 60 m
Swath Width	183 km
Radiometric Resolution	8 bits (256 gray tones)
Orbit Duration	98.8 min
Orbits / Day	14
Orbits / Cycle	233
Revisit at Equator	16 days

Du fait de leur résolution spectrale élevée, les tout derniers satellites LANDSAT ont été considérés comme dotés des meilleurs capteurs pour le classement des zones, et ont largement contribué au développement de ce domaine. Ils sont équipés de trois canaux dans le spectre visible (bleu, vert et rouge) et de trois canaux dans le proche infrarouge, où l'atmosphère est la plus translucide.

Satellites de Radar

ERS

Lancé par l'Agence européenne de l'espace, à tous les satellites d'ERS (Tab. 9) ont les premières missions acquérant des données disponibles dans le commerce de radar à micro-ondes, procurant de nouvelles occasions survivent à des applications de télédétection. Les images de radar sont indépendantes de l'éclairage ou de absence de nuage. D'autres instruments mesurent l'amplitude et la fréquence d'onde, la vitesse du vent et la direction. ERS 1 actionné régulièrement du 25/7/1991 au 10/3/2000, ERS 2 a commencé des acquisitions régulières en mai 1995 et il est encore opérationnel.

Les satellites ERS-1 et ERS-2 ont été construits par des industriels européens, sous la direction de l'Agence Spatiale Européenne (ESA). Ils ont été lancés respectivement en 1991 et 1995. Ils sont équipés d'un système micro-ondes actif, capable d'acquérir des données à travers une épaisse couverture nuageuse ou durant la nuit. L'un des instruments embarqués à leur bord, le diffusiomètre, mesure la direction et la vitesse du vent au-dessus des océans; un autre capteur, l'Altimètre, peut mesurer la hauteur des vagues. Enfin, le capteur peut-être le mieux connu, à savoir le radar SAR (Synthetic Aperture Radar), produit une image de la surface. Ses données sont ensuite utilisées en cartographie. Cependant, l'interprétation d'une image SAR est très différente de celle d'une image acquise par un capteur optique. Les images SAR sont sans couleur. Elles donnent des informations relatives à la rugosité de la surface. Pour un capteur SAR, une surface de mer avec des vagues de hauteur moyenne ou élevée provoquées par le vent, est un exemple de surface rugueuse, tandis qu'une mer calme ou couverte de vaguelettes, représente une surface lisse. Sur terre, une forêt est une surface rugueuse. A ce titre, elle apparaît en couleur claire. En revanche, de l'herbe ou une autoroute apparaîtra en couleur sombre, car le radar l'interprétera comme une surface relativement lisse.

Tableau 9 - Caractéristiques Principales – ERS

Orbit Altitude	785 km (sun-synchronous orbit)
Spectral Band	AMI - SAR Image Mode: C-band (5.3 GHz) AMI - SAR Wave Mode: C-band (5.3 GHz) AMI - SAR Wind Scatterometer: C-band (5.3 GHz) ATSR 1: 1.6 microns ATSR 2: 3.7 microns ATSR 3: 10.8 microns ATSR 4: 12 microns
Pixel Size	AMI - SAR Image Mode: 30 m AMI - SAR Wave Mode: 10 m AMI - SAR Wind Scatterometer: 50 km ATSR: 1 km
Swath Width	AMI - SAR Image Mode: 100 km AMI - SAR Wave Mode: 5 x 5 km AMI - SAR Wind Scatterometer: 500 km ATSR: 500 km
Orbits / Day	35
Orbits / Cycle	501
Revisit at Equator	35 days

RADARSAT

RADARSAT a été lancé le 4 novembre 1995 et c'est le premier satellite d'observation de la terre du Canada. Le RADARSAT (Tab. 10) fonctionne dans la fréquence micro-ondes connue sous le nom de bande de C (fréquence de 5,3 gigahertz ou longueur d'onde de 5,6 cm), qui peut pénétrer les nuages et les précipitations.

Tableau 10 - Caractéristiques Principales – RADARSAT

Orbit Altitude	798 km (sun synchronous)
Spectral Band	ScanSAR Wide: 100 m ScanSAR Narrow: 50 m Extended Low: 35 m Wide: 30 m Standard: 25 m Extended High: 25 m Fine: 8 m
Swath Width / Beam Mode	ScanSAR Wide: 500 x 500 km ScanSAR Narrow: 300 x 300 km Extended Low: 170 x 170 km Wide: 150 x 150 km Standard: 100 x 100 km Extended High: 75 x 75 km Fine: 50 x 50 km
Orbits / Day	14
Orbit Period	101 min
Revisit at Equator	24 days

2. ALB (Airborne Laser Bathymetry) - LIDAR (Light Detection And Ranging)

*** EID Méditerranée**

*** ARPA/IA**

L'Airborne LIDAR Bathymetry (ALB) est une technique utilisée pour mesurer la profondeur de l'eau, même faible, au moyen d'un scanner laser. L'ALB peut s'avérer une technologie précise et efficace dans le relevé de bathymétries de faible profondeur. Il présente cependant quelques limites qui en restreignent le champ d'application, principalement à cause de pertes d'exactitude.

La technologie ALB est née dans les années soixante en tant que projet de la marine militaire des Etats-Unis pour la détection des sous-marins. Mais le système s'est répandu dans les années quatre-vingt-dix, notamment dans le domaine civil. Le marché est aujourd'hui dominé par trois fabricants (détails en fond):

- le canadien Optech, créateur du modèle SHOALS;
- l'australien Tenix, avec le système LADS;
- le suédois AHAB, avec le système Hawk Eye II.

Un système ALB est un ensemble complexe de lasers, composants électromécaniques, dispositifs optiques et ordinateurs, dont sont équipés tous les modèles présents dans le commerce, même si les produits utilisés sont de marques différentes. Mais nous reviendrons plus loin sur les principales caractéristiques de ces équipements en reportant les données fournies par les fabricants.

La technologie LIDAR (Light Detection And Ranging) est un moyen de mesure récent utilisant des dispositifs laser aéroportés. Son principe repose sur la mesure du temps écoulé entre l'émission et la réception d'un signal laser après avoir été réfléchi par sa cible, ce qui permet de déduire la distance entre l'instrument et la cible. Deux lasers sont généralement utilisés, un laser vert dont la longueur d'onde permet de pénétrer les eaux côtières avec le moins d'atténuation possible pour détecter les fonds marins, et un laser rouge qui est réfléchi par la surface de l'eau pour détecter à la fois le sol et le niveau de la surface des mers.

Depuis une dizaine d'année le LIDAR embarqué dans des avions a été utilisé pour diverses applications: hydrographie, topographie, gestion forestière, vulcanologie et urbanisme (Populus et al, 2001). Il existe aussi des utilisations depuis le sol (Venema, 2000) et depuis l'espace (LITE (Lidar In-space Technology Experiment) : <http://www.lidar.jpl.nasa.gov/lite.htm>) pour la météorologie. Comparé aux techniques traditionnelles de mesures (sondages, photogrammétrie, dGPS) la collecte de données par avion permet une très forte densité de mesures ainsi que la couverture de grandes régions pour un coût en temps et en argent bien plus faible.

L'utilisation du LIDAR sur les zones côtières a aussi des avantages propres, la possibilité d'effectuer des campagnes rapides (étude des changements saisonniers, des dégâts provoqués par les tempêtes..) sur des zones où il peut être difficile d'employer les moyens de mesure traditionnels. En outre le LIDAR permet aussi l'étude simultanée des fonds marins et des zones émergées ainsi que des structures présentes à la fois au dessus et au dessous de la surface (brise-lames, épis, etc.) (Guenther et al, 2000). Déjà en 1999, la technologie LIDAR était jugée comme très prometteuse avec l'idée que cela allait révolutionner les outils de quantification de l'érosion côtière, avec des pas de résolution de l'ordre de 1 m pour une exactitude verticale de 5 à 10 cm et une exactitude horizontale de 30 à 50 cm (Shrestha et al, 1999).

Des levés LIDAR avaient été effectués en 1999 puis en 2002, à Pinellas Country (Floride) sur 450 km² pour suivre des opérations de rechargement de plage (Shrestha et al, 2005). Malgré un biais de 16 cm (0,54 ft), la variabilité globale (érosion) de la plage (- 1,15 ft soit une perte de 35 cm d'épaisseur) rendait le suivi digne d'intérêt (notamment par comparaison aux méthodes classiques). Un gros programme de suivi ASLM (Airborne Laser Swath Mapping, aussi connu sous l'acronyme LIDAR) est lancé en 2003 sur les plages Nord de Floride: 50 km de plage sur une largeur de 700 m dont 200 m en mer avec un investissement de 1,5 Millions de dollars pour acheter le matériel (Shrestha et al, 2005). Deux opérateurs (l'Université de Floride et le Département de Protection de l'Environnement) se sont groupés (2003) pour mettre en place des levés visant à quantifier de manière précise les évolutions morphologiques de la plage (Shrestha et al, 2005).

Le rapport du groupe international (né d'une union entre les USA et le Canada) sur le lac Ontario et le fleuve Saint-Laurent (mars 2006) montre que les levés LIDAR effectués sur le lac

en 2001 avaient un niveau de détail acceptable (courbes de niveaux tous les 50 cm) aux fins de la modélisation côtière prévisionnelle. Par contre ils insistent sur le fait que la fusion des relevés topographiques et bathymétriques s'est avérée problématique, notamment à cause de la différence de normes en matière de données entre le territoire américain et le territoire canadien.

Aux Etats-Unis cette technique est répandue notamment pour des études d'impact de cyclones sur les côtes, bien que se développant en Europe aucun essai n'a jamais été effectué sur les côtes méditerranéennes de la France. Les données LIDAR sont aussi exploitées pour la définition légale du domaine maritime ou pour l'étude d'impact de rechargement de plage, il est même possible d'observer la migration des dunes sous marines dans un chenal de navigation (McClung Wozencraft et Irish, 2000).

Le LIDAR marin est particulièrement indiqué pour les relevés de faible profondeur, dans la mesure où il permet de travailler depuis le ciel et d'éviter ainsi tous les risques liés à la navigation à proximité du littoral (récifs, bancs de sable, etc.). De plus, contrairement aux méthodes traditionnelles qui nécessitent différentes solutions logistiques pour sonder à la fois les fonds marins et la plage (bateau, canot pneumatique, relevé au sol), avec la perte d'exactitude qui en découle dans l'assemblage des données, le système ALB donne la possibilité de sonder simultanément les parties émergées et immergées de la côte, même lorsque la profondeur est faible, là où les systèmes traditionnels ne fonctionnent pas.

Autre aspect à ne pas négliger, la vitesse d'exécution du relevé, qui s'avère être de 20 fois supérieure à celle des systèmes traditionnels. Il n'empêche que le LIDAR bathymétrique permet d'obtenir, en des temps plus brefs, une quantité de points nettement supérieure, ces derniers étant répartis de façon uniforme dans des bandes beaucoup plus larges et conformément à un quadrillage ne variant pas avec la profondeur de l'eau (Carli et al, 2004; Beachmed, 2004 a, b, c; Milli et Surace, 2006).

Etant donné les gains de productivité et de temps qu'il permet de réaliser, le système ALB présente des avantages économiques non négligeables puisqu'il revient effectivement cinq fois moins cher qu'un relevé *multibeam*. Une comparaison effectuée sur 50 km de côte, pour une bande d'environ 800 m en mer et 100 m à terre a nécessité:

- 1.000.000 € et 7 mois de travail pour le relevé *multibeam* ;

- 200.000 € et 1 mois de travail pour le relevé ALB (Beachmed, 2004 c)

Mais s'il représente bel et bien une alternative intéressante par rapport aux systèmes traditionnels, la technologie ALB est encore limitée pour certains aspects: la profondeur maximale sondable, étroitement dépendante des conditions physiques de l'eau au moment du relevé.

Le paramètre qui influence le plus l'intervalle de pénétration du rayon laser est la quantité de particules en suspension, dans la mesure où elles dispersent et réfléchissent l'impulsion verte, permettant de sonder les fonds à une profondeur non supérieure à deux, voire trois fois la profondeur du disque de Secchi.

La turbidité, associée aux autres phénomènes perturbateurs tels que le surf ou le réfléchissement solaire, vient fausser la mesure bathymétrique mais les systèmes ALB sont dotés de matériel et de logiciels permettant sa modélisation et par conséquent son élimination partielle, en restituant des valeurs affectées par une erreur d'environ 25 cm (1σ), tant sur l'altitude que sur la position planimétrique. Cette exactitude peut s'avérer même supérieure, pouvant aller jusqu'à 15 cm, mais la comparaison avec les techniques traditionnelles de relevé dénote une situation moins positive.

Compte tenu de toutes les erreurs opérationnelles, même si non attribuables au système ALB, les résultats des expériences menées font état de différences sur la cote de :

- 0,38 m de moyenne ($\sigma = 0,44$ m) entre relevé ALB et relevé *singlebeam*, où la surface définie au LIDAR apparaît moins profonde que celle obtenue avec les points acquis par l'échosonde (Milli et Surace, 2006) ;
- 0,967 m de moyenne ($\sigma = 1,762$ m) entre relevé ALB et relevé *multibeam*, où les données de l'échosonde font état d'une profondeur inférieure que les données ALB correspondantes, tout en restant dans l'intervalle de confiance de 90%, 1 m – 1,5 m. (Intelmann, 2006).

Les différences sur la position planimétrique ne sont pas significatives dans la mesure où elles dépendent uniquement du mode GPS utilisé et des conditions de tout le système au moment du relevé.

Le système ALB s'est donc révélé rapide et versatile. Cependant, dans la comparaison avec les systèmes traditionnels, il a fait preuve jusqu'à présent d'une moins grande exactitude, avec la présence d'un effet systématique qui pourrait être dû à une erreur n'ayant pas fait l'objet d'une modélisation précise.

Fonctionnement

La technologie ALB consiste, comme pour le LIDAR terrestre - plus courant, en une série de dispositifs transportés par de petits avions ou hélicoptères, dans le but d'effectuer le relevé plano-altimétrique d'une série de points disposés sur un quadrillage précédemment défini, de façon à optimiser la couverture de la surface et l'efficacité du relevé.

L'équipement est constitué d'un dispositif intégré comprenant un GPS, un système inertiel et un générateur - récepteur d'impulsions laser (scanner) :

- le premier, qui opère en temps réel et en post-traitement, sert à référencer la composante planimétrique des points relevés par le laser ;
- le deuxième, mesure les angles d'orientation de l'avion ainsi que les accélérations, renseignant ainsi sur l'orientation dans l'espace du générateur au moment de l'émission du rayon laser et, par conséquent, sur la forme de son image au sol. Ce système est indispensable car la moindre erreur d'évaluation du nadir est amplifiée par l'altitude de vol de l'avion : une incertitude de $0,05^\circ$, à une altitude de 400 m, comportera une erreur de 25 cm sur la mesure verticale (Guenther et al, 2000) ;
- le troisième appareil émet et dirige le rayon laser à travers un miroir rotatif stabilisé par un système inertiel, automatiquement équilibré en fonction de l'altitude de l'avion, afin d'obtenir l'espacement souhaité entre un point et un autre, tout en restant dans les limites d'amplitude de la bande. Le récepteur enregistre les impulsions de retour servant à mesurer la profondeur (Beachmed, 2004 a, b, c; Guenther et al, 2000).

Les deux premiers appareils, bien que de modèle et de fabricant différents, ressemblent beaucoup à ceux utilisés pour les relevés terrestres au LIDAR. En fait, c'est le scanner qui fait toute la particularité du système ALB puisqu'il est basé non pas sur l'utilisation d'une seule impulsion laser, mais de deux: l'une dans le champ du vert (532 nm), l'autre dans celui des quasi-infrarouges (*near IR* 1084 nm). Pour générer deux impulsions, il faut un laser à infrarouge avec duplicateur de fréquence qui fonctionne à au moins 400 pulsations par

seconde, afin d'obtenir les espacements maximums dans le quadrillage de mesure (Guenther et al, 2000).

De plus, compte tenu du plus grand besoin d'énergie pour pénétrer dans la colonne d'eau, le système ALB requiert des impulsions d'une durée d'environ 250 nanosecondes, au lieu des 20 nanosecondes habituellement nécessaires pour le relevé terrestre. Cela implique que la vitesse de balayage du LIDAR marin est inférieure à celle de son cousin terrestre (<http://www.fugro-pelagos.com>). Une partie importante du rayon quasi-infrarouge (2% de l'énergie initiale) est réfléchi par la surface d'eau. Une portion se dirige vers le capteur qui en mesure l'intensité et la vitesse. L'autre, qui parvient à pénétrer dans l'eau, est quant à elle rapidement absorbée et ne génère donc aucun réfléchissement significatif.

L'impulsion verte, beaucoup moins atténuée par l'absorption, réussit par contre à atteindre le fond marin, où elle sera réfléchi et renvoyée en partie vers le capteur.

Une fois connues la vitesse de propagation de la lumière dans l'air et dans l'eau, dans les conditions réunies au moment du relevé, la profondeur de l'eau est calculée à partir de la différence entre le temps de retour des deux impulsions, de l'ordre de quelques centaines de nanosecondes. La mesure de cet écart temporel aussi réduit est rendue possible par le système GPS utilisé comme une horloge d'exactitude, grâce aux marqueurs temporels présents dans le message de navigation et générés par les horloges atomiques de haute exactitude des satellites (Milli et Surace, 2006).

Bien évidemment, la mesure de la profondeur n'est pas aussi simple qu'il n'y paraît en théorie, dans la mesure où elle est influencée par toute une série de facteurs :

- *Conditions de la surface marine* : cette variable influence considérablement l'intensité du signal de retour au capteur. Ainsi, la présence de vagues en cas de vent peut provoquer un réfléchissement d'une grande partie de l'impulsion vers le capteur (phénomène de surf), ce qui va déterminer un signal superficiel plus intense. En revanche, en conditions de mer calme, la surface de l'eau se comporte comme un gigantesque miroir unique réfléchissant la lumière loin du capteur. Dans ce cas, il convient de passer par un récepteur hors onde pour mesurer la dispersion de Raman et les signaux de fluorescence provenant du volume d'eau juste en dessous de la surface. Par ailleurs, l'orientation des vagues au moment de

l'impact du rayon influence l'angle de réfraction de l'impulsion verte, normalement considérée à 15° en conditions de mer calme (<http://www.optech.ca>).

- *Turbidité de l'eau* : avec la pénétration et la diffusion dans la colonne d'eau du rayon vert, celui-ci est sujet à des phénomènes d'absorption et de dispersion. Ces derniers dépendent de la quantité et du type de particules en suspension qui en réduisent continuellement l'intensité, en augmentant l'amplitude spatiale et le temps de retour. En outre, ces phénomènes sont responsables de la rétrodiffusion d'une partie du signal vers le récepteur, avant son arrivée au fond. Cette portion d'énergie sera alors élaborée comme du bruit : il apparaît donc clairement que la mesure de la profondeur ne peut être effectuée que lorsque le signal réfléchi est supérieur au signal rétrodiffusé. Cette limitation détermine la valeur de l'angle maximal d'acquisition par rapport à la verticale, de sorte que l'énergie reçue soit suffisante pour permettre d'effectuer la mesure, à savoir 20° (Milli et Surace, 2006). On a pu observer que le signal fléchit de façon exponentielle à partir du moment où celui-ci entre en contact avec la surface marine et ce, jusqu'à son arrivée au fond, déterminant ainsi la profondeur d'investigation maximale D_{\max} , calculée à partir de la formule suivante:

$$D_{\max} = \frac{n}{K}$$

où n est une constante variant entre 3 et 5 par seconde, jour et nuit, et où K est un facteur exponentiel pour lequel le vecteur du rayonnement de la lumière incidente diminue avec la profondeur (Beachmed, 2004c; Guenther et al, 2000). Les profondeurs maximales atteintes sont d'environ 60 m - 70 m, et dans tous les cas, non supérieures à deux, voire trois fois la profondeur du disque de Secchi.

- *Conditions météorologiques* : même si l'on recherche des journées de beau temps et sans vent pour effectuer le vol dans le but de minimiser l'effet de surf et la dispersion atmosphérique due à l'humidité, il convient de considérer avec une attention toute particulière le reflet du soleil sur la surface marine. Dans la mesure où il représente un signal de retour non désiré, il constitue en effet une source d'erreur. Compte tenu également de la valeur maximum de la profondeur qu'il est possible d'atteindre, il s'avère que la condition idéale pour réaliser un relevé ALB est une nuit de ciel clair et sans lune. Ceci étant dit, cette option est déconseillée à cause des dangers encourus lors des vols de basse altitude dans de telles conditions (Guenther et al, 2000; Intelmann, 2006). Malgré les éléments perturbateurs et les phénomènes d'atténuation, les deux signaux de retour (le

rayon vert et le rayon rouge) peuvent être identifiés comme des signaux à impulsion et peuvent être associés aux signaux émis au départ, afin de déterminer la profondeur du fond marin au point d'impact des rayons (<http://www.optech.ca>). Notons cependant que pour connaître la profondeur d'un fond marin, il suffit de mettre en relation les données GPS et le temps de parcours de l'onde verte uniquement (altitude ellipsoïdal). Mais le rayon infrarouge s'avère néanmoins indispensable pour pouvoir associer le retour du fond à un instant d'émission bien précis, dans la mesure où les phénomènes de dispersion auxquels l'impulsion est soumise ne permettraient pas d'en identifier la dimension temporelle.

Optech SHOALS T1000

Le modèle SHOALS T1000 (Tab. 11), le plus innovant de tous les appareils Optech, présente, dans un produit de taille raisonnable, un puissant laser scanner avec un poste prévu pour l'élaboration des données directement depuis l'avion.

La version complète permet de relever aussi bien en mode hydrographique (grâce à la fonction spéciale caractéristique du système ALB) qu'en mode topographique, et se comporte dans ce cas comme un LIDAR habituel terrestre. Les deux typologies d'opérations sont caractérisées par des conditions opérationnelles et des valeurs d'exactitudes différentes.

Lorsqu'il est utilisé pour les relevés bathymétriques, l'altitude de vol doit être de 200 à 400 m, hauteur à partir de laquelle le laser parvient à pénétrer dans la mer jusqu'à 40 - 50 m dans des eaux limpides, 20 - 40 m à proximité du littoral et 20 m dans des eaux turbides internes. Notons qu'il reste néanmoins toujours en mesure de relever des zones de basse profondeur, jusqu'à 0,2 m.

Une fois la vitesse de croisière atteinte (entre 230 et 330 km/h), le scanner réussit à se synchroniser avec la vitesse de l'avion. Il est alors en mesure de couvrir jusqu'à 70 km²/h avec un quadrillage de relevé à carreaux pouvant varier entre 2 m et 5 m de côté, tout en maintenant une exactitude sur la cote et sur la position planimétrique IHO d'ordre 1.

Dans le cas d'un relevé topographique, l'altitude de vol augmente (entre 300 et 700 m), pour une exactitude :

- de 25 cm toujours sur la côte;

- dépendante du mode d'acquisition GPS des données planimétriques: EQM (écart quadratique moyen) de 2 m pour un relevé au DGPS, tandis qu'avec le KGPS, on obtient des valeurs affectées par Δx équivalent à :

$$\Delta x = 0.002 \times H$$

où H est l'altitude de vol. L'erreur sera donc comprise entre 60 cm et 1,4 m.

Il s'avère que la largeur de la bande ne dépend pas de la profondeur de l'eau, chose qui ne se produit pas avec les techniques traditionnelles bathymétriques, alors qu'elle est influencée par l'altitude de vol.

Les appareils utilisés pour effectuer le relevé sont connectés entre eux pour former un système fixe intégré composé de :

- un émetteur laser;
- un capteur rétro réfléchissant Cassegrain avec deux canaux pour le vert, deux pour l'infrarouge et un pour le rouge de la bande Raman ; les deux premiers enregistrent le signal de retour de la lumière, respectivement à des profondeurs supérieures à 7 m et inférieures à 12 m, tandis que le canal infrarouge et le canal Raman servent à identifier la surface de l'eau. Le cinquième canal (infrarouge) est utilisé pour effectuer la discrimination en temps réel entre l'eau et la terre (ou le sol);
- un récepteur GPS en modalité DGPS ou DGPS;
- un dispositif inertiel Litton LTN – 90;
- deux ordinateurs Pentium et une imprimante couleur;
- un circuit de refroidissement;
- une caméra vidéo utilisée pour obtenir un enregistrement de la zone scannerisée. Chaque prise contient un encadré renseignant à tout moment sur le temps, la latitude, la longitude, l'altitude, le tangage, le roulement et la direction de l'avion. Chaque prise présente également un quadrillage avec le Nadir de l'avion, calibré à 30 m.

Tableau 11 – Caractéristiques du système SHOALS T1000

Paramètre	Mode hydrographique	Mode topographique
Fréquence de mesure	1000 Hz	10 kHz
Altitude de vol	200 – 400 m	300 – 700 m
Largeur de la bande	0,58 x altitude	
Largeur typique	215 m (quadrillage à carreaux de 4 x 4 m)	
Profondeur minimum	0,2 m	
Profondeur maximum	50 m	
Densité d'échantillonnage	2x2, 3x3, 4x4, 5x5 m	
Exactitude sur la profondeur	IHO d'ordre 1 (25 cm, σ)	25 cm, σ
Exactitude horizontale	IHO d'ordre 1 (2,5 m, σ)	2,0 m, σ au DGPS 0,002 x altitude au KGPS
Vitesse de l'avion	230 – 330 km/h	

A côté de sa composante hardware, le système est également doté d'un logiciel, le CGS *Ground Control System* qui permet de planifier le plan de vol, d'élaborer les données recueillies en post-traitement, d'éliminer le bruit et de passer immédiatement de la visualisation en 3D des données hydrographiques à celle des données topographiques. Ce programme est constitué de trois composants principaux :

- le MAPS, *Management And Planning Software*, qui permet d'établir des plans de vol à partir de la disposition des lignes et des points à relever ;
- le DAVIS, *Downloading Autoprocessing Visualization Software*, servant à télécharger, élaborer, dépouiller et visualiser les données recueillies ;
- le STARS, *Statistical Tracking And Reporting Software*, qui permet de créer des rapports de vol pour analyser la progression de la mission et l'état du système.
- L'émetteur – récepteur laser contient également un algorithme permettant à l'opérateur de visualiser en temps réel la profondeur approximative depuis l'avion, et par conséquent de

modifier la mission en temps réel : modification des paramètres de vol pour maximiser la couverture, répétition d'une ligne ou déplacement sur une autre zone.

Tenix Mk II LADS

Fabriqué par une société bénéficiant d'une expérience internationale de près de dix ans dans le secteur des relevés ALB, le laser scanner LADS MkII (Tab. 12) compte parmi les systèmes les plus rapides et les plus innovants du monde, grâce à la reconnaissance et à la restitution de la bathymétrie de la côte (<http://www.cgrit.it>).

Tableau 12 – Caractéristiques du système LADS MkII

Avion		Relevé	
Modèle	Dash 8-202	Altitude	360 – 660 m
Autonomie	3700 km	Vitesse	260 – 390 km/h
Tenue de cap	$\sigma = 3\text{m}$	Marge de profondeur	Jusqu'à -75 m
Vitesse de croisière	460 km/h	Marge topographique	50 – 0 m
Altitude de croisière	7500 m	Amplitude	indépendante de l'altitude
Positionnement	DGPS ou KGPS	Espacement	2x2, 3x3, 4x4, 5x5, 6x6 m
		Couverture	70 km ² /h
		Exactitude horizontale	IHO d'ordre 1
		Exactitude verticale	IHO d'ordre 1

Le système LADS MkII est installé sur un avion de Havilland Dash 8-202, équipé tant pour les longs parcours de haute altitude que pour les vols de basse altitude effectués lors des relevés, et garantit une autonomie de 3.700 km.

En modalité d'acquisition, l'avion se déplace à une vitesse de 260 – 390 km/h le long de lignes droites déterminées à l'avance et suivies par le pilote automatique, avec un écart maximum de tolérance de 3 m, à une altitude comprise entre 360 m et 660 m, afin de consentir le relevé de la bande côtière comprise entre + 50 m et - 75 m, selon la limpidité de l'eau, une fourchette qui comprend le relevé des données bathymétriques et topographiques à la fois.

Dans ces conditions, le laser scanner, sur un quadrillage à carreaux de 2 à 6 m de côté, couvre plus de 70 km²/h, une valeur qui varie sensiblement en fonction de la proximité des points et des lignes de relevé, soit par exemple 65 km²/h avec un espacement de 5 m et 20% de superposition, ou 22 km²/h avec des points disposés tous les 3 m et 25% de superposition.

Mais ce qui rend le système LADS MkII véritablement unique, c'est la constance de l'amplitude de la bande (Tab. 13) qui ne dépend plus de la profondeur de l'eau, contrairement au SHOALS 1000, ni de l'altitude de l'avion, puisqu'elle n'est influencée que par l'espacement du quadrillage et par la vitesse de vol.

Tableau 13 – Amplitude de la bande selon les modalités de relevé

Espacement du quadrillage	Distance entre les lignes	Vitesse de l'avion	Amplitude
6 x 6 m	260 m	340 km/h	300 m
5 x 5 m	200 m	320 km/h	240 m
4 x 4 m	160 m	260 km/h	192 m
3 x 3 m	80 m	275 km/h	100 m
2 x 2 m	30 m	260 km/h	50 m

Les appareils utilisés pour effectuer le relevé sont connectés entre eux pour former un système fixe intégré composé principalement de:

- un émetteur-récepteur laser;
- un récepteur GPS en modalité DGPS ou DGPS;
- un dispositif inertiel ;
- trois ordinateurs pour synchroniser le système, contrôler le cap de l'avion et créer une interface entre technicien et hardware;
- un appareil photo numérique pour photographies aériennes, enregistrant des clichés à 2 megapixels par seconde et fonction caméra vidéo.

La société Tenix fournit elle aussi un logiciel consacré (GS Ground System) aux fonctions suivantes:

- *Depth check function*: calcule la profondeur moyenne et la déviation standard des données recueillies dans la journée ;

- *Cross line comparison function*: calcule les différences moyennes et les déviations standards des points au croisement entre les lignes de relevé et les cross lines;
- *Waterfall display* : associé au composite data display, au *local primary display* et au *raw data display*, il montre trois secondes de données colorées en fonction des profondeurs ;
- *Data validation*: effectue une révision détaillée et modifie chaque ligne de relevé pour valider le traitement automatique des données;
- *Data checking*: contrôle le processus de validation;
- *Data visualisation*: importe les données dans un logiciel pour la visualisation en 3D, permet de contrôler de vastes zones de relevé et identifier les anomalies restantes;
- *Data final review & quality control*: termine le processus en validant une dernière fois les données.

AHAB Hawk Eye II

L'Hawk Eye II (Tab. 14) peut couvrir entre 10 et 50 km²/h, à une altitude comprise entre 200 et 300 m, à une vitesse de vol de 165 - 280 km/h, et fonctionner soit en mode hydrographique, soit en mode topographique. L'altitude de vol exerce une influence sur la largeur de la bande.

Dans le premier cas, il peut traiter jusqu'à 4.000 points/s répartis sur 2 m², à une profondeur maximum de 50 m. Dans le deuxième, la capacité d'acquisition arrive jusqu'à 6 4000 points/s, avec une densité maximale de 10 points/m²; le système parvient à identifier automatiquement le trait de côte.

Comme dans les modèles précédents, il fonctionne avec un appareil photo numérique à haute résolution (1200*1600).

Tableau 14 – Caractéristiques du système Hawk Eye II

Paramètre	Mode hydrographique	Mode topographique
Couverture d'extension	10 – 50 km ² /h	
Altitude de relevé	200 – 300 m	
Vitesse de relevé	165 – 280 km/h	
Espacement	Jusqu'à 1,45 m	Jusqu'à 0,4 x 0,2 m
Amplitude	100 m (altitude de relevé 300 m)	
Fréquence	4 kHz effectifs, 1 kHz nominal	64 kHz effectifs, 8 kHz nominal
Profondeur maximum	50 m	
Exactitude	IHO d'ordre 1	

La société AHAB fournit elle aussi les logiciels pour élaborer les données recueillies, un pour le mode bathymétrique et un pour le mode topographique :

- Mode bathymétrique: *AHAB Hydrographic Studio and CARIS HIPS* ;
- Mode topographique: TerraScan.

Comparaison entre relevé ALB et relevé traditionnel

Conçu initialement comme un système servant à identifier des corps de petites dimensions (2 m x 2 m) à des fins militaires et nautiques, le LIDAR bathymétrique fait l'objet depuis quelques années d'expériences, dans le but de vérifier si l'exactitude atteinte dans l'indication de la profondeur des fonds marins peut être comparable à l'exactitude des systèmes bathymétriques « traditionnels », c'est-à-dire des échosondes *single-beam* et *multibeam*.

Bien que les principaux systèmes ALB soient certifiés avec une exactitude nominale de 24 cm, leur potentiel technique permettrait d'atteindre les 15 cm. Cette différence s'explique par le fait que les résultats sont toujours faussés par les nombreuses variables qui caractérisent chaque relevé (Beachmed, 2004c; Milli et Surace, 2006).

Tout se joue donc dans la rapidité d'exécution du relevé, et donc dans son faible coût, par rapport aux technologies citées précédemment, sans que cela ne nuise à la quantité des données puisqu'elle s'avère en réalité nettement supérieure: il s'agirait donc d'un système idéal si, avec une quantité supérieure de données collectées en un temps plus court et pour un coût inférieur, il faisait preuve d'une exactitude au moins égale à celle des systèmes traditionnels.

Les expériences accumulées au cours de ces dernières années n'ont souvent pas pu être mises à profit à cause de la turbidité de l'eau. Certaines ont cependant abouti avec succès et nous en reportons ci-dessous les résultats de deux d'entre elles :

Cas d'étude n° 1 Sardaigne Nord - Ouest; ALB Vs *Single-beam* (monofaisceau)

L'expérience a été menée dans le Nord-ouest de la Sardaigne, dans une portion de littoral comprenant une partie du golfe de l'Asinara, à l'est de l'île Piana, et une bande s'étendant au Nord, au Sud et à l'Ouest de cette dernière.

Le relevé *single-beam* a été effectué en 2003/2004 avec une échosonde DESO 25 montée sur un bateau allant à une vitesse minimum de 3 nœuds à proximité des côtes et à une vitesse maximale de 8 nœuds au large; la distance planimétrique entre un point et l'autre varie entre 1,5 m et 4 m (Tab. 15).

Le système de positionnement utilisé était un DGPS, tandis que les informations concernant la marée ont été obtenues à l'aide du marégraphe numérique OTT ORPHEUS positionné à Porto Torres, à environ 40 km de la zone de relevé.

Les corrections pour la vitesse du son avaient été fournies par l'Institut Hydrographique de la Marine.

Le relevé ALB a en revanche été effectué le 16 octobre 2003 par la Compagnia Riprese Aeree de Parme avec le Tenix LADS MkII, en reprenant les points indiqués sur un quadrillage 5 cm x 5 cm à une vitesse de vol de 170 km/h, en suivant des lignes de 240 m de largeur, espacées de 100 m les unes des autres, de sorte à avoir une superposition totale.

Les données ALB ont été élaborées selon la procédure habituelle qui prévoit :

- le géoréférenciel direct des données en fonction des informations fournies par le GPS et par le système inertiel;
- la rototranslation afin de porter le centre du système de référence au point d'émission – réception du laser;
- la correction de la vitesse de la lumière dans l'air et dans l'eau, bien que ce facteur n'exerce pas autant d'influence que dans les relevés traditionnels, à l'exception du changement de vitesse à l'interface air-eau;
- dans ce cas, des données moyennes saisonnières sont utilisées pour corriger le rayon vert (atmosphère et eau) et le rayon rouge (atmosphère uniquement);
- les corrections de marée effectuées dans ce cas avec les données prévues;
- élimination des données anormales.

Les données collectées par les deux systèmes (WGS84 pour les données planimétriques et MLWS (*Mean Low Water Spring*) pour les données altimétriques) et restituées en UTM fuseau 32, avaient les caractéristiques suivantes :

Tableau 15 – Caractéristiques des relevés ALB et *single-beam*

Dispositif	Nombre de points	Répartition	Surface du relevé	Temps nécessaire
<i>Single-beam</i>	97.914	linéaire	32,18 km ²	12 jours
ALB	814.861	en surface	40,30 km ²	5 heures

Les résultats obtenus avec les deux systèmes peuvent être analysés séparément.

Evaluation de l'exactitude planimétrique

En phase de post-traitement, les données ALB ont été mis en corrélation avec les positions relevées par KGPS, avec des mesures de phase sur les portantes L1 et L2, présentant une erreur donnée par

$$\Delta x = 0.3m + 0.001m \times D$$

où D est la distance en km de la station Master qui se trouvait dans ce cas à Parme, à environ 460 km. Par ailleurs, il subsiste une erreur d'offset entre le centre de phase de l'antenne GPS et le centre du système ALB, estimée à 0,66 m à 95% de probabilité.

Y contribuent également l'identification de l'interface air - eau, perturbée par l'état de la mer, l'inclinaison du rayon et la profondeur des fonds marins. L'erreur planimétrique totale atteint alors les 4 m à 95 %.

Le système *single-beam* s'est en revanche servi du GPS avec corrections Omnistar. L'erreur planimétrique est restée inférieure à un mètre, avec un intervalle de confiance de 95 %.

Evaluation de l'exactitude altimétrique

A l'incertitude intrinsèque du système ALB (les 25 cm indiqués par le fabricant), il faut ajouter une erreur ultérieure, due à l'état de la mer et à l'action de la marée, de l'ordre de 0,3 m, soit une erreur totale théorique de 0,55 m.

L'échosonde présente une exactitude de 0,1 m, mais l'absence de tout système inertiel sur l'embarcation et l'attribution de 0,05 m d'incertitude dans l'évaluation de la marée conduisent à une erreur totale de 0,32 m.

Des lignes transversales de contrôle ont été effectuées pour les deux relevés. A position planimétrique égale, elles reportent sur la côte un écart moyen entre ces lignes et les mesures initiales de 0,07 m pour le système ALB et inférieur à 0,3 m pour 95% des points *singlebeam*.

Comparaison des résultats

Comme nous le disions plus haut, les données des deux systèmes ont été mis en corrélation avec un *datum* géodésique, mais pour bien les comparer, il a été décidé de créer un TIN avec les données ALB et de projeter sur celui-ci les données *singlebeam*.

A position planimétrique égale, les valeurs de profondeur enregistrées par le système ALB sont en moyenne inférieures et les différences les plus significatives se rencontrent dans les zones touchées par des phénomènes de surf ou dans lesquelles la turbidité était la plus élevée. La différence entre les valeurs ALB et *singlebeam* est une variable aléatoire, avec un EQM de 0,44 m et une moyenne de 0,38 m (Tab. 16) une valeur qui dénote un léger effet systématique.

Le relevé ALB réalisé peut rentrer dans la IHO d'ordre 1, puisque le degré d'exactitude planimétrique, qui peut s'améliorer ultérieurement au fur et à mesure que l'on se rapproche de la station Master, est compris dans la fourchette prévue (5 m + 5 % de la profondeur).

En ce qui concerne la côte, si l'on retient le relevé *singlebeam* comme une base « certaine » puisqu'il est le fruit d'une technologie qui a fait ses preuves, on observe que 70 % des points ALB ont un écart par rapport aux données correspondantes acquises avec le *singlebeam*, inférieur au seuil de tolérance requis par l'IHO d'ordre 1, calculable à travers :

$$\sigma = \sqrt{a^2 + (b \times d)^2}$$

où a = 0,5 m ; b = 0,013 et où, pour la profondeur d, on utilise une valeur moyenne de 20 m (IHO, 1998).

Tableau 16 – Ecart entre résultats ALB et *single-beam*

Ecart par rapport au <i>Single-beam</i>	Ecart par rapport au <i>Single-beam</i>	Nombre de points
-0,56 m < s < 0,56 m	$-\sigma < s < \sigma$	51.747
-1,12 m < s < 1,12 m	$-2 \sigma < s < 2 \sigma$	19.182
-1,68 m < s < 1,68 m	$-3 \sigma < s < 3 \sigma$	1.501
-2,24 m < s < 2,24 m	$-4 \sigma < s < 4 \sigma$	478
-2,8 m < s < 2,8 m	$-5 \sigma < s < 5 \sigma$	598

Comme on peut le constater, l'écart entre les données ALB et les données *singlebeam* est inférieur à $\pm 0,56$ m pour 51.747 points, 70 % du total, dont 44.899 présentent une profondeur supérieure pour le relevé à l'échosonde, tandis que la situation s'inverse pour les 6.848 restants (Milli et Surace, 2006).

Cas d'étude n° 2 : Etat de Washington ; ALB Vs *Multibeam* (multifaisceau)

En mars 2005, l'Olympic Coast National Marine Sanctuary (OCNMS) de l'état de Washington a chargé les sociétés Fugro Pelagos Inc et GRW Engineers de procéder à un relevé ALB sur une zone de 40,7 km², comprise entre Point et Cape Alava.

Le but de l'opération était de connaître la situation du fond marin dans une zone précise à proximité du littoral, trop accidentée pour pouvoir être relevée avec les méthodes traditionnelles, et de comparer les résultats obtenus avec les données déjà disponibles, collectées par le biais d'un relevé *multibeam* à haute résolution, réalisé en octobre 2004.

Les séances de vol ont eu lieu entre le 19 et le 24 avril 2005, pour une durée totale de 21 heures, avec le système Optech SHOALS T1000, dans les conditions suivantes (Tab. 17):

Tableau 17 – Paramètres du relevé ALB avec le système SHOALS T1000

Mode	Fréquence	Altitude de vol	Vitesse	Quadrillage	Limites
Hydrographique	1 kHz	400 m	230 km/h	4x4 m	0 / -15 m
Topographique	10 kHz	700 m	285 km/h	2x1,6 m	0 / MHHW*

* *MHHW* = *Mean Higher High Water*

Des mesures de turbidité réalisées le 15 avril 2004 ont donné des profondeurs du disque de Secchi comprises entre 3,2 m et 8,7 m, alors qu'à travers un relevé ALB, on estimait que l'on pouvait mesurer des profondeurs allant de 8 à 26 m.

On avait établi que la meilleure période pour effectuer la reconnaissance était le mois d'avril, dans la mesure où c'est une période où les grosses averses printanières sont déjà passées et où la température de l'eau est encore suffisamment froide pour éviter toute prolifération excessive d'algues, ce qui serait devenu plus probable avec l'arrivée de la saison estivale.

Mais les choses ne se sont pas passées comme prévu à cause d'une perturbation qui a réduit les heures de vol disponibles et augmenté la turbidité de l'eau ainsi que l'effet de surf. Peu de données utiles ont donc pu être recueillies, en particulier dans la zone Sud.

Malgré tout, la profondeur maximale relevée par le laser a été de 22 m dans la zone exposée aux courants et aux vents océaniques : l'exposition n'exerce donc aucune influence sur l'état de la turbidité.

Comparaison des données

Le relevé ALB a été effectué en mode DGPS, en référence au *datum* ellipsoïdique NAD83. Il a donc été nécessaire d'utiliser le modèle d'ondulation du géoïde Geoid99 pour associer les côtes à un système orthométrique (NAVD88) basé sur le niveau moyen de la mer (MSL).

Mais les bathymétries réalisées avec le *multibeam* se référaient au MLLW (*Mean Lower Low Water*) par le biais du marégraphe Neah Bay. Il a donc été indispensable de ramener les données du LIDAR au *datum* altimétrique MLLW à travers le modèle VDatum, qui fonctionne à travers une grille de modèles de marée reliée aux marégraphes.

La comparaison s'est ensuite faite au moyen de logiciels fournis par Optech et ARCinfo. Une grille 4m x 4m a été créée pour les deux sets de données qui ont été ensuite entrecoupées pour obtenir une grille finale avec uniquement les polygones contenant les deux typologies de relevé.

Les polygones de superposition ont été plus de 44.000. Ils ont permis de fournir des différences entre les deux relevés allant de - 24,3 m à 8,48 m, avec une moyenne de - 0,967 m et une dérivation standard de 1,792 m.

L'analyse des moindres carrés montre qu'en restant dans un intervalle de confiance de 90% (-0,54 m – 2,33 m), les données du *multibeam* sont pour la plupart moins profondes de 1 m – 1,5 m par rapport aux données ALB. Quant aux différences extrêmes, elles sont présentes dans deux zones distinctes et attribuables au relevé d'un faux fond.

Dans le cadre de l'analyse précédente, la droite de régression permet d'obtenir la relation linéaire reliant les données LIDAR aux données du *multibeam* MD, soit :

$$LIDAR = -2.576 + 0.835 \times MD \quad (R = 0.682)$$

L'évolution générale des différences peut dépendre du fait que les données du *multibeam* ont été dépouillées et interpolées avec une contrainte davantage influencée par une profondeur faible, pour se prémunir contre les dangers de la navigation, rehaussant ainsi toute l'évolution du fond (Intelmann, 2006).

Présentation et analyse du vol pré-test en France (Hérault)

Dans le projet OPTIMAL, le SMNLR et le CG 34 ont clairement demandé à l'EID, de réaliser dès la Phase A un vol de pré-test et de l'analyser. Ce pré-test très limité, a servi uniquement à vérifier que le vol test prévu en phase B et qui représente une somme financière importante, n'aboutirait pas à un résultat inexploitable. Ce pré-test n'a pas la valeur technique du vol test (Phase B) qui sera simultanément avec des mesures de topographie et de bathymétrie classiques afin de valider complètement ce système de suivi du littoral.

Pour être conforme au projet déposé il faut donc que l'EID présente et analyse le vol de pré-test dans le rapport de phase A. C'est une demande expresse des partenaires OCR français. Cependant cette analyse porte sur des éléments plus qualitatifs (mode opératoire, bonne visualisation des formes et objets recherchés, etc.) et peut s'apparenter donc à un retour d'expérience au même titre que l'analyse bibliographique. Le vol test de la Phase B apportera lui des résultats quantitatifs beaucoup plus importants.

Au printemps, a eu lieu un vol pré-test d'essai de la technologie LIDAR par la société Admiralty Coast le 17 Mars 2006. L'avion a parcouru une zone de 12 km de long sur 500 m de large en 6 lignes de vols pour la mesure et 2 lignes de vols transversales pour la validation interne des données (Fig. 2).



Figure 2 - Plan des lignes du vol test effectué le 17 Mars 2006

La zone d'étude pour ce pré test a été choisie pour faire passer les lignes de vols selon un tracé partant du Grau du Prévost en direction des salins de Frontignan. Ce choix vient de la possibilité compte tenu de la courbure en cet endroit du littoral, de survoler successivement les différents types d'unités littorales qui nous intéressent dans le cadre du programme:

- la plage immergée de - 10 m de profondeur au trait de côte;
- la plage émergée;
- le cordon dunaire;
- les cônes de débordement de tempête (*overwashes*);
- l'étang de Pierre Blanche et de Vic en arrière du lido.

Lors de l'acquisition des données les conditions dans la zone étaient :

- Vent: Jusqu'à 8h du matin, vent orienté Nord, vitesse moyenne de 8 nœuds ($8 \times 1,852 = 14,8$ km/h) ; De 8h à 13h, vent orienté Nord-Est, vitesse moyenne de 13 nœuds (24 km/h) ; De 13h à minuit, vent d'Est, vitesse moyenne de 7 nœuds (13 km/h);
- Houle: Houle d'Est-Sud-Est en hausse le soir (passage de belle à peu agitée).

La restitution des résultats a donné lieu à une réunion avec le CG34, le SMNLR et Mr Carl-Johan Stigermark de la société ADMIRALTY Coast, prestataire le 31 Mai 2006.

La donnée obtenue est de bonne qualité et couvre une zone suffisante (Fig. 3), on voit que l'acquisition s'est faite aussi bien vers le large qu'à l'intérieur de l'étang.

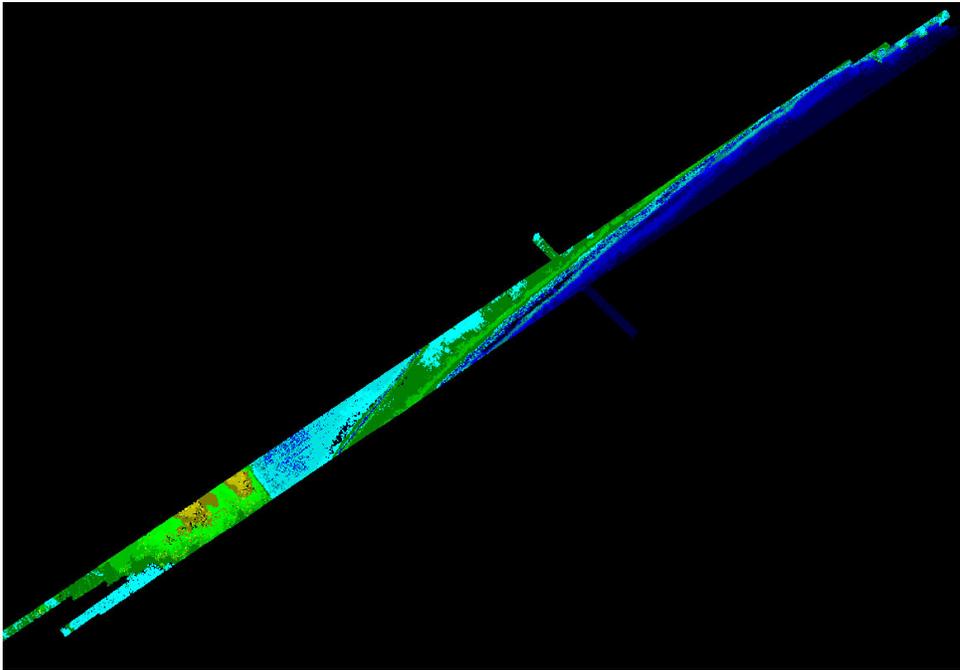


Figure 3 - Visualisation de la donnée recueillie par les lignes de vols

La donnée dépasse nos exigences dans le sens où :

- La profondeur pouvant être atteinte est de l'ordre de 20 m, ce qui, pour notre zone qui s'étend jusqu'à 10 m avec une profondeur de fermeture de 7 m, laisse une bonne marge de sécurité en cas de turbidité plus forte de la zone;
- Le décrochage de la mesure lors de la transition entre la terre et l'eau se fait ici entre 30 à 50 cm de profondeur contre environ 1 m pour les mesures par bateau.

Nous avons aussi constaté la forte densité de la couverture des lasers et la capacité des données traitées de fournir une information très riche que ce soit sur terre ou en mer (Fig. 4). Cette information sera bien sur aussi utilisable dans d'autres domaines (SIG, urbanisme, communication, prévention des risques, délimitation du domaine public maritime, etc.).

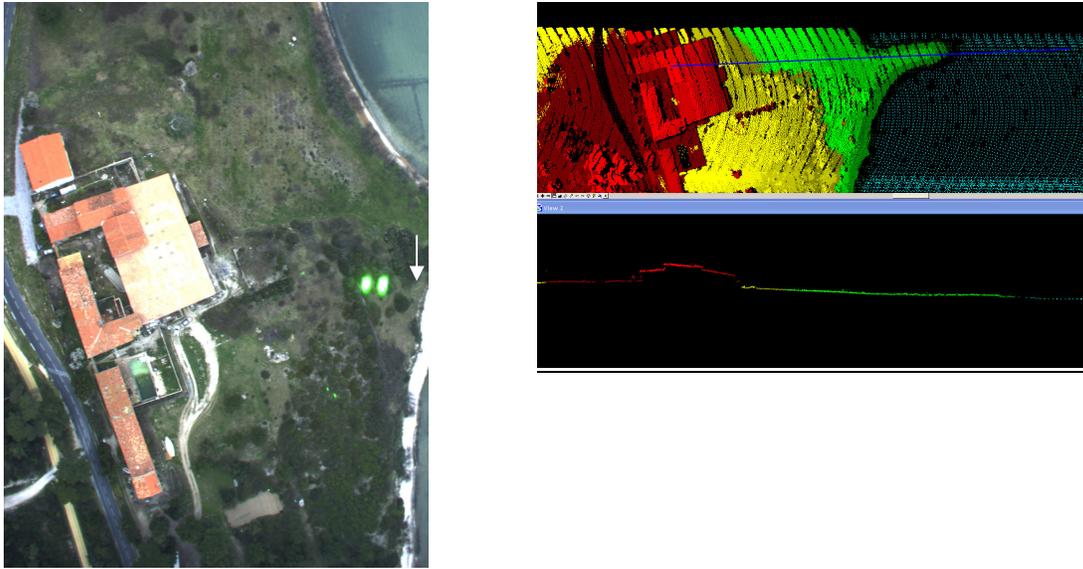


Figure 4 - Exemple d'une zone couverte et de sa représentation tridimensionnelle grâce aux mesures LIDAR

Données de turbidité

En ce qui concerne le Golfe d'Aigues-mortes, le principal facteur limitant pour la mesure LIDAR est la turbidité de l'eau (Guenther et al, 2000). Nous avons procédé à des mesures de la turbidité à l'aide d'un disque de Secchi de façon extensive le long du Golfe à trois périodes différentes par des profondeurs de 3 m et 6 m (Fig. 5).

La profondeur d'acquisition que peut atteindre le LIDAR est estimée dans la littérature entre 2,5 et 3 fois la profondeur de Secchi.

Le 13 Mars soit quatre jours avant le passage de l'avion, les conditions en mer donnent une visibilité moyenne de 4 m par 6 m de fond pour la profondeur de Secchi, ce qui correspond à une profondeur atteignable par le LIDAR de 10 m, valeur facilement atteinte lors du vol pré-test.

Le 14 Avril des conditions similaires donnent une eau limpide et une profondeur de Secchi de l'ordre de 5 m par 6 m de fond.

La journée du 25 Avril est différente en ce qu'une houle de Sud était présente et qu'il avait plu la veille. La profondeur de Secchi ne dépassait pas 2,5 m même par 6 m de profondeur.



Figure 5 - Emplacement des points de mesures de la turbidité par la méthode du disque de Secchi

Ces données confirment que l'acquisition peut porter suffisamment en profondeur pour couvrir la portion de plage que l'on veut étudier (fonds de 10 m maximum) du moment que l'on évite les périodes de houle et de précipitation, ce qui est rendu techniquement possible par le prestataire (veille météorologique et période d'attente de conditions favorables sont comprises dans la prestation). On voit un exemple de MNT (Modèle Numérique de Terrain) obtenu à partir des données du vol pré-test (Fig. 6).

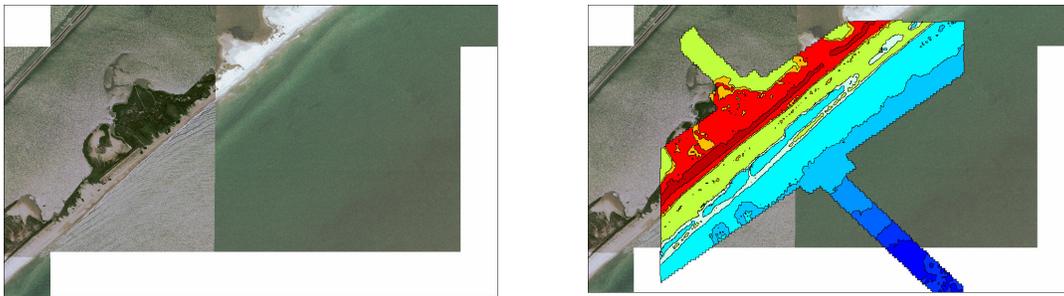


Figure 6 - Localisation d'un extrait du MNT étudié - Lido de l'étang de Pierre Blanche

On a extrait un ensemble de points en terre et en mer vers l'étang de Pierre Blanche. La qualité du rendu est visible dans l'Annexe I, la couverture dense (résolution de 4 m) permet de rendre compte de toutes les caractéristiques de la zone (étang, dunes, végétation, barres), une ligne de vol transversale montre que l'on peut atteindre une profondeur de 10 m.

Le potentiel de la technique réside dans la quasi continuité des mesures à l'interface terre/eau, par exemple la Fig. 7 malgré sa faible résolution permet de distinguer des éléments tels que le canal du Rhône à Sète, la présence d'*overwashes*, les dunes et mêmes les barres sableuses sous marines.

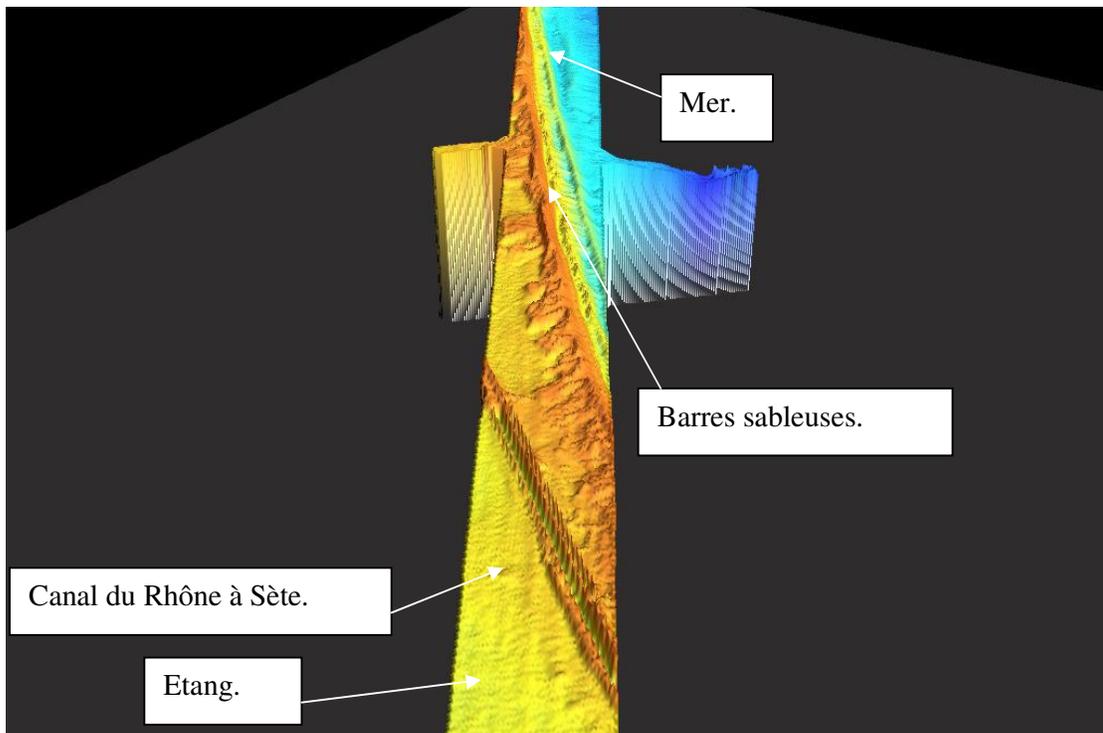


Figure 7 - Représentation tridimensionnelle des données (résolution de 20 m)

Le vol pré-test est apparu très satisfaisant et a répondu à quasiment toutes les questions scientifiques et pratiques qui ont pu se poser (organisation des campagnes, portée en profondeur, connexion terre-mer, référentiel géographique).

La couverture étendue, la portée et la densité de la mesure LIDAR en font un outil sans équivalent qui convient parfaitement aux objectifs d'étude et de gestion de la zone littorale. Le

succès de cette technique novatrice sur le Golfe du Lion pourrait être la première étape d'une nouvelle approche du suivi à moyenne et grande échelle des côtes.

La mise en œuvre technique ne devrait pas poser de problèmes grâce aux longues périodes de mer calme et de faibles précipitations.

Toutefois le format de la donnée finalisée n'est pas encore pleinement satisfaisant, le calcul de la différence zéro NGF/IGN 1969 – hauteur ellipsoïdale n'étant pas clairement renseigné. Il conviendra d'être suffisamment précis sur le protocole de traitement des données exigé lors de l'achat d'une campagne de mesure.

A savoir que la donnée doit être fournie au format WGS84 (ou RGF93) en x et y et en altitude ellipsoïdale pour z.

Celle-ci pourra être transformée en Lambert III sud et hauteur par rapport au zéro NGF grâce au logiciel Circé de l'IGN (avec l'option « transformation grille »). Le prestataire devra donc utiliser les bornes centimétriques de l'IGN (comme celle de port Camargue) dans la zone d'étude pour caler ses GPS.

Enfin il faudra faire confirmer le protocole (prise en compte de la température de l'air avec un vol de calibration) et les différentes possibilités de traitement de la donnée (élimination des artéfacts).

Nous sommes donc confiants mais restons cependant prudents (compte tenu de la faible surface couverte) : cet essai, même si il est concluant, n'a que valeur de test.

3. SISMIQUE

* ICM

En adressant deux techniques (la sismique de haute résolution et son application au suivi côtier et le système de modelé côtier (SMC), nous avons essayé de valider la méthodologie pour résoudre des problèmes d'érosion et d'accumulation de sable sur le littoral en vue d'améliorer la gestion côtière. Nous avons tout spécialement mis l'accent sur le contraste entre les résultats obtenus par la sismique de haute résolution et l'information collectée avec d'autres techniques telles que la sonde multi-faisceau, en évaluant le potentiel, les limitations et la résolution de ces techniques, plutôt qu'à présenter les techniques de traitement des données sismiques car elles sont amplement décrites dans la littérature scientifique.

Sismique de Haute Résolution

Les premières expériences de sismique de réflexion remontent aux années 30 et c'est à cette époque que l'on a commencé à comparer les sections verticales profondes (en temps) aux failles géologiques. À l'origine, la sismique de réflexion a été développée pour la prospection pétrolière et d'autres dépôts minéraux. Les premiers essais documentés de sismique de réflexion de haute résolution (superficielle) datent de 1954 (Pakisser et Mabey, 1984 ; Warrick et Winslow, 1960), mais en raison du coût élevé des profils et de l'effort exigé, ils ont été abandonnés. À la fin des années 70, on assiste à un retour timide de cette technique de réflexion superficielle (Hunter et Hobson, 1977). Il faudra cependant attendre 1985-90 pour que la sismique de réflexion de haute résolution commence vraiment à se développer. L'une des premières techniques appliquées a été celle de la fenêtre optimale (*optimum-window*, Pullan et Hunter, 1990) où, à partir d'essais initiaux, on sélectionne la distance appropriée entre le point de déclenchement et la station réceptrice, de sorte à prospecter le sous-sol en obtenant une section formée par des traces d'*offset* commun. Plus tard, l'application de la méthode du point réflecteur commun (CMP/CDP) est allée de pair avec le développement des sismographes, en coïncidant avec le passage des 12 canaux typiques de l'acquisition des données de réfraction aux 24, 48 et 96 canaux utilisés actuellement, ainsi qu'avec l'augmentation du rang dynamique de 60 à plus de 96 dB. Pendant les 10-15 dernières années, les progrès réalisés dans ce domaine ont essentiellement porté sur l'amélioration des systèmes d'enregistrement, de traitement du signal et sur les techniques interprétatives (Piwakowski, 2004).

Le fondement de la méthode sismique de réflexion (Fig. 8) repose sur l'émission d'une onde sismique et sur l'enregistrement des temps d'arrivée des ondes réfléchies à la limite des couches ayant différentes propriétés physiques (Blondel et Murton, 1997), par une série de détecteurs situés à une certaine distance de la source émettrice (hydrophones).

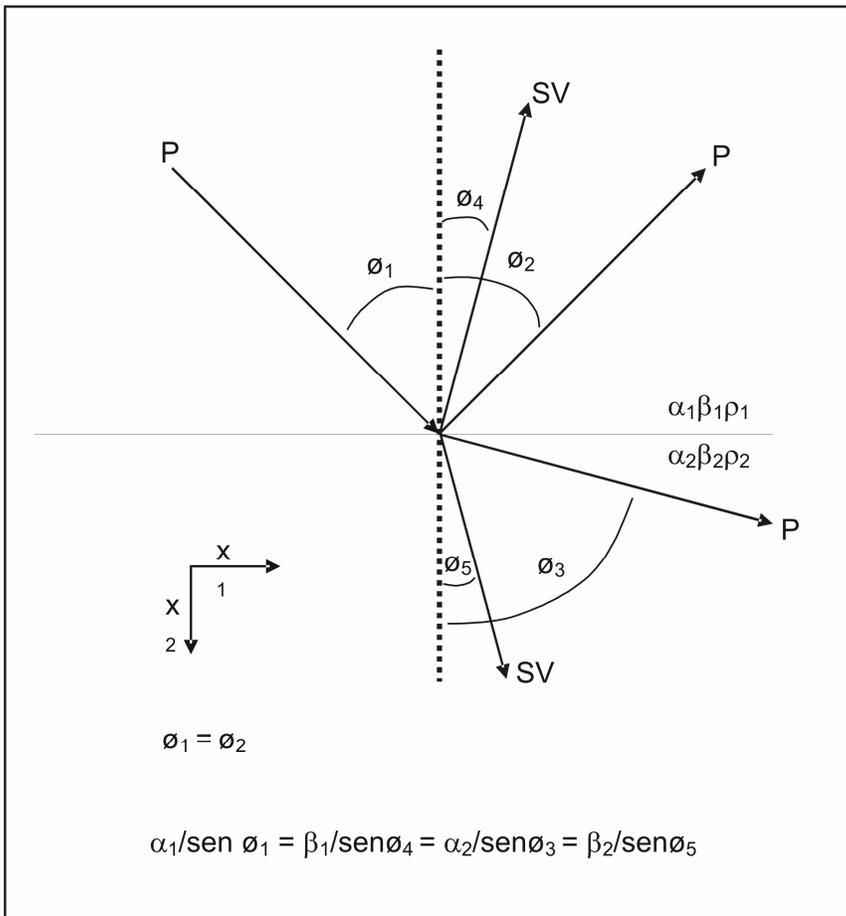


Figure 8 - Schéma de la réflexion et de la réfraction que subissent les ondes sismiques (modifié de McQuillin et al, 1984)

Les ondes sismiques sont des ondes élastiques qui se propagent dans la terre. Quand elles arrivent à une interface, présentant des caractéristiques physiques différentes de celles du milieu traversé, ces ondes sont réfléchies ou réfractées, selon l'angle d'incidence qu'elles ont à leur arrivée (loi de Snell). La Fig. 8 représente le cas idéal d'une réflexion et d'une réfraction à l'interface, α et β étant les vitesses d'onde P et S respectivement et ρ la densité pour chaque couche au-dessus et au-dessous de l'interface où se produit la réflexion et la réfraction.

Notons que si $\alpha_1 > \alpha_2$ pour une certaine valeur ϕ_1 , $\phi_3 = 90^\circ$, le rayon réfracté voyage le long de l'interface entre deux milieux. Cette valeur de ϕ_1 est appelée « angle critique ». Pour des angles d'incidence supérieure, toute l'énergie serait réfléchiée et il n'y aurait pas d'onde réfractée.

Les ondes P sont des ondes de compression entraînant un mouvement de particules parallèle à la direction de propagation de l'onde. Les ondes S sont des ondes transversales pour lesquelles le mouvement des particules est perpendiculaire à la direction de propagation de l'onde.

La différence fondamentale entre les méthodes de réflexion et de réfraction sismique est leur spectre de fréquences, de 1-20 Hz pour les ondes réfractées et de 20-100 Hz pour les ondes réfléchies.

La méthode de réflexion sismique utilise une source génératrice d'ondes, qui est généralement proche de la surface de l'eau (McQuillin et al, 1984) et qui les envoie dans diverses couches sédimentaires. Ces ondes voyagent en direction descendante jusqu'à ce qu'elles se réfléchissent ou se réfractent sur une interface ayant des propriétés différentes et reviennent alors vers le récepteur situé à la surface qui reçoit son signal (Fig. 9).

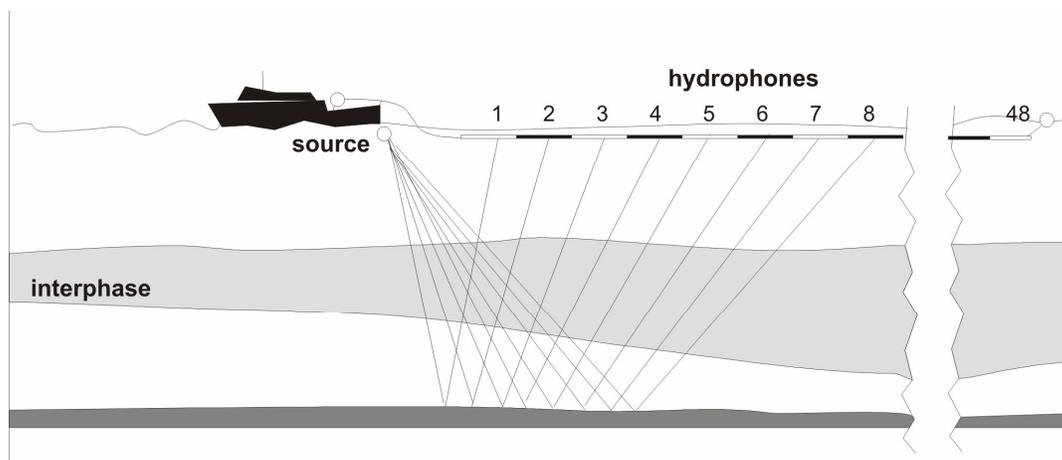


Figure 9 - Schéma du système de sismique de réflexion (modifié de McQuillin et al, 1984)

L'enregistrement montre le temps que met la pulsation à aller et revenir (temps double de voyage ou *two-way travel time*, *TWT*), temps qui, multiplié par la moitié de la vitesse de cette onde au milieu, nous donne la distance parcourue (Fig. 9).

Avantages / inconvénients

Le principal avantage de la sismique de haute résolution (HRS) dans les études de gestion côtière est l'information qu'elle apporte sur le sous-sol.

Dans le suivi de l'érosion côtière, de nombreuses techniques innovantes ont été appliquées pour évaluer l'érosion côtière avec une grande exactitude, telles que les images par satellite (El-Asmar et White, 2002 ; Niedermeier et al, 2005), les photographies aériennes (Anfuso et al 2001, 2005 ; NRC, 2006), les caméras vidéo (Aarninkhof et Holman, 1999 ; Ojeda et Guillén, 2004 ; Ranasinghe et al, 2004), les techniques topo-bathymétriques classiques (Muñoz-Pérez et al, 2001a,b ; Anfuso et al, 2003 ; NRC, 2006), la photogrammétrie numérique (Ojeda et al, 2002 ; Domínguez et al, 2005) et l'altimétrie laser aérotransportée (LIDAR) (Blott et Pye, 2004 ; Shrestha et al, 2005).

Mais dans certaines zones côtières, l'érosion des plages entraîne l'accumulation du sable érodé dans d'autres segments de littoral ; ce nouveau problème s'ajoute à celui de l'érosion et demande à être considéré. Il est donc nécessaire de délimiter le volume de sable accumulé, raison pour laquelle les méthodes sismiques sont proposées. En effet, non seulement elles servent à évaluer le volume de sable accumulé, mais encore elles permettent de cartographier les corps sédimentaires sableux (Lobo et al, 2004 ; Tesson et al, 2005) et les prismes côtiers (Boyer et al, 2005 ; Labaune et al, 2005 ; Niedoroda et al, 2005) associés à la plage en érosion.

Il existe divers appareils de sismique de réflexion qui travaillent à des fréquences différentes, ce qui détermine la résolution verticale obtenue (Tab. 18; Fig. 10).

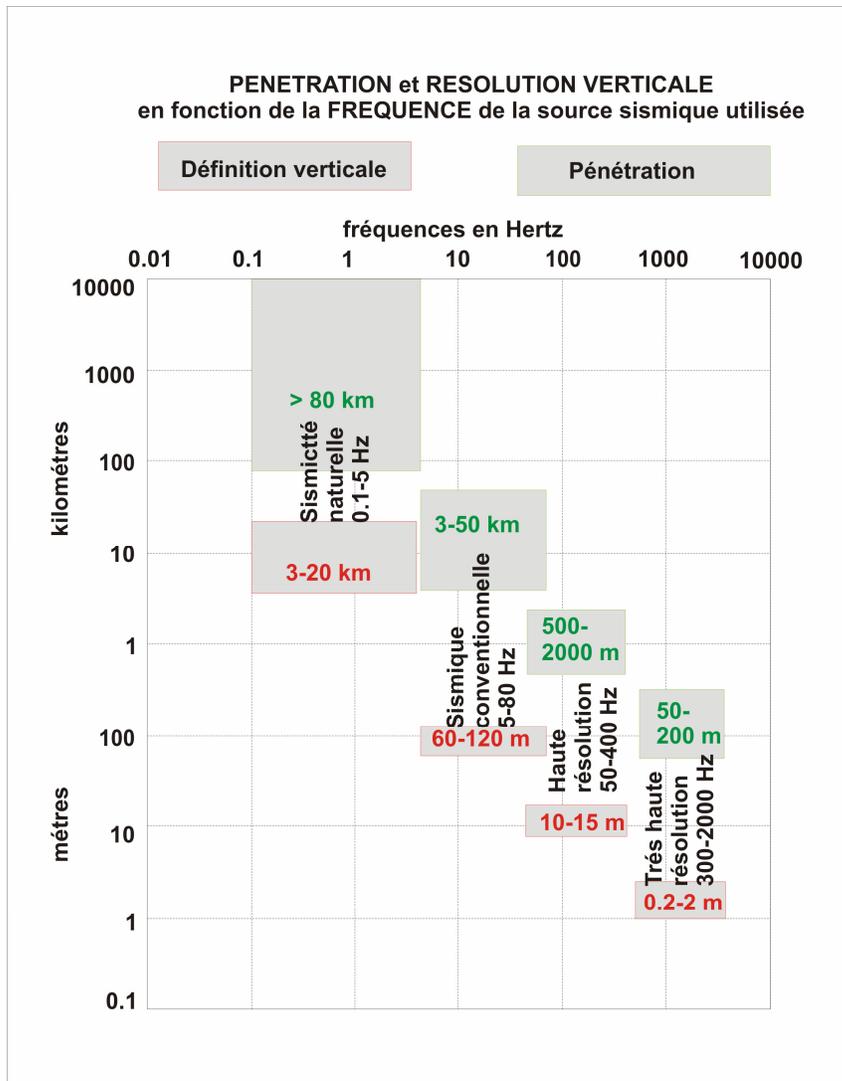


Figure 10- Schéma de la résolution et de la pénétration des différents appareils sismiques selon la fréquence de la source (modifié de l’Ifremer – <http://www.ifremer.fr>)

Tableau 18 - Caractéristiques des principaux appareils sismiques (modification de Judd et Hovland, 1992)

APPAREIL	FREQUENCE FONDAMENTALE	LARGEUR BANDE (Hz)	RESOLUTION (m)	PENETRATION (m)
CHIRP	5 kHz	2 – 16 kHz	0,06-0,1	0,06-0,8
<i>HUNTEC DEEP TOW BOOMER</i>	1,5 – 3,5 kHz	0,2 – 5,5 kHz	0,2	15 – 80
<i>PINGERS</i>	3,5 kHz	1,4 – 4,5 kHz	0,6	5 – 40
<i>MINISLEEVE EXPLODER</i>	250 Hz	60 – 1000 Hz	1,5	800 – 1000
<i>GEOPULSE</i>	300 Hz	100-300 Hz	1,5	100 m
<i>13 KJ SPARKER (9 TIP)</i>	100 Hz	40 – 300 Hz	2,5	1000 – 1200
<i>AIRGUN ARRAY (4 x 40 cu.in.)</i>	80 Hz	10 – 200 Hz	4	1500 – 2500

Dans le milieu marin, le meilleur appareil est sélectionné principalement en fonction de la profondeur et de la nature des sédiments. Divers paramètres logistiques interviennent aussi, tels que le coût, la longueur du bateau, le bruit de fond, le temps d'acquisition et les facteurs ambiants.

Pour les études du littoral notamment, les paramètres logistiques et environnementaux sont similaires pour tous les appareils, de sorte que les facteurs déterminants pour choisir le meilleur appareil seront la profondeur de l'eau, le type de sédiment et le rapport résolution/pénétration nécessaire à l'étude.

Pour cartographier les corps sédimentaires côtiers et en cherchant un compromis idéal entre résolution et pénétration (Fig. 10), les meilleurs systèmes sont les appareils de haute résolution (Geopulse) (Tab.18) qui travaillent à des fréquences de 0.1-0.3 kHz et donnent une résolution comprise entre 1 et 1.5 m et une pénétration de 100 m maximum en fonds sableux.

Plusieurs études appliquant des méthodes différentes dans la même zone indiquent que les méthodes de très haute résolution offrent une haute résolution des premiers mètres de sédiment (résolution verticale: 0,5 - 1 m) mais ne pénètrent pas suffisamment dans les fonds dont

l'épaisseur est importante, de sorte qu'il faut les compléter par la sismique de haute résolution pour obtenir la pénétration nécessaire (Denny et Colman, 2002 ; Baldwin et al, 2004).

Le principal inconvénient de la sismique de haute résolution appliquée aux études de gestion du littoral est la limitation dans la résolution verticale. La pénétration offerte par la sismique de haute résolution est nécessaire pour cartographier le prisme côtier, mais la résolution est-elle suffisante pour évaluer le volume de sable accumulé à l'entrée du port ? Pour le vérifier, des levés bathymétriques du fond marin seront effectués dans les zones d'accumulation, avant et après le dragage et près d'un an plus tard. Cela permettra de vérifier si la méthode sismique est capable d'évaluer le volume de sable accumulé qui est dragué chaque année.

Application aux études de suivi du littoral

La sismique de très haute résolution s'applique aux études du littoral dans la mesure où elle permet d'obtenir une haute résolution de l'architecture stratigraphique des dépôts côtiers (Mosher et Simpkin, 1999).

L'évolution côtière dépend principalement du bilan entre la disponibilité de sédiments et l'état de ces mêmes sédiments retravaillés par la houle. Ces deux paramètres se matérialisent dans les corps sédimentaires et leurs surfaces, forme, volume et étendue ; ils reflètent le stade d'évolution d'un système côtier déterminé. L'étude de ces corps sédimentaires permettra de comparer la situation présente à l'évolution historique du littoral, d'estimer le transport transversalement à la côte et les effets du transport longitudinal. Ce n'est qu'après avoir résolu ces questions que l'on pourra développer des stratégies de gestion côtière.

Parmi les applications de la sismique de haute résolution au suivi côtier, citons:

- l'identification des zones d'impact anthropogénique, telles que les zones de dragage (Schwab et al, 1997);
- la délimitation en profondeur de l'épaisseur des sables mobilisables et des barres de sable qui peuvent être retravaillés et considérés lors de travaux futurs de régénération naturelle ou artificielle. La structure interne des barres de sable aide à comprendre la dynamique actuelle par rapport à la construction et à la destruction des barres (Wagle et Veerayya, 1996; Jung et al, 1998 ; Marsset et al, 1999 ; Zeiler et al, 2000 ; Chaumillon et al, 2002; Lobo et al, 2004 ; Tesson et al, 2005);

- le repérage et la délimitation des corps sédimentaires (prisme côtier, Saito et al, 1998 ; Trentesaux et al, 1999 ; Hernández-Molina et al, 2000 ; Tessier et al, 2000 ; Lobo et al, 2003, 2004, 2005 ; Boyer et al, 2005 ; Labaune et al, 2005 ; Niedoroda et al, 2005) en tant que sources potentielles de sédiments pour la régénération des plages;
- l'établissement de l'architecture du prisme côtier pour mieux comprendre l'évolution morphosédimentaire actuelle du système côtier (Tessier et al, 2000 ; Amina et al, 2002 ; Berné, 2002 ; Chaumillon et al, 2002 ; Lim et al, 2004 ; Michel et al, 2004 ; Boyer et al, 2005 ; Tesson et al, 2005 ; Burningham et Cooper, 2005 ; Burningham et French, 2006).

La cartographie des formes sédimentaires (prisme côtier et barres de sable) nous renseigne tout spécialement sur le transport des sédiments, l'importance des structures géologiques du sous-sol et la géologie historique, qui contrôlent la distribution actuelle des sédiments.

La connaissance approfondie du système sédimentaire et de sa situation actuelle par rapport aux tendances historiques est fondamentale pour définir une stratégie de gestion du littoral.

Données de Base Existantes

Ce rapport apporte une réflexion critique sur la méthodologie employée dans l'évaluation et la prédiction de l'érosion côtière en termes de temps, d'échelle, d'exactitude, de rapport coût/applicabilité et tendance/prédiction, dans un cas précis, la côte du Maresme, dans la région de Catalogne. Il s'agit d'évaluer l'érosion sur une portion de littoral linéaire, où le transport longitudinal des sédiments est interrompu par la présence d'infrastructures côtières (Fig. 11). Cette altération de la dynamique sédimentaire provoque une accumulation de sable dans la zone submergée de l'infrastructure portuaire et l'extension des plages situées au vent ainsi que l'érosion du littoral situé sous le vent (Kirk, 1992 ; Dibajnia et al, 2004). Une base de données sur la zone étudiée est disponible, comme des données topo-bathymétriques, photographies aériennes et climat maritime.

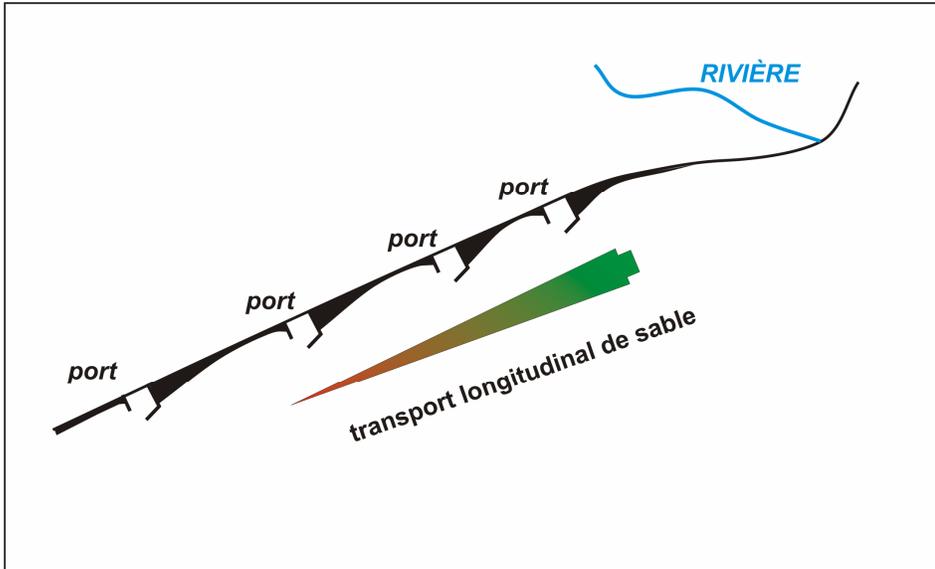


Figure 11- Schéma de l'érosion sur une côte linéaire, provoquée par la présence d'infrastructures côtières

4. RESEAU DE POINTS DE CONTROLE EN MER (PCM)

*** Dip. Sc. Terra/Univ. Studi di Firenze**

Nous sommes dans une phase de rapide évolution pour les techniques de suivi territoriale en général, sur les fonds marins et en particulier les plages émergées, et il est difficile objectivement de trouver dans la littérature scientifique une réponse univoque aux problèmes relatifs à la colocation, la matérialisation, la distance, et les liaisons entre les points de contrôle et les réseaux géodétiques. La naissance et la diffusion toujours plus évidents des techniques de positionnement par satellite GNSS (Beutler et al, 1999) imposent une attention sur l'acquisition des données reportés comme étant pris de la littérature il y a seulement 3 - 4 ans. En fait, en correspondance à l'utilisation des suivis satellitaires on voit une évidente concentration de l'utilisation des méthodologies de suivi topographique à travers « Total Station ». La conséquence plus évidente, mais pas l'unique, est que nous perdons la qualité requise de visibilité réciproque entre les points de contrôle et ceux de la zone marine (ou de plage) intéressée au suivi. Il y a aussi des problèmes de système de référence géodétique, cartographique et, également important, de *datum* altimétrique.

Pour une compréhension de la problématique liée au projet d'un réseau de points dirigé au monitoring des côtes il faut citer celles qui sont les méthodologies utilisées.

Pour les suivis côtiers, nous pouvons distinguer trois catégories principales : plages émergées, ligne de rivage, et plages immergées (Beachmed, 2004 b,c).

Pour le suivi de la plage émergée, en plus de l'utilisation du GPS (Bianco et Carella, 2000; Brasington et al, 2000; Buckley et Mills, 2000; Morton, 1993) on commende à utiliser des techniques nouvelles comme le laser scanner, terrestre et aérotransporté (Aminti et Aminti, 2002; Bresci et al, 2005; Casella, 1999,2000; Casella et Galetto, 1998 ; Charlton et al, 2003; French, 2002; Hofton et Blair, 2002; Husing et Gomes Pereira, 1998; Populus et al, 2003). La première est très utile pour le suivi des travaux de défense côtière, et la seconde est plus utilisée pour le suivi des littoraux des grandes extensions, avec une exactitude acceptable. Une autre technique utilisée est la photogrammétrie aérienne (Baily et al, 2003; Banchini et al, 1999; Casella et al, 2001; Henry et al, 2002; Judge et Overton, 2001; Livingstone et al, 1998; Rovelli et al, 2002; Tao et Hu, 2001).

Dans un suivi morphologique de la côte il est particulièrement important d'étudier l'évolution de la ligne de rivage dans sa définition correcte (Douglas et Crowell, 2000; Graham et al, 2003 ; Honeycutt et Krantz, 2003; Langley et al, 2003; Larson et al, 2003; Leatherman, 2003; Parker, 2003; Ruggiero et al, 2003; Southgate et al, 2003; Stauble, 2003; Zuzek et al, 2003; De Vriend, 2003 ; Byrnes et al, 2003). Les méthodes et les instruments utilisés pour le suivi de la ligne de rivage peuvent varier beaucoup selon son extension. En général, on utilise des techniques de photogrammétrie aérienne (Fletcher et al, 2003; Lestak et al, 2003), aussi avec des restitutions digitales de photos ayant des caractéristiques métriques pas optimales (Smith et Atkinson, 2001), avec des suivis GPS (Buckley et al, 2002). Nous pouvons avoir des intégrations avec des méthodes topographiques classiques, à travers l'utilisation de Stations Totales, éventuellement motorisées et ayant des systèmes d'enregistrement automatique des données. La correction différentielle des données reçues d'un système GPS de navigation (seulement code), peut donner des résultats suffisamment précis avec un coût et niveau de productivité intéressants (Krueger, 2006). Pour le suivi de la ligne de rivage, en plus des suivis GPS-DGPS, techniques photogrammetriques et caméras fixes, le lancement des satellites avec senseurs de haute résolution IKONOS et Quickbird a ouvert de nouvelles perspectives pour l'utilisation des images satellites à haute résolution (Lupino et al, 2005; Caprioli et al, 2003; Cina et al, 2004; Fiani et al, 2000; Fletcher et al, 2003; Volpe et Rossi, 2003; Capra et al, 2003; Marsella et Volpe, 2002; Kaichang et al, 2003; Ustun et al, 2003).

Pour le suivi topographique des fonds marins on utilise des *ecosounders* toujours plus évolués pour mesurer la profondeur comme le *Multibeam*. La position est donnée par des instrumentations satellitaires qui varient selon l'exactitude requise (Gibeaut et al, 1998; Piccin et Coren, 2002; Reson, 2003; Matsumoto et al, 2001; US Army Corps of Engineers, 2002; Ueno et al, 2000). Comme expérimentation, on a essayé d'utiliser des images satellites (Giannetto et al, 2003). En plus, une version du *laser scanner* (LIDAR) permet aussi de suivre les fonds moins profonds en conditions de basse turbidité de l'eau (White et Wang, 2003; Brock et al, 2002; Irish et Lillycrop, 1999; Guenther et al, 2000 ; Estep et al, 1994 ; Optech Inc, 2004; Wozencraft 2002; Wozencraft et Lillycrop, 2003 ; Wozencraft et Millar, 2005 ; Lillycrop et al, 2002).

La méthode GPS (*Global Positioning System*) est une technique amplement utilisée dans les suivis côtiers, soit de façon directe, soit pour la navigation comme support à d'autres

systèmes. Les techniques traditionnelles de topographie sont de plus en plus abandonnées. Il est clair que un réseau de points de contrôle des côtes doit être pensé pour les suivis avec instrumentalisation satellitaire, et donc ajoutant plus de détails (Todaro, 2002 ; CNIPA, 2006) à un réseau GPS national ou régional, considérant également les innovations constantes des techniques de *surveys*. Ce réseau doit considérer les techniques actuelles de levé et des instrumentations disponibles, mais aussi des tendances futures parce que la technologie est en train de beaucoup avancer. On pourrait penser à des ultérieurs réseaux de support au suivi côtier dans le domaine de la calibration des instruments hydrographiques comme par exemple des points de contrôle positionnés sur les fonds marins pour arriver aux standards d'exactitude prévus dans le levé des fonds (IHO, 1998, 2005).

Dans la littérature nationale et internationale nous trouvons peu de références spécifiques sur les réseaux de points de contrôle destinés au suivi des littoraux (Fiani et al, 2002; Krueger, 2006). Le thème le plus général de suivi topographique et morphologique des littoraux a été affronté par plusieurs auteurs (Mitasova et al, 2003, 2004; Bradbury et al, 2001, 2002; Gorman et al, 1998; Hanson et al, 2003; Abbott, 2001). Le projet d'un réseau côtier de points de contrôle peu être comparé à un réseau de détail pour des opérations de suivi plus génériques, dans ce cas-là, la littérature offre plusieurs points de réflexion (Bitelli et Uguendoli, 1996; Franco et al, 2001). Des ultérieurs typologies de réseau ont été utilisés dans des études sur les variations du niveau de la mer (Baker et al, 1997, Bevis et al, 2002; Tronvig, 2003; Hess, 2003; Di Lieto et al, 2002). Un autre aspect à considérer est celui du système de référence à adopter, aussi pour les pays où il n'y a pas de réseau national ou régional d'où dériver la référence côtière détaillée (Barzaghi et al, 2002; Di Girolamo, 2003; Donatelli et al, 2002; Maseroli et Nicolodi, 2002; Baiocchi et al, 2000).

L'exactitude selon les objectifs prévus

Dans le projet d'un réseau de référence, on doit considérer celles qui seront les techniques de levé à utiliser pendant le monitoring et des exactitudes requises. Dans le domaine côtier, la représentation cartographique des paramètres qui décrivent les variations morphologiques peut osciller entre 1:1.000 et 1:5.000, mais il est requis, aussi pour des raisons techniques et opératives, une exactitude planimétrique de la donnée digitale de 10-50 cm et une altimétrique d'au moins 10 cm, pour pouvoir estimer les variations volumétriques. Considérant l'exigence relativement modeste de l'exactitude des levés des plages, émergées et immergées, avec l'exception de la zone dunaire, une erreur en cote d'environ 10 cm, est une limite difficilement

obtenue, même si on détermine des déformations significatives ou des estimations non exactes des volumes de sédiments des plages pour des zones de superficie très ample. Une exactitude avec cet ordre de grandeur aux cotes, permet d'identifier des variations morphologiques autour des travaux de défense, qui en général résultent d'un ordre de grandeur supérieur (Douglas et Crowell, 2000). Reste le problème, qu'on ne peut pas toujours résoudre, de l'exactitude nécessaire pour les estimations précises des bilans de sédiments dans le littoral (Aminti et Aminti, 1999).

L'utilisation des réseaux de référence est nécessaire aussi à cause de l'exigence de lier entre eux (et avec la cartographie existante) plusieurs levés, où il faut avoir une exactitude élevée sur la position planimétrique sur les cotes des points connus pour l'orientation absolu des levés photogrammétriques ou *laser scan* (point de support). C'est différent dans le cas où l'objectif de ces réseaux soit de vérifier si, dans la zone d'intérêt, il y a des phénomènes de variation de la cote orthométrique dans le temps, liées à des causes géologiques ou hydrologiques (Baker et al, 1997). Dans ce cas-là, les réseaux de lignes de nivellement géométrique et celles de référence peuvent avoir des extensions variables et arriver à plusieurs km de longueur. A cause de cela, pour vérifier dans le temps les cotes de certains points opportunément matérialisés (de contrôle) avec l'exactitude nominale du millimètre, il faudra utiliser les instruments de mesure avec des caractéristiques adéquates pour maintenir une exactitude élevée, quantifiée conventionnellement avec l'erreur moyenne kilométrique qui peut varier entre 0,5 et 2 mm/km.

L'exigence de l'exactitude pour les levés (variance des coordonnées des points déterminés) dépend naturellement de ces objectifs:

- *Pour une utilisation cartographique (levés avec exactitude métrique):* Dans ce cas, l'exactitude dépend surtout de l'échelle de sa représentation, et de l'erreur de graphisme (écriture). En général, l'erreur admise dans le dessin cartographique (et pourtant aussi dans l'interprétation du dessin) peut arriver à 0,2 mm: si on appelle D le dénominateur de l'échelle de la carte, l'erreur admissible pour la connaissance des coordonnées d'un point est donnée par :

$$p = 0,0002 D \text{ [m]}$$

(par exemple: si la carte a un rapport d'échelle de 1:5.000, l'exactitude p sera ± 1 m.)

L'existence de la cartographie numérique, en particulier à grande échelle, tend à augmenter la demande par exactitude, et on peut définir la tolérance sur les coordonnées

d'un point aussi de façon indépendante du rapport graphique de représentation. Dans cette tolérance, on peut donner comme exemple le levé des lignes de rivage, qui est presque toujours seulement planimétrique, et les coordonnées des points sont référées aux systèmes cartographiques d'intérêt national.

- *Pour le projet des structures de défense du littoral (levés avec exactitude décimétrique):* Dans ce cas, l'exactitude dépend aussi de l'échelle de restitution graphique, mais, en adoptant des dénominateurs bas (1:500 ; 1:1.000), on tend à demander une définition plus exacte de la position des points. Le levé est toujours plan-altimétrique, et les coordonnées des points sont presque toujours référées aux systèmes cartographiques d'intérêt national (même se quelquefois on utilise des références locales).
- *Pour le contrôle de l'évolution des littoraux (calcul des volumes des plages) ou pour la réalisation des manufacturés structurels (levés centimétrique):* Dans ce cas, les levés vont arriver à des exactitudes plus élevées, parce que l'évolution temporelle des plages, suivie anche à travers des mesures répétées dans le temps (Bradbury et al, 2001,2002), doivent être déterminées avec une exactitude proportionnelle à l'extension de la zone en objet. Il est évident que l'erreur dans le calcul de volume des plages, soit directement proportionnelle à l'extension de la zone surveillée.

Le projet d'un réseau de référence (Points de Contrôle)

En Italie, le réseau primaire national, le IGM95 (Surace, 1995 ; Vespe et al, 2000) doit constituer la référence pour projeter et réaliser un réseau côtier de détail. Le réseau de détail (CNIPA, 2006) aura la densité et l'emplacement définis selon la finalité des travaux. Les cotes n'auront pas nécessairement la configuration typique d'un réseau géodétique (connexion et redondance élevée). Pour le cas des cotes, il suffira d'avoir des points de contrôle loin quelques kilomètres, permettant une couverture totale pour le développement d'un levé GPS-RTK (cinématique en temps réel) avec connexion radio modem. Quand il faudra faire des levés topographiques plus traditionnels, comme Station totale, la distance entre les points de contrôle pourra être plus réduite (Mitasova et al, 2003).

Pour ce qui concerne le projet on peut faire référence aux indications, connues, prévues pour les réseaux géodétiques communs, où les aspects principaux sont:

- Le réseau devra être connecté à au moins deux sommets du réseau de référence et être constitué par au moins deux bases indépendantes pour chaque sommet. Les sommets du réseau devront être connectés par au moins deux bases avec deux points de référence du réseau national, même n'ayant pas de configuration de réseau géodétique.
- Tous les points seront matérialisés à travers des clous appropriés, faits avec du matériel non périssable, dans des endroits d'accès facile, en général sur des manufactures qui puissent maintenir une stabilité adéquate dans le temps. Il faudra vérifier l'absence de perturbations électromagnétiques, et d'obstacles qui empêchent la réception des signaux satellitaires.
- Pour chaque sommet il faudra élaborer une monographie complète qui puisse permettre la reconnaissance du point.
- La détermination du réseau devra être faite selon polygonales d'exactitude ou avec des mesures GPS selon la méthodologie statistique différentielle.
- Toutes les sessions de mesure doivent être faites avec des récepteurs GPS à double fréquence (L1/L2) selon la modalité et les spécifications de mesure, et un positionnement typique des levés de réseaux géodétiques.
- Les cotes sur le niveau moyen de la mer des points de contrôle doivent être dérivées à travers des connexions au réseau de nivellement géométrique de haute exactitude nationale, et aussi dans certains cas à travers un nivellement GPS. En Italie, la connexion altimétrique à des points de contrôle IGM est encore nécessaire et doit être faite avec une exactitude acceptable : ce qui n'empêche pas le bon succès des levés par rapport aux objectifs, car il a été projeté. Si il est nécessaire d'avoir des exactitudes avec un ordre de grandeur centimétrique (Pellegrinelli et al, 2003), on peut utiliser, jusqu'à une distance de quelques kilomètres, les nivellements GPS, avec quelque précaution. S'il faut suivre des connexions avec une exactitude meilleure, ou si on ne peut pas utiliser des récepteurs géodétiques GPS, il faudra suivre des opérations de nivellement géométrique d'exactitude adéquate, ce qui est plus long et plus coûteux, mais donne des résultats plus précis, du moins pour des distances jusqu'à 1 km.

Il faut remarquer que, si le réseau italien IGM95, du moins pour les applications cartographiques, a une cohérence interne acceptable (Biagi et al, 2005), celle altimétrique, qui aurait besoin d'une exactitude absolue plus importante, donne des indications peu actualisées (le niveau moyen de la mer est plus haut même quand on prend de vieilles déterminations qui ont plus de 60 ans) et quelquefois peu cohérents, parce que les phénomènes d'eustatisme et

subsidence peuvent avoir altéré la différence de niveau entre les différents points de contrôle, et les cotes absolues liées à eux. On recommande la référence des réseaux et des points de contrôle qui le matérialisent sur le terrain aux sommets des réseaux géodétiques, parce que ces points résultent matérialisés, monographés et archivés avec l'attention d'un organisme public, ce qui garantit la permanence dans le temps, et permet la connexion entre des levés effectués par plusieurs opérateurs également dans des périodes distantes.

Les connexions planimétriques sont presque toujours faites avec des instruments GPS : la matérialisation anti-économique des réseaux de points de contrôle réciproquement visibles (U.S. Army, 2006) et distants de quelques dizaines de mètres, ne sont plus nécessaires et sont remplacés par des réseaux de points choisis de façon à permettre la formation d'un réseau assez régulier, avec des cotés de l'ordre de 3-6 km (Fiani et al, 2003).

Plus récemment (Biagi et al, 2005) les réseaux ont été beaucoup réduits en quantité de points parce que l'on pense à leur substitution avec des « stations de référence visuelle » (VRS ou MRS) basées sur des connexions télématiques avec des réseaux GNSS permanents, connectés entre eux, et avec la capacité de donner – via modem téléphonique – une correction différentielle aux récepteurs mobiles (*rover*) dans un temps *circa* réel avec une productivité élevée (*time to fix*: initialisation redite pour RTK) et d'excellente qualité (Franco et al, 2001, Pugliano et al, 2003).

Les régions italiennes et plusieurs pays européens ont déjà acquis ou sont en train de développer cette technologie et la prochaine réalisation du projet européen Galileo donnera un élan ultérieur à cette réalité, qui permet le positionnement géodétique (avec une exactitude approximative d'ordre centimétrique) en temps réel (Biagi et al, 2005).

Même dans les techniques de levé qui sont « directes » d'un aéro-mobile, comme la photogrammétrie « industrielle » et le *laser scan* (Brock et al, 2002; Lohani, 2001), qui aujourd'hui sont utilisées aussi pour les levés bathymétriques (Maso, 2002; Milli et Surace, 2006; Irish et Lillycrop, 1999), on pourra utiliser des réseaux de stations permanentes pour avoir des résultats de meilleur qualité à des coûts réduits. En éliminant les stations *master*, on pourra aussi redire les points à terre – GCP.

Même pour les levés des points de contrôle pour les levés par images (Smith et Atkinson, 2001), télédéteectées (*Remote Sensing*) ou par photographies digitales obtenues avec des instruments divers (Buckley et al, 2002), qui permettent de suivre aussi des levés bathymétriques (Giannetto et al, 2003), on peut obtenir des résultats satisfaisants avec l'utilisation de méthodologies basées sur des récepteurs satellitaires. Dans ce cas, la tendance d'élargissement de l'utilisation de réseaux de stations permanentes GNSS permet de supposer une confirmation à l'indication de réseaux de points fixés qui soient moins nombreux.

En général, on peut dire que l'exactitude requise par un réseau de points de contrôle utiles au monitoring de la ligne de rivage doit être de ± 3 cm pour les coordonnées planimétriques et ± 5 cm pour celle altimétrique.

Pour ce qui concerne le système de coordonnées, le calcul devra être fait avec des logiciels appropriés et pour la compensation de la polygonale avec des sommets qui coïncident avec des points qui appartiennent au réseau national.

Les coordonnées des points de contrôle seront transformées dans un système géodétique national. Sauf quand la cote des sommets a été obtenue à travers des points de contrôle de nivellement du réseau altimétrique de référence, la conversion des cotes ellipsoïdales, déterminées avec la méthodologie GPS, en cotes orthométriques doit être effectuée avec l'aide du modèle de géoïde gravimétrique de la zone.

Connexion des Points de Contrôle aux réseaux géodétiques

En ce qui concerne la situation actuelle des réseaux géodétiques utilisés pour la définition, *datum* et ellipsoïdes relatifs de référence, le *Datum* Géodétique est un système de référence qui permet d'exprimer en termes mathématiques la position de points de la surface terrestre et représente les paramètres d'identification d'un ellipsoïde avec des références spatiales précises.

Réseaux géodétiques utilisés dans les levés (Biagi et al, 2005):

- GPS international (Ray et al, 2004): pour la géodynamique International GNSS Service (IGS), *datum* IGB00 e ITRS (ayant une définition dynamique), ITRFyy (par yy on indique les années quand les déterminations statiques ont été effectuées);

- GPS européen (Adam et al, 2000; Bouscher et Altamini, 2001): réseau European Permanent Network (EPN) soigné par European REference Frame (EUREF) pour les applications cartographiques, *datum* ETRS89 (ITRF89 – 1989.0) ou ETRFyy (obtenue avec une roto-translation à 6 paramètres de ITRFYyy);
- GPS italien (Surace, 1995) réseau IGM95: soigné par IGMI, *datum* coïncident (pour l'orientation absolu des points de contrôle dans le système cartographique cartésien) avec ETRF89, ellipsoïde WGS84;
- Réseau altimétrique fondamental IGMI : connecté avec des lignes de nivellement au marégraphe fondamental de Genova et à d'autres situés surtout dans les îles majeures. C'est un réseau statique, qui n'a pas besoin de déformations de la croûte et des variations du niveau moyen de la mer, qui est dans une phase d'élévation, avec une moyenne de *environ* 1 mm/an.

Représentations cartographiques utilisées pour les levés en Italie

- Gauss-Boaga: surtout pour la Cartographie Tecnica Regionale (CTR), *datum* Roma40, ellipsoïde de Hayford;
- UTM: pour la cartographie nationale, *datum* ED50, ellipsoïde de Hayford;
- UTMW: récemment utilisé par le IGMI, *datum* WGS84, ellipsoïde ETRF89.

Même si il n'y a pas de système destiné principalement à la recherche scientifique, la situation est complexe et rendue critique par l'absence d'une commission géodétique qui donne une orientation univoque. Actuellement, l'orientation de la communauté scientifique internationale est celui d'orienter les utilisateurs vers la choix du système de référence et représentation plus adéquat à l'instrumentation de mesure, afin de ne pas avoir d'influences négatives sur l'exactitude des résultats, sauf passer, si le client le demande, les coordonnées des points relevés sur le système cartographique conventionnel à travers une transformation adéquate. Par exemple, un levé basé sur des techniques GPS devrait être toujours référencé au système WGS84 (Fiani et al, 2003) et représenté avec cartographie UTMW, mais un levé topographique pourra être référencé à un système local (Eulerian) et ensuite transféré en coordonnées cartographiques en utilisant deux points doubles ou plus qui permettent de déterminer les 3-4 paramètres pour la transformation horizontale, et la translation verticale pour la transformation des différences de niveaux en cotes orthométriques.

Référence des levés aux plusieurs systèmes et surfaces de représentation

Les levés du littoral sont représentés selon les conventions de la cartographie et souvent dans le monitoring, comme par exemple pour les variations de la ligne de rivage, on utilise des représentations faites il y a plusieurs années. On trouve le problème d'uniformiser plusieurs cartographies. Celles-ci sont souvent référencées à plusieurs *datums*, comme par exemple Bessel-Genova Observatoire et Hayford-Roma40 ou ED50, ou même qui utilisent des représentations cartographiques différentes, Mercatore pour les cartes nautiques et bathymétriques, UTM Gauss-Boaga ou même Cassini-Soldner.

Les instruments qui utilisent des données de satellites (GPS) donnent les résultats « gros » dans un de leur *datum*. La solution générale de ces problèmes est quelquefois assez complexe, et, si une exactitude élevée est requise, dans l'ordre centimétrique, il n'y a pas d'alternative aux approches rigoureuses du problème (Adam et al, 2000; Bouscher et al, 2001) qui sont, dans le cas le plus simple, les transformations à 6 ou 7 paramètres pour les changements de *datum* (Molodensky) appliqués aux coordonnées cartésiennes géocentriques des points élevés.

D'autre part, les levés littoraux n'ont pas besoin normalement d'une exactitude particulière, surtout pour ce qui concerne l'orientation « absolue » du levé dans le réseau d'appartenance. Pour cette raison, les solutions simplifiées, habituelles à roto-translations avec (ou sans) variation d'échelle (transformations 4-3 paramètres), peuvent donner des résultats amplement satisfaisants (Piccin et al, 2002; Fiani et al, 2003) en particulier concernant le problème planimétrique.

En général, les récepteurs modernes GPS sont capables de donner les résultats finaux même dans un *datum* différent de celui dans lequel les mesures sont effectuées, et expriment la position des points obtenus en coordonnées horizontales référencées à un système cartographique pré-choisi, selon la détermination préliminaire des paramètres nécessaires et/ou points « doubles ». Cela peut être utile du point de vue de la productivité, mais il y a quelques doutes sur la difficulté d'avoir un contrôle critique de la procédure et en particulier sur l'évaluation de l'exactitude effectivement obtenue avec la transformation. Une petite erreur dans la définition des paramètres, opération qui n'est pas toujours immédiate, peut conduire à des résultats qui sont intolérables, même en quantité élevée.

Pour ce qui concerne le levé bathymétrique, surtout pour le levé des littoraux, il faut faire attention (Parker, 2003) à l'ambiguïté des résultats qui peuvent être référencés à trois origines différentes:

- Au géoïde : cotes orthométriques référencées au niveau moyen de la mer, mesuré à une certaine date, en général au marégraphe de Genova 1942 (ou 1954), comme on le voit dans les appels d'offres sur les côtes italiennes;
- Au ellipsoïde WGS84 (selon paragraphe antérieur): pour les mesures GPS « grosses »;
- A la cote du niveau de réduction des *ecosounders*, étant prise du niveau moyen des marées basses de syzygie (MLWS ou LRS – NOAA 2000).

Dans le cas où l'on veuille confronter plusieurs levés, il est évident qu'il faut contrôler préliminairement que ceux-ci soient référencés à la même origine. Si cela n'est pas le cas, il faut effectuer les corrections nécessaires. Dans le cas plus simple, où l'on porte les cotes orthométriques à un géoïde déterminé dans une date différente ou au MLWS, il faut additionner une incrémentation (algébrique) aux cotes à déterminer sur la base d'au moins, un point « double » ou d'information précise sur la définition de la différence de cote entre ces références ; quand les mesures sont référencées, une au géoïde, et l'autre à l'ellipsoïde, il faut tenir compte du non-parallélisme et des différences de forme entre les deux surfaces (ondulations géodiques) ; et ceci est d'autant plus considérable quand la zone est plus ample.

En Italie, ce problème peut être résolu facilement et avec une exactitude de l'ordre centimétrique (Pellegrinelli et al, 2003) en utilisant le logiciel VERTO distribué par IGMI, est développé en collaboration avec le Politecnico di Milano. Dans les autres pays, où il n'y a pas de produits analogues, il faut suivre le levé, GPS et altimétrique, sur un nombre de points doubles de façon à permettre de particulariser opportunément l'ondulation du géoïde (Fiani et al, 2003).

5. ANALYSE DE LA VARIABILITE INTRINSEQUE DES PLAGES

*** Dip.Sc.Terra/Univ. degli Studi di Firenze**

Pour que la conception des plans côtiers soient appropriés du point de vue de l'environnement et de l'économie, les ingénieurs côtiers et administrateurs doivent prévoir le comportement morphodynamique à court et a long terme, dans une échelle temporelle de journées à des dizaines d'années, et pour des extensions de côtes de centaines de mètres à des dizaines de kilomètres. Les stratégies de développement doivent considérer ces échelles, parce que la réponse des unités/cellules physiographiques qui composent le système côtier aux forçants, dépend des rapports entre ces forçants à différentes échelles.

Durant les 60 dernières années, on a produit un large volume de littérature sur les processus côtiers sur la ligne de rivage. Un grand nombre de modèles empiriques, analytiques et numériques ont été développés pour mieux comprendre le mécanisme de l'énergie des vagues dans le *nearshore* et la réponse de la plage. Le but de ces études est d'obtenir un insight vers le mécanisme du système et prévoir la réponse (court-long terme) du système à plusieurs conditions de l'environnement.

Les variables importantes qui ont été identifiées ont été vérifiées par plusieurs scientifiques dans des cas d'études. Cependant, l'application de la théorie aux applications réelles ne peut pas être faite sans une connaissance a priori du système côtier concerné. On voit que les scientifiques prennent des données pour des zones très amples et pour une longue période de temps, pour pouvoir déterminer, avec criticisme, des tendances régionales et locales. L'identification des cellules littorales et de la dynamique interne est la base pour le développement d'une stratégie de gestion côtière intégrée. Pour évaluer la vraie nature de la variabilité locale et régionale, le scientifique côtier a un devoir complexe, ce qui évolue vers un art de performance et d'interprétation, plutôt que vers une science exacte.

D'autre part, jusqu'à présent, il n'y a pas de modèle universel qui prévoit le comportement des systèmes côtiers dans une large échelle temporelle avec un haut degré de confiance. Il y a plusieurs raisons pour cela, comme:

- *Problèmes d'échelle*: Sherman (1995) déclare que « le problème de l'échelle est une barrière substantive pour la prévision, basée sur les processus du développement des morphologies pendant des années jusqu'à environ une dizaine d'années. » Cet intervalle de temps a un grand intérêt pour les aménageurs côtiers, mais c'est celui le plus difficile à quantifier ou paramétrer. La littérature côtière est pleine d'exemples d'études de cas qui prévoient avec exactitude les forçants locaux et la réponse associée de la plage, mais on sait déjà qu'il est difficile de généraliser les résultats à des situations arbitraires, en particulier pour des échelles de temps plus longues (dizaines d'années) (Stive et al, 2002). De Vriend (1991) fait une description des défis fondamentaux dans la formulation des modèles à des échelles beaucoup plus larges que celles des processus de base, et le raisonnement quantitatif, orienté vers les processus, est plus adéquat dans ces cas-là. La morphodynamique côtière à longue échelle de temps (dizaines d'années à milliers d'années) et d'espace (dizaines à centaines de kilomètres) est devenue un champ de recherche bien établi, nommé « comportement côtier de grande échelle » (*Large-Scale Coastal Behaviour*). Des études sur des processus plus petits continuent à produire des résultats utiles du point de vue du diagnostic. Ce type d'études de réduction continue à démolir les rapports de feed-back entre vagues, courants, et transport de sédiment, et la réponse de la topographie du fond marin.
- *Estimations du transport de sédiment*: La distribution spatiale du transport *longshore* de sédiment est une quantité qui est rarement mesurée et d'une façon insuffisante (Haas et Hanes, 2004). Cela a des conséquences pour la validation des modèles numériques et de prévisions, en particulier pour ce qui concerne le projet des structures d'ingénierie où des rechargements artificiels. Il est implicite que dans tous les modèles leur performance dérive de la représentation/modélisation exacte des composants individuels du modèle. De même façon, les formules actuelles pour les taux de transport dépendent de la qualité des données sur lesquelles elles sont basées. Ces facteurs font que notre capacité de développer des modèles adéquats dépend de la paramétrisation correcte des composants, ce qui est une grande préoccupation des scientifiques. En plus, la plupart des modèles de prévision du transport *longshore* de sédiment vient des travaux sur les plages sableuses, méso- et macro-tidales (Morfett, 1990; Komar, 1996) et le degré dans lequel il peuvent être appliqués à d'autres environnements peut être problématique.

- Qualité des données*: la nécessité d’avoir des données de haute qualité sur l’évolution de la côte, d’une échelle annuelle à une échelle de dizaine d’années est significative, et l’actuelle absence de données est un grand obstacle au raffinement des modèles existants et à la validation des paramètres d’échelle. Pour mieux comprendre, les scientifiques ont utilisé de nouvelles techniques mathématiques et statistiques mais souvent ces techniques ont des exigences strictes concernant les données. Pour les modèles mathématiques plus avancés, l’exigence des données de qualité est une réalité nécessaire. Pour évaluer d’une façon critique la variabilité de la ligne de rivage, on a besoin d’une grande base de données. Par exemple, la photogrammétrie aérienne peut donner des informations sur le type de ligne de rivage, orientation, longueur, et largeur. Les levés de plage déterminent les dimensions des grains, les élévations de *wave run-up*, hauteur des *foredunes*, élévations des *wave cut platforms*, et la variation du profil *cross-shore*. La susceptibilité des différentes régions côtières à l’érosion ou à un autre phénomène dangereux, est déterminée par les variables de la ligne de rivage, dérivées d’une cartographie extensive. Pourtant, une synthèse régionale de prévision peut être utilisée pour identifier la susceptibilité de la ligne de rivage à : (i) érosion (ii) dangers chroniques et catastrophiques (iii) impacts de l’interférence humaine (iv) pollution locale et régionale. Cette base de données peut être intégrée avec d’autres bases de données faites sur la même base spatiale, sur la végétation et des habitats, des intérêts des *stakeholders*, comme tourisme et des limites administratives et de gestion.
- Changements dans le niveau de la mer*: pour simplifier la nature du modèle de processus-réponse de la variation côtière (mesuré dans les échelles temporelles et spatiales courtes) comme étant une fonction des changements du niveau de la mer on est obligé d’assumer des rapports linéaires, et donner des cadres de référence de base comme les profils de plage bi-dimensionnelle (Devoy, 1987). Quand les variations des caractéristiques du profil sont intégrées au fil du temps, elles peuvent montrer la nature des changements côtiers de macro échelle. La validité de ces changements dans l’échelle de temps géologique est problématique. Même si les études sur le niveau de la mer n’ont pas été considérées dans les modèles côtiers de variabilité de la plage, l’importance de la montée du niveau de la mer dans toutes les études côtières est considérable. Les conséquences de la montée du niveau de la mer selon les prévisions actuelles, à des taux accélérés, doivent être exagérés dans les modèles à grande échelle.

- *Les côtes altérées par l'homme*: l'extension globale de l'érosion côtière a causé le développement d'un grand nombre de projets de prévention et protection dans les zones côtières. On a eu une grande modification des systèmes côtiers naturels, avec la prolifération des « côtes altérées par l'homme ». Historiquement, on voit des différents schémas de protection côtière – de la construction des lagunes pendant la période des étrusques pour protéger contre les maladies (Innocenti et Pranzini, 1993), aux projets plus récents pour protéger des ressources agricoles et industrielles (Kraus, 1988). La conscience plus développée au niveau international sur l'élévation du niveau de la mer et l'impact économique et social de fort impact par les événements de basse fréquence et de haute magnitude, comme des *storm surges*, ont causé le développement de plusieurs techniques de mitigation – des méthodes intuitives locales (comme sacs de sable) aux programmes d'ingénierie et scientifiques à grande échelle (comme brise-lames, épis, digues).
- *Impacts principaux sur la côte qui sont causés par l'homme* : les processus naturels qui affectent le *nearshore* dans les côtes altérées par l'homme sont étés modifiés jusqu'à un niveau où les modèles scientifiques existantes ne peuvent plus être appliqués avec un degré de confiance. Les échanges entre littoral et surface ne peuvent plus être examinés avec la technique traditionnelle du « black box », mais chaque système doit être examiné séparément. Il y a la possibilité d'examiner les modèles de processus-réponse du système côtier pour plusieurs schémas de protection côtière, sous des conditions environnementales très différentes, mais la nécessité de suivre les impacts locaux et régionaux de ces structures est toujours urgente. La connaissance sur le terrain à une grande valeur pour planifier des projets futurs, et, de plus, pour valider ou non, les capacités de prédiction des modèles de l'ingénierie qui sont utilisés dans le projet et la planification des structures.

Est-ce que les processus locaux suivent des échelles de modèles régionaux ou locaux ?

On accepte que les systèmes côtiers soient forcés par des processus à grande échelle (dizaines d'années) et que les modèles basés sur des processus plus courts ne servent pas à la prédiction de l'évolution côtière à long terme (Hanson et al, 1999). Par exemple, plusieurs modèles bidimensionnels et tridimensionnels ont été développés pour analyser le comportement côtier dans des échelles de temps et de longueur qui intéressent les ingénieurs et aménageurs côtiers (10^0 - 10^2 ans; dizaines de kilomètres). Ces modèles sont basés sur des processus hydrodynamiques qui sont bien connus, mais leur complexité ne permet pas qu'ils soient

appliqués à des échelles géologiques de temps ($> 10^3$ ans) (Storms et al, 2002). En plus, au fur et à mesure que l'échelle temporelle et spatiale de la recherche augmente, de nouveaux processus peuvent émerger pour dominer la variabilité côtière. Les processus d'échelle plus larges peuvent être expliqués par les dynamiques des processus d'échelle plus fine, mais ils peuvent être très différents entre eux. En plus, au problème d'échelle qui est commun dans toutes les sciences naturelles (comme biologie, écologie, océanologie, météorologie), la non linéarité du système côtier est aussi un facteur qui empêche la capacité de prédiction des modèles. Au fur et à mesure que les échelles de temps et d'espace changent, l'importance relative des différents processus change aussi (Imeson et Lavee, 1998). Par conséquent, des extrapolations simples qui assument des rapports linéaires d'échelle ne permettront pas d'arriver à de bonnes prédictions quand il y a de l'hétérogénéité spatiale, et aussi des interactions non linéaires entre les forçants et la réponse côtière associée. Ces non linéarités sont absorbées par les calculs du modèle et cela produit une faible performance du modèle.

La plupart des travaux expérimentaux est faite à de petites échelles, à cause des restrictions scientifiques, logistiques et financières. Malheureusement, les aménageurs côtiers (et la société) ont besoin de réponses sur la dynamique côtière et océanique qui se vérifie à des échelles plus grandes que celles que l'on peut étudier à un niveau expérimental. La vérification des méthodes empiriques et théoriques pour augmenter l'échelle des résultats des études sur des processus à petite échelle, en arrivant aux prédictions à échelles plus grandes, est un composant important pour la discipline (Underwood et al, 2005). A ce propos, une considération importante est la croissante hétérogénéité spatiale qui suit l'augmentation des échelles spatiales. Une validation possible se réfère à continuer à examiner les effets des changements des niveaux de variance et déterminer l'importance des différentes sources d'hétérogénéité dans plusieurs systèmes.

Les modèles

Actuellement, il n'y a pas de modèles universels pour analyser et prévoir le comportement côtier. Le consensus dans la littérature scientifique reconnaît que la variabilité côtière opère dans un *range* d'échelles temporelle et spatiales. Comme Capobianco et al (1998) ont discuté dans une perspective pour un modèle d'évaluation intégrée, « la plupart des problèmes côtiers concernant de grandes échelles se réfèrent à des systèmes complexes comme les estuaires, les deltas et les *tidal inlets* ». La quantité de sédiment qui se déplace dans ces systèmes est en général élevée si l'on compare avec les sédiments des systèmes voisins ». Une variété de

modèles basés sur des processus peut être appliquée à ces systèmes, en produisant des résultats utiles d'un point de vue du diagnostic. Cependant, leur valeur de prédiction reste limitée, soit parce qu'ils décrivent seulement un champ de transport résiduel et ignorent les interactions morphodynamiques, ou parce qu'ils incluent seulement certains processus physiques importants. De cette façon, les modèles qui travaillent au niveau du processus ne peuvent pas considérer les échelles temporelles et spatiales plus grandes qui sont associées à l'évolution d'un système naturel.

Stive et al (2002) suggèrent que la quantification de la mobilité de la plage augmente avec l'échelle des études. Par exemple, dans les plages de l'Australie, la position de la ligne de rivage a varié de 5 - 14 m dans une série temporelle de 1 – 5 ans ; en Hollande, la même variation a été mesurée pour approximativement 20 m pour une série temporelle de presque 30 ans. La nature de la variabilité temporelle a été caractérisée en utilisant des périodicités qui sont irrégulières à quasi-sinusoïdales (Stive et al 2002). Inhérente à l'analyse de la variation de la ligne de rivage est le facteur forçant pour une plage ou cellule littorale particulières. La question d'échelle est une approche fondamentale pour déterminer le comportement réel d'une plage. La littérature côtière a identifié un *range* ample d'échelles de temps et d'espace pour les causes naturelles et celles induites par les activités humaines qui sont responsables d'avoir forcé la variation de la ligne de rivage. Le degré sur lequel chacun de ces facteurs peut être bien déterminé dépend beaucoup de la qualité des données disponibles pour le scientifique côtier. En plus, les changements uniformes doivent être acceptés dans plusieurs cas à cause de l'absence de données – et cela introduit une grande incertitude dans beaucoup des cas. Pour évaluer les fluctuations à petite échelle qui opèrent dans le long terme spatial et temporel, il est essentiel que les scientifiques côtiers et des ingénieurs incorporent ces fluctuations dans les plans à long terme. Etablir des limites critiques pour la variabilité à court, moyen et longs termes est encore un problème important pour les scientifiques côtiers.

Petite échelle

Le modèle du profil de la plage

On peut classer les études de morphologie côtière à trois niveaux: macro-échelle, méso-échelle et micro-échelle. Les processus à micro-échelle (comme turbulence des fluides, et processus de chaque grain/vague) ne sont pas considérés dans cette revue. Dans la macro-échelle et la méso-échelle, les feedbacks, positifs et négatifs entre des niveaux de la mer en changement, le budget des sédiments, le champ d'onde incident et la topographie de l'offshore,

doivent être établis. Souvent, on étudie les systèmes côtiers sur ces échelles généralisées, au lieu de reconnaître les morphologies côtières comme des entités dynamiques et par conséquent, en démontrant à micro-échelle une réponse différentielle aux niveaux de la mer (qui monte, descend ou reste immobile). Pourtant, l'étude empirique des caractéristiques à micro-échelle, où le profil de la plage est le cadre principal de référence, est une composante essentielle des études côtières détaillées.

Sherman (1991) réfère que le profil de la plage est une réponse morphologique fondamentale aux processus du *nearshore*, qui permet de déduire les caractéristiques des sédiments de la plage, le régime local de l'énergie des vagues et la géométrie du *nearshore*. Le profil de la plage, perpendiculaire, bidimensionnel, est choisi comme le cadre de référence de base pour simplifier la nature du modèle processus-réponse de variabilité côtière comme fonction du changement du niveau de la mer (Devoy, 1987). Des variations de caractéristiques du profil, lorsqu'elles sont intégrées avec le temps, peuvent montrer la nature des changements côtiers à macro-échelle. Les profils de la plage ont été beaucoup utilisés pour obtenir l'information sur la variabilité de la plage par l'action des vagues de tempête (Morton et al., 1995; Lee et al., 1995; Lee et Yang, 1999; Costas et al, 2005), modèles de migration des barres (Hallermeier, 1981 en Komar; Lippmann et al., 1993; Ruessink et Kroon, 1994; Larson et al, 2003), cycles de *spring-tide* (Eliot et Clarke, 1988); interaction de l'eau du sous-sol (Horn, 2002); processus du *swash zone* (Kobayashi et da Silva, 1987; Nordstrom et Jackson, 1990; Oh et Dean, 1994; Hughes et Turner, 1999); processus de transport de sédiment (Stauble et Cialone, 1996); variations saisonnières du climat des vagues (Shepard, 1950; Inman, 1953; Davis et Fox, 1972; Winant et al, 1975; Aubrey, 1979 et 1983; Birkemeir, 1984; Masselink et Pattiaratchi, 2001) et, à une mesure moins évidente, des variations à long terme, (Thom et Hall, 1991; Short et al, 1995; Short et Masselink, 1999; Dingler et Reiss, 2002; Schwarzer et al, 2003; Short et Trembanis, 2004; Li et al, 2005).

Pour avoir une évaluation exacte de la réponse du profil aux forçants sur la côte, il faut avoir un *dataset* de qualité –comme reporté par le Army Corps of Civil Engineers Field Research Facility à Duck, USA (23 ans); le Coastal Research Station (CRS) à Lubiatowo, Poland (30 ans); Thom et Hall (1991) à Moruya, Australia (16 ans); Short et Trembanis (2004) à Narrabeen Beach, Australia (26 ans); Wijnberg et Terwindt (1995) à Terschelling, Holland (31 ans); et Jansen (1997) en utilisant des données JARKUS obtenues par le Dutch Directorate General of Public Works and Water Management (35 ans). Ces programmes de suivi à long

terme ont permis aux scientifiques d'avoir un bon *insight* sur le comportement de la plage à une échelle plus grande.

D'une part, les variations saisonnières de l'ajustement du profil de la plage sont bien documentées; d'autre part, l'utilisation combinée des observations à long terme et les nouvelles techniques statistiques (voir ci-dessous), ont donné des insights importants sur la réponse côtière. Par exemple, Short et Trembanis (2004) ont identifié et séparé l'échelle et la nature de la variabilité de la plage dans plusieurs échelles (comme par exemple, des cycles saisonniers d'érosion et accrétion (2-3 ans), jusqu'aux processus de rotation des plages, à échelle plus grande). En utilisant des techniques d'analyse de séries temporelles, *Principle Component Analysis* (PCA) et *wavelet analysis*, les auteurs ont pu distinguer les changements mensuels de la position de la ligne de rivage des principaux changements qui étaient saisonniers avec des périodes entre deux et plusieurs années – selon les tendances générales reportées par Thom et Hall (1991) et Trembanis et al (2001) dans la même région. Cette étude est un bon exemple d'identification de la variabilité côtière à long terme et grande échelle en utilisant des techniques et des données de qualité sur le profil de la plage. La disponibilité de bases de données similaires est difficile à trouver à cause des limitations logistiques et fiscales.

Outre à donner des *insights* sur la variabilité de la plage, les *datasets* de qualité donnent aussi une base de données de travail pour tester des nouvelles techniques pour l'analyse du comportement de la plage à long terme. La variabilité complexe du profil de la plage dans le temps et l'espace exige des outils analytiques adéquats. Des travaux récents suggèrent que peut être, les méthodes linéaires traditionnelles ne sont pas adéquates (Li et al, 2005).

Modèles de morphodynamique

Les modèles morphodynamiques sur la zone côtière sont un outil important pour la gestion de la côte. Ils sont opérés sur des échelles qui vont de mois à dizaines d'années, et peuvent donner une information sur comment la morphologie d'une ligne de rivage devrait évoluer en réponse aux forçants d'origine anthropique. Ces modèles ont souvent une faible performance à niveau détaillé, en partie parce que les processus physiques qui causent le changement morphologique se font dans des échelles de temps beaucoup plus courtes que le changement. Les meilleurs modèles (« état de l'art ») sont en train de devenir de plus en plus sophistiqués dans ces tentatives de modeler le transport des sédiments avec exactitude. Cependant, une

alternative ou une solution complémentaire pourrait être l'intégration des modèles avec des observations sur la morphologie, en utilisant des techniques d'assimilation de données.

On peut généralement appliquer deux concepts dans la modélisation de la morphodynamique du *nearshore*, avec ou sans la présence de structures de défense. Le premier concept considère seulement les conséquences finales des mécanismes opérant, et a le but de prévoir les tendances à long terme pour le développement de la plage (Leont'yev, 1999). Cette approche considère seulement le résultat intégré des processus morphodynamiques et n'inclut pas d'analyses détaillées sur les mécanismes qui opèrent. Cette approche forme souvent la base des modèles à « une ligne » (*one-line models*), qui ont le but de prévoir l'évolution de la ligne de rivage sous l'influence des structures (Hanson, 1989; Larson et Kraus, 1989; Szymkiewicz et al, 1998, 2000).

La deuxième approche présume la modélisation de tout l'ensemble des processus élémentaires responsables pour les changements de la topographie de fond dans le *nearshore*. Une zone côtière typique doit comprendre des composants qui décrivent le champ des vagues, les distributions spatiales des courants induites par les vagues, et le transport associé des sédiments, et enfin les changements spatiaux et temporels au niveau du fond (Leont'yev, 1999). Ce type d'approche a été appliqué avec succès dans plusieurs instituts dans le monde, comme: Waterways Experiment Station, Army Corps of Engineers, USA; Delft Hydraulics, Hollande; HR Wallingford; et Danish Hydraulic Institute (Danemark).

Sous des conditions de vagues constantes, toutes les plages approchent un profil d'équilibre où le mouvement (déplacements) net des sédiments est nul. Le concept de profil de plage et de profondeur de fermeture a prouvé son extrême utilité dans la projection des rechargements de plages et la modélisation de l'évolution de la ligne de rivage. Les modèles mathématiques décrivent la réponse côtière aux changements des conditions environnementales (comme, e.g., à la présence de structures de défense, comme épis et brise-lames, qui interrompent le transport *longshore* des sédiments) en utilisant le rapport entre profil d'équilibre et profondeur de fermeture, en s'associant aussi à une équation de transport, comme celle du *Coastal Engineering Research Center* (CERC, 2002). Ces modèles à *une ligne* dépendent fortement de l'hydrodynamique locale pour résoudre les problèmes côtiers spécifiques d'une région (Chadwick, 1989). Les modèles « à une ligne » donnent des informations uniquement sur un

contour de rivage *typique*, assument seulement le transport *longshore* des sédiments et sont limités seulement au développement du profil *cross-shore*.

L'hydrodynamique et le transport des sédiments utilisés par les modèles sont simples, et ne donnent pas d'informations scientifiques importantes nécessaires à la prévision de la morphologie côtière avec une bonne certitude. Certaines études ont amélioré plusieurs aspects de ces modèles, en introduisant, par exemple, des points de *source* et *sink* des sédiments, et en augmentant la stabilité et l'applicabilité des modèles. Selon les ressources disponibles et les limites fiscales, l'étude de l'évolution côtière en réponse aux structures humaines a été bien documentée dans ces deux cadres principaux. Dans tous les cas, l'érosion des côtes adjacentes est vue comme une réponse rapide des systèmes côtiers aux changements de la dynamique côtière, et de la quantité des sédiments littoraux.

5. MODELES NUMERIQUES

* **Dip. Sc. Terra/Univ. degli Studi di Roma « La Sapienza »**

* **IACM/FORTH**

* **ICM**

Le sous-projet OpTIMAL développera et appliquera des modèles numériques pour la description de l'analyse quantitative de l'évolution morphologique et sédimentaire des littoraux, et pour la description hydrodynamique côtière. Trois types de modèles seront développés et/ou appliqués : a) un modèle de profil d'équilibre, qui sera développé et appliqué aux travaux de rechargement artificiel et validé avec des données obtenues par satellite et au terrain; b) un nouveau modèle hydrodynamique qui sera développé pour la description de la propagation des vagues, des déplacements des courants entraînés par les vagues, du transport 3D littoral des matières sédimentaires et de la morphodynamique du fond marin, et qui sera validé avec des études de terrain en Crète c) le Système de Modélisation Côtière, qui a été récemment développé en Espagne, et sera utilisé ici en parallèle avec les travaux de sismique.

A) MODELE MORPHODYNAMIQUE : MODELE DE PROFIL D'EQUILIBRE (P4 : UNIVERSITA DI ROMA « LA SAPIENZA »)

En ce qui concerne l'élaboration d'un modèle de prédiction des effets morphologiques de la reconstruction des littoraux, le rechargement artificiel est une technique de plus en plus utilisée dans la protection ou la reconstruction des plages, aussi bien en cas d'urgence (storm-induced erosion) qu'en présence d'une érosion persistante. En Europe (Hanson et al., 2002), dans les pays qui ont le plus recours à cette technique, on compte 26 zones littorales traitées en France, 36 en Italie, 60 en Allemagne, 30 aux Pays-Bas, 400 en Espagne, 13 au Danemark et 32 au Royaume-Uni.

Les interventions de rechargement dans les pays européens et extra européens

Le rechargement artificiel des plages est une technique qui s'est progressivement diffusée à partir des années 60 au détriment des interventions comprenant des ouvrages rigides. La migration de *l'hard-engineering* à la *soft-engineering approach* a été une conséquence de l'opinion partagée que les ouvrages rigides peuvent causer des effets indésirables, en mitigant

seulement par endroits l'érosion côtière, voire, en la transférant souvent aux littoraux adjacents. La « philosophie » du rechargement se base sur le fait qu'il vaut mieux importer sur les côtes sous-alimentées les sédiments manquants plutôt que d'altérer le système en le contraignant à retenir le peu de sédiments existants. Cette technique d'intervention est le fer de lance de la *soft-engineering approach*, en représentant une méthode habituellement bien acceptée, bien supportée par l'environnement et valable en tant qu'élément de protection ou de reconstruction de la plage, que ce soit en cas d'urgences (*storm-induced erosion*) ou d'érosion persistante. De plus, de sa diffusion dérive la rédaction de nombreux manuels et de livres où sont suggérées des méthodes et des lignes guides. Nous en citerons quelques-uns: le *Manual on Artificial Beach Nourishment* (CUR, 1987), le *Artificial Beach Nourishments* (Van De Graav et al, 1991a), le *Empfehlungen fur Kustenschutzwerke* (EAK, 1993), le *Beach Nourishment and Protection* (NRC, 1995), le *Beach Management Manual* (CIRIA, 1996a,b), le *Beach Nourishments and Shore Parallel Structures* (CUR, 1997), et le *Coastal Engineering Manual* (USACE, 2002 c), e il *Beach Nourishment: Theory and Practice* (Dean, 2002).

Hanson et al (2002) présentent un inventaire des méthodes et des aspects liés aux rechargements en Europe (Evangelista et al, 1991; Ferrante et al, 1992; MAFF, 1993; Lechuga, 1994; Roelse, 1996; Benassai et al, 1997; Dette, 1998; Hamm, 1998; Hamm et al, 1998; Zaggia, 1998; Biegel et Spanhoff, 1999; Cipriani et al, 1999). A la date de cet ouvrage avaient déjà été traitées 26 zones littorales en France, 36 en Italie, 60 en Allemagne, 30 en Hollande, 400 en Espagne, 13 au Danemark et 32 au Royaume-Uni, pour un déversement d'inertes total équivalant à 24 millions (M) de m³/an (correspondant à 27.5 projets/an), une quantité presque égale à celle utilisée aux USA (30 projets/an). Et, notamment, en Italie, la quantité d'inertes totalement déversée s'élève à 15 M m³ et elle devrait atteindre les 20-22 M m³ en considérant les nombreuses interventions effectuées après 2002. Pour expliquer la grosse quantité de matériaux déversés, nous devons signaler les rechargements italiens à Pellestrina et à Cavallino (pour un total de 7.6 M m³), à Ravenna (1.4 M m³), à Ostia Lido (1.4 M m³) et à Bargeggi (2 M m³).

De plus, Hanson et al (2002) indiquent des différences dans les critères adoptés pour la protection des côtes européennes. Les interventions en Espagne, en France, en Italie, au Royaume-Uni (et même aux USA) – contrairement à celles de l'Allemagne, de la Hollande et du Danemark – manquent souvent de programmes à long terme. De plus, même les interventions de rechargement semblent être conçues différemment. Par exemple, la France et

l'Italie appliquent peu les solutions stratégiques même si les études se révèlent assez avancées grâce à l'emploi fréquent de modèles physiques et numériques. En Espagne, au cours des 20 dernières années, la pratique du rechargement est devenue le remède principal contre l'érosion côtière et un monitoring systématique par photos aériennes est effectué et intéresse aussi bien les plages reconstruites que les littoraux à risque (MIMAM, 1998; MOPU, 1988; Munoz-Perez, 2001a). En Hollande, au Danemark, en Allemagne et au Royaume Uni, l'attention est surtout concentrée sur les événements extrêmes (*coastal flooding*) et ceci se traduit par des programmes à long terme et par des actions de monitoring régulières. La Hollande est, notamment, l'un des pays pionniers en matière de techniques adoptées et d'expériences dérivant de la vulnérabilité objective de ses côtes (Beets et al, 1992; Guillén et al, 1999). L'Espagne et la Hollande sont dans tous les cas, par cubage total de matériaux déversés (110 M m³ chacune), les pays qui utilisent le plus la technique du rechargement, avec la différence qu'en Espagne les zones traitées sont beaucoup plus nombreuses (400 contre 30 de la Hollande).

Les différentes approches concernant la protection des littoraux européens sont synthétisées par Capobianco et Stive (1997) en trois comportements dénommés à l'origine: a) *resistance and maintenance*, qui prévoit, grosso modo, le maintien du statu quo à travers des ouvrages rigides entraînant des frais de maintenance nuls (mentalité répandue en France et en Italie); b) *change at the margins*, où l'on s'occupe de traiter les symptômes plus que les causes en amont, ce qui se traduit en pratique par des rechargements dans le cadre de côtes protégées par des ouvrages rigides (comme en Espagne); c) *openness and adaptability*, où l'on essaie avant tout de comprendre les causes de l'érosion et ensuite de concevoir des interventions d'assainissement (comme en Hollande, en Allemagne, au Danemark et au Royaume-Uni). Ces différents comportements démontrent que les pays de l'Europe du Sud devraient adopter les expériences que l'Europe du Nord a accumulées quant à la gestion à long terme de ses côtes, la régularité de ses monitorages et la compréhension des phénomènes naturels. Mais les diversités et les spécificités sont telles que chaque pays doit apprendre quelque chose de l'autre pays; par exemple, les expériences du Royaume-Uni quant à l'utilisation de mélanges de sédiments différents (y compris les graviers) peuvent être exportées ailleurs (Hamm et al, 2002).

Les autres pays de l'Union européenne n'utilisent qu'assez rarement la technique du rechargement. En effet, la Belgique a une extension de côtes assez modeste (seulement 65 km),

dont une moitié est composée de plages et de dunes et l'autre moitié de plages protégées à l'aide d'ouvrages rigides. A partir de 1968 quelques interventions y ont été effectuées sur environ 20 km de littoral en utilisant une quantité de sable totale équivalant à 17,2 M m³ (Kerchaert et al, 1986). La Grèce utilise principalement des ouvrages rigides (tout comme la Suède) et les rechargements, rares et très localisés, ont été effectués avec une quantité insignifiante d'inertes pour un total n'excédant pas les 10.000 m³. L'Irlande enregistre seulement deux interventions significatives, avec une utilisation totale de 235.000 m³ de sable et, dans l'un des deux cas, de sable mixte et de gravier. Le Portugal compte le premier rechargement effectué en Europe (en 1950 à Estoril) auquel se sont succédées 30 interventions dans 12 localités différentes, pour un volume totalement déversé de 6.5 M m³.

Dans les pays extra européens, la pratique du rechargement est répandue au Japon (5 M di m³ annuellement déversés), en Afrique du Sud (5 M di m³/an), en Australie (1 M di m³/an) et aux USA (30 M de m³/an). Les Etats-Unis ont adopté cette technique depuis environ 80 ans et c'est, aujourd'hui, la méthode préférée pour la conservation des côtes, au point que ce pays est leader quant aux expériences acquises et au nombre de projets mis en œuvre (Clayton, 1989; Wiegel, 1994; Basco, 1999; Heather, 2001). Chaque projet, appuyé par le gouvernement fédéral (à travers le *Corps of Engineerings*) ou par chaque état, est attentivement évalué en termes de coûts et de bénéfices (Houston, 1995, 1996; Parsons et Noailly, 2004), avec la tendance à rendre publique la procédure de la recherche et les résultats finaux à travers des rapports techniques (Stauble et Kraus, 1993a; Kana et al, 1997; Bokuniewicz, 1998; Browder et Dean, 2000; Parson et Noailly, 2004). Les Etats-Unis se concentrent beaucoup plus sur l'obtention des résultats que sur la côte en elle-même (NRC, 1995; Hamm et al, 2002). Les modèles physiques et numériques sont très utilisés et ils font l'objet de nombreux ouvrages scientifiques parfois contenant des apports innovants. Il en ressort que les Etats-Unis et la Hollande se distinguent par le nombre de leurs expériences et par la qualité de leurs projets.

Etudes pour la conception de l'intervention

Les ouvrages de rechargement exigent une série de préétudes dont le but est de fournir des considérations et des données utiles pour la rédaction du projet exécutif. Ces études visent à décrire le littoral, à en comprendre la dynamique en cours, à prévoir leurs effets sur le rechargement, à fournir des évaluations volumétriques et à créer des scénarios hypothétiques basés sur des hypothèses d'intervention raisonnables qui sont aussi évaluées sur le plan économique. Selon NRC (1995), ces études requièrent l'utilisation de méthodes d'analyse

affranchies, de prédiction et d'appréciation des incertitudes contenues dans les différentes hypothèses d'intervention. De plus, la diffusion publique des intentions de projet comme norme de sensibilisation sociale n'est pas du tout prématurée. L'examen de la littérature scientifique révèle que de nombreuses méthodes peuvent être adoptées dont quatre points seront discutés ci-dessous: (1) enquêtes cognitives sur le littoral de l'intervention; (2) plan de reconstruction de la plage émergée; (3) prédictions des effets morphologiques du rechargement; (4) évaluations volumétriques concernant le rechargement; (5) évaluations volumétriques des nouveaux rechargements en vue de la conservation du littoral; (6) rédaction du projet exécutif.

Enquêtes cognitives sur le littoral de l'intervention

Elles ont l'objectif de définir les processus dynamiques du littoral où doit être inséré le projet et d'obtenir les paramètres utiles à ce dernier et à son optimisation. Les enquêtes sont menées à une échelle de temps différente (court et long terme) et spatiale (régionale et locale) en comprenant généralement les aspects énoncés ci-après :

(a) *Cartographies de base*: elles intéressent la position de la ligne de rivage, les cotes altimétriques de la plage émergée et de l'arrière-plage, la présence d'ouvrages de protection, les routes, les édifices, les stations balnéaires et tout ce qui est « rigide » et pouvant interférer avec les processus des côtes. Ces cartes servent de référence pour les modèles et les restitutions de nature diverse et elles revêtent, en outre, une grande importance dans l'analyse des bénéfices espérés.

(b) *Variations historiques de la ligne de rivage*: elles permettent de déduire les tendances dynamiques, le taux d'érosion et les prélèvements volumétriques correspondants (Stive et al, 2002; Leatherman, 2003; Thieler et al, 2003; Bossak et al, 2005). Les données de base sont représentées par les cartographies historiques, récentes et cadastrales, ainsi que les cartes bathymétriques, les photos aériennes, les images satellite (Harris et al, 2005; Morton et Miller, 2005). Les systèmes GIS facilitent la gestion et la comparaison des données repérées (Geoconnexion, 2006).

(c) *Profils de plage (émergée et sous-marine)*: ils sont utilisés comme éléments descriptifs du littoral ou comme source de données pour les modèles hydrauliques et du transport sédimentaire (NCSTM, 2006). De plus, ils définissent la variabilité annuelle, saisonnière, et les

réponses immédiates du littoral aux événements extrêmes (Morton, 1979; Larson et Kraus, 1989b; List et Farris, 1999). Certains systèmes informatiques comme l'ISPR (Birkemeier, 1984), le BMAP (Sommerfeld et Wise, 1995) et le GRASS (2006), facilitent l'analyse et la comparaison des données.

(d) *Profondeur de fermeture*: c'est la limite externe de la plage sous-marine au-delà de laquelle l'érosion et le dépôt sont insignifiants (Birkemeier, 1985; Hinton et Nicholls, 1998). Ce paramètre – utilisé pour les prédictions morphologiques et volumétriques et pour l'exécution de modèles hydrauliques et de transport – est évalué par les données des houles, granulométriques et en comparant les relevés bathymétriques de différentes (Hallermeier, 1981; Stauble et Kraus, 1993b; Houston, 1994; Nicholls et al, 1996; Jenkins et Keehn, 2001; Dalrymple, 2006). Kraus et Larson (1995) fournissent des suggestions spécifiques aux problèmes du rechargement.

(e) *L'hydraulique côtière*: elle est déduite à travers les mesures de la marée, les modèles numériques *hindcast*, et les évaluations statistiques concernant les paramètres moyens et de pic de la houle pour les différentes directions de provenance (USACE, 1984; Hubertz, 1992; McAneny 1993; McAneny et Jones, 1993; McGehee, 1993). Des modèles appropriés sont utilisés sur la base de ces données (Capobianco et al, 2002).

(f) *Bilan sédimentaire*: il permet de quantifier le taux net d'érosion/dépôt, utile pour les évaluations volumétriques des nouveaux rechargements (*refill*) et pour les analyses du transport le long du rivage. De nombreux ouvrages illustrent les techniques de calcul (Jarrett, 1991; USACE, 1992; Meisburger, 1993; Komar, 1996); en particulier, Stauble et Morang (1992) soulignent les indicateurs morphologiques du transport le long du rivage, tandis que Gravens (1989) présente une méthode pour la déduction du transport net à partir de données *hindcast*.

(g) *Carrières marines*: elles sont à évaluer sur la base de leur potentiel qui est en fonction du type et de la quantité d'inertes, de la géométrie des dépôts utiles, de leur stabilité stratigraphique, de la bathymétrie, des coûts de transport et de l'impact sur l'environnement dû à l'activité extractive (NRC, 1995). Des enquêtes sismiques et des carottages sont utilisés pour le repérage des dépôts utiles (Tortora, 1994; Chiocci et La Monica, 2003; BeachMed, 2004a,b,c), généralement liés aux épisodes de la dernière transgression. Certains modèles (p.

ex. STM: Cowell et al, 1995) peuvent orienter les recherches en mer, en tenant compte des conditions favorables à la préservation transgressive (Tortora et Cowell, 2005a; 2005b). Nous nécessitons de cartographies détaillées de la zone de la carrière qui serviront de support à l'activité extractive (Chiocci et La Monica, 2003).

(h) *Caractéristiques granulométriques du sédiment inerte et natif*: elles sont utilisées dans certaines méthodes d'évaluation volumétrique (*overflow-renourishment factors*) et pour prédire la forme du profil morphodynamique à la suite de l'intervention. D'autres caractéristiques sédimentologiques concernent la couleur, les composants minéraux, leur concentration et poids spécifique et la variabilité granulométrique le long du littoral et dans les dépôts utiles (Capobianco et al, 2002). Stauble (1991) discute des caractéristiques essentielles concernant le rechargement.

(i) *Impact social de l'intervention*: son évaluation se fait en fonction des activités de la communauté locale, en tenant compte également de la qualité esthétique du littoral, des accès à la mer et des aspects économiques liés au tourisme balnéaire. Les avis des autorités locales et des résidents nous permettent d'orienter le projet (Van De Graav et al, 1991b).

Plan de reconstruction de la plage émergée

En résumé, il se base sur l'assignation de deux paramètres morphologiques, l'ampleur et la cote de la berme. L'ampleur (c-à-d la progression du rivage requise) dépend de l'objectif du projet, des ressources économiques disponibles, des différents aspects de l'environnement et des instances locales. Aux Etats-Unis, l'avancement propice du rivage est évalué à travers un procédé d'optimisation des coûts-bénéfices, en choisissant parmi les différentes mesures, celle qui est la moins coûteuse (USACE, 1991). Ce procédé se sert de modèles numériques (p. ex. BEACH : Larson et Kraus, 1998) qui prévoient les dommages (coûts) des événements extrêmes en fonction de l'ampleur de la berme. Les autres aspects à évaluer concernent le taux naturel de recul de la ligne de rivage, les pertes latérales à la suite du rechargement (*lateral spreading*) et d'autres aspects liés à la durée de la plage au cours du temps (Inman et al, 1993; Stive et al, 2002).

La cote à assigner à la berme correspond généralement à la cote déjà présente sur la plage à traiter. Des cotes plus basses causent au fil des années des crêtes de berme où l'on observe souvent des stagnations d'eau derrière elles, tandis que des cotes plus hautes causent à la laisse

des escarpements érosifs prononcés qui interfèrent avec l'activité balnéaire. La berme de beaucoup de plages stables ou progradantes (*healthy beaches*: HB) a une pente typiquement faible vers la mer et cet aspect doit donc être pris en compte lors du projet. Et, plus généralement, la pente conseillée est comprise entre 1/100 et 1/150 (USACE, 1991). Les cotes de référence peuvent être relevées sur la plage examinée ou sur les plages limitrophes de type HB, à l'aide d'appareillages RTK (*real time kinematics*), pour reconstruire ensuite un profil moyen en tenant compte de la variabilité saisonnière et du bord du rivage. Certains programmes (p. ex. BMAP: Sommerfeld et Wise, 1995) facilitent la gestion des données topographiques recueillies.

Prédictions des effets morphologiques du rechargement

Beaucoup de méthodes se servent de reconstructions géométriques 2D (profils terre-mer) qui prévoient (en analogie avec les épisodes naturels de progradation: Bruun, 1986; Tortora, 1991) une translation vers le large du profil de plage d'origine (pré-rechargement) équivalant à la progression souhaitée de la ligne de rivage (USACE, 2002a). Le profil translaté comprend les éléments de la plage émergée optimisés au point (2). Si l'inerte et le sédiment naturel sont de dimensions moyennes différentes, la forme du profil translaté est modifiée à travers des méthodes qui se basent sur le concept du profil d'équilibre (Dean, 1991). De plus, si le profil d'origine reflète trop les conditions érosives, le profil translaté est déduit des littoraux stables ou en progradation se trouvant à proximité (type HB). Toutes les reconstructions 2D prévoient des profils qui s'étendent jusqu'à la profondeur de fermeture et le calcul du profil d'origine (ou HB) comme moyenne de relevés multiples de façon à inclure la variabilité saisonnière et le bord du rivage. Le concept de profil d'équilibre est largement diffusé et il est parfois associé à l'évaluation du transport le long du rivage et de l'érosion due aux tempêtes (USACE, 2002a).

(a) *Prédiction dans le cas d'inerte équivalant au sédiment naturel*: elle ne prévoit pas de modifications de forme entre le profil d'origine et le profil translaté à moins que le premier ne reflète des conditions de forte érosion et qu'il faille donc le remplacer dans la translation par un profil de type HB. Certains programmes (e.g. STM: Cowell et al, 1995; CROSMOR: Grasmeijer, 2002) effectuent automatiquement la reconstruction géométrique en permettant de varier la forme du profil translaté à travers des paramètres adéquats. La reconstruction peut se faire aussi en 3D en soumettant d'abord les données des relevés effectués sur un vaste territoire aux procédés de maillage (*gridding*) et en translatant ensuite la matrice obtenue vers la mer (Tortora, 1992).

(b) *Prédiction dans le cas d'inerte différent du sédiment naturel*: elle utilise des méthodes se basant souvent sur la théorie du profil d'équilibre (absence de transport transversal) et elle fait l'objet de beaucoup d'ouvrages (Bruun, 1954; Dean, 1977; 1991; Moore, 1982; Dally et al, 1985; Larson, 1988; Kriebel et al, 1991; Bodge, 1992; Dalrymple, 1992; Pilkey et al, 1993; Stive et De Vriend, 1995; Zheng et Dean, 1997; Gonzalez et al, 1999: USACE, 2002b). La prédiction se fait en translatant le profil d'origine (ou de type HB) plus ou moins par rapport à la progression du rivage prévu dans le projet (point 2). Cette incrémentation ou diminution, évaluée par équation, se fait différemment selon les différents points (profondeur) du profil, qui modifie donc sa forme en tenant compte de la granulométrie moyenne de l'inerte et du sédiment naturel (USACE, 2002a). Dean (1991; 1998) définit trois principales géométries suivant que le profil après rechargement coupe le profil avant rechargement entre la profondeur de fermeture et la côte (*intersecting profile*), ou au-delà de cette profondeur (*nonintersecting profile*) ou s'il manque la plage émergée après le rechargement (*submerged profile*). Les trois types dépendent du volume d'inerte déversé et de la taille de l'inerte: si plus gros que le sédiment naturel (*intersecting profile*), si plus fin ou égal (*nonintersecting profile*). La typologie *submerged* est liée aux conditions *nonintersecting* dans le cas d'un volume déversé insuffisant. Dean (1991) définit les champs numériques dans lesquels se vérifient les géométries *intersecting* et *nonintersecting*. L'une des limites est que le profil d'équilibre dépend de l'intervalle temporel et qu'il diffère donc selon qu'on le considère à l'échelle annuelle ou pluriannuelle. Ceci semble être l'un des motifs principaux des différences souvent remarquées entre les prédictions et les données de monitoring une fois le rechargement effectué (Capobianco et al, 2002).

Evaluations volumétriques pour le rechargement

Elles se basent sur des reconstructions géométriques, sur des méthodes de type sédimentologique et sur des modèles qui intéressent différemment le rechargement et qui traitent aussi certains aspects au point (3).

(a) *Evaluations de type géométrique*: elles utilisent les reconstructions (et les concepts de base correspondants) au point (3), en calculant l'aire comprise entre le profil d'origine et le profil translaté, considérée en m³ par mètre linéaire de côte. Ces reconstructions sont souvent répétées sur plusieurs profils espacés de façon à interpréter la variabilité morphologique du bord du rivage. Des évaluations plus précises dérivent de calculs 3D (point « 3a »), par la

différence des deux matrices de maillage (originale et translatée) et, ensuite, corrigées par des méthodes (point 4b) tenant compte des différences granulométriques entre le sédiment inerte et le sédiment naturel. Pour *healthy beaches*, une estimation expéditive (USACE, 2002a) du volume (V) dont on avait besoin pour la progression nécessaire du rivage (W) prévoit comme seules données d'entrée la cote de la berme (B) et la profondeur de fermeture (Dc), $V=W(B+Dc)$, dans le cas de sédiments inertes et naturels équivalents. Le cas échéant, des évaluations tout aussi rapides seront obtenues par deux équations se référant respectivement aux géométries de type *intersecting* et *nonintersecting* (Dean, 1991). Ou encore par une équation (Dean, 2002) qui, en tenant compte du diamètre moyen du sédiment ainsi que de la hauteur et de la période des vagues significatives, génère le profil d'équilibre (le profil d'origine et celui à translater). Toutes ces évaluations expéditives sont recommandées uniquement pour les calculs préliminaires. Certains programmes (BMAP: Sommerfeld et Wise, 1995) et même un site Web (Grasmeijer, 2006) les automatisent. Dans tous les cas, le profil d'équilibre, étant décrit par une équation exponentielle, manque de détails morphologiques (comme les barres) et parfois d'importance volumétrique.

(b) *Evaluations de type sédimentologique*: elles se servent de l'*overflow factor* qui compare la granulométrie du sédiment inerte et naturel à travers les paramètres Diamètre Moyen et Classement (Folk et Ward, 1957) de deux échantillons (composites), calculés comme moyenne de la variabilité granulométrique existant dans la zone de carrière et sur le littoral (Hobson, 1977a; La Monica et al, 1984). Cette méthode considère: que le sédiment inerte se transforme en sédiment naturel sous l'effet de la houle; que les fractions granulométriques perdues à cause de cette transformation sont les fractions incompatibles avec le régime hydraulique local; que ces fractions correspondent à celles manquantes du sédiment naturel; et que pour compenser leur perte, il faut augmenter le déversement de sédiment. L'*overflow factor* fournit un numéro pur qui corrige les évaluations volumétriques précédentes basées sur l'égalité inerte-naturel (3a): par exemple une valeur de 2 indique qu'il faut les redoubler.

Les mises à jour effectuées au cours des années aboutissent à trois types d'*overflow factor*, indiqués par Rs (Krumbein et James, 1965), Rd (Dean, 1974) et par Ra (James, 1975), qui se différencient par les modalités hypothétiques de transformation du sédiment inerte dans le sédiment naturel. Le facteur Rs (Krumbein et James, 1965) peut être calculé empiriquement de façon analytique et graphique (James, 1975). Le calcul empirique considère, pour chaque fraction dimensionnelle, le rapport entre le pourcentage en poids du sédiment naturel et inerte,

en considérant ensuite la valeur maximale de cette série de rapports (rapport critique); la classe granulométrique correspondante est indiquée comme phi critique ($\phi_{crit.}$) et représente la fraction dont l'inerte est le plus insuffisant. Le calcul analytique de R_s et du $\phi_{crit.}$ se base, en revanche, sur deux équations. La limite de R_s est qu'il prévoit la transformation de l'inerte suite à la perte irréaliste des fractions grossières hors du spectre granulométrique du sédiment naturel. Nous aboutissons donc à des surévaluations volumétriques pour les sédiments inertes grossiers. Plus généralement, la transformation complète est possible seulement si le sédiment inerte est moins classé que le sédiment naturel. Le facteur R_d (Dean, 1974), calculé de façon graphique, considère que le processus de transformation comporte seulement l'éloignement des fractions les plus fines du diamètre moyen du sédiment naturel et qu'il se complète lorsque le diamètre moyen des deux sédiments comparés coïncide. Le facteur R_a (James, 1975) peut être évalué de façon graphique et il se base lui aussi sur la supposition que les fractions granulométriques plus fines que la dimension critique sont éloignées (limite de stabilité des fractions inertes).

En comparant les trois types d'*overflow factor*, Hobson (1977b) considère le type de James (1975) comme étant le meilleur. Pour les inertes étant constitués aussi de boue, Hobson (1977a) conseille quelques corrections pour tenir compte de l'éloignement des boues pendant les phases d'extraction et de déversement. Dans USACE (2002a) les valeurs de l'*overflow factor* entre 1 et 1.05 sont considérées comme optimales et il est recommandé d'utiliser des inertes avec un diamètre moyen équivalant ou un peu plus grand que celui du sédiment naturel. Etant donné que ce facteur se base exclusivement sur des attributs granulométriques, son utilisation est parfois critiquée (Dean, 2000). Mais il peut tout de même servir de complément aux méthodes intégrant davantage les processus physiques des côtes (NRC, 1995). Pranzini (1999) fournit une autre méthode pour apprécier sur base granulométrique le degré de convenance de l'inerte au rechargement.

Evaluations volumétriques des nouveaux rechargements pour la conservation du littoral

Différentes méthodes d'analyse et modèles numériques sont employés pour le calcul du déficit sédimentaire, sur la base duquel sont programmés les cadences et volumes à déverser. Ce déficit somme le déficit typique du littoral (pré-rechargement) et les pertes dérivant de l'effet de *lateral spreading* dû à la saillie du littoral reconstitué. Cet effet se manifeste par des reculements rapides de la ligne de rivage qui tend au rétablissement naturel de sa configuration rectiligne d'origine. Les pertes qui en dérivent dépendent de la houle, du transport le long du

rivage, de la stabilité de l'inerte (granulométrie) et de la forme de la ligne de rivage le long des deux raccordements aux bords du littoral (Dean et Yoo, 1992; NRC, 1995). Le *lateral spreading*, qui profite toute de même aux plages adjacentes, peut être contrasté soit par des ouvrages rigides transversaux (le long du littoral et surtout aux bords de ce dernier), soit en harmonisant la transition avec les plages adjacentes par des raccordements longs et doux. Des transitions à angle brusque de la ligne de rivage entraînent des érosions progressives, en partant des marges vers le littoral. Hanson et Kraus (1993) posent le problème en termes d'optimisation économique en faisant remarquer que des transitions harmonisées ont besoin de quantités importantes au début (première opération de rechargement), mais moindres par la suite (rechargements successifs). De plus, on a constaté que ces pertes latérales diminuent avec la longueur du littoral traité. Leur évaluation prévisionnelle est assez compliquée et elle dépend parfois des techniques utilisées. Hanson (1999), par exemple, en comparant une méthode d'analyse et deux modèles numériques dont l'un raffiné, on obtient des prévisions différentes dans les trois cas, ce qui implique, par conséquent, des prises de décision différentes quant au projet. Généralement, les méthodes utilisées pour les évaluations relatives à la cadence et à la volumétrie des rechargements traitent le déficit sédimentaire en agrégeant les pertes du *lateral spreading* et du littoral d'origine (pré-rechargement). USACE (2002a) illustre les méthodes d'analyse qui, basées sur des équations avec des paramètres principalement hydrauliques (Dean et Yoo, 1992), fournissent les cadences des nouveaux rechargements en mesurant le temps nécessaire au prélèvement de volumes définis. L'évaluation présuppose qu'il faille effectuer le nouveau rechargement lorsque la masse initialement introduite (premier rechargement) a diminué d'un certain pourcentage avec, par conséquent, le reculement du rivage jusqu'à un maximum consenti (ligne de rivage critique).

Nous pouvons nous servir de beaucoup de modèles numériques pour l'évaluation du bilan sédimentaire et des autres aspects prévisionnels importés de la même manière. Capobianco et al (2002) soulignent le fonctionnement des modèles disponibles en les distinguant en quatre catégories décrites ci-après. Les *Profile Evolution Models* décrivent l'évolution le long des profils transversaux à la côte et ils sont généralement utilisés pour simuler les effets d'événements extrêmes. Kraus et Wise (1993), Newe et Dette (1995), Zheng et Dean (1997) expliquent certaines de leurs applications quant aux nouveaux rechargements dans le cas de prévisions à court terme; tandis que celles à long terme sont traitées dans Work et Dean (1995), Roelvink et al (1996), et Larson et al (1999a,b). Certains concepts de base des *Profile Evolution Models* sont contenus dans les ouvrages précédents tels que Kriebel et Dean (1985),

Larson et Kraus (1989a,b; 1998), Larson et al (1990a,b). Une révision sur les procédés déterministes contenus dans ces modèles est illustrée dans Roelvink et Broker (1993). Les *Shoreline (one-line) Evolution Models* décrivent l'évolution de la ligne de rivage en tentant d'élargir sa progression même vers les isobathes. Leur utilisation sert souvent à formuler des prédictions à long terme dans des contextes morphodynamiques intéressés par des ouvrages rigides. Hanson et Kraus (1993), Works et Dean (1995), Gravens (1997), et Browder et Dean (2000) présentent quelques applications dans le cas d'un nouveau rechargement. Nous pouvons considérer comme ouvrages précurseurs ceux de Pelnard-Considère (1956), Bakker (1968), Fleming et Hunt (1976) et Le Méhautée et Soldate (1978). Les *Multi-layer Models* sont une combinaison hybride des deux modèles précédents (les plus utilisés) et leurs conditions théoriques nécessaires sont illustrées dans Steetzel et al (1998); on les utilise généralement dans le cas de scénarios de côte décrits par peu de données (Capobianco et al, 2002). Les *Quasi-3D Models* reconstruisent géographiquement l'évolution de la côte mais ils sont encore considérés comme plutôt expérimentaux, surtout dans des milieux littoraux complexes. Les ouvrages auxquels se référer sont Larson et al (1990a, b), De Vriend et al (1993a,b), Stauble et al (1993), Nicholson et al (1997), Lesser (2000), Reniers et al (2001), et Lesser et al (2004). Cette dernière catégorie comprend aussi le modèle 3D qu'on est en train d'expérimenter dans le domaine BeachMed. Hamm et al (2002) considèrent que l'emploi de modèles numériques doit tenir compte de la finalité avec laquelle ils ont été eux-mêmes initialement conçus, vu que la création de beaucoup d'entre eux ne vise pas toujours le nouveau rechargement. Pour résumer, les modèles conçus pour les profils transversaux sont appropriés aux interventions de rechargement, tandis que les modèles considérant la dimension le long de la côte sont plus appropriés à la description du milieu où l'intervention est effectuée.

Une autre méthode d'évaluation volumétrique est celle de James (1974; 1975) qui se penche sur le *renourishment factor*, calculé en comparant la granulométrie du sédiment inerte et naturel. Cette technique prévoit des rechargements dont le volume est équivalent au déficit de bilan existant, une fois que ce dernier est corrigé par ce facteur. Il en dérive que ce déficit sera plus ou moins grand selon la stabilité de l'inerte à utiliser. Le calcul de ce facteur se fait de façon analytique ou graphique en se servant des mêmes données d'entrée prévues pour l'*overflow factor*.

Rédaction du projet exécutif

Il contemple les objectifs à atteindre, les ressources disponibles, les caractéristiques dynamiques du littoral, les prévisions sur les effets du rechargement, les quantités nécessaires pour le mettre en acte et pour la conservation de l'ouvrage au fil du temps. Il faut, pour rédiger le projet exécutif, examiner attentivement les différentes solutions alternatives fournies par les études prévisionnelles (les points précédents), souvent revisités plus en détail à travers des modèles de prédiction testant les différents scénarios espérés (NRC, 1995; Capobianco et al, 2002; USACE, 2002c). Les choix qui en dérivent se basent sur l'évaluation des données objectives, sur l'optimisation du rapport coût-bénéfice et sur les alternatives à faible risque d'insuccès (effets inattendus). Le projet exécutif s'exprime à travers des techniques spécifiques et économiques qui intéressent, en résumé: (a) les zones de déversement et les modalités pour le mettre en acte; (b) l'éventuelle possibilité de rechargements hybrides (associés aux ouvrages rigides); (c) les modalités d'extraction et de transport de l'inerte.

L'aspect (a) implique quatre options relatives aux déversements effectués aux pieds des dunes, sur la plage émergée, sur la plage sous-marine ou sur tout le profil morphodynamique. La première est généralement adoptée pour contraster l'érosion des événements extrêmes (Capobianco, 2002). La seconde (la plus utilisée) permet de reconstruire la plage suivant la morphologie souhaitée et l'usage immédiat de cette dernière. La troisième, en considérant que les inertes déversés dans la mer arrivent spontanément sur la plage émergée, comporte un abattement des coûts pour les déversements facilités et ne prévoyant pas de travaux de « mouvement terre » sur la plage émergée. La quatrième a été particulièrement expérimentée, avec succès et avec une réduction des coûts, en Allemagne, au Danemark et en Hollande (Brunn, 1988; Spanhoff et al, 1997; Hamm et al 2002; Grunnet et al, 2004; Van Duin et al, 2004). Les sites de déversement correspondent pour la première option aux zones à risque (*hot spot*) et pour les autres ils sont évalués en fonction du transport le long du rivage. Pour l'aspect (b), le choix relatif aux interventions hybrides dépend du volume du transport transversal et le long du rivage et des pertes prévues dues au déficit naturel et au *lateral spreading*. Des ouvrages transversaux sont mis en acte aux marges des littoraux avec un transport actif le long du rivage et/ou dans les cas où un avancement prononcé de la ligne de rivage serait nécessaire (CUR, 1997; Larson et al, 1997a; Krystian et Pilarczy, 2003). Des ouvrages parallèles, souvent submergés, se prêtent, en revanche, aux littoraux avec un transport transversal prédominant. Pour l'aspect (c) les choix opérationnels dépendent de la bathymétrie et de la stratigraphie des dépôts de carrière, de leur distance du littoral et de la quantité de sédiment à extraire. Les

informations sur les techniques et les appareillages d'extraction et de déversement sont illustrées dans Tomasicchio et Tomasicchio (2000), et Wikipedia (2006). Le projet exécutif qui dérive des décisions prises, agrège de manière organique les différentes complexités et il comprend les techniques spécifiques, les coûts et la programmation des monitorages effectués après le rechargement avec le détail des cadences en terme de temps, des instruments à utiliser et des analyses des données prévues.

Monitoring effectué après l'intervention

Les enquêtes de monitoring visent à s'assurer de l'état de l'ouvrage et à comprendre les interactions avec les processus naturels (Timothy et al, 1988; Davis, 1991; Kroon et al, 1995; Valverde et al, 1999; Browder et Dean, 2000). Elles permettent, notamment, d'évaluer la performance de l'intervention, d'identifier les problèmes surgis et d'y remédier, et de programmer les nouveaux rechargements relatifs à la conservation. Les données du monitoring sont aussi utilisées pour calibrer les modèles prévisionnels déjà utilisés, qui acquièrent de cette façon la validité dans la gestion future du littoral. De plus, ces données permettent d'améliorer les méthodes et les techniques adoptées en comparant les attentes avec ce que l'intervention a réellement produit. Le plan des monitorages intéresse la spécificité de la zone traitée et le type d'intervention effectué. De nombreux manuels fournissent les lignes guides à suivre et les instruments à utiliser (CUR, 1987; NRC, 1995; Morgan et al, 1997a,b; Larson et al, 1997b; Dean, 2002; USACE 2002c).

Le monitoring touche les trois phases principales, de l'avant intervention (discutée au point 1), de l'intervention et de l'après intervention. La seconde, à effectuer immédiatement à la fin de l'ouvrage, documente la quantité d'inerte déversée, la typologie de ce dernier et la façon dont il a été mis en place. Sa finalité étant de vérifier la fidélité de l'ouvrage par rapport au projet exécutif et de décrire la stabilité morphologique du littoral avant qu'il n'interagisse avec l'environnement (temps zéro du processus évolutif). Cette phase prévoit généralement l'identification de la ligne de rivage, le prélèvement d'échantillons et des enquêtes topographiques et éventuellement bathymétriques (pour les rechargements marins). On déduit le type d'inerte à employer des données d'échantillonnage et la quantité de volume est évaluée en tant que différence entre les cotes de la surface morphologique reconstruite et la surface avant l'intervention.

La troisième phase prévoit de multiples monitorages, plus fréquents (environ tous les six mois) pendant la première période lorsque les modifications du littoral sont très rapides. Généralement les réponses espérées concernent les questions suivantes : où se disperse l'inerte déversé, quel taux de perte subit-il, quels sont les processus qui le déplacent et comment se redistribue-t-il dans la zone traitée (NRC, 1995). Leur solution est en grande partie confiée à des relevés topographiques et bathymétriques répétés qui, mis en comparaison (données de maillage soustraites), permettent des restitutions 3D où les zones de prélèvement et de déversement sont définies par l'emplacement géographique et l'épaisseur. Il en dérive des « photographies » répétées dans le temps (cadences du monitoring) concernant les variations géométriques (et les volumes associés) de la masse ajoutée à l'origine (rechargement). Ces cartes se fondent sur les données (épaisseurs) nécessaires aux évaluations de bilan et de volumétrie des rechargements. De plus, elles peuvent être utilisées pour calibrer les modèles numériques attribués à la définition des axes de transit du sédiment. Les données bathymétriques sont aussi utilisées pour éclaircir le contrôle de l'inerte sur le profil morphologique (Medina et al, 1994; Roelvink et al, 1996). Une répétition d'échantillonnages est prévue à cet effet permettant, en outre, de définir l'évolution granulométrique, le degré de mélange du sédiment inerte-naturel, et les fractions de l'inerte perdues et ne convenant pas à l'ouvrage (Pearson et Riggs, 1981; Eitner et Ragutzki, 1994; Guillén et Hoekstra, 1997). L'extension des relevés bathymétriques et topographiques aux littoraux adjacents, à travers des comparaisons temporelles, permet aussi d'apprécier les pertes latérales dues au *lateral spreading*. Dans le cas de rechargements hybrides, il faut prêter une grande attention à l'efficacité des ouvrages rigides par rapport à la tâche qui leur a été assignée. Les instruments et les techniques des enquêtes bathymétriques sont illustrés dans Parson (1997) et Gorman et al (1998). Pour effectuer des calculs volumétriques à partir de données 3D, nous vous conseillons d'utiliser des instruments du type *multi-beam* relevant le fond, calibrés avec soin sur des points de référence désignés (les calibrages barométriques et de la marée sont implicites).

L'élément critique de l'intervention est la plage émergée, et c'est ici qu'il faut concentrer les relevés et les observations pour s'assurer des réponses à long terme et celles liées aux événements critiques, à la saison et à l'état de la mer dont dépendent les cycles morphologiques mineurs du littoral (Wright et Short 1984; Wright et al, 1986). L'attention du monitoring doit être plus généralement concentrée sur la remodelisation naturelle de la plage et sur les causes concomitantes qui la déterminent : taux de prélèvement, régime hydraulique, transport le long du rivage et le type d'inerte introduit. La granulométrie de ce dernier

conditionne, notamment, la morphologie de la plage et, par conséquent, le degré de « tenue » de celle-ci aux événements extrêmes. Dans cette optique, la position de la ligne de rivage est encore plus critique car elle a tendance à reculer spontanément en diminuant ainsi la zone de la plage à laquelle accéder. Il faut donc effectuer toute une série de monitorages répétés afin de définir le taux de reculement et les volumes prélevés. Le reculement du rivage est aussi utilisé comme paramètre réglant la cadence des nouveaux rechargements: sur la base de considérations opportunes est tracée une ligne de rivage critique idéale qui, si atteinte, marque le moment du nouveau rechargement.

Les techniques de monitoring de la plage prévoient des relevés altimétriques (topographiques ou par des systèmes RTK) et des observations concernant les évidences liées au dynamisme du littoral ou à l'identification des zones à risque sur lesquelles éventuellement intervenir (Stauble, 1994 ; Hamm et al, 2002). Les systèmes ARGUS contribuent énormément à travers des *webcams* placées le long du littoral, ce qui permet un monitoring pratiquement continu (Holland et al, 1997). La possibilité de rectifier les images *webcam*, en les intégrant en une seule vue d'en haut, permet aussi de prendre des mesures morphologiques. Vous pouvez trouver les images *webcam* de différents traits de côte mondiaux sur Internet (CIL, 2006; Delft Hydraulics, 2006; WRL, 2006). D'autres techniques de monitoring prévoient l'utilisation de photos aériennes et d'images satellite qui dûment élaborées fournissent aussi des données bathymétriques (Krabill et al, 2000; Brock et al, 2002; USACE, 2002c).

Un nouveau modèle en développement

Quatre points essentiels ressortent des publications scientifiques et méritent d'être examinés et approfondis: (1) la conception de projets visant un rapport coût/bénéfices optimal, grâce en particulier aux modèles d'orientation des choix; (2) la réalisation d'actions de monitoring continues; (3) l'introduction de réalisme (données de monitoring) dans les modèles consacrés à la conservation du littoral; (4) la nécessité d'analyser les points susmentionnés suivant des méthodes organiquement intégrées entre elles.

Nous sommes en train d'élaborer aussi une méthode qui tient compte de ces quatre points, en fournissant des évaluations et des prédictions morphologiques (3D) utiles pour l'ensemble du programme d'intervention, de la phase initiale du projet jusqu'au monitoring après intervention. Cette méthode considère le dépôt du chargement comme contenu entre les deux surfaces limites qui représentent la morphologie de la plage (émergée et sous-marine) avant et

après l'intervention. Ce dépôt est décrit numériquement à travers les données de cote et de granulométrie de ces deux surfaces, toutes deux définies par un ensemble de grilles granulométriques (une grille pour chaque fraction) et par une grille graduée.

Lors de la phase précédant l'intervention, le dépôt est géométriquement prévu à l'aide de trois instruments de calcul. Le premier, en supposant que les sédiments inertes et naturels aient la même granulométrie, comporte le déplacement vers le large de la surface inférieure (pré-chargement) dans la mesure de la progression demandée de la ligne de rivage. Le deuxième, en se servant de calculs innovateurs, modifie la morphologie de la surface déplacée en fonction de la granulométrie du sédiment local et inerte. Le troisième, enfin, calibre la volumétrie du dépôt obtenu de manière à positionner la ligne de rivage selon le projet. De ce dernier instrument dérivent l'estimation volumétrique des inertes nécessaires et la prévision des effets du chargement, reproduites grâce à des cartes bathymétriques, granulométriques et des épaisseurs du dépôt. Les trois instruments susdits peuvent être réintroduits pour différentes hypothèses d'intervention et pour l'emploi d'inertes d'autres types, afin de choisir une solution susceptible d'optimiser le rapport coûts-bénéfices.

Lors de la phase qui suit l'intervention, la méthode gère les données de monitoring en utilisant toujours ladite description numérique. Ce qui donne naissance à autant de « photogrammes » morpho-géométriques du dépôt que sont les phases de monitoring. Des systèmes de calcul appropriés comparent ces « photogrammes » en mettant en évidence les variations du fond, de la plage émergée, de la granulométrie et du bilan sédimentaire. En outre, les données de monitoring sont utilisées pour calibrer le modèle de prévision (instrument 3), de façon à le rendre beaucoup plus valable pour la programmation des rechargements de conservation du littoral. Dans le cadre BeachMed-e, cette méthode sera expérimentée pour la première fois sur des cas réels, en particulier sur trois chargements ayant eu lieu et en cours de réalisation le long des côtes du Latium (les littoraux de Ladispoli, Minturno et Fondi). L'expérimentation comportera des tests de validation (comparaison entre effets prédits et réels), comprenant également d'éventuels éléments correctifs à apporter à la méthode.

B) MODELES HYDRODYNAMIQUES (IACM/FORTH; ICM)

Les modèles hydrodynamiques sont objet d'étude du sous-projet NAUSICAA, et leur fondation peut être trouvée dans leurs Rapports Techniques spécifiques. Cependant, deux partenaires d'OpTIMAL utiliseront des modèles hydrodynamiques dans le contexte de notre projet, et ils sont décrits ci-dessous.

B1) MODELE ALS (IACM/FORTH)

Au niveau conceptuel et au niveau numérique d'exécution, les modèles d'évolution multidimensionnelle de la côte partent habituellement d'un certain nombre de processus physiques constitutifs (vagues, courants, transport de sédiment), qui sont couplés par l'intermédiaire d'un module d'évolution des fonds fondé sur la préservation de sédiments. La Fig. 12 récapitule les concepts des modèles de base.

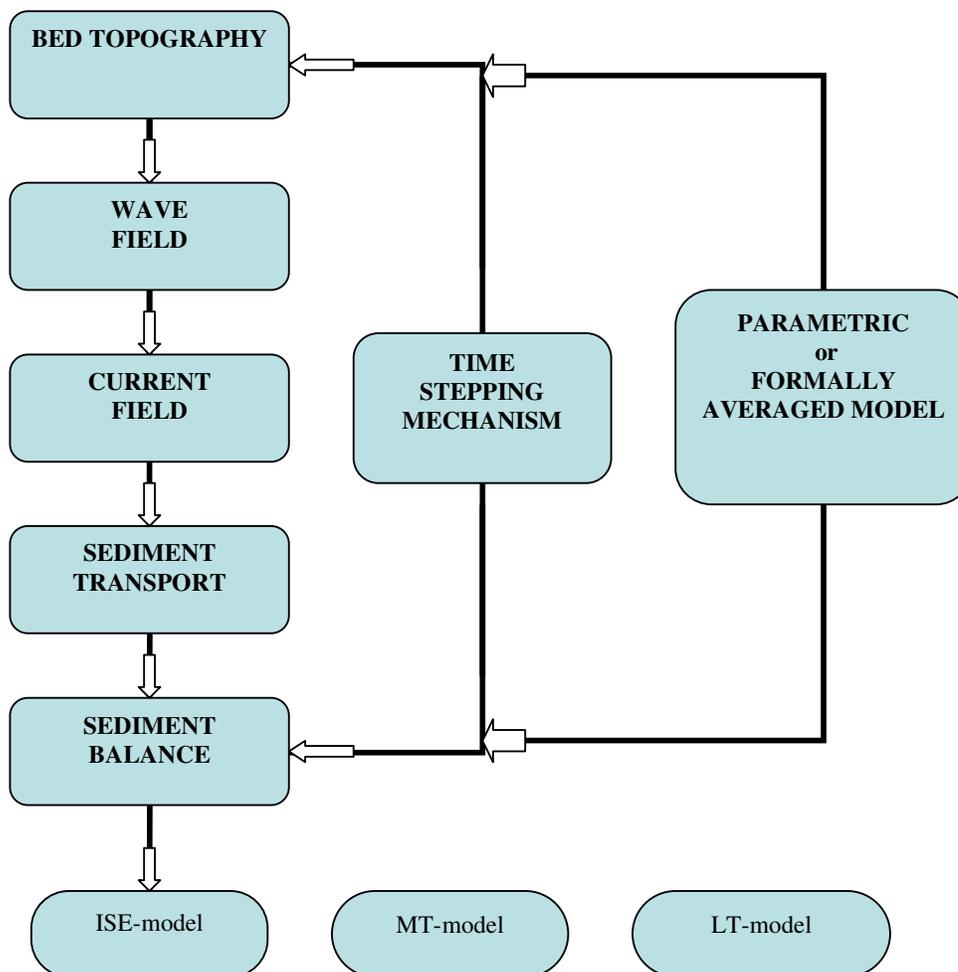


Figure 12 - Concepts des modèles morphologiques composés

La Fig. 12 représente 3 concepts de base:

- *Modèles «Sédimentation/Erosion Initiales» (ISE)*: qui passent seulement une fois par la suite des modèles constitutifs, en fait, l'hydrodynamique et le calcul de transport de sédiment est fondé sur l'hypothèse d'une topographie invariable de lit et seul le taux de sédimentation ou d'érosion pour cette topographie est calculé à chaque endroit.
- *Modèles «Morphodynamiques de Moyen Terme» (MTM)*: dans lesquels la nouvelle topographie des fonds est incluse dans les calculs hydrodynamiques et de transport de sédiments. Ceci produit un système boucle qui décrit la dynamique temps-évolution du lit. L'échelle de temps de cette simulation morphodynamique essentiellement déterministe (Wright et Thom, 1977 ; De Vriend, 1991) ne peut pas être sensiblement plus grande que l'échelle de temps hydrodynamique (durée d'une tempête, d'une période de marée), même en tenant compte de futures améliorations de l'efficacité des techniques..
- *Modèles «Morphologiques à Long Terme» (LTM)*: dans lesquels les équations constitutives ne décrivent pas les différents processus physiques, mais processus intégrés à un niveau plus élevé de l'agrégation.

Modèles ISE

La série de modèles de processus constitutifs qui forme un modèle ISE est un élément essentiel dans toutes les approches morphologiques de modèles. La composition de cette série est loin d'être insignifiante et détermine, jusqu'à un degré élevé, la qualité du résultat final (De Vriend, 1987).

La partie du système modèle composé qui est employée pour les modèles initiaux de sédiment/érosion est indiquée sur la Fig. 12. Comme on pouvait le prévoir, les modèles de type ISE sont les plus largement utilisés dans la pratique.

L'effort informatique impliqué est relativement limité et l'exécution est relativement facile. D'ailleurs, les dernières descriptions de processus peuvent habituellement être incluses sans trop de complications inattendues.

Les modèles de ce type sont cependant difficiles à interpréter en termes d'évolution morphologique à plus long terme, et ils peuvent seulement strictement fournir des informations

sur des phénomènes à une échelle de temps beaucoup plus courte que l'échelle de temps morphologique.

Compte tenu de ces potentiels et limitations, la question est d'optimiser l'utilisation des modèles de type ISE. Evidemment, ils décrivent les processus constitutifs et leurs interactions instantanées, et ils fournissent des possibilités pour expérimenter en condition réelle. D'autre part, ils ne peuvent pas représenter le comportement dynamique du système et encore moins prévoir l'état d'équilibre.

Les principaux résultats d'un modèle ISE sont le champ de transport de sédiment et le modèle de sédimentation/érosion. Les expériences avec les modèles 3D morphodynamiques à moyen terme montrent que le taux initial de sédimentation/érosion n'est pas toujours très représentatif de ce qui se produit après un certain temps, tandis que le modèle de transport l'est habituellement plus. En outre, l'interprétation des résultats des modèles ISE, en termes de prévision morphologique à plus long terme, est souvent plus facile sur la base du champ de transport résiduel annuel estimé.

Une autre manière d'utiliser les modèles ISE est d'examiner les contributions de divers ensembles de conditions (tempêtes, périodes modérées de vent de diverses directions, périodes de temps calme, marée de vive-eau, marée de morte-eau) aux champs de transport résiduel et de sédimentation/érosion.

Dans des situations complexes, telles que les inondations de marée (*tidal inlets*), la réponse n'est pas évidente, en particulier parce que les travaux d'ingénierie proposés tendent à avoir différents effets sous différentes conditions (Steijn et al , 1989).

Les modèles ISE peuvent également être employés pour l'analyse des procédés globaux de transport dans des situations complexes, avant et après changements ou mesures. Une fois que le modèle a été validé et a montré sa fiabilité, il peut être employé pour éclaircir les processus physiques à un niveau global. L'utilisation des modèles ISE ne doit pas être nécessairement

pour le transport du sable; ils peuvent être également employés pour décrire le transport et le situation future du sédiment cohésif (Fritsch et al, 1989; Villaret et Latteux, 1992).

Modèles MTM

Contrairement aux modèles ISE, les modèles MTM (Fig. 13) décrivent le comportement dynamique du système morphologique. Bien que quelques applications intéressantes aient été montrées (Latteux, 1980 ; Chalion et al, 1985 ; Yamagushi et Nishioka, 1984), ces modèles sont encore au premier stade de développement. Des problèmes importants restent à résoudre, au niveau aussi bien conceptuel que de réalisation.

Une fois ces problèmes résolus, et avec de futures réductions des dépenses informatiques, les modèles MTM peuvent être un outil puissant pour des simulations morphodynamiques jusqu'aux périodes de l'évolution morphologique concernée, à condition que la compréhension physique suive le potentiel des modèles numériques.

Les modèles MTM ne sont pas susceptibles de pouvoir couvrir les périodes qui sont beaucoup plus grandes que l'échelle de temps inhérente de l'évolution morphologique concernée. Le processus décrit est non linéaire et les données sont incertaines et incluent des événements extrêmes, ainsi on doit s'attendre à ce que la prévisibilité de l'évolution morphologique diminue à mesure que la période augmente. D'avantage de quantification de cette formulation est cependant encore un sujet de recherche

Modèles 2DH-MTM

La structure des modèles 2DH-MTM (De Vriend et al, 1993a) inclut les modèles de calcul suivants:

- modèle de champ ondulatoire modèle de champ de vague;
- calcul de force transmise par une onde sur la base de contrainte de rayonnement ou de dissipation d'énergie ondulatoire;
- modèle courant de profondeur intégrée qui décrit le champ de vitesse de profondeur moyenne sans résolutions verticales. Toute l'information sur la structure du courant vertical est réunie dans l'hypothèse de fermeture de l'effort de cisaillement du fond, qui

- suppose un courant de cisaillement horizontal, incluant les effets ondulatoires, les forces externes ne pouvant être distinguées par le niveau où elles agissent;
- formule de transport de sédiment ou modèle avec profondeur intégrée de charge en suspension qui décrit la profondeur moyenne de concentration de sédiment sans résolution verticale;
 - un module d'équilibre de sédiment qui calcule les changements du niveau du lit en fonction de la divergence du champ de transport.

Même un modèle MTM qui se compose de modèles constitutifs bien établis et largement testés, ne peut garantir un bon résultat pour le modèle dans son ensemble. La combinaison des modules forme un nouveau système, avec son propre comportement, ses particularités et ses pièges. La procédure de solution numérique doit être considérée et le modèle doit aussi être testé quantitativement.

Une intercomparaison des modèles est une alternative pour une première analyse: elle nous permet d'éliminer les défauts principaux et d'évaluer la sensibilité pour modeler la composition, les procédés numériques, les procédures de progression de temps, etc. Par conséquent, le projet MAST G6M (De Vriend, 1991, Broker, 1995, Broker et al, 1995, Roelvink et al, 1995) a inclus un programme commun d'essai pour quatre modèles MTM qui sont développés dans divers instituts européens.

Le modèle DHI (Danish Hydraulic Inst.)

Le modèle de vague dans le modèle DHI est basé sur le concept HISWA (Holthuijsen et al, 1989), qui décrit la propagation, la croissance et l'affaiblissement du champ stationnaire de vagues créées par le vent (*wind-wave*) de courte période et de crête modérée. La formulation explique les effets sur les vagues de la réfraction, de banc, et du vent il explique aussi, la dissipation par la friction et la rupture du fond et la réfraction et le blocage des vagues dues aux actions des courants.

L'unité morphologique du système décrit le transport de sédiment et les changements de niveau de lit dus à l'action combinée des vagues et des courants. Le modèle de transport de sédiment est basé sur le modèle STP DHI intra-vague (Deigaard et al, 1986).

Le modèle DH (Delft Hydraulics)

HISWA est utilisé comme module d'onde dans le modèle DH. Indépendamment des amplitudes et des directions d'onde, le module d'onde produit les forces d'ondes induites selon la formulation de dissipation, au lieu des efforts de rayonnement (Dingemans et al, 1987). Le module de transport de sédiment donne accès à un choix de formules de transport et de modèles d'ondes moyennes d'advection/diffusion pour le transport de charge en suspension. Un procédé numérique explicite Lax-Wendorff-type 1-step est employé pour la mise en compte la bathymétrie

Le modèle UL (University of Liverpool)

Le module d'onde du modèle UL est basé sur l'équation cinématique de conservation, avec la diffraction et l'équation de conservation d'énergie. Il décrit les ondes à crêtes élevées avec une répartition des hauteurs de Raleigh et inclut les effets de l'interaction vague-courant et la rupture de vagues (*wave breaking*) Le module de transport de sédiment comporte une équation empirique de transport, qui est basée sur des données disponibles de laboratoire et de champ. Le module qui manipule les changements topographiques résout l'équation d'équilibre de masse pour le sédiment en utilisant un procédé Lax-Wendorff modifié.

Le modèle HR (Wallingford)

Le module d'onde emploie une solution d'avancement en temps (*forward marching*) de l'équation dépendante du temps de Mild-Slope, exprimée sous forme d'équations de transport et d'équations « eikonales », ces dernières comprenant des termes de diffraction. Il explique les effets sur les ondes de la réfraction et de banc, la diffraction et la dissipation par la friction et la rupture du fond. Des forces d'entraînement pour la génération de courant sont calculées directement à partir de la formulation de dissipation. Le module d'onde a été décrit (Southgate et Goldberg, 1989). Deux modèles alternatifs de transport de sédiment sont disponibles. L'un emploie une simple loi de puissance pour les effets des courants avec agitation d'onde et un critère de seuil de mouvement (Chesher et Miles, 1992) l'autre utilise une approche énergétique incorporant les courants, plus agitation d'onde, effets d'asymétrie d'onde, transport de masse d'onde et pesanteur (Bailard, 1981 ; Stive, 1986).

Modèles Quasi-3D

Comme indiqué auparavant, l'approche 2DH a une applicabilité limitée et échoue là où les mécanismes de transport *cross-shore* sont importants. Afin de modéliser ces situations, la structure de flux 3D doit être décrite.

L'une des façons de réaliser ceci est d'inclure un module de flux qui résolve les équations hydrodynamiques sur une grille 3D, en incluant habituellement l'approximation hydrostatique. En raison du nombre d'appels du module de flux dans un calcul morphodynamique, ceci peut ne pas toujours être une option attrayante.

Dans l'éventail d'applications pratiques nous pouvons nous servir de la différence d'échelle des procédés de flux prédominants dans le plan horizontal et vertical et souvent aussi parmi ceux *longshore* et *cross-shore*. Ceci ouvre la voie aux concepts de quasi-3D (Katopodi et Ribberink, 1992), tels que:

- les modèles n-profil, qui consistent en une série de modèles de profils *cross-shore* plus ou moins parallèles qui sont couplés par l'intermédiaire des équilibres de matière pour l'eau et le sédiment;
- Les modèles 2DH avec post-traitement 1DV et les modèles quasi-3D dans lesquels un modèle 2DH est couplé à un modèle 1D-vertical. Ce dernier décrit la structure du flux vertical et les relations de fermeture du concept 2DH.

La plupart de ces concepts sont à une première étape du développement et viennent d'être testés dans la pratique (De Vreind et Ribberink, 1991), mais ils sont probablement la meilleure manière de procéder dans le développement ultérieur de modèles morphodynamiques de secteur côtier.

Applications numériques

Cas 1: Baie semi-circulaire

Le premier cas d'essai concerne une baie semi-circulaire parallèle à la direction de l'incidence de vagues, sous un angle de 15° de la ligne de côte calme.

La simulation numérique du cas expérimental; avec son sédiment léger et ses pentes anormalement raides (1:17) dus à la direction verticale.

Le cas est mesuré jusqu'à une situation plus normale en multipliant les dimensions horizontales par 20 et les verticales par 10. On suppose que le sédiment est de sable uniforme, de taille de grain médiane $200 \mu\text{m}$ et d'une vitesse de chute de 0.022 m/s . Dans la simulation numérique, la baie semi-circulaire à un rayon de 50 m. La plage a une pente de 3%, qui est reliée à la baie en un plan horizontal à 2,3 m au dessous du niveau moyen d'eau. Entre les découpes (droites) de profondeur de 2,3 m et 5,5 m, il y a une pente de 9%. Du bout de cette pente à la frontière de «formation de l'onde» environ 20 m, le lit est plat. Une grille rectangulaire uniforme de 66 nœuds en direction *cross-shore* (x-direction) et de 76 nœuds (y direction) est employée, avec une taille de grille de 4m dans l'une ou l'autre direction.

Le modèle est conduit par les vagues irrégulières à crêtes longues avec leurs crêtes parallèles à la frontière de «formation de la vague» et avec une amplitude d'onde de *root-mean-square* de 6,0 m à cette frontière. La période de pointe est de 5 s. La frontière de formation de la vague et les frontières latérales sont fermées pour le mouvement moyen de l'eau et le transport de sédiment. Un nombre constant de Manning de $0.03125 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$ est employé pour décrire la résistance de lit dans le module de flux. La viscosité des remous dans les limites horizontales de diffusion est prise à $0.05 \text{ m}^2/\text{s}$ dans tout le secteur.

Ce cas a été traité avec chacun des quatre modèles MTM 2DH (DHI, DH, UL, HR). Sur la Fig. 13, certains des résultats pour la bathymétrie initiale sont présentés. Les modèles de vagues donnent des résultats tout à fait semblables pour ce cas plutôt simple. L'inclusion de l'interaction vague-courant dans le modèle UL semble avoir un effet mineur qui est concentré près de *downdrift end* de la baie et dans le coin gauche supérieur du bassin. L'agent morphologique le plus important est tout à fait similaire pour tous les modèles.

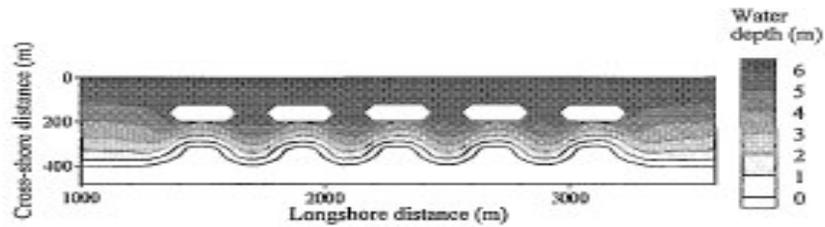


Figure 13 - Changements morphologiques dus à un système des brise-lames isolés (après 60 jours d'action de vague)

Bien que les modèles de transport soient plutôt semblables, les taux de transport diffèrent de manière significative, les transports prévus par les modèles DHI et DH étant sensiblement plus élevés que ceux qui résultent du modèle UL, qui sont à leur tour sensiblement plus élevés que ceux qui résultent du modèle HR. Lors d'une inspection plus minutieuse, le transport au travers de la baie dans le modèle DHI est plus faible par rapport au transport près de la côte (*near-shore*) de l'une ou l'autre extrémité et dans la baie.

Malgré les différences dans le transport de sédiment, les modèles de changements morphologiques sont plutôt semblables après 1,5 jour d'évolution. Tous les modèles prévoient un dépôt dans la baie, aux dépens de la côte adjacente. Les différences entre les taux de transport sont reflétées principalement dans les différents taux de changement topographique.

En dépit de la limitation de la non-inclusion de l'évolution, ces modèles 2DH reproduisent les principaux dispositifs de l'évolution de lit dans les expériences.

Cas 2: Structures côtières

Ce cas d'essai se rapporte à un système de digues en mer soumis à des conditions constantes de vagues. Le modèle ICEM (Saied et Tsanis, 2005b) est employé dans la modélisation numérique. Le système se compose de cinq digues séparées de 200 m de longueur et de 200 mètres d'espacement. Les digues sont situées à 240 m du rivage. On suppose une vague perpendiculaire d'eau profonde de taille significative de 2,0 m, et de période significative de 9,0 secondes sur 60 jours. La Fig. 14 montre l'impact morphologique d'un système de digues séparées après 60 jours, où le rivage avance derrière les digues sous forme de grands saillants.

Alors que les saillants avancent vers les digues, on s'attend à ce que les cellules de circulation derrière les digues deviennent plus petites et plus fortes. Par conséquent, le taux de changement de la géométrie des saillants change continuellement dans le temps. La Fig. 14 montre un exemple de courants conduits par les vagues formées derrière le système de digues après 28 jours. On peut voir que des changements bathymétriques considérables interviennent. L'accumulation des saillants est accompagnée d'érosion en mer entre les digues.

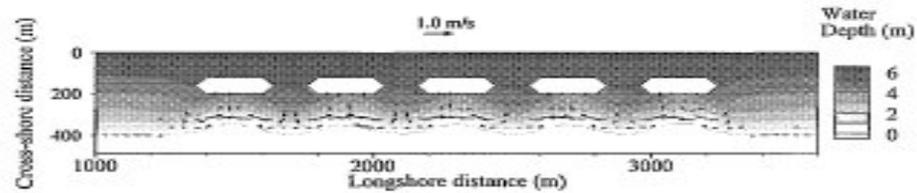


Figure 14 - Circulation derrière les brise-lames isolés (après 28 jours d'action de vague)

Dans le cas où la vague attaque principalement la plage à grands angles obliques, le système d'épis (groin) est très commun. La même plage sablonneuse utilisée dans le cas précédent est employée. On suppose un climat constant de vague d'eau profonde d'une taille significative d'1,5 m et de période significative de 9,0 secondes. Un grand angle de vague en mer ($\theta_0=45^\circ$) est employé pour dévier une quantité significative de dérive littorale de sorte que l'effet d'épis ait un sens. Le système se compose de quatre aines de 200 m de longueur et espacés de 600 mètres, ce qui correspond à trois fois la longueur de l'épi. Sur la Fig. 15, l'impact morphologique du système d'épis sur la plage après 90 jours est présenté. La Fig. 16 montre la circulation autour du système des épis après 60 jours, où les impacts bathymétriques sur la circulation autour du système des épis sont évidents. La dérive littorale est détournée par le système des aines comme représenté sur la Fig. 16, ce qui cause des changements bathymétriques offshore considérables autour de chaque prospérité, comme représenté sur la Fig. 15.

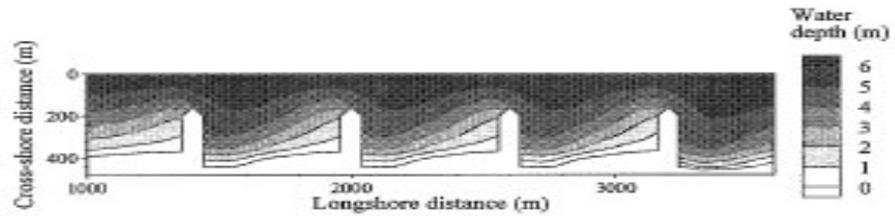


Figure 15 - Changements morphologiques dus à un système d'épis imperméables (après 90 jours d'action de vague)

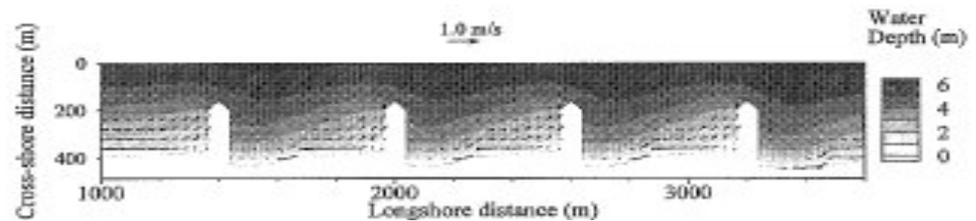


Figure 16 - Circulation autour d'un système d'épis imperméables (après 60 jours d'action de vague)

On s'attend à ce qu'un système d'épis immergés cause une déviation moindre de la dérivation du littoral que le système d'aines émergés et par conséquent un impact morphologique moindre sur le littoral. La Fig. 17 présente la circulation autour d'un système d'épis immergés de longueur et d'espacement semblable.

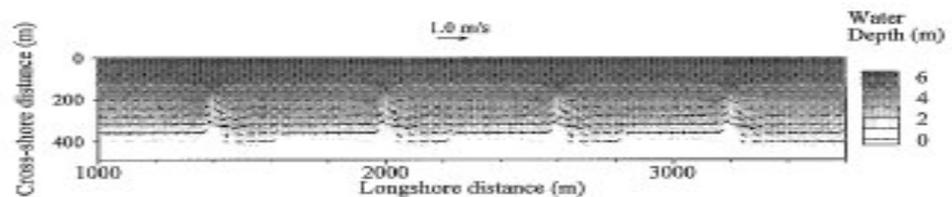


Figure 17 - Circulation autour d'un système d'épis immergés

Les épis sont à 1,5 m au-dessus du lit. On montre que le système immergé ne détourne pas le transport littoral autant que le système émergé. Par conséquent, l'impact du système immergé sur la partie côtière de la plage est moindre que celui du système émergé, comme il est montré sur la Fig. 18.

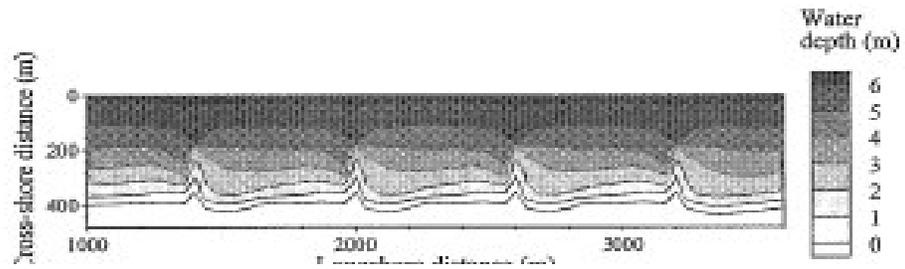


Figure 18 - Changements morphologiques dus à un système d'épis immergés (après 90 jours d'action de vague)

Les résultats de simulation pour les cas d'essais ci-dessus, montrent le comportement réaliste du modèle ICEM et démontre sa capacité à simuler les changements morphologiques de la structure côtière.

La méthodologie (MTM) analysée en Koutandos et al (2002a,b), Karambas et al (2002 a,b,c), Koutitas et al (2002), Tsanis et al (2006) et Androulidakis et al (2006), est composée de trois étapes. L'estimation de l'échelle du flux dans la région examinée est la première étape. La simulation numérique devient sur la base des équations des bas fonds, d'inclination douce pour les ondes brisées et non brisées. La deuxième étape est l'estimation des courants générateurs de flux. Ensuite on calcule le transport du sédiment et enfin la nouvelle morphologie du fond jusqu'à la position finale de la ligne de côte. Alternativement et à condition que cela concerne seulement la ligne de côte finale, le calcul numérique, après le calcul de l'échelle de flux, permet d'avancer avec le modèle d'une ligne afin que soit calculée la position finale de la ligne de côte. Les éléments exigés pour l'application de la méthode considérée sont constitués de la topographie de la région examinée, les vents prédominants, la croissance active pour chaque direction du vent et les caractéristiques de la matière du fond maritime.

La méthodologie ci-dessus a été appliquée dans un grand nombre de cas sur le territoire grec, comme pour le golfe d'Asphendamou au sud de la Crète (Tsanis et al, 2006) et le golfe d'Ouranoupolis en Grèce du nord (Androulidakis et al, 2006), soit pour la prévision des répercussions sur la ligne de côte en raison de travaux techniques de construction, soit pour le suivi de phénomènes d'érosion. En Crète, les caractéristiques géographiques considérées de l'île le fait que, tant au nord qu'au sud de la Crète, apparaissent des vents puissants et violents avec une intensité plus grande que 7 BF, présentent un risque sérieux d'érosion des côtes

(Tsanis et al, 2006). Dans le cadre OpTIMAL, on fera le suivi de l'érosion et la proposition de mesures de modification d'une ligne de côte où, après la construction de l'ouvrage portuaire et en particulier de la digue exposée au vent, le champ ondulé de la région côtière a été modifié en résultant la modification des conditions hydrodynamiques, et par conséquent des rythmes de transport solide du sable, ayant comme répercussion l'apparition de phénomènes d'érosion sur la côte contiguë à l'est de l'ouvrage. Par l'étude bibliographique, il est devenu manifeste que la méthode 3 est plus efficace que la 1 et la 2 et les régions où elle a déjà été appliquée, cf. Tsanis et al (2006) et Androulidakis

C) SYSTEME DE MODELISATION COTIERE (ICM)

Les modèles compris dans le Système de Modélisation Côtière (SMC) seront utilisés et validés dans les différentes alternatives avec la bathymétrie des cartes nautiques du littoral espagnol et la bathymétrie obtenue avec la sonde multi-faisceau pour de futures applications à la gestion côtière. L'évolution morphologique de la plage obtenue à partir du programme sera évaluée avec les résultats de plusieurs campagnes géophysiques, où nous réaliserons des topographies et des bathymétries de haute résolution, avant et après le remblaiement de la plage et un an après l'intervention.

Actuellement, les modèles numériques s'appliquent à la définition du trait de côte (Boak et Turner, 2005), du profil d'équilibre (Bernabeu et al, 2002), aux régénérations de plages (Capobianco et al, 2002 ; Hamm et al, 2002) et à la morphodynamique (Dibajnia et al, 2004 ; Ranasinghe et al, 2004 ; Battjes, 2006 ; Martinelli et al, 2006 ; Roelvink, 2006). Or, la complexité, la grande variété d'échelle et la tridimensionnalité des procédures impliquées dans les phénomènes qui interviennent dans l'évolution des plages ont pour conséquence qu'il n'existe pas actuellement de modèle unique applicable à tout le rang d'échelles pour étudier tous les problèmes qui se présentent. D'où la classification des différents modèles en fonction de l'échelle temporelle d'application (Requejo, 2005):

- modèles de prédiction à court et moyen terme, en distinguant les modèles d'évolution en profil et les modèles d'évolution en 3D;
- modèles de prédiction à long terme (modèles d'une ligne);
- modèles d'évolution qui essaient de s'appliquer au moyen et long terme.

Parmi les différents modèles de simulation numérique employés en ingénierie du littoral, le Système de modélisation côtière (SMC) permet d'obtenir de très bons résultats dans l'étude et l'évaluation des interventions sur le littoral.

Le Système de Modelé Côtier (*Sistema de Modelado Costero/SMC*) est une application informatique qui intègre une série de modèles numériques permettant d'appliquer une méthodologie d'étude et de conception des interventions sur le littoral. Cette méthodologie est développée par le Groupe d'Ingénierie Océanographique et Côtière de l'Université de Cantabrie et la Direction Générale des Côtes du Ministère de l'Environnement, dans le cadre du projet de recherche : « Modèle d'Aide à la Gestion du Littoral ».

Le Ministère de l'Environnement et l'Université de Cantabrie souscrivent, le 14 mai 2002, à une convention de collaboration pour la « diffusion et la distribution des modèles numériques qui sont élaborés dans le cadre du projet d'assistance technique: Développement du Modèle d'Aide à la Gestion du Littoral ». L'Objectif de cette convention est double:

- Permettre et faciliter une distribution adéquate des modèles aux différentes administrations, universités et bureaux d'études aux activités en relation avec le littoral;
- S'assurer que les utilisateurs au sein de ces institutions disposent des connaissances suffisantes pour une utilisation correcte des outils développés. A cet effet, des cours de formation seront dispensés sur l'utilisation des modèles numériques et l'application des méthodologies.

Le SMC est une application informatique qui intègre une série de modèles numériques permettant d'appliquer une méthodologie d'étude et de conception des interventions sur le littoral. Cette méthodologie est présentée dans les Documents Thématiques et de Référence, développés par le Groupe d'Ingénierie Océanographique et Côtière (G.I.O.C) de l'Université de Cantabrie (UC) et la Direction Générale des Côtes du Ministère de l'Environnement (MMA).

Le SMC regroupe une série de modèles numériques structurés en accord avec les échelles temporelles et spatiales des processus à modéliser. Le SMC est structuré en cinq modules fondamentaux : « Pré-traitement », « Court terme », « Moyen et long terme », « Modélisation du terrain » et « Tuteur » (*Sistema de Modelado Costero. Manual del SMC 2.0., Fig. 19*).

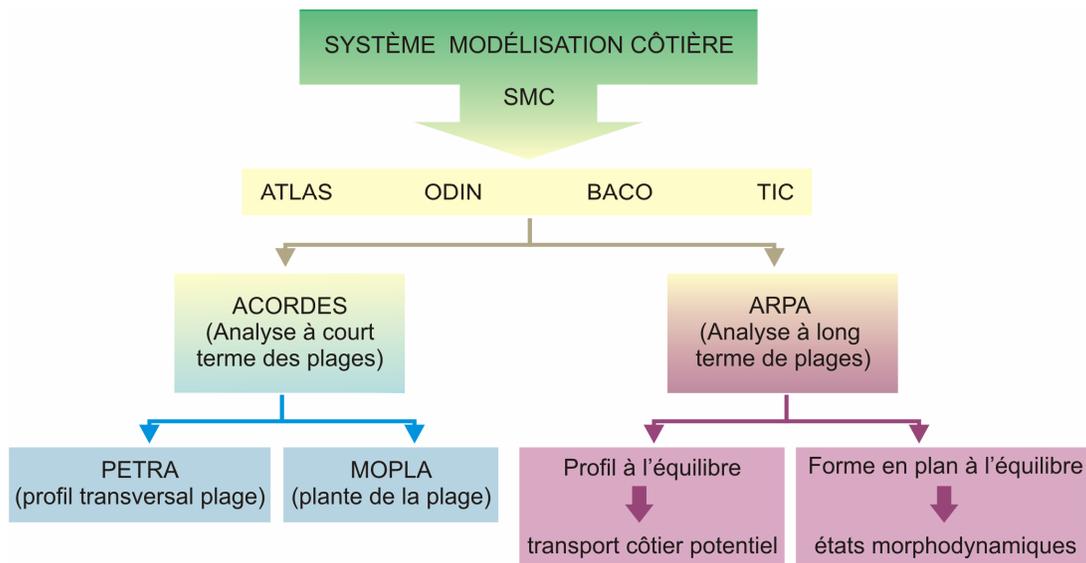


Figure 19- Structure du SMC

Le module « Pré-traitement » permet de traiter l'information entrée pour les différents modules numériques, et est constitué par des programmes (Atlas, Odín et Baco):

- **ATLAS:** Le programme Atlas a pour objectif la visualisation des résultats obtenus dans le Document Thématique de Cote d'Inondation du Projet « Développement d'un Modèle d'Aide à la Gestion du Littoral ». Le programme permet d'obtenir les régimes moyens et extrêmes de l'amplitude des marées et de la cote d'inondation des plages exposées du littoral péninsulaire espagnol. Voici quelques exemples d'application du programme Atlas: (i) Détermination de la cote de berme associée aux profils de plage (ii) Détermination de la cote associée au niveau des marées.
- **ODIN:** L'objectif du module Odín est de caractériser les houles du site en étude et de fournir des données nécessaires à la poursuite de la séance de travail sur le SMC. Le programme Odín permet d'obtenir, pour n'importe quelle zone de la côte espagnole, l'information suivante: (i) Régimes moyens directionnels de la houle visuelle (hauteurs de vague et périodes) en profondeurs indéfinies et à une profondeur donnée (ii) Caractéristiques de la houle associées au flux moyen d'énergie (iii) Houles caractéristiques des conditions moyennes annuelles et (iv) la caractérisation de la houle se fait à partir d'une base de données de houle visuelle.

- BACO: L'objectif fondamental de ce programme est de fournir à l'utilisateur l'information bathymétrique disponible de la zone d'étude. Ce programme va permettre de : (i) Sélectionner, pour une zone d'étude du littoral espagnol, les cartes nautiques et les données bathymétriques digitalisées de cette zone, et (ii) générer, avec cette information, un projet de travail de type SMC.

Le module « Analyse à court terme des plages » (Acordes) inclut les modèles qui permettent d'analyser la morphodynamique d'un système côtier à une échelle spatio-temporelle de court terme et comporte les programmes (Mopla et Petra) :

- Le modèle intégral de « Morphodynamique de plages » (Mopla) est un programme qui permet de simuler la propagation de la houle depuis les grandes profondeurs jusqu'à la ligne de côte. A partir des données de houle propagée, le modèle réalise le calcul des courants dans la zone des brisants et finalement simule l'évolution morphodynamique de la plage considérée.
- Le programme Petra est un modèle numérique d'évolution morphodynamique du profil transversal de la plage. Le modèle résout les équations du flux de sédiments à l'intérieur de la zone du surf, ainsi que les changements de la bathymétrie associés aux variations spatiales du transport de sédiments. L'importance du transport est fonction des caractéristiques du milieu (eau, sédiment, et bathymétrie) et des conditions hydrodynamiques (houle et courants de déferlement). L'objectif du modèle Petra est de connaître la réponse du profil de plage face à un événement de tempête en termes de recul de la ligne de côte et de forme du profil.

Le module « Analyse à long terme de plages » (Arpa) contient les outils numériques qui permettent de modéliser le système à une échelle spatio-temporelle de moyen et long terme.

Le module « Modèle de terrain » (MDT) permet de modifier les contours du fond (bathymétrie) et latéraux (falaises, digues naturelles et artificielles, etc.) de la zone d'étude avec l'objectif de générer différentes alternatives à l'intérieur du projet.

Le module « Tuteur d'Ingénierie des côtes » (Tic), inclut et résout un ensemble de formules généralement utilisées pour les problèmes d'ingénierie côtière.

Avantages/inconvénients

Les principaux avantages de l'application du Système de Modélisation Côtière sont les suivants:

- L'application d'un modèle unifié pour toutes les administrations publiques en Espagne. Cela permet de comparer les résultats d'une zone à ceux de zones de caractéristiques similaires selon la même méthode. De même, la validation du programme en terme d'exactitude peut être envisagée lors de prochaines études sur l'évolution du littoral de la péninsule. On peut aussi penser à étendre son utilisation à d'autres zones côtières en Méditerranée.
- Il permet d'évaluer des situations passées et présentes et de prédire des situations futures en proposant de nouveaux scénarios et en évaluant l'influence des interventions anthropiques sur la zone.

L'inconvénient du Système de modélisation côtière est qu'il nécessite une qualité supérieure des données de départ. Pour obtenir de bonnes prédictions, les données bathymétriques et l'information du climat maritime doivent être aussi précises que possible.

Le SMC permet d'accéder à un programme (Baco) contenant une base de données qui inclut la majeure partie des cartes nautiques du littoral espagnol, ainsi que les bathymétries correspondantes digitalisées. À partir de cette information, le SMC génère un projet d'étude où l'information bathymétrique issue de Baco peut être combinée avec des données de bathymétrie issues d'autres sources. La bathymétrie obtenue peut être modifiée et différentes alternatives ou cas d'étude peuvent être étudiés.

Nous validerons les différentes alternatives avec la bathymétrie des cartes nautiques du littoral espagnol et la bathymétrie obtenue avec la sonde multi-faisceau pour de futures applications à la gestion côtière.

Nous évaluerons également l'évolution morphologique de la plage obtenue à partir du programme avec les résultats de plusieurs campagnes géophysiques, où nous réaliserons des topographies et des bathymétries de haute résolution, avant et après le remblaiement de la plage et un an après l'intervention.

Application aux études de suivi du littoral

Le SMC est un outil qui permet de réaliser un grand nombre de tâches, parmi lesquelles:

- Créer ou ouvrir un projet de travail associé à une zone d'étude sur la côte. Le projet gère toute l'information générée au sein du projet, stockée de façon structurée dans des répertoires suivant une hiérarchie. Un projet peut être créé à partir de fichiers de bathymétrie et/ou d'images de la zone d'étude.
- Permet d'accéder à un module (Baco) contenant une base de données qui inclut la majeure partie des cartes nautiques du littoral espagnol, ainsi que les bathymétries correspondantes digitalisées. A partir de cette information, le SMC génère un projet d'étude où l'information bathymétrique issue de Baco peut être combinée avec des données de bathymétrie issues d'autres sources. La bathymétrie obtenue peut être modifiée et différentes alternatives ou cas d'étude peuvent être étudiés.
- Permet également de générer des projets à partir d'images (photos aériennes, plans, cartes nautiques, etc.), à partir desquelles il est possible d'analyser les formes en plan à long terme des sites côtiers. Dans le cas où l'on dispose d'images correspondant à différentes époques, le modèle permet de réaliser une analyse des situations passée, présente et future.
- Permet de créer un projet à partir de différentes bathymétries d'un même site, obtenues à différentes époques. Comme dans le cas des images, il est possible d'étudier les situations passée et présente et de prédire la situation future selon différents scénarios de projet.
- Permet de digitaliser et d'obtenir bathymétrie et ligne de côte à partir d'une carte nautique ou d'un plan référencé de la zone.
- Permet d'accéder à un module contenant une base de données de houle visuelles et qui traite cette information pour fournir les caractéristiques de la houle dans la zone d'étude. Ce module de données de houle génère l'information nécessaire à l'exécution des modèles numériques inclus dans le système.
- Permet d'accéder à l'information de l'Atlas de Cote d'Inondation en n'importe quel point du littoral espagnol.
- A partir du SMC peuvent être exécutés les différents modèles numériques permettant de réaliser une analyse à court, moyen et long terme du système côtier considéré.

7. SYSTEMES VIDEO/WEBCAMS

*** DIPTERIS/Univ. degli Studi di Genova**

*** DISTART/Univ. degli Studi di Bologna**

Le monitoring vidéo de l'évolution des plages exerce un rôle fondamental dans chaque politique territoriale dans laquelle la bande littorale est impliquée.

Beaucoup de processus côtiers laissent des signes visibles sur la surface terrestre, qui peuvent être suivis de loin avec un système automatisé de caméras. Dans les dernières années, l'apparition de nouvelles technologies a profondément changé les méthodologies qui concernent le monitoring de l'environnement. La télésurveillance de la bande côtière a, en particulier, été intéressée par des techniques comme le télélevé, le GPS (Global Position System) et le vidéo monitoring (Holman et al, 1993). En particulier, la télésurveillance des zones côtières à l'aide d'appareils vidéo, est devenue récemment assez fréquente pour la gestion des images, grâce à la diminution des prix des systèmes de numérisation vidéo et des ordinateurs, également de puissance considérable (Ferretti et al, 2002).

Ce type de vidéo monitoring, en comparaison aux techniques traditionnelles, résulte être plus économique, étant donné que les coûts d'entretien et de main-d'œuvre sont plus bas, et il peut acquérir un grand ensemble de données à long terme, avec une haute résolution spatiale et temporelle dans des conditions de mer hostiles. Son utilisation plus générale permet de contrôler les variations des lignes de rivage, (Plant et Holman, 1997) les taux des sédiments en suspension, le rechargement artificiel de plages (<http://www.videomonitoring.com/atm>), le trafic maritime, l'usage des plages etc. Le vidéo-monitoring se révèle donc une alternative excellente aux systèmes de télédétection plus coûteux, pour l'étude de la zone côtière en considération du fait qu'il présente un soin du même ordre de grandeur que la télésurveillance avec des images satellite.

La clé de chaque technique de monitoring vidéo est l'interprétation quantitative des données vidéo acquises. Le renseignement quantitatif peut être extrait par une image si elle constitue une représentation en échelle réelle dans laquelle placer l'objet ou les objets à examiner (Archetti et al, 2004).

La motivation d'une recherche orientée et associée aux applications pratiques inclut souvent: l'identification et la quantification de l'érosion de la ligne de côte, la mise en place et la performance d'une oeuvre de défense côtière qui représentent les input de base de l'ingénierie côtière. Le principal instrument qui permet d'évaluer les phénomènes dont on vient de parler, avec des objectifs concernant la gestion de la plage, de la part des particuliers comme des organismes publics, et d'autres objectifs concernant la recherche scientifique, est sans aucun doute le monitoring continu et régulier de la côte et des phénomènes. Parmi les différents objectifs de la télésurveillance vidéo on peut rappeler:

- Étude de l'évolution côtière à moyen/long terme pour la position de plans de développement et de gestion;
- Analyse du bilan sédimentaire du littoral pour l'étude des rapports entre input fluvial et dépression *cross-shore* et *long-shore* des matériels;
- Étude de l'évolution côtière à court terme pour l'évaluation de l'impact des oeuvres maritimes et pour l'évaluation de l'efficacité des interventions;
- Détermination de l'étendue et de la qualité de la plage afin d'en optimiser les utilisations.

Les principales enquêtes qui peuvent être effectuées sont destinées à la définition et à l'évolution des modèles morphologiques qui caractérisent le littoral. Les renseignements qui peuvent être obtenus par la télésurveillance vidéo et ses potentialités sont en développement continu.

La technique de l'acquisition lointaine d'images a amplement été utilisée pour la zone côtière avec des objectifs différents, qui vont de l'étude de l'usage du territoire, à des aspects de l'environnement, jusqu'à l'élaboration de cartes topo-bathymétriques, celles qui sont le plus développées avec des techniques radar, des vidéos avec l'utilisation d'images aériennes et satellites (Aarninkhof, 2003).

En considérant les systèmes de *web-cam* disponibles, on a remarqué que le système le plus complet et universel est l'*Argus video coastal monitoring system*, développé près de l'Oregon State University par Rob Holman. La versatilité du système lui permet de se répandre dans beaucoup de pays côtiers parmi lesquels l'Angleterre, la Hollande, l'Italie, et l'Espagne (en ce qui concerne l'Europe) et la Californie, la Floride, les Hawaii, l'Oregon, etc. (pour les Etats Unis).

La recherche et le développement d'une acquisition lointaine d'images vidéo, à travers le système Argus fut expérimenté pour la première fois par des chercheurs du CIL (Coastal Imaging Lab) dans les années 80, en utilisant une caméra vidéo montée sur un trépied, dans le but d'étudier le *run-up* houleux et, en particulier, la période des flots/vagues gravitationnels, un phénomène commun à l'Oregon (Holman et al, 1984). Initialement les caméras vidéo utilisées fournissaient des images seulement en noir et blanc, et la seule élaboration produite *off-line*, était l'image moyenne (*time-exposure*). Puis furent introduits d'autres types d'élaborations, toujours des produits *off-line*: les images *variance* et les *time-stack*. La première station Argus fixe fut installée en 1992 sur la côte de l'Oregon à Agate Beach (Newport). Nombreux sites d'intérêt scientifique dans le monde sont suivis avec un système de caméras-vidéos (<http://www.planetargus.com>). ARGUS constitue le premier et la référence parmi nombreux autres systèmes qui par la suite ont été développés; nous signalons le système Erdman développé par Rusty Erdman (<http://www.videomonitoring.com>).

Le système *Argus* prévoit l'utilisation de différentes caméras-web, posées à une hauteur supérieure à 40 mètres et qui photographient la plage à des intervalles réguliers en permettant l'acquisition automatique des images du littoral. Les stations de télésurveillance vidéo sont constituées souvent par quelques caméras vidéo ou appareils numériques positionnés obliquement le long de la côte, aptes à recouvrir un champ visuel jusqu'à 180°, correspondant à une section de côte de 3 à 6 kilomètres de longueur, en fonction de la hauteur où les caméras vidéo sont installées et de la longueur centrale des lentilles.

Au système de caméras vidéo est connecté un ordinateur, placé dans les alentours de la station qui doit gérer l'acquisition des images et puis les rendre en réseau, de manière à ce que celles-ci soient ensuite immédiatement accessibles aux laboratoires d'analyses (<http://www.netcoast.nl/info/argus/argus.htm>, <http://www.coastal.er.usgs.gov/wfla/video/>).

Les reprises sont effectuées pendant les heures de lumière d'une journée par plusieurs caméras de télévision fixes, et le système avait été programmé pour élaborer différents types d'images produites *off-line*. Pendant la journée, les caméras prennent, toutes les heures, une photo par seconde pendant 10 minutes consécutives; l'image qui dérive des photographies prises par la web-caméra n'est pas orthogonale, mais elle présente une inclinaison en fonction de la hauteur d'acquisition; ce problème est facilement résolu du moment que le *software* de gestion de l'*Argus station* possède des outils aptes à la rectification de l'image (Fig. 20) (Aarninkhof et Roelvink, 1999; Holman et al, 1993).

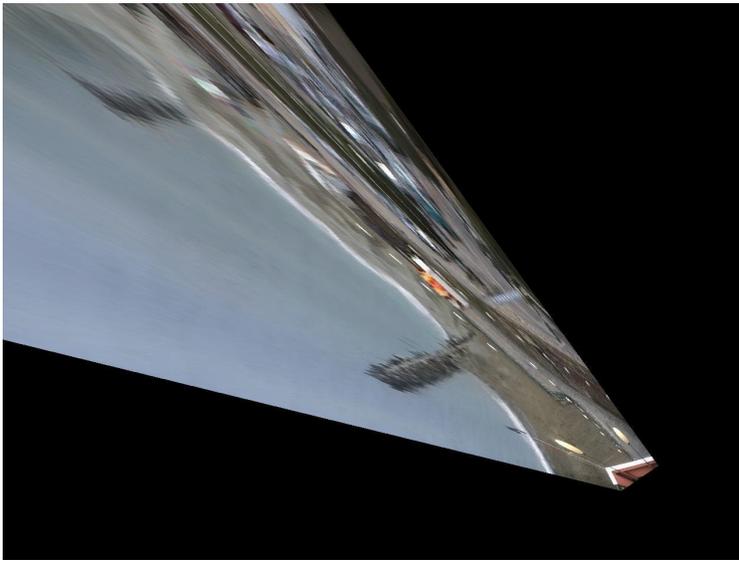


Figure 20 - Image *time-exposure* et image *time-exposure* rectifiée de Levanto, Italie

Les photographies sont emmagasinées et élaborées par l'*Argus station*, composé de la caméra-web, une plate-forme *hardware* et un *software* dédié qui rend les images élaborées. Ce système peut être aidé par des reliefs sur le terrain et les résultats permettent d'obtenir une grande quantité d'informations concernant le littoral, beaucoup plus grande par rapport à des simples enquêtes de campagne ou des photos aériennes avec une cadence mensuelle ou annuelle.

Les images

Les images sont acquises par des appareils vidéos photographiques de dimensions variables selon les typologies de l'instrument, pendant la période de lumière de chaque journée, à des intervalles d'une heure.

L'hardware est programmé pour extraire différents types d'images qui consistent en photogrammes instantanés traditionnels, *snapshot*, images statistique, *time exposure*, *day timex* et *variance* et séries historiques de l'intensité des pixels (*time-stack*), illustrées par la suite. Les prises de vue nocturnes acquises en maintenant de longs temps d'exposition nécessaires à impressionner le capteur, sont en voie d'expérimentation. Cette typologie d'images, *timex* de nuit, sera utilisée pour exécuter des solides de plage si l'excursion tidale nécessaire pour exécuter la bathymétrie intertidale, n'est pas pendant les heures de lumière d'une journée.

Snapshot

Les images *snapshot* ou *snap* représentent les images les plus simples, étant donné qu'elles consistent à des images instantanées de la plage. Les images *snapshot* (Fig. 21) sont des photographies instantanées de la zone dans laquelle l'*Argus station* est positionné; avec ces images on peut déterminer les orientations des fronts des vagues et la distance qui sépare deux crêtes consécutives. Le *snap* documente simplement l'activité du système plage, c'est-à-dire ce qui arrive au moment de l'acquisition. Il est utile par exemple pour observer les rechargements, les caractéristiques du champ de flots/vagues, mais il n'est pas utile pour obtenir des renseignements de type quantitatif. Plusieurs images *snap* sont utilisées pour élaborer d'autres typologies d'images comme *time-exposure* et les *day timex*, en absence d'images moyennes réelles et d'images *variance*.



Figure 21 - Image *snapshot* F280905-1201_01_01 du littoral de Levanto, Italie

Time-exposure

L'image qui a la majeure potentialité à fournir des renseignements de type morphologique et hydrodynamique est la *time-exposure* (*timex*). Elle est créée en faisant la moyenne de l'intensité de chaque pixel de 600 *snap*. La caméra vidéo acquiert 600 images, 1 Hz, et elle en rend une image moyenne, c'est-à-dire avec l'élimination du bruit visuel, qui est la variabilité à court terme. Les images *time-exposure* (Fig. 22) sont un nombre fixe d'images *snapshot* élaborées; elles permettent de mettre en évidence les caractéristiques qu'on ne pourrait pas remarquer avec la simple image instantanée. Elles correspondent à une superposition d'images prises pendant les 10 minutes et cette élaboration permet d'éliminer les conditions aléatoires et instantanées que la superficie de la mer peut présenter (élévation de la surface de l'eau à cause de la propagation des vagues, ligne de côte déformée à cause des jets de rivage etc.); par conséquent elles constituent une excellente base pour les analyses du trait de côte, comme pour la localisation et les analyses morphodynamiques des barres sous-marines (Alexander et Holman, 2004). De cette image ils peuvent identifier les positions d'éléments clés de la côte, comme la position de la ligne de rivage, la position des barres submergées et des *rip current*.



Figure 22 – Image *time-exposure* F280905-12_mean du littoral de Levanto, Italie

L'image *time-exposure* présente des bandes de haute intensité lumineuse claire qui se forment en conséquence du procès de moyenne temporelle, qui correspondent aux zones dans lequel les flots/vagues s'écrasent, c'est à dire sur les barres et en proximité du rivage, et donc avec la diminution de la profondeur du fond.

Lippmann et Holmann (1989) ont montré que telles bandes réfléchissent le cours de bathymétrie de la plage immergée, même si la modélisation de la position des barres de brisement peut présenter un *offset* considérable, plus de 30 m, selon le changement du niveau de marée et de la hauteur des flots incidents. Cette tendance peut être correcte de manière empirique (Van Enkevort et Ruessink, 2001) (Kingston et al, 2000). Des images *timex* redressées permettent, ainsi, d'entreprendre une analyse morphodynamique.

Les images moyennes rectifiées, en termes de coordonnées réelles, permettent d'entreprendre une analyse morphodynamique. Ce type d'analyse a été utilisé pour quantifier la variabilité spatiale et temporelle de la morphologie des barres immergées à Duck, USA (Lippmann et Holman, 1990) et à Noordwijk, Olanda (Van Enkevort et Ruessink, 2003 pour étudier le

comportement (cyclique) des barres *longshore* (Wijnberg et Holman, 1997; Alexander, 2001) et des barres en direction normale (Konicki et Holman, 2000), pour monitorer la réponse morphologique d'une baie côtière à une série limitée de situations de tempête (Morris et al, 2001).

Ce type d'image est un bon indicateur de positions des barres immergées (Lippman et Holman, 1990) de la ligne de bord, d'éléments caractéristiques comme par exemple les cuspides (Holland et Holman, 1996) les *rip-current* et les *rip channel* (Symonds et al, 1997; Ranasinghe et al, 1999, 2000).

Variance

Les images *variance* (Fig. 23) servent pour mettre en évidence les déplacements des structures immergées et de la ligne de rivage; elles représentent la variance de l'image à 10 minutes de l'observation, c'est-à-dire la variance de l'image *time-exposure*. Les images variances sont des images obtenues et utilisées par l'élaboration des mêmes séries de *snapshot* pour produire les *timex*, mais dans ce cas, à chaque pixel est associée la variance statistique des intensités lumineuses qui l'ont caractérisé au cours des 10 minutes. Dans l'équation suivante x_i représente chaque *snap* unique, μ les *timex* et N le numéro total de *snap* :

$$\sigma_i^2 = \sum_{i=1}^N (x_i - \mu)^2 / N$$

Les images variance sont utilisées pour mieux définir la position de la ligne de rivage et la zone de brisement, étant donné que l'analyse de la variance aide à distinguer les régions qui changent dans le temps de celles « statiques », en soulignant les premières comme des zones lumineuses, et les secondes comme des zones sombres. Donc, cette typologie d'image est utile pour reconnaître la position de la ligne de rivage, identifiable de la séparation entre surface lumineuse et surface sombre et l'ampleur de la plage.



Figure 23 - Image *variance* F280905-12_var du littoral de Levanto, Italie

Les différentes typologies d'images (Figure 24) ont différentes potentialités dans les objectifs proposés. Trois différentes typologies d'images sont représentées, prises au Littoral de Dante par la même caméra de télévision dans la même heure. On peut remarquer la différence entre une image instantanée (*snapshot*), une moyenne (*time-exposure*) et une relative à la variance (*variance*).



Figure 24 - Images *Snapshot*, *Time exposure* et *Variance* à Lido di Dante

Day-timex

À travers un procès de moyenne, analogue à celui employé pour la production des images moyennes, mais appliqué à l'intervalle entier d'heures de lumière d'une journée, on obtient les images *day-timex*.

Les images *day-timex* (Fig. 25) sont les images médiates du jour de référence: ces photos sont beaucoup employées pour suivre le développement de la *water-line* sur une période mensuelle ou annuelle. Sur la base des expériences de terrain et des données réperées en bibliographie, le système *Argus* a résulté être un excellent système de monitoring pour évaluer et analyser l'évolution du littoral, comme pour mettre en évidence les variations morphologiques des traits de côte étudiés, caractérisés par des plages vastes et sableuses (<http://elb.cmima.csic.es/elb>).



Figure 25 – Image *day-timex* F280905_mean du littoral de Levanto, Italie

Celles-ci constituent des images représentatives d'une journée entière, faites à partir de la moyenne (en termes d'intensité des pixels) des *snapshot* acquis à intervalles d'une heure pendant toute la période de lumière. Ils sont utiles pour relever la position des barres et des canaux de *rip* et pour identifier la position de la ligne de rivage journalière moyenne.

Time-stack

Les images *time-stack* représentent une grande innovation introduite par le système Argus dans l'étude de la zone côtière à travers les renseignements provenant des intensités des pixels. En plus des données vidéo dans le temps, les données acquises peuvent être destinées à recueillir des séries temporelles de l'intensité des pixels. Ces images sont utilisées dans une analyse qui concerne des méthodes pour évaluer et quantifier les procès hydrodynamiques en se référant aux caractéristiques du champ de flot/vague, aux vitesses des courants et aux procès de *swash*.

Fixé, sur une image de base, un vecteur de pixel, en direction *cross-shore* (ou en direction *long-shore*, la série historique peut être extraite de leur intensité lumineuse en succession rapide dans le temps, appelée *time-stack*. On obtient une ligne d'intensité répétée dans un arc de temps arbitraire, qui peut durer peu de secondes ou quelques années.

L'idée à la base de cette approche est que chaque pixel est considéré comme si c'était un instrument de vidéo monitoring positionné en situ dans ce point. Ainsi, alors que les mesures traditionnelles demandent l'installation en situ d'instruments avec un haut coût d'entretien, l'utilisation des pixels est bien plus pratique et économique. Ce type d'élaboration est utilisé pour mesurer la rapidité et la direction des flots, le *wave run-up* et l'excursion du *swash* pour monitorer la migration de la ligne de rivage, et pour calculer la bathymétrie de la zone *offshore* (<http://www.planetargus.com>).

Sur l'image *time-stack* (Fig. 26) on voit sur l'axe vertical le temps, et sur l'horizontal l'espace (*cross-shore* ou *long-shore*). Les rayures blanches indiquent le cours des brisements des flots. Pendant la période d'élaboration d'une image *time-stack* le système obtient des images à 2 Hz, pour augmenter la résolution temporelle afin de mieux suivre le cours du champ de flot et des courants. Les images ont été utilisées pour quantifier la rapidité et l'angle d'incidence des flots qui se propagent vers le rivage (Lippmann et Holman, 1991) et pour calculer la statistique des vagues qui se brisent, et les modèles de brisement des flots le long de la zone de *surf* (Lippmann et Holman, 1992).



Figure 26 - Exemple de *time-stack* relatif à un lanceur de pixel perpendiculairement disposé au bord représentable sur l'image de Littoral de Dante le 14 novembre 2004 heures 14.12 (Archetti et al, 2004)

Grâce aux signes visibles qui restent sur la surface de la mer, les *time-stacks* permettent la télésurveillance des courants *longshore* (Chickadel et Holman, 2002a; Chickadel et al, 2003, Cohen et al, 2004) et *cross-shore* (Chickadel et Holman, 2002b). *Time-stacks* représentant la zone de *swash* (Holland et Holman, 1993), ont été employés pour évaluer les caractéristiques du *wave run-up* dans une plage naturelle (Holland et al, 1995) et l'hydro et morfo-dynamique de la région de *swash* (Holland et Puleo, 2001). Les capacités du système vidéo pour l'étude de la zone de *swash* incluent, actuellement, la réalisation de cartes, bidimensionnelles, des profils de vitesse du champ de flot, obtenue par le *Particle technique Image Velocimetry* (PIV) (Puleo et al, 2000, Holland et al, 2001), qui a été utilisée en particulier pour estimer les coefficients de frottement qui se développent pendant la propagation de la vague et dans la zone de *swash* (Holland et Puleo, 2001). La quantification des procès hydrodynamiques des images vidéo se base amplement sur la visualisation des crêtes uniques des vagues et des signes laissés par les courants superficiels, qui dépendent de la résolution locale des pixels, du climat houleux dominant, et des conditions atmosphériques.

Les *time-stack* sont analysés avec des algorithmes appropriés et successivement assimilés en modèles numériques ou directement recueillis avec des essais de champ pour un système complet de prévisions des phénomènes *nearshore* (Archetti et al, 2004).

***Merging* et redressement des images**

Les caméras vidéo digitales cadrent différentes zones du site monitoré où existent des GPC (*Ground Control Points*) et des zones minimales de recouvrement qui rendent possible le processus de *merging* des images, (union des images uniques) rapportées à un même moment de reprise. Les GPC représentent les points dont les réelles coordonnées tridimensionnelles sont connues, parce qu'enregistrées à travers des méthodes de relief différent et indépendant. Le processus de *merging* consiste à faire adhérer les différentes images de façon à en obtenir une entière qui représente la zone entière en examen, en maintenant également l'effet de la perspective. Il se produit donc une représentation plane en coordonnées réelles de toute la zone cadrée par les caméras vidéo. La rectification des images *merged* est nécessaire pour pouvoir mettre sur une carte, dans un système de coordonnées réelles, les éléments morphologiques reconnaissables sur l'image. Le procédé pour le redressement des *timex* se base sur les idées de photogrammétrie, avec l'utilisation d'un système omographique pour le passage de coordonnées images aux coordonnées réelles. S'il s'agit de système d'acquisition fixe, il est possible de définir quelques-uns des modèles intrinsèques et extrinsèques. Dans le cas contraire il est difficile de définir la configuration géométrique du système d'acquisition pour chaque reprise effectuée, le redressement sera opéré avec la seule utilisation des GPC.

Les points d'appui, GPC sont distribués dans le site étudié de manière à ce qu'au moins trois soient disponibles par caméra vidéo pour la détermination de l'orientation extérieure.

Pour les images produites par les caméras vidéo dotées de trois GPC on en produit un système minimum et déterminé d'équations dans lequel les images coordonnées et réelles des points d'appui, constituent des termes connus et des modèles d'orientation externes à elle inconnus. Pour les images avec plus de trois GPC (en nombre supérieur que le minimum nécessaire), on en tire un système d'équations exubérantes dans lequel l'image coordonnée des points d'appui

est à considérer comme grandeur modérée, et qui doit être résolu à travers une technique de compensation des mesures à travers laquelle on calcule les inconnues, et on réarrange en même temps les coordonnées d'images initiales.

Potentialité du monitoring avec des *webcams*

Les renseignements contenus dans les images Argus et ses applications sont nombreuses et ont été profondément recherchées. La fiabilité, la précision et l'éclectisme du système de télésurveillance côtière vidéo a été rigoureusement documenté dans la littérature scientifique (Aarninkhof et al, 2000, 2005; Alexander et Holman, 2004; Chickadel et al, 2003; Holman et Guza, 1984; Stockdon et Holman, 2000, Holland et Holman, 1993a; Holland et Holman, 1993b; Holland et Holman, 1999; Holland et al, 2001; Holman et al, 1991; Lippmann et Holman, 1989; Lippmann et Holman, 1991; Plant et Holman, 1997, Armaroli et al, 2003).

Le but de la télésurveillance vidéo est, surtout, celui d'identifier les signes des éléments et des processus présents dans le système côtier et, successivement, de les quantifier dans l'espace et dans le temps. Comme nous avons vu dans les paragraphes précédents, les images *timex*, *day-timex* et *variance* sont des instruments utiles d'identification des éléments morphologiques ainsi que ceux hydrodynamiques.

Les *time-stack*, sont par contre utiles dans la quantification des phénomènes hydrodynamiques, du moment qu'ils représentent la différente intensité lumineuse des pixels au passage du mouvement houleux et des courants.

Par les techniques d'analyse d'image, il est possible de déduire les renseignements suivants avec une cadence hebdomadaire:

- la position, les mouvements et la morphologie des barres immergées (hauteur, longueur, largeur et profondeur, Davidson et al, 1997 ; Lipmann et Holman 1989);
- la position de la ligne de brisement des flots et par conséquent l'ampleur de la plage et ses changements (Madsen et Plant, 2001 ; Turner et al, 2000);
- le bathymétrie de la zone intertidale (Aarninkhof et al, 2003, Aarninkhof et al, 1999);
- l'hydrodynamique des flots et des courants superficiels, la période et l'angle d'incidence des vagues, l'intensité des courants le long des côtes, et des *rip current* (Chickadel et al, 2003).

Ligne de Rivage

Dans la dernière décennie l'usage de l'acquisition lointaine d'images par des techniques de télésurveillance vidéo a intéressé avec grand intérêt le milieu littoral et les processus côtiers.

Une des applications les plus intéressantes concerne l'identification de la ligne de bord des images *time-exposure* et la détermination suivante de bathymétrie de la plage intertidale. Pour une évaluation de la variation de la ligne de bord, il est nécessaire que les images soient calibrées et rectifiées (Holland et al, 1997).

Comme déjà mentionné, le procès de rectification d'une image reverse la même image sur un plan horizontal de manière telle qu'elle puisse être mesurée directement sur l'image.

Bathymétrie Intertidale

Les modèles les plus communs pour identifier la bathymétrie de la plage intertidale par images vidéo se basent sur deux différents passages. Tout d'abord la position horizontale de la ligne de rivage est identifiée, par des images *timex* redressées, et ensuite on en estime l'élévation verticale associée, à partir des conditions hydrodynamiques présentes.

Tel procédé produit un contour *longshore* de l'élévation de la plage intertidale. Mettant sur une carte une série de tels contours pendant un cycle de marée, il est possible de construire le cours tridimensionnel de la surface de la plage intertidale entre deux contours correspondants à la ligne de rivage de la basse marée et à celle de la haute marée.

Cette approche assume que des changements morphologiques à échelles spatiales de 10 à 100 mètres soient minimes pendant la période de temps d'échantillonnage, en général de 6 à 10 heures.

Un des principaux problèmes a sans aucun doute été celui de réussir à développer un modèle fiable pour la détermination de la ligne de bord.

Les premiers modèles pour la détermination de la ligne de bord (Plant et Holman, 1997; Janssen, 1997; Davidson et al, 1997) ont été développés quand encore les stations Argus

acquerraient seulement des images en noir et blanc. Ces modèles visaient à identifier un cours caractéristique dans la distribution des intensités des pixels échantillonnés dans la zone de *swash*. Le modèle « SLIM », (Plant et Holman, 1997; Madsen et Plant, 2001), basé vraiment sur telle approche, il considère la ligne de meilleure intensité de brisement en proximité du bord (*ShoreLine Intensity Maximum*, SLIM), comment bonne approximation de la position de la ligne de bord. Tel modèle a montré de fonctionner bien en présence d'une bien prononcé SLIM, donc, appliqué à la plage réfléchie soit en conditions de bas que de haut régime houleux. En plages dissipative, par contre, où pour la présence de barres immergées et de basse pente du profil de plage, un SLIM proportionné ne se forme pas, tel modèle ne peut pas être appliqué. Le problème d'un SLIM peu marqué et par conséquent l'absence d'un contraste net entre eau et plage, qui empêchent le bon fonctionnement du modèle SLIM, il a été dépassé, après 1997, avec le développement d'une seconde génération de modèles pour la détermination de la ligne de bord, basés sur des images couleurs.

Le modèle PIC, Pixel Intensity Clustering (Aarninkhof et Roelvink, 1999), adopte une technique de regroupement de pixels pour séparer les mouillés des secs, le modèle ANN (*Artificial Neural Network*) (Kingston et al, 2000), applique l'approche du *neural network* pour faire la distinction entre pixels mouillés et secs, et, finalement, le modèle CCD (*Colour Channel Divergence*) (Turner et al, 2000), fait la distinction entre les pixels mouillés et secs selon la divergence des bandes individuelles de couleurs rouge, bleu et vert.

Comparaison entre les modèles et conclusions

La comparaison concerne la consistance des résultats obtenus par chaque méthode, sur la base d'environ 40 images vidéo, sélectionnées par chaque site, concernant un ample *range* de conditions hydrodynamiques, morphologiques et atmosphériques,.

La méthodologie adoptée pour la comparaison entre les résultats du positionnement de la ligne de bord et de la détermination de l'élévation associée, peut être consultée en Aarninkhof et al (2003).

Les techniques pour la détermination de la ligne de rive opèrent dans un *range* d'applicabilité qui dépend de:

- *Conditions atmosphériques*: Changements dans les conditions atmosphériques peuvent influencer vivement les contrastes de couleur dans les images vidéo. Pour garantir un

range ample d'applicabilité, les modèles qui se basent sur la détermination à travers les différences de couleurs, devraient être aptes à affronter des conditions différentes. On obtient cela en calibrant de tels modèles en relation à différentes situations météorologiques.

- *Régimes hydrodynamiques en proximité du bord*: Toutes les techniques sont sensibles aux changements dans les conditions de *swash* et de brisement au bord, chose qui arrive de manière différente pour le SLIM par rapport aux modèles qui se basent sur la couleur. Le SLIM, en effet, compte sur la présence d'une ligne bien prononcée de brisement sur la rive, et améliore ses performances pour des valeurs croissantes de ξ_{shore} . En absence d'un régime houleux capable de produire une ligne bien évidente de brisement au bord, le modèle SLIM, n'est pas apte à rendre la position de la ligne de bord. En ce qui concerne les autres modèles, ils tendent à localiser la ligne de bord d'autant plus vers la terre, que la zone de *swash* tend davantage à s'élargir.
- *Caractéristiques morphodynamiques du site examiné*: Tous les modèles sont applicables aux plages qui présentent un cours *longshore* uniforme. Les modèles ANN et PIC sont seulement aptes à gérer des plages caractérisées par des éléments non uniformes comme des structures dissipatives, par exemple des barres.

Les quatre modèles semblent fournir des lignes de bord bien corrélées entre elles, toutefois distantes l'une de l'autre par un certain offset. Le modèle SLIM, parmi tous, détermine une ligne de bord particulièrement éloignée des autres, plutôt vers la mer, et en général se révèle le pire de tous, probablement pour la haute sensibilité aux variations des conditions hydrodynamiques. Les autres techniques donnent des résultats plutôt semblables entre eux; le PIC positionne plutôt la ligne de bord vers la terre.

Par rapport aux soins, des calculs, omis ici, le modèle ANN se révèle être le meilleur sur le *range* entier des conditions. En ce qui concerne l'estimation de l'élévation de la ligne de bord, toutes les méthodes en tirent un bénéfice en incluant dans la formulation le *wave set-up*, ainsi que le *swash*.

Un ample programme de recherches mené par l'université de Bologne a commencé avec le projet international CoastView, financé dans le Programme Cadre V de l'UE terminé en avril 2005, dans le but d'expérimenter un système de télésurveillance des sites côtiers avec des techniques vidéos ([http:// www.thecoastviewproject.org](http://www.thecoastviewproject.org)).

Actuellement, dans le projet OpTIMAL, on s'occupera de l'application et du développement des systèmes alternatifs au système ARGUS, en Liguria, Emilia-Romagna, Creta et Macédoine de l'Est. En considérant les informations acquises, le projet essayera de délimiter la structure des plateformes *hardware* et/ou de *softwares* qui résulteraient être aptes à être efficacement employées pour l'étude de l'équilibre du littoral et qui permettraient d'obtenir des données analogues à l'*Argus station*, tant d'un point de vue qualitatif que quantitatif. Ces systèmes alternatifs sont intéressants du point de vue des coûts et de l'indépendance de la gestion du système. Des activités de campagne avec des mesures morphométriques de la plage et des échantillonnages des sédiments, tant dans la plage émergée, le long de la ligne de rivage, que dans la plage sous-marine, permettront de confronter, une fois les images élaborées, les données obtenues et d'en évaluer l'effective crédibilité.

En particulier, en Emilia-Romagna on testera un système alternatif, moins coûteux, où la station vidéo a été installée sur le toit d'un édifice devant la plage, étant composée de deux systèmes vidéo: un, regardant vers le Nord, et avec une caméra de haute résolution Super HAD CCD 1/2" avec zoom 3,6-18 mm, et un autre, regardant vers le sud, avec deux caméras fixes avec 8 megapixels (Olympus SP500UZ - résolution maximum 2816 X 2112), où une prendra des images *snapshot* pendant la journée et des images *long time exposure* pendant la nuit; l'autre, couverte avec un filtre adéquat, prendra des long time-exposures (15 s) pendant la journée. Le software permettra à un opérateur à distance de déterminer la collection des images d'un type particulier à des intervalles de temps désirés. Le contrôleur basé sur un PC contrôlera des caméras, et la collection des images créera les images moyennes (en réduisant la transmission des données) et transmettra les résultats à un centre de recueil de données. Il est en phase d'expérimentation l'acquisition d'une moyenne d'images réelles, créés en utilisant une nouvelle approche. La moyenne d'images sera obtenue en utilisant un filtre neutre et un long temps d'exposition. Avec un filtre approprié, une exposition d'au-delà 16 secondes, une image peut être reprise, étant réellement la moyenne des images pendant cette période (16 secondes). Le système mettra ensemble une série de ces images, en faisant ensuite ultérieurement la moyenne, par exemple, si chaque image représente 16 secondes de moyenne, en 10 minutes en faisant ultérieurement la moyenne de ces images nous aurions une image qui représente 160 secondes (Conley D. et Erdman R., 2006).

En Liguria, on a effectivement remarqué que le système *Argus* est excessivement complexe pour un littoral qui présente les caractéristiques morphodynamiques des plages de la Liguria; par conséquent l'application d'un système analogue résulterait surdimensionnée (et coûteuse) pour les nécessités de monitoring des petites plages, caractérisées par un développement réduit à niveau longitudinal du moment qu'elles sont comprimées entre des promontoires. En considérant la spécificité de la côte, on a examiné la possibilité de développer une méthode de monitoring simplifiée qui utilise un nombre de caméras-web inférieur par rapport aux systèmes pris en considération (*Argus*), du moment qu'on n'a pas la nécessité d'avoir une vision à 180° des traits de côte à analyser à cause de la présence des falaises qui souvent encadrent les plages en empêchant leur développement latéral.

Sur la base des applications développées pour l'élaboration et l'emmagasinage des images (Holland et al, 1997; Holman et al, 2003), il a été possible d'étudier et réélaborer des images dans le but de poser les bases pour la réalisation d'un *software* approprié, qui puisse répondre aux exigences de monitoring dérivants de la particularité géomorphologique de la côte ligurienne, en maintenant la qualité et la validité des systèmes déjà réalisés et actuellement employés; cette plate-forme résulterait aussi compétitive soit pour ses caractéristiques que pour les coûts de réalisation et gestion. A ce propos, on a prévu l'installation d'une centrale constituée par deux caméras fixes, qui acquièrent et transmettent les images de la plage. De façon mécanique, sont prises 4 photos chaque minute pendant 4 minutes, 3 fois par jour, à 8, à 12 et à 16 heures et les photos obtenues sont ensuite géoréférencées et filtrées pour éliminer les objets en mouvement et successivement rectifiées pour obtenir une vue aérienne. Les photos instantanées (*snapshot*), que nous avons prises et que nous avons emmagasinées, permettront de réaliser des études concernant l'évaluation de l'orientation des fronts de vagues.

REFERENCES

- Aarninkhof S.G.J. (2003) - *Nearshore bathymetry derived from video imagery*. DUP Science Ed., The Netherlands. 191 pp.
- Aarninkhof S.G.J. et Holman R.A. (1999) - *Argus video-based monitoring of the nearshore zone: A tool for both nearshore science and coastal zone management*. Backscatter, The magazine of aquatic remote sensing, 10 (2).
- Aarninkhof S.G.J. et Roelvink J.A. (1999) - *Argus based monitoring of intertidal beach morphodynamics*. Proceeding of coastal sediment, ASCE. pp. 2429-2444.
- Aarninkhof S.G.J. (2003) - *Nearshore Bathymetry derived from Video Imagery*, PhD Thesis, Delft University of Technology, Delft, The Netherlands. 175 pp.
- Aarninkhof S.G.J., Caljouw M. et Stive M.J.F. (2000) - *Video-Based, quantitative assessment of intertidal beach variability*. Proc. 27th International Conference of Coastal Engineering, Vol. IV. pp. 3291-3304
- Aarninkhof S.G.J., Ruessink B.G. and Roelvink J.A. (2005), *Nearshore subtidal bathymetry from time exposure images*. Journal of Geophysical Research, Vol. 110, C06011, doi: 10.1029/2004JC002791.
- Aarninkhof S.G.J., Turner I.L., Dronkers T.D.T., Caljouw M. et Nipius L. (2003) - *A video based technique for mapping intertidal beach bathymetry*. Coastal Engineering, 49: 275-289.
- Abbott V. (2001) - *The Surveyor and the Coastal Zone*. The Hydrographic Journal, 99: 32 -39.
- Adam J., Augath W. et Boucher C. (2000) - *The European Reference System coming on age*. Proc. of International Association of Geodesy Symposia, IAG Scientific Assembly. Springer. V121. pp. 47-54.
- Adams R. et Bischof L. (1994) – *Seeded Region Growing*. IEEE Transaction on Pattern Analysis and Machine Intelligence, June 1994. 16 (6): 641-647.
- Alexander P. S. (2001) - *Quantitative analysis of nearshore morphological variability based on video imaging*. MSc thesis, Oregon State University. pp. 240.
- Alexander P.S. et Holman R.A. (2004) - *Quantification of nearshore morphology based on video imaging*. Marine Geology, 208: 101-111.
- Allan J.C., Komar P.D. et Priest G.R. (2003) - *Shoreline variability on the high-energy Oregon coast and its usefulness in erosion-hazard assessment*. Journal of Coastal Research, SI 38: 83-105.

- Aly H. M., Klein G. A. et Giardino R. J. (2005) - *SAR Interferometry as a Tool for Monitoring Coastal Changes in the Nile River Delta of Egypt*. Workshop on Radar Investigations. No. 6036.
- Aminti P. et Aminti P.L. (2002) - *Impiego della scansione laser nel rilievo dei volumi emersi delle spiagge e delle scogliere – note preliminari*. Boll. SIFET, 4/02: 62-75.
- Anfuso G. et Gracia F.J. (2005) - *Morphodynamic Characteristics and Short-Term Evolution of a Coastal Sector in SW Spain: Implications for Coastal Erosion Management*. Journal of Coastal Research, 21 (6): 1139–1153.
- Anfuso G., Benavente J. et Gracia F.J. (2001) - *Morphodynamic responses of nourished beaches in SW Spain*. Journal of Coastal Conservation, 7 (1): 71-80.
- Anfuso G., Martínez Del Pozo J.A., Gracia F.J. et López-Aguayo F. (2003) - *Long-shore distribution of morphodynamic beach states along an apparently homogeneous coast in SW Spain*. Journal of Coastal Conservation, 9: 49-56.
- Anima R. J., Eittreim S. L., Edwards B. D. et Stevenson A. J. (2002). *Nearshore morphology and late Quaternary geologic framework of the northern Monterey Bay Marine Sanctuary, California*. Marine Geology, 181 (1-3): 35-54.
- Archetti R. et Lamberti A. (2004) - *Monitoraggio idrodinamico di una spiaggia protetta. confronto tra misure ed elaborazioni di immagini*. XXIX Convegno nazionale di Idraulica e Costruzioni idrauliche. Trento, 7-10 settembre 2004. pp. 663 -670.
- Armaroli C., Ciavola, P., Balouin, Y. et Gatti, M. (2004) - *An integrated study of shoreline variability using GIS and ARGUS techniques*. Proceeding of the International Coastal Symposium. Journal of Coastal Research, SI 39: 34 – 52.
- Aubrey D.G. (1979) - *Seasonal patterns of onshore/offshore sediment movement*. Journal of Geophysical Research, 84: 6347-6354.
- Bagli S. et Soille P. (2004) – *Automatic delineation of shoreline and lake boundaries from Landsat satellite images*. Proceedings of initial ECO-IMAGINE GI and GIS for Integrated Coastal Management, Seville 13-15 May 2004.
- Bailard J.A. (1981) - *An energetics total load model for a plane sloping beach*. J.Geophys.Res., 86(C11): 10938-19854.
- Baily B. et Nowell D. (1996) - *Techniques for monitoring coastal change: a review and case study*. Ocean & Coastal Management, 32 (2): 85-95.
- Baily B., Collier P., Farres P., Inkpen R. et Pearson A. (2003) - *Comparative assessment of analytical and digital photogrammetric methods in the construction of DEMs of geomorphological forms*. Earth Surface Processes and Landforms, 28(3): 307-320.

- Baiocchi V., Barbarella M., Crespi M., Sacerdote F. et Sucure J.J. (2000) - *Progetto di una rete di inquadramento GPS per la realizzazione di cartografia a grande scala in Angola*. Atti 4^a Conf. ASITA.Genova. pp. 83-88.
- Baker T.F., Woodworth P.L., Blewitt G., Boucher C. et Woppelmann G. (1997) - *A European network for sea level and coastal land level monitoring*. Journal of Marine Systems, 13(1): 163-171.
- Bakker W.T. (1968) - *The dynamics of a coast with a groin system*. Proceedings 11th Coastal Engineering Conference, ASCE. pp. 492– 517.
- Baldwin W.E., Morton R.A., Denny J.F., Dadisman S.V., Schwab W.C., Gayes P.T. et Driscoll N.W. (2004) - *Maps showing the stratigraphic framework of South Carolina's Long Bay from Little River to Winyah Bay*. U.S. Geological Survey Open-File Report: 2004-1013.
- Banchini G., Gentili G., Lombardo G.F. (1999) - *L'ortofoto digitale a colori: un nuovo strumento per la gestione del territorio*. Boll. SIFET, 1-2/99: 45-54.
- Barzaghi R., Betti B., Borghi A. et Tornatore, V. (2002) - *The Italian quasi –geoid ITALGEO99*. Boll. di Geodesia e Scienze Affini (IGM), 1/02: 33-51.
- Basco D.R. (1999) - *Overview of beach engineering in the United States of America*. Final Report, Old Dominion University.
- Battiau-Queney Y., Billet J.F., Chaverot S., Lanoy-Ratel P. (2003) - *Recent shoreline mobility and geomorphologic evolution of macrotidal sandy beaches in the north of France*. Marine Geology, 194: 31- 45
- Battjes J.A. (2006) - *Developments in coastal engineering research*. Coastal Engineering, 53: 121 – 132.
- Beachmed (2004 a) - *Le projet Beachmed: Récupération environnementale et entretien des littoraux en érosion avec l'utilisation des depots sablonneux marins - 1^{er} cahier technique (phase A)*. 208 pp.
- Beachmed (2004 b) - *Le projet Beachmed: Récupération environnementale et entretien des littoraux en érosion avec l'utilisation des depots sablonneux marins – 2^{ème} cahier technique (phase B)*. 208 pp.
- Beachmed (2004 c) - *Le projet Beachmed: Récupération environnementale et entretien des littoraux en érosion avec l'utilisation des depots sablonneux marins – 3^{ème} cahier technique (phase C)*. 324 pp.
- Beets D.J., Van Der Valk L. et Stive M.J.F. (1992) - *Holocene evolution of the coast of Holland*. Marine Geology, 103: 423– 443.

- Benassai E., Gentilomo M., Ragone A., Setaro F. et Tomassichio U. (1997) - *Littoral restoration by means of protected beach nourishment recent Italian works*. PIANC Bulletin, 94: 43-55.
- Bergamasco A. et Pesaresi M. (1997) - *Elaborazione di dati Landsat-TM per lo studio dell'evoluzione della linea di spiaggia: il litorale del Cavallino (Venezia)*. Rivista Italiana di Telerilevamento, 9: 35-42.
- Bernabeu A.M., Medina R. et Vidal C. (2002) - *An equilibrium profile model for tidal Environments*. Scientia Marina, 66 (4): 325-335.
- Berné S. Vagner P., Guichard F., Lericolais G., Liu Z., Trentesaux A., Yin P. et Yi H. (2002) - *Pleistocene forced regressions and tidal sand ridges in the East China Sea*. Marine Geology, 188 (3-4): 293-315.
- Beutler M., Rothacherl S., Schaer T.A., Springer J. et Kouba R.E. (1999) - *The international GPS Service (IGS) an interdisciplinary Service in Support of Earth Sciences*. Advances in Space Research, 23(4): 631-653.
- Bevis M., Wolfgang S. et Merrifield M. (2002) - *Technical Issues and Recommendations Related to the Installation of Continuous GPS Stations at Tide Gauges*. Marine Geodesy, 25(1): 87-99.
- Biagi L., Crespi M., Manzino A. M. et Sansò F. (2005) - *I servizi di posizionamento basati su reti di stazioni permanenti GNSS*. Atti 9^a conf. ASITA. Catania.
- Bianco A. et Carella P. (2000) - *Verifica della precisione del sistema GPS RTK OTF in un rilevamento lungo la costa della Puglia*. Atti 4^a conf. ASITA. Genova. pp. 463-464.
- Biasini A. (1995) - *Caratteristiche e impieghi delle fotografie aeree da alta quota dell'Italia*. Atti del 4 Workshop del Progetto Strategico C.N.R. "Clima, ambiente e territorio nel Mezzogiorno", Potenza 26-29/11/1990. pp. 461-477.
- Biegel E.J. et Spanhoff R. (1999) - *Large and small scale coastal behaviour and the effect of the shoreface nourishment at Terschelling, the Netherlands*. Final Report prepared for SAFE project National Institute for Coastal and Marine Management/RIKZ. The Hague, Netherlands.
- Binaghi E., Brivio P.A., Rampini A., Grezzi P. et Licenzi M. (1999) - *Classificazione dei pixel misti mediante un modello neuro-fuzzy*. Rivista Italiana di Telerilevamento, 16: 41-50.
- Birkemeier W.A. (1984) - *A user's guide to ISRP: The interactive survey reduction -program*. Instruction Report CERC-84-1, U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station, Coastal Engineering Research Center, Vicksburg, MS.
- Birkemeier W.A. (1985) - *Field data on seaward limit of profile change*. Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering. 111(3): 598-602.
- Birkemeier W.A. (1984) - *Time scales of nearshore profile change*. Proceedings of the 19th International Conference on Coastal Engineering (ASCE). pp. 1507-1521.

- Bitelli G. et Unguendoli M. (1996) - *Alcune indicazioni pratiche per l'esecuzione di reti GPS*. Boll. SIFET, 1/96: 61-80.
- Blondel P.H. et Murton B.J. (1997) - Handbook of seafloor sonar imagery. PRAXIS-Wiley and Sons Ed., Chichester. 314 pp.
- Blott S.J. et Pye K. (2004) - *Morphological and sedimentological changes on an artificially nourished beach, Lincolnshire, UK*. Journal of Coastal Research, 20 (1): 214-233.
- Bo G., Dellepiane S. et De Laurentis R., (2001) - *Coastline extraction in remote sensed images means of texture feature analysis*. Geoscience and Remote Sensing Symposium, IGARSS '01_2001 IEEE International 9-13 July 2002. Vol. 3. pp. 1493-1495.
- Boak E.H. et Turner I.L. (2005) - *Shoreline definition and detection: a review*. Journal of Coastal Research, 21 (4): 688-703.
- Boccardo P., Borgogno Mondino E. et Tomolo F.G. (2005) - *Correzione geometrica di immagini satellitari ad alta risoluzione: metodi non parametrici*. Rivista Italiana di Telerilevamento, 32: 3-17.
- Bodge K.R. (1992) - *Representing Equilibrium Beach Profiles with an Exponential Expression*. Journal of Coastal Research, 8(1): 47-55.
- Bokuniewicz H.J. (1998) - *Monitoring beaches: conditions at the village of East Hampton, NY*. Shore and Beach, 66(4): 12-17.
- Bossak B.H., Morton R.A. et Sallenger A.H. Jr. (2005) - A GIS-Based Information System for Predicting Impacts from Coastal Storms—The Coastal Impact Assessment Tool (CIAT), Version 1.0, User's Manual. U.S. Geological Survey (USGS), Report 2005-1260. pp. 1-28.
- Boucher C. et Altamimi Z. (2001) - Specifications for reference frame fixing in the analysis of a EUREF GPS campaign. <http://lareg.ensg.ign.fr/EUREF>
- Boyer J., Duvail C., Le Strat P., Gensous B. et Tesson M. (2005) - *High resolution stratigraphy and evolution of the Rhone delta plain during Postglacial time, from subsurface drilling data bank*. Marine Geology, 222-223 (1-4): 267-298.
- Bradbury A.P., McFarland S., Horne J. et Eastick C. (2002) - *Development of a strategic coastal monitoring programme for southeast England*. Proceedings International Coastal Engineering Conf. Cardiff. ASCE. pp. 216-222.
- Bradbury A.P., McFarland S., Beck R. et Curtis B. (2001) - *Strategic monitoring of the coastal zone towards a regional approach*. Proceedings Conference of River and Coastal Engineers. DEFRA. pp. 789-797.

- Brasington J., Rumsby B.T. et McVey R.A. (2000) - *Monitoring and modelling morphological change in a braided gravel-bed river using high resolution GPS-based survey*. *Earth Surface Processes and Landforms*, 25(9): 973-990.
- Bresci D. et al. (2005) - *Studio geomorfologico delle dune costiere di Marina di Cecina (Toscana) con rilievi Lidar da aereo*. *Studi Costieri*, 11: 17-30.
- Brock J.C., Wright C.W., Sallenger A.H., Krabill W.B. et Swift R.N. (2002) - *Basis and methods of NASA airborne topographic mapper lidar surveys for coastal studies*. *Journal of Coastal Research*, 18: 1-13.
- Broker I. (1995) - *Coastal area modeling*. MAST 6-Final Workshop, Gdansk. pp. 2/86 – 2/90.
- Broker I., Johnson H.K., Zyserman J.A., Ronberg J.K., Pedersen C., Deigaard R. et Fredose J. (1995) - *Coastal profile and coastal area morphodynamic modeling*. MAST 6-Final Workshop. Gdansk. pp. 7-12
- Browder A.E. et Dean R.G. (2000) - *Monitoring and comparison to predictive models of the Perdido Key beach nourishment project, Florida, USA*. *Coastal Engineering*, 39: 173–191.
- Bruun P. (1954) - *Coastal erosion and development of beach profiles*. U.S. Army Engineer, Beach erosion Board, Technical Memorandum n° 44.
- Bruun P. (1986) - *Sedimentary balances (land and sea) with special reference to the icelandic south coast from Torlaks-Ho'fn to Dyrholacy. River nourishment of shores-practical analogies on artificial nourishment*. *Coastal Engineering* 10(2): 193- 210.
- Bruun P. (1988) - *Profile nourishment: its background and economic advantages*. *Journal of Coastal Research*, 4(2): 219- 228.
- Buckley S. et Mills J. (2000) - *GPS and the wheel – how integrating the world's greatest invention is helping to monitor coastal erosion*. *Surveying World*, 9(1): 41.
- Buckley S.J., Mills J.P., Clarke P.J. et Edwards S.J. (2002) - *Sinergy of GPS INSAR and Photogrammetry for coastal zone monitoring*. ISPRS Commission IV.
- Burningham H. et Cooper J.A.G. (2005) - *Morphology and historical evolution of north-east Atlantic coastal deposits: the west Donegal estuaries*. *Journal of Coastal Research*, 41:148-59.
- Burningham H. et French J. R. (2006) - *Morphodynamic behaviour of a mixed sand-gravel ebb-tidal delta: Deben estuary, Suffolk, UK*. *Marine Geology*, 225 (1-4): 23-44.
- Byrnes M.R., Crowell M. et Fowler C. (2003) - *Shoreline Mapping and change analysis: technical considerations and management implications*. Preface. *Journal of Coastal Research*, SI, 38: 1-4.

- Canada Centre for Remote Sensing (2006) - Satellite remote sensing to map the dynamics of the Canadian Beaufort Sea coastline (1973-1999). http://www.ccrs.nrcan.gc.ca/radar/marine/beaufort_e.php?p=1
- Capobiano M., Hanson H., Larson M., Steetzel H.J., Stive M., Chatelus Y., Hamm L., Aarinkhof S. et Karambas T. (2002) - *Nourishment design and evaluation: applicability of model concepts*. *Coast Eng.*, 47: 113-135.
- Capra A., Costantino D. et Todaro S. (2003) - *La georeferenziazione delle immagini cartografiche e telerilevate*. Atti 7^a conf. ASITA. Verona. pp. 597-602.
- Caprioli M., Scognamiglio A. et Tarantino E. (2002) - *Utilizzo della tecnologia GPS per l'ortorettifica dei dati IKONOS*. Atti 6^a conf. ASITA. Perugia. pp. 637-642.
- Caprioli M., Scognamiglio A., Strisciuglio G. et Tarantino E. (2003) - *Verifica dell'accuratezza nella generazione di ortoimmagini da dati satellitari Quickbird*. Atti 7^a conf. ASITA. Verona. pp. 613-618.
- Carli S., Cipriani L.E., Bresci D., Danese C., Iannotta P., Pranzini E., Rossi L., Wetzel L. (2004) - *Il Piano Regionale di gestione integrata della costa ai fini del riassetto idrogeologico*. In: L.E. Cipriani et C. Regoli (Eds.) *Tecniche di monitoraggio dell'evoluzione delle spiagge*. Regione Toscana Ed. Edifir, Firenze. pp 125-165.
- Casella V. (1999) - *Potenzialità del laser scanning per la conoscenza del territorio*. *Boll. SIFET*, 1/99: 87-96.
- Casella V. (2000) - *Studio sperimentale della precisione plano-altimetrica del laser scannino*. Atti 4^a conf. ASITA. Genova. pp. 543-552.
- Casella V. et Galetto R. (1998) - *Tecniche innovative per il rilevamento terrestre, aereo e da satellite*. Atti 2^a conf. ASITA. Bolzano. pp. 33-53.
- Casella V., Galetto R., Spalla A. et Zampori B. (2001) - *Estrazione del DTM di precisione dell'argine di un fiume: fotogrammetria analitica, fotogrammetria digitale e laser scanning a confronto*. *Boll. SIFET*, 2/01: 193-211.
- CERC (2002) - *Coastal Engineering Manual*. Washington, D.C.: U.S. Army Corps of Engineers, Coastal Engineering Research Center.
- Chadwick A.J. (1989) - *Field measurements and numerical model verification of coastal shingle transport*. BHRA, The Fluid Engineering Centre, UK. pp. 381-402.
- Chadwick J., Dorsch S., Glenn N., Thackraya G. et Shilling K. (2005) - *Application of multi-temporal high-resolution imagery and GPS in a study of the motion of a canyon rim landslide*. *ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing*, 59: 212- 221.

- Chalion B., Pechon Ph. et Coeffe Y. (1985) - *Hydraulic studies of the bed evolution of the River Canche estuarine and of the Dunkirk harbour extensions*. Conf. Num. and Hydr. Mod. Of Ports and Harbours. Birminnham. BHRA, Bedford. pp. 51-64.
- Charlton M.F., Large A. et Fuller I. (2003) - *Application of airborne LIDAR in river environments: the river coquet, UK*. Earth Surface Processes and Landforms, 28(3): 299-306.
- Chaumillon E., Gillet H., Weber N. et Tesson M. (2002) - *Évolution temporelle et architecture interne d'un banc sableux estuarien: la Longe de Boyard (littoral atlantique, France)*. Comptes Rendus Geosciences, 334 (2): 119-126.
- Chen L. C., Rau J.Y. (1998) - *Detection of shoreline changes for tideland areas using multi-temporal satellite images*. International Journal of Remote Sensing, 19 (17): 3383-3397.
- Cheser T.J. et Miles G.V. (1992) - *The concept of single representative wave for use in numerical models for long-term sediment transport predictions*. 2nd Int. Conf. on Hydr. and Env. Mod of Coastal, Est. and River Waters. Bradford. Ashgate. Brookfield. VT. pp. 371-380.
- Chickadel C. et Holman R. A. (2002a) *Measuring longshore current with video techniques*. Eos Trans. AGU, 82(47), Fall Meet. Suppl.
- Chickadel C. and Holman R. A. (2002b) *Optical measurements of low frequency cross-shore flows*. Eos Trans. AGU, 83(47), Fall Meet. Suppl, p. F717.
- Chickadel C.C., Holman R.A. et Freilich M. (2003) - *An optical technique for the measurement of longshore currents*. J. Geophys. Res., 108 (C11): 3364.
- Chiocci F.L. et La Monica G.B. (2003) - *Individuazione e caratterizzazione dei depositi sabbiosi presenti sulla piattaforma continentale della regione Lazio e valutazione di un loro utilizzo ai fini del ripascimento artificiale dei litorali in erosione. Rapporto finale della seconda fase, Vol. 1, 2, 3 e 4, Università degli Studi di Roma "La Sapienza" Dipartimento di Scienze della Terra, Regione Lazio Assessorato Ambiente e Protezione Civile*.
- CIL (2006) - Coastal imagin Lab. Oregon State University. <http://cil-www.oce.orst.edu/>
- Cina A. et Piras M. (2004) - *Aggiornamento della cartografia con tecniche integrate GPS a basso costo e immagini ad alta risoluzione*. Rivista Italiana di Telerilevamento, 29.
- Cipriani L.E., Pelliccia F. et Pranzini E. (1999) - *Beach nourishment with nearshore sediments in a highly protected coast*. "MEDCOAST '99", Antalya, Turchia. 9-13 nov. 1999, pp. 1579-1590.
- CIRIA (1996 a) - *Beach Management Manual*. In: J.D. Simm (Eds) Construction Industry Research and Information Association. Report 153. London, United Kingdom. pp. 448.

- CIRIA (1996 b) - *Beach recharges material-demand and resources*. In: J.D. Simm (Eds) Construction Industry Research and Information Association, Report 154, London, United Kingdom, pp. 174.
- Clayton T.D. (1989) - *Artificial beach replenishment on the U.S. Pacific Shore: a brief overview*. Proceedings of Coastal Zone 1989. ASCE. Charleston, U.S.A. pp. 2033- 2045.
- CNIPA. (2006) - Specifiche tecniche per il raffittimento della rete fondamentale IGM95. www.cnipa.gov.it.
- Cohen A.B., Aarninkhof, S.G.J., Chickadel, C. et Battjes, J.A. (2004) - *Video-derived observations of alongshore currents*. ICCE 2004, ASCE. Vol 2. pp. 1468 – 1479.
- Collier P., Fontana D. et Pearson A. (1995) – *GIS mapping of Langstone Harbour for an integrated ecological and archaeological study*. Proceeding of International Symposium on GIS and Computer Mapping for Coastal Zone Management. Ed. R. Furness. pp. 315-327
- Conley D. et Erdman R. (2006) - Monitoraggio tramite web-cam del litorale da Sestri L. a Lavagna. Bollettino 34 AIOM. Aprile 2006. Ed. Technital. Verona. pp. 5 -11.
- Cowell P.J., Roy P.S. et Jones R.A. (1995) - *Simulation of large-scale coastal change using a morphological behaviour model*. Marine Geology, 126: 45-61.
- Crowell M., Leatherman S.P. et Buckley M.K. (1991) – *Hystorical shoreline change: error analysis and mapping accuracy*. Journal of Coastal Research, 7 (3): 839-852.
- CUR (1987) - Manual on Artificial Beach Nourishment. Recommendation. Report 130. Centre for Civil Research Codes and Specifications. Rijkswaterstaat/Delft Hydraulics. The Netherlands. 1995 pp.
- CUR (1997) - Beach nourishments and and shore parallel structures. Report 97-2. Centre for Civil Research Codes and Specifications. Gouda. Netherlands.
- Dally W.R., Dean R.G. et Dalrymple R.G. (1985) - *Wave height variation across beaches of arbitrary Profile*. Journal of Geophysical Research, 90(6): 11917-11927.
- Dalrymple R.A. (1992) - *Prediction of Storm/Normal Beach Profiles*. Journal of Waterways, Port, Coastal and Ocean Engineering, American Society of Civil Engineers, 118(2): 193-200.
- Dalrymple R.A. (2006) - Depth of closure. www.coastal.udel.edu , <http://www.coastal.udel.edu/faculty/rad/depth.html>
- David B. et Fasquel P. (1997) - *Qualité d'une base de données géographique: concepts et terminologie*. Bulletin d'information de l'IGN (France) 67.
- Davidson M. A., Huntley D., Holman R.A. et George K. (1997) - *The evaluation of large (km) intertidal beach morphology on a macrotidal beach using video images*. Proc. Coastal Dynamics '97, New York: ASCE. pp. 385-394.

- Davis R.A. (1991) - *Performance of a beach nourishment project based on detailed multi-year monitoring: Redington Beach, FL*. Proceedings of Coastal Sediments 1991. ASCE. New York. pp. 2101-2115.
- Davis R.A. et Fox W.T. (1972) - *Coastal processes and nearshore sand bars*. Journal of Sedimentary Research, 42 (2): 401-412.
- Devillers R. (2004) - *Conception d'un système multidimensionnel d'information sur la qualité des données géospatiales*. Thèse de Doctorat – Université Laval, Canada. www.theses.ulaval.ca/2004/22242/ch02.html
- De Vriend H. J. (2003) - *On the prediction of aggregated-scale coastal evolution*. Journal of Coastal Research, 19(4): 757-759.
- De Vriend H.J. (1987) - *2DH mathematical modeling of morphological evolutions in shallow water*. Coastal Engineering, 11(1):1-27.
- De Vriend H.J. (1991) - *G6 Coastal Morphodynamics*. In: N.C. Kraus, K.J. Gingerich et D.L.Kreibel, Proc. Coastal Sediments '91, Seattle, WA. ASCE. New York. pp. 356-370.
- De Vriend H.J. et Ribberink J.S. (1991) - *A quasi-3D mathematical model of coastal morphology*. 21st ICCE. Malaga. pp. 1689-1703.
- De Vriend H.J., Zyserman J., Nicholson J., Roelvink J.A., Pechon P. et Southgate H.N. (1993 a) - *Medium-term 2DH coastal area modelling*. In: H.J. De Vriend (Ed.) Coastal Morphodynamics: Processes and Modelling. Coastal Engineering, 21: 193–224.
- De Vriend H.J., Capobianco M., Latteux B., Chesher T. et Stive M.J.F. (1993b) - *Long-term modelling of coastal morphology: a review*. In: H.J. De Vriend (Ed.) Coastal Morphodynamics: Processes and Modelling. Coastal Engineering, 21: 225– 269.
- De Vriend H.J., Zyserman J., Nicholson J., Roelvink J.A., Pechon P. et Southgate H.N. (1993) - *Medium-term 2DH coastal area modelling*. Coastal Engineering, 21: 193-224
- Dean R.G. (1977) - *Equilibrium Beach Profiles: U.S. Atlantic and the Gulf Coasts*. Department of Civil Engineering, Ocean Engineering Report n° 12, University of Delaware, Newark, DE.
- Dean R.G. (1991) - *Equilibrium Beach Profiles: Characteristics and Applications*. Journal of Coastal Research 7(1): 53-84.
- Dean R.G. (1998) - *Beach nourishment: a limited review and some recent results*. Proc. 26th ICCE, ASCE. pp. 45– 69.
- Dean R.G. (2000) - *Beach Nourishment Design: Consideration of Sediment Characteristics*. UFL/COEL-2000/002, Department of Civil and Coastal Engineering, University of Florida, Gainesville, FL.

- Dean R.G. (2002) - *Beach Nourishment: Theory and Practice*. World Scientific Publishing Co. New Jersey. 399 pp.
- Dean R.G. et Yoo C.H. (1992) - *Beach-Nourishment Performance Predictions*. Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering, 118(6): 567-585.
- Dean R.J. (1974) - *Compatibility of borrow materials for beachfill*. Proceedings 14th International Coastal Engineering Conference, ASCE. pp. 1319-1333.
- Deigaard R., Fredsoe J. et Hedegeard I.B. (1986) - *Mathematical model for littoral drift*. J. Waterw. Port, Coastal Ocean Engineering, 112(3): 351-369.
- Delft Hydraulics (2006) - Argus coastal monitoring. wldelft.nl/index.html
- Della Rocca M.R. et Fortunato A. (2002) - *Individuazione della linea di costa da immagini sar mediante trasformata localizzata di radon*. Atti 6^a Conferenza Nazionale ASITA, Perugia 5-8 Novembre. Vol. 2. pp.1011-1016.
- Denny J.F. et Colman S.C. (2002) - Geophysical surveys of Bear Lake, Utah-Idaho. U.S. G.S. Open File Report: 03-150.
- Dette H.H. (1998) - *Beach fill practice in Germany*. SAFE Report, 2nd Annual Workshop. Commission of the European Communities, Sylt, Germany.
- Devoy R.N.J. (1987) - *Sea Surface Studies: A Global View*. Croom Helm, London, pp 640.
- Di Girolamo A. (2003) - *Le quote dei punti determinati con GPS, variazioni locali degli scostamenti geoidici in Trentino Alto Adige*. Boll. SIFET, 1/03: 77-84.
- Di K., Ma R., Wang J. et Li R. (2003 a) - *Coastal Mapping and Change Detection Using High-Resolution IKONOS Satellite Image*. National Conference for Digital Government Research. Boston. MA. pp. 343-346.
- Di K., Ma R., Wang J. et Li R. (2003 b) - *Automatic Shoreline Extraction from High-Resolution IKONOS Satellite Image*. ASPRS Annual Conference Proceedings. May 2003 Anchorage. Alaska.
- Di Lieto A., Lusetti C. , Nobili A. et Surace L. (2002) - *Il fenomeno di marea*. Boll. SIFET, 2/02: 82-102.
- Dibajnia, M., Nairn, R.B., Ross, P. (2004) - *Analysis of long-term sand accumulation at a harbor using 2DH numerical simulation*. Coastal Engineering, 51 (8-9): 863-882.
- Dingemans M.W., Radder A.C. et De Vriend H.J. (1987) - *Computation of the driving forces of wave-induced currents*. Coastal Engineering, 11(5/6): 539-563.
- Dingler J.R. et Reiss T.E. (2002) - *Changes to Monterey Bay beaches from the end of the 1982-83 El Nino through the 1997-98 El Nino*. Marine Geology, 181 (1): 249-263.

- Dolan R. (1973) – *Coastal processes high aerial photographs aid in investigations*. Photogrammetric Engineering, 39, 255-260
- Domínguez L, Infuso G. et Gracia F.J. (2005) - *Vulnerability assessment of a retreating coast in SW Spain*. Environmental Geology, 47: 1037-1044.
- Donatelli D., Maseroli R. et Pierozzi M. (2002) - *La trasformazione tra i sistemi di riferimento utilizzati in Italia*. Boll. di Geodesia e Scienze Affini (IGM), 4/02: 247-310.
- Douglas B.C. et Crowell M.C. (2000) - *Long-term shoreline position prediction and error propagation*. Journal of Coastal Research, 16(1): 145-152.
- Drury S.A. (2001) – *Image interpretation in geology*. Nelson Thornes e Blackwell Science, pp. 290
- EAK (1993) - *Empfehlungen für die Ausführung von Küstenschutzwerke (Recommendations for the design of coastal structures)*. Die Küste, Heft 55, Heide, Germany.
- Eitner V. et Ragutzki G. (1994) - *Effects of artificial beach nourishment on nearshore sediment distribution (Island of Norderney, southern North Sea)*. J. Coastal Research, 10(3): 637-650.
- El-Asmar H.M. et White K. (2002) - *Changes in coastal sediment transport processes due to construction of New Damietta Harbour, Nile Delta, Egypt*. Coastal Engineering, 46 (2):127-138.
- Eliot I.G. et Clarke D.J. (1988) - *Semi-diurnal variation in beachface aggradation and degradation*. Marine Geology, 79: 1-22.
- Erkkilä A. et Kalliola R. (2004) – *Patterns and dynamics of coastal waters in multi-temporal satellite images: support to water quality monitoring in the Archipelago Sea, Finland*. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 60: 165-77.
- Estep L., Lillycrop J. et Parson L. (1994) - *Estimation of Maximum Depth of Penetration of a Bathymetric Lidar System Using a Secchi Depth Database*. Marine Technology Society Journal, 28(2): 31-36.
- Evangelista S., La Monica G.B. et Landini B. (1991) - *Artificial beach nourishment using fine crushed limestone gravel: first data about short and long-term beach response at Terracina (Latium, Italy)*. Boll. Ocean. Teor. Appl., Trieste, X (2-3-4): 273-278.
- Favretto A., Mauro G., Ramella R., et Romeo R. (2004) – *Telerilevamento e GIS per lo studio costiero: verifica di alcuni campionamenti puntuali*. Atti della 8° Conferenza Nazionale Asita – 14-17 Dicembre 2004. pp 1059 – 1063.
- Ferrante A., Franco L. et Boer S. (1992) - *Modelling and monitoring of a perched beach at Lido Di Ostia, Rome*. Proc. 23th Int. Conf. on Coastal Eng. ASCE. pp. 3305-3318.

- Ferretti O., Delbono I., Barsanti M. et Conley D.C. (2002) - *Dinamica costiera: monitoraggio tramite web camera e con metodologie tradizionali. Litorali da Sestri Levante a Lavagna*. Abstract. 3° Convegno Nazionale Scienze del Mare, Bari Novembre 2002. p 108.
- Fiani M. et Vatore F. (2000) - Un esperimento di cartografia da satellite. Boll. SIFET, 4/00: 47-63.
- Fiani M., Prezioso G., Troisi S., Turturici L. et Wirz M. (2002) - *Una rete GPS per il monitoraggio delle variazioni morfologiche delle coste*. Atti 6^a conf. ASITA. Perugia. pp. 1145-1147.
- Fleming C.A. et Hunt J.N. (1976) - *Application of a sediment transport model*. Proc. 15th Coastal Engineering Conference. ASCE. pp. 1184– 1202.
- Fletcher J., Rooney M., Barbee S., Lim C. et Richmond B. (2003) - *Mapping shoreline change using digital orthophotogrammetry on Maui, Hawaii*. Journal of Coastal Research, SI 38: 106-124.
- Floreaa Z. et Caramizoiu A. (2005).- *Change Detection in Romanian Coastal Zone of the Black Sea*. 31st International Symposium on Remote Sensing of Environment.
- Folk R.L. et Ward W.C. (1957) - *Brazos river bar: a study in the significance of grain size parameters*. Jour. Sed. Petrol., 27: 3-36.
- Franco V., Lo Brutto M. et Villa B. (2001) - *Progetto di una rete sub-regionale di stazioni permanenti GPS*. Atti 5^a conf. ASITA. Rimini. pp. 827-828.
- French J.R. (2002) - *Airborne LIDAR in support of geo-morphological and hydraulic modelling*. Earth Surface Processes and Landforms, 28(3): 321-335.
- Fritsch D., Teisson Ch. et Manoha B. (1989) - *Long term simulation of suspended sediment transport: Application to the Loire estuary*. 23rd IAHR-Congress. Ottawa. Ont.NRC. Ottawa. Ont.. C.277-284.
- Fromard F., Vega C. et Proisy C. (2004) - *Half a century of dynamic coastal change affecting mangrove shorelines of French Guiana. A case study based on remote sensing data analyses and field surveys*. Marine Geology, 208: 265–280.
- Geoconnexion (2006) - Geoconnexion International magazine. <http://www.geoconnexion.com/>
- Giannetto M., Mirtelli G. et Lechi G. (2003) - *Un modello genetico per la stima della batimetria da satellite ad alta risoluzione geometrica*. Atti 7^a conf. ASITA. Verona. pp. 1169-1174.
- Gibeaut J.C., Gutierrez R. et Kyser J.A. (1998) - *Increasing the accuracy and resolution of coastal bathymetric surveys*. Journal of Coastal Research, 14(3): 695-915.
- Gomasasca M.A. (2000) – *Introduzione a Telerilevamento e GIS per la gestione delle risorse agricole e ambientali*. Ed. Associazione Italiana di Telerilevamento. 250 pp.
- Gomasasca M.A. (2004) – *Elementi di Geomatica*. Ed. Associazione Italiana di Telerilevamento. 618 pp.

- Gonzalez M., Medina R. et Losada M.A. (1999) - *Equilibrium beach profile model for perched beaches*. Coastal Engineering, 36: 343-357.
- Gorman L., Morang A. et Larson R. (1998) - *Monitoring the coastal environment; part IV: mapping, shoreline changes, and bathymetric analysis*. Journal of Coastal Research 14(1): 61-92.
- Gorman L., Morang A. et Larson R. (1998) - *Monitoring the coastal environment; part IV: mapping, shoreline changes, and bathymetric analysis*. Journal of Coastal Research, 14(1): 61-92.
- Graham D., Sault M. et Bailey C. J. (2003) - *National Ocean Service Shoreline: past, present and future*. Journal of Coastal Research, SI 38: 14-32.
- Grasmeijer B.T. (2002) - *Process-based cross-shore modelling of barred beaches*. PhD thesis, ISBN 90-6809-338-X, Utrecht, The Netherlands.
- Grasmeijer B.T. (2006) - *Beach fill, Compute the equilibrium beach profile*.
www.coastalresearch.nl/index.htm, http://www.coastalresearch.nl/beach_fill.htm
- Gravens M.B. (1989) - *Estimating potential longshore sand transport rates using WIS data*. Coastal Engineering Technical Note B-19, U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station, Coastal Engineering Research Center, Vicksburg, MS.
- Gravens M.B. (1997) - *Wave resolution effects on predicted shoreline positions*. Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering, 123(1): 23–33.
- Grignetti A., Casacchia R. et Salvatori R. (2005) - *Studio dei cambiamenti di un sistema dunale mediante integrazione di foto aeree e immagini MIVIS e Quickbird*. Rivista di Studi Costieri, 8, 111-120
- Grunnet N.M., Walstra D.R. et Ruessink B.G. (2004) - *Process-based modelling of a shoreface nourishment*. Coastal engineering, 51(7): 581-607.
- Guenther G., Cunningham A., Larocque P. et Reid J. (2000) – *Meeting the accuracy challenge in airborne LIDAR bathymetry, Dresden, EARSeL-SIG-Workshop LIDAR*, 27.
- Guenther G.C., Grant A., Cunningham A. P., La Rocque E. et Reid D. J. (2000) - *Meeting the accuracy challenge in airborne lidar bathymetry*. Proceedings 20th EARSeL-SIG-Workshop LIDAR. Dresden. pp 432-445.
- Guillén J. et Hoekstra P. (1997) - *Sediment Distribution in the Nearshore Zone: Grain Size Evolution in Response to Shoreface Nourishment (Island of Terschelling, The Netherlands)*. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 45: 639-652.
- Guillén J., Stive M.J.F. et Capobianco M. (1999) - *Shoreline evolution of the Holland coast on a decadal scale*. Earth Surf. Processes Landf. 24: 517–536.

- Haas K.A. et Hanes D.M. (2004) - *Process based modeling of Total Longshore Sediment*. Journal of Coastal Research, 20(3): 853-861.
- Hallermeir R.J. (1981) - *A profile zonation for seasonal sand beaches from wave climate*. Journal of Coastal Engineering, 4: 253-277.
- Hamm L. (1998) - *Performance of soft beach systems and nourishment measures for European coasts (project SAFE)*. Proc. 3rd European Marine Science and Technology Conf., Lisbon, 23-27 May 1998. Project Synopsis, vol. II, pp. 931- 944.
- Hamm L., Billard N., Viguier J. et L'Her J. (1998) - *Les rechargements de plage en France*. Internal report Sogreah Ingénierie n. 518904R13, Grenoble, France.
- Hamm L., Capobianco M., Dette H.H., Lechuga A., Spanhoff R. et Stive M.J.F. (2002) - *A summary of European experience with shore nourishment*. Coastal Engineering, 47: 237-264.
- Hanson H. (1999) - *Economic Optimisation of Beach Fill Transitions Using a Shoreline Change Model*. SAFE Report, Final Overall Workshop, Commission of the European Communities, Venezia, Italy.
- Hanson H., Brampton A., Capobianco M., Dette H.H., Hamm L., Laustrup C., Lechuga A. et Spanhoff R. (2002) - *Beach nourishment projects, practices, and objectives - a European overview*. Coastal Engineering, 47: 81- 111.
- Hanson H., Kraus N.C. (1993) - *Optimization of beach fill transitions*. In: D.K. Stauble et N.C. Kraus (Eds.) Beach Nourishment Engineering and Management Considerations. Proc. Coastal Zone '93. ASCE, New York, pp. 103- 117.
- Hanson H., Aarninkhof S., Capobianco M., Jiménez J.A., Larson M., Nicholls R.J., Plant N.G., Southgate H.N., Steetzel H.J., Stive M.J.F. et De Vriend, H.J. (2003) - *Modelling of Coastal Evolution on Yearly to Decadal Time Scales*. Journal of Coastal Research, 19(4): 790–811.
- Harris M., Brock J., Nayegandhi A. et Duffy M. (2005) - *Extracting Shorelines from NASA Airborne Topographic Lidar-Derived Digital Elevation Models*. U.S. Geological Survey (USGS), OFR 2005–1427: 1-32.
- Heather D. (2001) - *Replenishment versus retreat: the cost of maintaining Delaware's beaches*. Ocean & Coastal Management, 44: 87-104.
- Henry J.B., Malet J.P., Maquaire O. et Grussenmeyer P. (2002) - *The use of small format and low altitude aerial photos for the realization of high resolution DEMs in mountainous areas: application to the super-sauze earthflow (France)*. Earth Surface Processes and Landforms, 27(12): 1339-1350.

- Hernández-Molina F.J., Fernández-Salas L.M., Lobo F., Somoza L., Díaz-Del-Río V. et Alveirinho Dias J.M. (2000) - *The infralittoral prograding wedge: a new large-scale progradational sedimentary body in shallow marine environments*. *Geo-Marine Letters*, 20: 109-117.
- Hess K.W. (2003) - *Tidal datums and tidal coordination*. *Journal of Coastal Research*, SI 38: 33-43.
- Hinton C. et Nicholls R.J. (1998) - *Spatial and temporal behaviour of depth of closure along the Holland coast*. Proc. 26th Coastal Engineering Conference, ASCE. pp. 2913- 2925.
- Hobson R.D. (1977 a) - *Sediments handling and beach fill design*. International Coastal Engineering Conference, Coastal Sediments '77, ASCE. pp. 167-179.
- Hobson R.D. (1977 b) - *Review of design elements for beach fill evaluation*. U.S. Army Coastal Engineering Research Center, Technical Memorandum, TM-77-6: 1-51.
- Hofton M.A. et Blair J.B. (2002) - *Laser altimeter return pulse correlation : a method for detecting surface topographic change*. *Journal of Geodynamics*, 34(3): 477-489.
- Holland K.T. et Holman R.A. (1993a) - *The statistical distribution of swash maxima on natural beaches*. *Journal of Geophysical Research*, 98 (C6):10,271-10,278.
- Holland K.T. et Holman R.A. (1993b) - *A stereometric technique for mapping foreshore topography*. In EOS Transactions, American Geophysical Union. 338 pp.
- Holland K. T. et Holman R. A (1996) - *Field observations of beach cusps and swash motions*. *Marine Geology*, 134: 77-93.
- Holland K.T. et Holman R.A. (1997) - *Video estimation of foreshore topography using trinocular stereo*. *Journal of Coastal Research*: 13(1), 81-87.
- Holland K.T. et Holman R.A. (1993) - *The statistical distribution of swash maxima on natural beaches*. *Journal of Geophysical Research*, 98(C6): 10271-10278.
- Holland K.T. et Holman R.A. (1999) - *Wavenumber-frequency structure of infragravity swash motions*. *J. Geophys. Res.*, 104 (C6): 13479-13488.
- Holland K.T. et Puleo J. A. (2001) - *Variable swash motions associated with foreshore profile change*. *Journal of Geophysical Research*, 106: 4613-4623.
- Holland K.T., Holman R.A., Lippmann T.C., Stanley J. et Plant N.G. (1997) - *Practical use of video imagery in nearshore oceanographic field studies*. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 22: 24-32.
- Holland K.T., Puleo J.A. et Kooney T.N. (2001) - *Quantification of swash flows using video-based particle image velocimetry*. *Coastal Engineering*, 44: 65-77.
- Holland K.T., Raubenheimer B., Guza R. T. et Holman R.A. (1995) - *Run-up Kinematics on a*

- natural beach*. Journal of Geophysical Research, 100: 4985-4993.
- Holman R.A, Lippmann T.C., O'Neil P.V. et Hathaway K. (1991) - *Video estimation of subaerial beach profiles*. Marine Geology, 97: 225-231.
- Holman R.A, Sallenger A.H., Lippmann T.C., Haines J. (1993) - *The application of video image processing to the study of nearshore processes*. Oceanography, 6 (3): 78-85.
- Holman R.A, Stanley J. et Ozkan-Haller T. (2003) - *Applying video sensor networks to nearshore environment monitoring*. Oceanography, 6 (3): 78-85.
- Holman R.A. et Guza R.T. (1984) - *Measuring run-up on a natural beach*, Coastal Engineering, 8:129-140.
- Honeycutt M.C. et Krantz D.E. (2003) - *Influence of the geologic framework on spatial variability in long-term shoreline change, Cape Henlopen to Rehoboth Beach, Delaware*. Journal of Coastal Research, SI 38: 147-167.
- Horn D. (2002) - *Beach groundwater dynamics*. Geomorphology, 48: 121-146.
- Houston J.R. (1994) - *Beach-fill volume required to produce specified dry beach width*. Coastal Engineering Technical Note 11-32, U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station, Coastal Engineering Research Center, Vicksburg, MS.
- Houston J.R. (1995) - *The economic value of beaches*. The CERCLear vol. CERC 95-4. US Army Engineers Waterways Experiment Station, Vicksburg, MS, pp. 1-4.
- Houston J.R. (1996) - *International tourism and US beaches*. Shore and Beach, 64: 3-4.
- <http://www.admiraltycoastal.com>
- <http://www.airbornehydro.com>
- <http://www.argus-data.wldelft.nl/index.html>
- <http://www.cgrit.it>
- <http://www.circe.iuav.it/circe/servizi/corsi/aerei.pdf#search=%22Raddrizzamento%20digitale%20per%20la%20costruzione%20di%20fotopiani%20con%20RDF%22>
- <http://www.cmima.csic.es/index.php?displayLang=ES>
- <http://www.coastal.er.usgs.gov>
- <http://elb.cmima.csic.es/elb/>
- <http://www.eurimage.com/> Eurimage
- <http://www.eurimage.com/reseller/area/greece.html>
- http://www.frf.usace.army.mil/SandyDuck/Experiments/onr97rpt_pdf/CDLIPPMA.PDF#search=%22wave%20breaking%20and%20dissipation%20in%20the%20nearshore%22
- <http://www.fugro-pelagos.com>
- <http://www.grass.itc.it/> GRASS (2006).

<http://www.gys.gr>
<http://www.gys.gr/ENGLISH/EN1.htm>
<http://www.ifremer.fr>
<http://www.lidar.jpl.nasa.gov/lite.htm>
<http://www.netcoast.nl/info/argus/argus.htm>
<http://www.onderzoekinformatie.nl/en/oi/nod/onderzoek/OND1282862/>
<http://www.optech.ca>
<http://www.planetargus.com/stades.html>
<http://www.regione.liguria.it/webcam>
<http://www.sbgmaps.com/lidar.htm>
<http://shoals.sam.usace.army.mil>
<http://www.spaceconsulting.gr/geoinformatics/home.htm>
<http://www.tenix.com>
<http://www.thecoastviewproject.org>
<http://www.usace.army.mil/USACE>
<http://www.video-monitoring.com/nearshoreimaging.htm>
www.video-monitoring.com
<http://www.wrl.unsw.edu.au/coastalimaging/index.php?page=public/ImageAnalysis.html>.

Hubertz J.M. (1992) - *Revised wave information study (WIS) results for the U.S. Atlantic Coast 1960-1975*. Coastal Engineering Technical Note I-51, U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station, Coastal Engineering Research Center, Vicksburg, MS.

Hughes M.G. et Turner I.L. (1999). *The beachface*. In: A.D. Short (Ed.) *Handbook of beach and shoreface morphodynamics*. John Wiley & Sons, New York, 119-144

Huising E. J., Gomes Pereira, L. M., (1998) - *Errors and accuracy estimates of laser data acquired by various laser scanning systems for topographic applications*. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 53: 245-261.

Huising E.J. et Pereira G. (1998) - *Errors and accuracy estimates of laser data acquired by various laser scanning systems for topographic applications*. Photogrammetry and Remote Sensing, 53(5): 245-261.

Hunter J.A et Hobson G.D. (1977) – *Reflections in shallow seismic refraction records*. Geoplot, 15: 183-193.

Iarusso M. R. (2005) - *3-D computer vision*. <http://www.dia.uniroma3.it>

IHO. (1998) - *Standards for Hydrographic surveys*. International Hydrographic Organization - S44.

- IHO (2005) - *Manual on Hydrography. International Hydrographic Organization* - M13.
- Imeson A.C. et Lavee H. (1998) - *Soil erosion and climate change: the transect approach and the influence of scale*. *Geomorphology*, 23 (2): 219-227.
- Immordino F., Valpreda E. et Simeoni U. (2002) – *Il telerilevamento iperspettrale MIVIS per la gestione costiera (foce Adige-Veneto)*. Atti della 6° Conferenza Nazionale ASITA, Perugia 5-8 Novembre 2002, II: 1343-1348.
- Inman D.L. (1953) - *Areal and seasonal variations in beach and nearshore sediments at La Jolla, California*. Beach Erosion Tech, Memo. 39pp.
- Inman D.L., Elwany H.S. et Jenkins S.A. (1993) - Shoreline and bar-berm profiles on ocean beaches. *J. Geophys. Res.*, 98 (C10):18181– 18199.
- Innocenti L. et Pranzini E. (1993) - *Geomorphological evolution and sedimentology of the Ombrone River Delta, Italy*. *Journal of Coastal Research*, 9: 481-493.
- Intelmann S. (2006) - Comments on Hydrographic and Topographic LIDAR Acquisition and Merging with Multibeam Sounding Data Acquired in the Olympic Coast National Marine Sanctuary, 128.
- International Hydrographic Organisation (1998) – *IHO standards for Hydrographic Surveys, Special Publication N° 44, 4th Edition*. 26pp.
- Irish J.L. et Lillycrop W.J. (1999) - *Scanning laser mapping of the coastal zone: the SHOALS system*. *Journal of Photogrammetry & Remote Sensing*, 54(2-3): 123-129.
- James J.R. (1974) - *Borrow Material Texture and Beach Fill Stability*. Proceedings of the 14th International Conference on Coastal Engineering, ASCE. pp. 1334-1344.
- James J.R. (1975) - *Techniques in Evaluating Suitability of Borrow Material for Beach Nourishment*. U.S. Army Coastal Engineering Research Center, Technical Memorandum, 60, Vicksburg, MS.
- Jansen H. (1997) - *Advanced data analysis methods in morphodynamical research. A feasibility study of pip and pop analysis*. Technical Report 97-17, Delft University of Technology.
- Janssen P.C. (1997) - *Intertidal beach level estimations from video images*. MSc. thesis, Delft University of Technology (Delft Hydraulics, Report Z2079).
- Jarret J.T. (1991) - *Coastal sediment budget analysis techniques*. *Proc. Coastal Sediments '91*, American Society of Civil Engineers. pp. 2223-2233.
- Jenkins M. et Keehn S. (2001) - *Effects of beach nourishment on equilibrium profile and closure depth*. Proceedings of Coastal Dynamics V01, Lund, Sweden. pp. 888- 897.
- Judd, A. G. et Hovland, M. (1992) - *The evidence of shallow gas in marine sediments*. In: A. M. Davis (Ed.) Methane in Marine Sediments. *Continental Shelf Research*, 12 (10): 1081-1095.

- Judge E.K. et Overton M. (2001) - *Remote sensing of barrier Island morphology: evaluation of photogrammetry-derived Digital Terrain Models*. Journal of Coastal Research, 17(1): 207-220.
- Jung W. Y., Suk B. C., Min G. H. et Lee Y. K. (1998) - *Sedimentary structure and origin of a mud-cored pseudo-tidal sand ridge, eastern Yellow Sea, Korea*. Marine Geology, 151 (1-4): 73-88.
- Kaichang Di., Wang R., Ma R. et Li R. (2003) - *Automatic shoreline extractions from high-resolution IKONOS satellite imagery*. Proceeding of ASPRS 2003 Annual Conference. Anchorage. 12(7): pp.14-18.
- Kana T.W., Katmarian R.E. et McKee P.A. (1997) - *The 1986-1995 Myrtle beach nourishment project ten-year performance summary*. Shore and Beach, 65(1): 8 - 23.
- Katopodi I. et Ribberink J.S. (1992) - *Quasi-3D modeling of suspended sediment transport by currents and waves*. Coastal Engineering, 18: 83-110.
- Kerchaert P., Roobers P.P.L., Noordam A. et De Candat P. (1986) - *Artificial beach nourishment on Belgium east coast*. J. Waterw. Port Coast. Ocean Eng., ASCE. 112 (5): 560- 571.
- Kingston K.S., Ruessink B.G., Van Enckevort I.M.J. et Davidson M.A. (2000) - *Artificial neural network correction of remotely sensed sandbar location*. Marine Geology, 160 (1-2): 137-160.
- Kirk R. M. (1992) - *Artificial beach growth for breakwater protection at the Port of Timaru, east coast, South Island, New Zealand*. Coastal Engineering, 17 (3-4): 227-251.
- Kobayashi N., DeSilva G.S. et and Watson K.D. (1989) - *Motion of Sediment Particles in Swash Zone*. Proceedings of Coastal Hydrodynamics, ASCE. pp 715-730.
- Komar P.D. (1996) - *The budget of littoral sediments, concepts and applications*. Shore and Beach, 64: 18-26.
- Konicki K. M. et Holman R. A. (2000) - *The statistics and kinematics of transverse sand bars on an open coast*. Marine Geology, 169:69-101.
- Krabill W.B., Wright C.W., Swift R.N., Fredreck E., Manizade S., Yungel, J., Martin, C., Sonntag, J., Duffy, M., Hulslander, W. et Brock J.C. (2000) - *Airborne laser mapping of Assateague National Seashore Beach*. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 66: 65-71.
- Kraus N.C. (1988) - *The effects of seawalls on the beach*. Journal of Coastal Research, Special Issue N° 4: 1-29.
- Kraus N.C. et Wise R.A. (1993) - *Simulation of January 4, 1992 storm erosion at Ocean City, Maryland*. Shore and Beach, 61 (1): 16–22.
- Kriebel D.L. et Dean R.G. (1985) - *Numerical simulation of timedependent beach and dune erosion*. Coastal Engineering, 9: 221– 245.

- Kriebel D.L., Kraus N.C et Larson M. (1991) - *Engineering methods for predicting beach profile response*. Proceeding of Coastal Sediment '91, American Society of Civil Engineers. pp. 557-571.
- Kroon A., Hoekstra P., Houwman K. T. et Ruessink B.G. (1995) - *Morphological monitoring of a shoreface nourishment. NOURTEC, experiment at Terschelling, The Netherlands*. Proceedings of the Coastal Engineering Conference, ICCE '94, ASCE. New York. pp. 2222–2236.
- Krueger C. P. (2006) - *Performance of GPS in surveys within the coast of Paraná state (Brazil)*. http://www.mundogeo.com.br/revistas-interna.php?id_noticia=5202.
- Krumbein W.C. et James W.R. (1965) - *A lognormal size distribution model for estimating stability of beach fill material*. U.S. Army Coastal Engineering Research Center Technical Memorandum, 16: 1-17.
- Krystian W. et Pilarczy K. (2003) - *Design of low-crested (submerged) structures – an overview*. 6th International Conference on Coastal and Port Engineering in Developing Countries, Colombo, Sri Lanka. pp. 1-18.
- La Monica G.B., Landini B. et Milli S. (1984) - *Ripascimento artificiale dei litorali in erosione. Il Tombolo di Feniglia (Toscana meridionale)*. Boll. Soc. Geol. Italiana, 103: 539-560.
- Labaune C., Tesson M. et Gensous B. (2005) - *Integration of high and very high-resolution seismic reflection profiles to study Upper Quaternary deposits of a coastal area in the western Gulf of Lions, SW France*. Marine Geophysical Researches, 26:109–122.
- Langley S.K., Alexander C.R., M. Bush D. et Jackson C.W. (2003) - *Modernising shoreline change analysis in Georgia using topographic survey sheets in a GIS environment*. Journal of Coastal Research, SI 38: 168-177.
- Larson M. (1988) - *Quantification of Beach Profile Change*. Report n° 1008, Department of Water Resources and Engineering, University of Lund, Lund, Sweden.
- Larson M. et Kraus N.C. (1989a) - *SBEACH: Numerical Model for Simulating Storm-Induced Beach Change, Report 1: Empirical Foundation and Model Development*. Technical Report CERC-89-9, US Army Engineer Waterways Experiment Station, Coastal Engineering Research Center, Vicksburg, MS.
- Larson M. et Kraus N.C. (1989b) - *Temporal and spatial scale of beach profile change, Duck, North Carolina*. Marine Geology, 117: 75-94.
- Larson M. et Kraus N.C. (1998) - *SBEACH: Numerical Model for Simulating Storm-Induced Beach Change, Report 5 - Representation of Nonerosible (Hard) Bottoms*. Technical Report CHL-98-9, Coastal Engineering Research Center, U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station, Vicksburg, MS.

- Larson M., Capobianco M. et Wise R.A. (1999a). *Modelling cross-shore sediment transport at different scales using equilibrium beach profile theory*. Proc. 4th Int. Symp. on Coastal Engineering and Science of Coastal Sediment Processes (Coastal Sediments '99), Hauppauge, Long Island (NY, USA). ASCE. Reston. pp. 1371–1387.
- Larson M., Capobianco M., Jansen H., Rozynski G., Southgate H., Stive M., Wijnberg K. et Hulscher S. (2003) - *Analysis and modelling of field data on coastal morphological evolution over yearly and decadal time scales. Part 1. background and linear techniques*. Journal of Coastal Research, 19(4): 760-775.
- Larson M., et Kraus N.C. (1995) - *Prediction of cross-shore sediment transport at different spatial and temporal scales*. Marine Geology, 126: 111-127.
- Larson M., Kraus N.C. et Byrnes M.R. (1990 a) - *SBEACH: Numerical Model for Simulating Storm-Induced Beach Change, Report 2: Numerical Formulation and Model Tests*. Technical Report CERC-89-9, US Army Engineer Waterways Experiment Station, Coastal Engineering Research Center, Vicksburg, MS.
- Larson M., Kraus N.C. et Hanson H. (1990 b) - *Decoupled numerical model of three-dimensional beach change*. Proc. 22nd Coastal Engineering Conference, ASCE. pp. 2173–2185.
- Larson M., Kraus N.C. et Hanson H. (1997 a) - *Analytical Solutions of the One-Line Model of Shoreline Change Near Coastal Structures*. J. Waterway, Port, Coastal and Ocean Eng., ASCE. 123(4).
- Larson M., Kraus N.C. et Wise R.A. (1999 b) - *Equilibrium beach profiles under breaking and non-breaking waves*. Coastal Engineering, 36: 59–85.
- Larson R., Morang A. et Gorman L. (1997 b) - *Monitoring the coastal environment: Part II. Sediment sampling and geotechnical methods*. Journal of Coastal Research, 13(2): 308-330.
- Latteux B. (1980) - *Harbour design including sedimentological problems using mainly numerical techniques*. 17th ICCE. Sydney. pp. 2213-2229.
- Le Méhautè B. et Soldate M. (1978) - *Mathematical modelling of shoreline evolution*. Proc. 16th Coastal Engineering Conference, ASCE. pp. 1163– 1179.
- Leatherman S.P. (2003) - *Shoreline change mapping and management along the U.S. east coast*. Journal of Coastal Research, SI 38: 5-13.
- Leatherman, S.P. (1983) - *Shoreline mapping: a comparison of techniques*. Shore and Beach, 51: 28-33.
- Lechuga A. (1994) - *Littoral dynamics and shoreline erosion: selected Spanish cases*. U.S.-Spain Workshop on Natural Hazards.

- Lee G.H., Nicholls, R.J., Birkemeier W.A. et Leatherman S.P., (1995) - *A conceptual fairweather-storm model of beach nearshore profile evolution at Duck, N.C., U.S.A.* Journal of Coastal Research, 11(4): 1157-1166.
- Lee J-S. et Yang M.C.K. (1989) – Threshold selection using estimates from truncated normal distribution. IEEE Transaction on System, Man, and Cybernetic, march/april, 19 (2): 422-429.
- Leont'yev IO (1999) - *Modeling of morphological changes due to coastal structures.* J. Coastal Eng., 38:143-166
- Lesser G.R. (2000) - *Computation of Three-dimensional Suspended Sediment Transport within the DELFT3D-FLOW Module.* MSc thesis No. HE066, IHE, Delft, The Netherlands.
- Lesser G.R., Roelvinka J.A., Van Kesteren J.A.T.M et Stelling G.S. (2004) - *Development and validation of a three-dimensional morphological model.* Coastal Engineering, 51: 883– 915.
- Lestak L.R., Manley W.F., et Maslanik J.A. (2003) - *Photogrammetric analysis of coastal erosion along the Chukchi coast at barrow, Alaska.* Arctic Coastal Dynamics, International Workshop. St. Petersburg. pp. 38-40.
- Li Y., Lark M. et Reeve D. (2005) - *Multi-scale variability of beach profiles at DUCK: A wavelet analysis.* Coastal Engineering, 52: 1133-1153.
- Lillycrop W.J., Pope R.W., Johnson P. et Lejdebriink U. (2002) - *Airborne lidar hydrography: a vision for tomorrow.* Sea Technology, 43(6): 27-34.
- Lim D. I., Jung H. S., Kim B. O., Choi J. Y. et Kim H. N. (2004).- *A buried palaeosol and late Pleistocene unconformity in coastal deposits of the eastern Yellow Sea, East Asia.* Quaternary International, 121 (1): 109-118.
- Lin T. H., Liu G. R., Chen A. J. et Kuo T. H. (2001) - *Applying Satellite Data for Shoreline Determination in Tideland Areas.* Proc. ACRS 2001. 22nd Asian Conference on Remote Sensing. Singapore 1. pp. 98-103.
- Lippmann T.C. et Holman R. A. (1992) - *Wave group modulations in cross-shore breaking patterns.* Proc. 23rd Int. Conf. on Coastal Engineering, New York. ASCE. pp. 918-931.
- Lippmann T.C. et Holman R. A (1990) - *The spatial and temporal variability of sand bar morphology.* Journal of Geophysical Research, 95: 11575-11590.
- Lippmann T.C. et Holman R. A. (1989) - *Quantification of sand bar morphology: a video technique based on wave dissipation.* Journal of Geophysical Research, 94: 995-1011.
- Lippmann T.C. et Holman R. A.(1991) - *Phase speed and angle of breaking waves measured with video techniques.* Proc. Coastal Sediments '91, New York, ASCE. pp 542-556.
- Lippmann T.C., Holman R. et Hathaway K.K. (1993) - *Episodic non stationary behavior of a double bar system at Duck, N.C., U.S.A., 1986-1991.* Journal of Coastal Research, 15: 49-75.

- List J.H. et Farris A.S. (1999) - *Large-scale shoreline response to storms and fair weather*. Proc. Coastal Sediments '99. ASCE. Reston, VA. pp. 1324-1338.
- Livingstone D., Raper J. et McCarthy T. (1998) - *Integrating aerial videography and digital photography with terrain modelling: an application for coastal geomorphology*. Symposium on "New techniques in geomorphology", Guildford. 29(1-2): 77-92.
- Lobo F. J., Fernández-Salas L. M., Hernández-Molina F. J., González R., Dias J. M. A., Díaz Del Río V. et Somoza L. (2005) - *Holocene highstand deposits in the Gulf of Cadiz, SW Iberian Peninsula: A high-resolution record of hierarchical environmental changes*. Marine Geology, 219: 109– 131.
- Lobo F. J., González R., Dias J. M. A., Hernández-Molina F. J., Fernández-Salas L. M., Díaz del Río V. et Somoza L. (2003) - *Onshore-offshore comparison of late Holocene highstand deposits in the Gulf of Cadiz margin (SW Iberian Peninsula): a record of high-frequency environmental fluctuations*. GISC Coast, Research Publication, 4:149-152.
- Lobo F.J., Sánchez R., González R., Dias J.M.A., Hernández-Molina,F.J., Fernández-Salas L.M., Díaz del Río V. et Mendes I. (2004) - *Contrasting styles of the Holocene highstand sedimentation and sediment dispersal systems in the northern shelf of the Gulf of Cadiz*. Continental Shelf Research, 24:461–482.
- Lohani B. (2001) - *Airborne altimetric lidar for topographic data collection: issues and applications*. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, 11: 47-61.
- Longley P. A., Goodchild M. F., Maguire D. J. et Rhind D. W. (2001) - *Geographical Information Systems and Science*. John Wiley & Sons. 454 pp.
- Loss E.D. et Niemann K.O. (2002) - *Shoreline feature extraction from remotely-sensed imagery*. Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2002, IGARSS '02_2002 IEEE International 24-28 June 2002, 6:3417-3419.
- Lupino P., Riccardi C., Di Osimo M., Pranzini E., Rossi L. et Wetzell L. (2005) - *Monitoring systems for beach erosion assessment and control at territorial scale*. Proceedings Medcoast '05. Kusadasi. pp. 995-1006.
- MacQuillin R., Bacon M. et Barclay W. (1984) - *An Introduction to Seismic Interpretation: Reflection Seismic in Petroleum Exploration*. Graham & Trotman. London. 287 pp.
- Madsen, A.J. and N.G. Plant. 2001. Intertidal beach slope predictions compared to field data, Marine Geology, 173 (1-4): 121-139.
- MAFF (1993) - *Strategy for flood and coastal defence in England and Wales*. Ministry of Agriculture, Fisheries and Food, MAFF/WelshOffice, MAFF Publications PB1471.

- Makota V., Sallema R. et Mahika C., (2004) – *Monitoring shoreline change using remote sensing and GIS: a case study of Kunduchi area, Tanzania*. Western Indian Ocean J. Mar. Sci., 3(1):1-10.
- Marsella M. et Volpe S. (2002) - *Analisi delle potenzialità dei dati satellitari ad alta risoluzione per la generazione di ortofoto*. Atti 6^a conf. ASITA. Perugia. pp. 1485-1490.
- Marsset T., Tessier B., Reynaud J-Y., De Batist M. et Plagnol C. (1999). -.*The Celtic Sea banks: an example of sand body analysis from very high-resolution seismic data*. Marine Geology, 158 (1-4): 89-109.
- Martinelli L., Zanuttigh B. et Lamberti A. (2006) -*Hydrodynamic and morphodynamic response of isolated and multiple low crested structures: Experiments and simulations* Coastal Engineering 53 (4): 363-379.
- Maseroli, R. et Nicolodi, S. (2002) - *Alcuni metodi per il passaggio dal sistema WGS84 ai sistemi geodetici locali*. Boll. ASITA, 32: 7-40.
- Maso M. (2002) - *Misure laserscanning e batimetria multibeam sull'asta principale del fiume Brenta*. Atti 6^a conf. ASITA. Perugia. pp. 1515-1520.
- Masselink G. et Pattiaratchie C.B. (2001) - *Seasonal changes in beach morphology along the sheltered coastline of Perth, Western Australia*. Marine Geology, 172: 243-263.
- Matsumoto Y., Kokuta S., Mori H. et Yamano H. (2001) - *Shallow water multibeam echosounding in Japan Hydrographic department*. F.I.G. International Conference. Seul. pp. 845-853.
- McAneny D.S. (1993) - *Availability of NDBC/NOAA data at WES*. Coastal Engineering Technical Note I-55, U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station, Coastal Engineering Research Center, Vicksburg, MS.
- McAneny D.S. et Jones D,L. (1993) - *Coastal engineering data retrieval system (CEDRS)*. Coastal Engineering Technical Note I-23, U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station, Coastal Engineering Research Center, Vicksburg, MS.
- McClung Wozencraft J. et Irish J. L. (2000) - *Airborne LIDAR surveys and regional sediment management*. Proceedings of EARSeL-SIG-Workshop LIDAR, Dresden/FRG.
- McGehee D.D. (1993) - *Effective utilization of wave data - A case study*. Coastal Engineering Technical Note I-57, U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station, Coastal Engineering Research Center, Vicksburg, MS.
- Medina R., Losada M. A., Losada I.J. et Vidal C. (1994) -*Temporal and spatial relationship between sediment grain size and beach profile*. Marine Geology, 118: 195-206.

- Meisburger E.P. (1993) - *Review of geologic data sources for coastal sediment budgets*. Instruction Report CERC-93-1, U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station, Coastal Engineering Research Center, Vicksburg, MS.
- Mele C. (2004) - *Calibrazione di una telecamera. Teoria e pratica*. <http://www.dia.uniroma3.it>
- Michel D., Desmazes F., Etchegaray A., Tessier B., Bretel P et Garlan T. (2004). *PRISme Littoral Aquitain: architecture et mobilité. Comité Inter-regional Manche Atlantique (CIRMAT)-UPS 849*. Colloque Cuadrienal. pp. 140-141.
- Milli A., Mori A., Nobili G., Pappani L., Surace G. et Banchini M. (2006) - *Tecniche innovative e tradizionali a confronto nella realizzazione di rilievi batimetrici costieri: un caso di studio*. Bollettino SIFET, 2: 11-32.
- MIMAM (1998) - *La Costa de todos naturalmente*. Ministerio de Medio Ambiente, Secretaria de Estado de Aguas y Costas, Direccion General de Costas, NIPO n. 310-98-024-4, Madrid, Spain.
- Mitasova H., Drake T.G., Bernstein D. et Harmon R.S. (2003) - *Spatio-temporal analysis of beach morphology using Lidar, RTK-GPS and open source Grass GIS*. Proceedings Coastal Sediments '03. Florida. ISBN 981-238-422-7.
- Mitasova H., Drake T.G., Bernstein D. et Harmon R.S. (2004) - *Quantifying Rapid Changes in Coastal Topography using Modern Mapping Techniques and Geographic Information System*. Environmental and Engineering Geoscience, 10(1): 1-11.
- MOPU (1988) - *Coastal Actions*. Direccion General de Puertos y Costas, Secretaria General Tecnica, Centro de Publicaciones, ISBN 84-505-7700-4, Madrid, Spain.
- Morang A., Larson R. et Gorman L. (1997a) - *Monitoring the coastal Environment: Part I. Waves and currents*. Journal of Coastal Research, 13(1): 111-133.
- Morang A., Larson R. et Gorman L. (1997b) - *Monitoring the coastal environment: Part III. Geophysical and research methods*. Journal of Coastal Research, 13(4): 1064-1085.
- Morfett J.C., (1990) - *A 'virtual power' function for estimating the alongshore transport of sediment by waves*. Coastal Engineering, 14: 439-456.
- Morris B.D., Davidson M.A. et Huntley D.A. (2001) - *Measurements of the response of a coastal inlet using video monitoring techniques*. Marine Geology, 175: 251-272.
- Morton R.A. (1979) - *Temporal and spatial variations in shoreline changes and their implications, examples from the Texas Gulf Coast*. J. Sediment. Petrology, 49: 1101– 1111.
- Morton R.A. et Miller T. (2005) - *National Assessment Of Shoreline Change: Part 2, Historical Shoreline Changes And Associated Coastal Land Loss Along The U.S. Southeast Atlantic Coast*. U.S. Geological Survey (USGS), Report 2005-1401: 1-40.

- Morton R.A., Gibeaut J.C. et Paine J.G. (1995) - *Meso-scale transfer of sand during and after storms: implications for prediction of shoreline movement*. Marine Geology, 126: 161- 179.
- Mosher D.C. et Simpkin P.G. (1999) - *Status and trend of Marine high-resolution seismic reflection profiling. Data acquisition*. GeoScience Canada, 26(4): 174-196.
- Mowrer H. T. (1999) - *Accuracy (Re)assurance: Selling Uncertainty Assessment to the Uncertain*. In: Lowell K. et Jaton A. (Eds.) Spatial Accuracy Assessment, Land Information Uncertainty in Natural Resources, Quebec, Ann Arbor Press. pp.3-10.
- Munoz-Perez J.J., Roman-Blanco B.L., Gutierrez-Mas J.M., Moreno L. et Cuenca G.J. (2001) - *Cost of beach maintenance in the Gulf of Cadiz (SW) Spain*. Coastal Engineering, 42: 143-153.
- Muñoz-Pérez J.J., Tejedor L. et Medina R. (2001) - *Las funciones empíricas ortogonales y los cambios en el perfil de playa a corto, medio y largo plazo*. Física de la tierra, 13: 139-166.
- NCSTM (2006) - *Existing coastal sediment transport models*. National Community Sediment-Transport Model (NCSTM), woodshole.er.usgs.gov/index.html, <http://woodshole.er.usgs.gov/project-pages/sediment-transport/>
- Newe J. et Dett H.H. (1995) - *Simulation of Dune and Nourished Berm Erosion During Storm Surges*. Proceedings Coastal Dynamics '95, Gdansk, Poland. ASCE, New York. pp. 850– 861.
- Nicholls R.J., Birkemeier W.A. et Hallermeier R.J. (1996) - *Application of the depth of closure concept*. Proceedings of the 25th Coastal Engineering Conference, ASCE. pp. 3874-3887.
- Nicholson J., Broker I., Roelvink J.A., Price D., Tanguy J.M. et Moreno L. (1997) - *Intercomparison of coastal area morphodynamics models*. Coastal Engineering, 31: 97– 123.
- Niedermeier A., Schulz-Stellenfleth J. et Borge, J.C.N. (2005) - *An empirical imaging model for SAR ocean wave measurements*. European Space Agency, (Special Publication) ESA SP, 572: 2355-2360.
- Niedoroda A.W. Reed C.W., Das H., Fagherazzi S., Donoghue J.F. et Cattaneo A. (2005) - *Analyses of a large-scale depositional clinoformal wedge along the Italian Adriatic coast*. Marine Geology, 222–223: 179– 192.
- Niu X., Wang, J., Di, K. et Li, R. (2004). *Geometric Modeling and Processing of QuickBird Stereo Image*. Proceedings of ASPRS, Annual Conference, Denver, Colorado, May 23-28, (CDROM).
- Nordstrom K.F. et Jackson N. (1990) - *Migration of swash zone, step, and microtopographic features during tidal cycles on an estuarine beach, Delaware Bay, New Jersey, USA*. Marine Geology, 92: 147-154.
- NRC (1995) - *Beach Nourishment and Protection*. National Research Council, Committee on Beach Nourishment and Protection, National Academic Press, Washington, DC, USA. 334 pp.

- NRC Report (2006) - *Report on the State of Erosion at Omapere-Opononi*. Calum Bonnington. Environmental Monitoring Officer. Coastal Northland Regional Council. 21 pp.
- Oh T.M. et Dean R.G. (1994) - *Effects of controlled water table on beach profile dynamics*. Proc. Int. Conf. Coastal Engineering, 3: 2449-2460.
- Ojeda E. et Guillén J. (2004) - *Comportamiento de las playas de Barcelona frente a una regeneración artificial (julio 2002)*. Geotemas, 6(2): 249-252.
- Ojeda Zújar J., Borgniet L., Pérez Romero A. M. et Loder J. F. (2002) - *Monitoring morphological changes along the coast of Huelva (SW Spain) using soft-copy photogrammetry and GIS*. Journal of Coastal Conservation, 8: 69-76.
- Optech Inc. (2004) - *Field Test Report for CHARTS, prepared for Joint Airborne Lidar Bathymetry Technical Center of Expertise*. Document N° 0020905/Rev A.
- Pakisser L.C. et Mabey D.R. (1984) - *Mapping shallow horizons with reflection seismograph*. ZZPG Bulletin, 38: 2382-2394.
- Palazzo M. et Vasanelli L. (2004) - *Correzione geometrica di immagini satellitari ad alta risoluzione mediante modelli indipendenti dal sensore*. Rivista Italiana di Telerilevamento, 29: 9-18.
- Parker B.B. (2003) - *The difficulties in measuring a consistently defined shoreline – the problem of vertical referencing*. Journal of Coastal Research, SI 38: 44-56.
- Parson E.L. (1997) - *Beach and nearshore survey technology*. Coastal Engineering Technical Note, CETN II-38, Waterways Experiment Station, US Army Corps of Engineers, Vicksburg, MS, USA.
- Parsons G.R. et Noailly J. (2004) - *A value capture property tax for financing beach nourishment projects: an application to Delaware's ocean beaches*. Ocean & Coastal Management, 47: 49 – 61.
- Pearson D.R. et Riggs S.R. (1981) - *Relationship of surface sediments on the lower forebeach and nearshore shelf to beach nourishment at Wrightsville Beach, North Carolina*. Shore and Beach, 49: 26-31.
- Pellegrinelli A., Perfetti N. et Russo P. (2003) - *Confronto tra i dati altimetrici della rete di raffittimento IGM95 e i dati VERTO1 nella Provincia di Ferrara*. Atti 7ª Conf. ASITA. Verona. pp.1593-1598.
- Pelnard-Considère R. (1956) - *Essai de Théorie de l'Evolution des Forms de Rivages en Plage de Sable et de Galets*. 4^me Journées de l'Hydraulique, Les Energies de la Mer, Question III, vol. 1. pp. 289– 298.

- Piccin A. et Coren F. (2002) - *Acquisizione e trattamento di dati morfobatimetrici ad alta risoluzione nel bacino del lago Sebino (Lombardia)*. Atti 6^a conf. ASITA. Perugia. pp. 1733-1738.
- Pilkey O.H., Young R.S., Riggs S.R., Smith A.W., Wu H. et Pilkey W.D. (1993) - *The concept of shoreface profile equilibrium: A critical review*. Journal of Coastal Research, 9: 255-278.
- Piwakowski B. (2004) – *High resolution seismic imaging as an efficient tool for shallow subsurface survey: case studies*. EGU 1st General Assembly. EGU04-A-03345.
- Plant N. et Holman R.A. (1997) - *Intertidal beach profile estimation using video images*. Marine Geology, 140: 1-24.
- Plant N.G., Holman R.A. (1997) - *Intertidal beach profile estimation using video images*. Marine Geology, 140: 1-24.
- Populus J., Barreau G., Fazilleau J., Kerdreux M. et L'Yavanc J. (2001) - *Assessment of the Lidar topographic technique over a coastal area*. CoastGIS'01, Second International Symposium on GIS and Computer Mapping, Halifax.
- Populus J., Laurentin A., Rollet C., Vasquez M., Guillaumont B. et Bonnot-Courtois C. (2003) - *Surveying coastal zone topography with airborne remote sensing for benthos mapping*. Earsel's SIG "Remote Sensing of the Coastal Zone" Workshop, Ghent.
- Pranzini E. (1999) - *Un indice di stabilità (Is) per la stima dell'idoneità dei materiali all'alimentazione artificiale delle spiagge*. Studi Costieri, 1: 75-83.
- Pugliano G., Cannon M.E. et Lachapelle G. (2003) - *Tecnica GPS RTK MRS sperimentazione sulla rete test della Campania GPS Network*. Atti 7^a conf. ASITA. Verona. pp. 1671-1673.
- Puleo J., Holland K.T., Kooney T. N. et Sallenger A. H. Jr. (2000) - *Field observations of swash zone flow patterns and 3d morphodynamics*. In: Proc. 27th Int. Conf. On Coastal Engineering, ASCE. pp. 637-650.
- Pullan S.E et Hunter J.A: (1990) – *Delineation of buried bedrock valleys using optimum-offset shallow seismic reflection technique*. In: S. Ward (Ed.) Geotechnical and Environmental Geotechnical Society Exploration Geophysics. pp. 89-97.
- Ranasinghe R., Symonds G. et Holman R., (1999) - *Quantitative Characterisation of Rip Dynamics Via Video Imaging*. In: N. C. Kraus (Ed) Proc. Coastal Sediments '99, Long Island, N. Y., ASCE. pp. 987-1002.
- Ranasinghe R., Symonds G., Black K. et Holman R. (2004) - *Morphodynamics of intermediate beaches: A video imaging and numerical modelling study*. Coastal Engineering, 51 (7): 629-655.

- Ranasinghe R., Symonds G., Black K., et Holman R. (2000) - *Processes governing rip spacing, persistence and strength in a swell dominated, microtidal environmen.*, Proc. Int. Conf. Coastal Eng., Sydney, Australia, July 16-21.
- Ray J., Dong D. et Altamini Z. (2004) - *IGS Reference Frames: status and future improvements.* GPS Solutions, 8(4): 1521-886.
- Reniers A., Symonds G. et Thornton E. (2001). Modelling of rip currents during RDEX. Proceedings of the 4th Coastal Dynamics Conference, Lund, Sweden. pp. 493– 499.
- Requejo M.S. (2005) - *Análisis y mejoras en la evaluación de diversos términos de los modelos de evolución de playas en escalas de medio plazo.* Tesis doctoral. pp 514.
- Roelse P. (1996) - *Evaluation of sand nourishments at the Dutch coast 1975-1994.* Report RIKZ-96.028, National Institute for Coastal and Marine Management/RIKZ. 72 pp.
- Roelvink J.A. (2006) - *Coastal morphodynamic evolution techniques.* Coastal Engineering, 53: 277-287.
- Roelvink J.A. et Broker I. (1993) - *Cross-shore profile models.* Coastal Engineering, 21: 163 – 191.
- Roelvink J.A., Meijer Th.J.G.P., Houwman K.T., Bakker R. et Spanhoff R. (1996) - *Field validation of a coastal profile model.* Proc. Coastal Dynamics '95. ASCE. New York. pp. 818 – 828.
- Roelvink J.A., Renniers A.J.H.M. et Walstra D.J.R. (1995) - *Medium term morphodynamic modelling.* MAST 6-Final Workshop. Gdnask. Poland. 7-3 à 7-6.
- Rovelli M.A. et Grassi S. (2002) - *Confronti tra DTM estratto da fotogrammetria digitale e da misure LIDAR.* Atti 6^a conf. ASITA
- Ruessink B.G. et Kroon A. (1994) - *The behavior of a multiple bar system in the nearshore zone of Terschelling, The Netherlands, 1965-1993.* Marine Geology, 121: 187-197.
- Ruggiero P., Kaminsky G.M. et Gelfenbaum G. (2003) - *Linking proxy-based and datum-based shorelines on a high energy coastline: implications for shoreline change analysis.* Journal of Coastal Research, SI 38: 57-82.
- Sabins F.F. (1987) – *Remote sensing principles and interpretation – II Ed.* W.H.Freeman & C. – New York – USA
- Saied U. et Tsanis I.K. (2005) - *ICEM: Intergrated Coastal Engineering Model.* Journal of Coastal Research, 21(6): 1257-1268.
- Saito Y., Katayama H., Ikehara K., Kato Y., Matsumoto E., Oguri K., Oda M. et Yumoto M. (1998) - *Transgressive and highstand systems tracts and post-glacial transgression, the East China Sea.* Sedimentary Geology, 122 (1-4): 217-232.

- Schwab W.C., Allison M.A., Corso W., Lotto L.L., Butman B., Bucholtz ten Brink M., Denny J., Danfoth W.W. et Foster D.S. (1997) – *Initial results of high resolution sea-floor mapping offshore of the New York-New Jersey metropolitan area using sidescan sonar*. *Northeastern Geology and Environmental Sciences*, 19 (4): 243-262.
- Schwarzer K., Diesing M., Larson M., Niedermeyer R.O., Schumacher W. et Furmanczyk K. (2003) - *Coastline evolution at different time scales – examples from the Pomeranian Bight, southern Black Sea*. *Marine Geology*, 194: 79-101.
- Shepard F.P. (1950) - *Beach cycles in Southern California*. U.S. Army Corps of Engineers, Beach Erosion Board, Technical Memo 15. p. 31.
- Sherman D.J. (1991) - *Gravel Beaches*. *National Geographic Research & Exploration* 7(4): 442-452.
- Sherman D.J. (1995) - *Submerging coasts: the effects of a rising sea level on coastal environments*. *The Geographical Review*, 85 (1): 111-113.
- Short A.D. et Masselink G. (1999) - *Embayed and structurally controlled beaches*. In: A.D. Short, (Ed) *Handbook of Beach and Shoreface Morphodynamics*, John Wiley & Sons. Chichester, Chapter 9.
- Short A.D. et Trembanis A. (2004) - *Decadal scale patterns in beach oscillation and rotation, Narrabeen Beach, Australia – time series, PCA, and wavelet analysis*. *Journal of Coastal Research*, 20: 523-532.
- Short A.D., Tremblanis A.C. et Turner I.L. (2000) - *Beach oscillation, rotation, and the Southern Oscillation, Narrabeen Beach, Australia*. *Proceedings of the 27th International Conference on Coastal Engineering*, Sydney, July 2001, New York. ASCE. pp. 2439-2452.
- Shrestha R.L., Carter W.E., Sartori M., Luzum B.J. et Slatton K.C. (2005) - *Airborne Laser Swath Mapping: quantifying changes in sandy beaches over time scales of weeks to years*. *Journal of photogrammetry and remote sensing*, 59: 222-232.
- Shrestha, R.L., Carter, W.E., Lee, M., Finer, P. et Sartori, M. (1999) - *Airborne Laser Swath Mapping: accuracy assessment for surveying and mapping applications*. *Journal of American Congress on Surveying and Mapping*, 59 (2): 83– 94.
- Smith D.P et Atkinson S.F. (2001) - *Accuracy of Rectification Using Topographic Maps versus GPS Ground Control Points*. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 67(5): 561-570.
- Sommerfeld B.G. et Wise R.A. (1995) - *Beach morphology analysis package (BMAP) Version 1*. *Coastal Engineering Technical Note H-34*, U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station, Coastal Engineering Research Center, Vicksburg, MS.

- Southgate H.N. et Goldberg D.G. (1989) - *An efficient computational model for wave refraction and diffraction using finite differences*. HR Wallingford, Report SR213.
- Southgate H.N., Wijnberg K.M., Larson M., Capobianco M. et Jansen H. (2003) - *Analysis and modelling of field data on coastal morphological evolution over yearly and decadal time scales. Part 2: non-linear techniques*. Journal of Coastal Research, 19(4): 776-789.
- Spanhoff R., Biegel E.J., Van De Graaff J. et Hoelstra P. (1997) - *Shoreface nourishment at Terschelling, the Netherlands: feeder berm or breaker berm?* Proc. Coastal Dynamics '97, Plymouth, June 23-27. ASCE, New York. pp. 863- 872.
- Srivastava, A., Niu, X., Di, K. et Li, R. (2005) - *Shoreline Modeling and Erosion Prediction*. In: Proceedings of the ASPRS, Annual Conference, Baltimore , MD , March 7-11.
- Stakhiv E. et Cuthbert D. (2006) - *Options en matière de gestion des niveaux et des débits du lac Ontario et du fleuve Saint-Laurent*, préparé par le Groupe d'étude international sur le lac Ontario et le fleuve Saint-Laurent. 178 pp.
- Stable D.K. (2003) - *The use of shoreline change mapping in coastal engineering project assessment*. Journal of Coastal Research, SI 38: 178-206.
- Stable D.K. et Cialone M.A. (1996) - *Sediment dynamics and profile interactions: DUCK94*. Proceedings 25th International Conference on Coastal Engineering, ASCE, Orlando, USA. pp. 3921-3934.
- Stable D.K. (1991) - *Native beach assessment techniques for beach nourishment*. Coastal Engineering Technical Note B-29, U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station, Coastal Engineering Research Center, Vicksburg, MS.
- Stable D.K. (1994) - *Evaluation of Erosion Hot-spots for Beach Fill Performance*. Proceedings, 7th National Conference on Beach Preservation Technology. Florida Shore and Beach Preservation Association. pp 198-215.
- Stable D.K. et Kraus N.C. (1993 a) - *Beach Nourishment Engineering and Management Considerations*. Coastlines of the World series, American Society of Civil Engineers, New York, NY.
- Stable D.K. et Kraus N.C. (1993 b) - *Project performance: Ocean city, Maryland beach nourishment; beach nourishment engineering and management considerations*. Proc. Coastal Zone '93. ASCE. New York. pp. 1-15.
- Stable D.K. et Morang A. (1992) - *Using morphology to determine net littoral drift directions in complex coastal systems*. Coastal Engineering Technical Note H-30, U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station, Coastal Engineering Research Center, Vicksburg, MS.

- Stauble D.K., Garcia A.W., Kraus N.K., Grosskopf W.G. et Bass G.P. (1993) - *Beach nourishment project response and design evaluation: Ocean City, Maryland. Report 1: 1988-1992*. Technical Report CERC-93-13, U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station, Coastal Engineering Research Center, Vicksburg, MS.
- Steetzel H.J., De Vroeg J.H., Van Rijn L.C. et Stam J.M.T. (1998) - *Morphological modelling using a modified multi-layer approach*. Proceedings 26th International Conference on Coastal Engineering, Copenhagen, Denmark.
- Steijn R.C., Louters T., Van der Spek A.J.F. et De Vriend H.J. (1989) - *Numerical model hindcast of the ebb tidal delta evolution in front of the Delta-works*. In: R.A. Falconer, P. Goodwin et R.G.S. Matthew (Eds.) *Hydraulic and Environmental Modelling of Coastal, Estuarine and River Waters*. Gower Technical, Aldershot. pp. 145-156.
- Stive M.J.F., Aarninkhof S.G.J., Hamm L., Hanson H., Larson M., Wijnberg K.M., Nicholls R.J., et Capobianco, M. (2002) - *Variability of shore and shoreline evolution*. *Coastal Engineering*, 47: 211-235.
- Stive M.J.F. (1986) - *A model for cross-shore sediment transport*. 20th ICCE. Taipei. pp. 1550-1564.
- Stive M.J.F. et De Vriend H.J. (1995) - *Modelling shoreface profile evolution*. *Marine Geology*, 126: 235-248.
- Stive M.J.F., Aarninkhof S.G.J., Hamm L., Hanson H., Larson M., Wijnberg K.M., Nicholls R.J. et Capobianco M. (2002) - *Variability of shore and shoreline evolution*. *Coastal Engineering*, 47: 211- 235.
- Stockdon, H.F. et Holman R.A. (2000) - *Estimation of wave phase speed and nearshore bathymetry from video imagery*. *J. Geophys. Res.*, 105 (C9): 22.015–22.033.
- Storms J.E.A., Weltje G.J., Van Dijke J.J., Geel C.R. et Kroonenberg S.B. (2002) - *Process-response modeling of wave dominated coastal systems: simulating evolution and stratigraphy on geological timescales*. *Journal of Sedimentary Research*, 72 (2): 226-239.
- Surace L. (1995) - *La nuova rete geodetica nazionale IGM95*. *Bollettino di Geodesia e Scienze Affini*, 2.
- Symond G., Holman R.A., Bruno B. (1997) - *Rip-currents*. *Proc. Coastal Dynamics '97*. New York. ASCE. pp. 584-585.
- Szmytkiewicz M., Biegowski J., Kaczmarek L.M., Okrój T., Ostrowski R., Pruszek Z., Ró y ski G., Skaja M. et Zeidler R.B. (1998) - *Comparative analysis of coastline models*. Final report, DWW-1149, Rijkswaterstaat Delft, C2-30-VAL, IBW PAN Gda sk.

- Szmytkiewicz M., Biegowski J.X, Kaczmarek L.M., Okroj T., Ostrowski R.X., Pruszek Z.,
 Rozynsky G. et Skaja M. (2000) - *Coastline changes nearby harbour structures: comparative analysis of one-line models versus field data*. Coastal Engineering, 40(2):119-139.
- Tao C. et Hu Y. (2001) - *A comprehensive study of the Rational Function Model for Photogrammetric processing*. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, 67(12): 1347-1357.
- Tessier B., Certain R., Barusseau J.P et Henriot J.P. (2000) - *Évolution historique du prisme littoral du lido de l'étang de Thau (Sète, Sud-Est de la France). Mise en évidence par sismique réflexion très haute résolution*. Earth and Planetary Sciences, 331: 709–716.
- Tesson M. Labaune C. et Gensous B. (2005) - *Small rivers contribution to the quaternary evolution of a mediterranean littoral system: the western Gulf of Lions, France*. Marine Geology, 222-223: 311-334.
- Thieler E.R et Danford W. (1995) – *Historical shoreline mapping: improving techniques and reducing positioning errors*. Journal of Coastal Research, 10: 547 – 563.
- Thieler E.R., Martin D. et Ergul A. (2003) - *The digital shoreline analysis system (DSAS) version 2.0: Shoreline change measurement software extension for ArcView*. U.S. Geological Survey Open-File Report 03-076, www.usgs.gov/ , <http://woodshole.er.usgs.gov/project-pages/dsas/>
- Thom B.G. et Hall W. (1991) - *Behavior of beach profiles during accretion and erosion dominated periods*. Earth Surface Processes and Landforms, 16: 113-127.
- Timothy W., Kana T.W. et Ram K.M. (1988) - *Analysis of nourished profile stability following the fifth Hunting Island (SC) beach nourishment project*. Coastal Engineering, 33: 117-136.
- Todaro R. (2002) - *Progetto rete geodetica Venezia GPS200*. Atti 6^a conf. ASITA. Perugia. pp. 1947-1950.
- Tomasicchio R. et Tomasicchio U. (2000) - *Lavori marittimi di dragaggio e di discarica*. Studi Costieri, 3: 85-102.
- Tortora P. et Cowell P.J. (2005 a) - *Principi geometrici nei sistemi costieri trasgressivi. Parte 1^a: processi di migrazione del litorale*. Geologica Romana, 38: 61-75.
- Tortora P. et Cowell P.J. (2005 b) - *Principi geometrici nei sistemi costieri trasgressivi. Parte 2^a: la preservazione di litosomi costieri su piattaforme continentali a debole pendenza*. Geologica Romana, 38: 77-96.
- Tortora P. (1991) - *Calcolo del volume di inerti nel ripascimento artificiale delle spiagge*. Rendiconti Soc. Geol. It., 14: 181-184.

- Tortora P. (1992) - *Contributo dell'indagine sedimentologica al ripascimento dei litorali in erosione: ipotesi di ricostruzione della spiaggia di Marina di Tarquinia (Lazio settentrionale)*. Boll. Soc. Geol. It., 111: 315-333.
- Tortora P. (1994) - *Sandy shelf deposits as source material for artificial nourishment of modern erosive beaches: an integrated approach using high resolution seismic and sedimentological analysis*. Giornale di Geologia, ser. 3a, 56/2: 275-277 (e poster).
- Trembanis A.C., Smith A.W. et Short A.D. (2001) - *El Nino/Southern Oscillation (ENSO), Wave Climate, and Beach Variation—Two Case Studies from Australia*. Proceedings Earth Systems Processes Meeting. Edinburgh, Scotland.
- Trentesaux A., Stolk A. et Berne S. (1999) - *Sedimentology and stratigraphy of a tidal sand bank in the southern North Sea*. Marine Geology, 159: 253-272.
- Tronvig K.A. (2003) - *NOAA's Coastal Oceanographic Applications and Services of Tides and Lakes (COASTAL) Program*. Proceedings OCEANS 2003. San Diego.V4. pp. 1948 - 1953.
- Turner I., Leyden V., Symond G., McGrath J., Jackson A., Jancar T., Aarninkhof S.G.J. et Elshoff L.E. (2000) - *Comparison of observed and predicted coastline changes at the Gold Coast artificial (surfing) reef*. Proc. of Int. Conf. on Coastal Engineering, Sydney. pp.1836-1847.
- Ueno M., Santerre R., Langelier D. et Marceau G. (2000) - *Improvement of GPS Ambiguity Resolution Using Height Constraint for Bathymetric Surveys*. Proceedings Geomatics 2000. Montreal. pp 842-850.
- Underwood N., Hamback P. et Inouye B.D. (2005) - *Large-scale questions and small-scale data: empirical and theoretical methods for scaling up in ecology*. Oecologia, 145: 177-178.
- US Army Corps of Engineers (2002) - *Engineering and Design - Hydrographic Surveying*. EM 1110-2-1003.
- US Army Corps of Engineers (2006) - *Coastal Engineering Technical Note*.
<http://chl.erdc.usace.army.mil/library/publications>
- USACE (1984) - *Shore Protection Manual*. 4th ed. U.S. Army Corps of Engineers, Coastal Engineering Research Center, US Government Printing Office, Washington, DC, 2.
- USACE (1991) - *National Economic Development Procedures Manual - Coastal Storm Damage and Erosion*. U.S. Army Corps of Engineers, Institute of Water Resources, Report No. 91-R-6, Water Resources Support Center, Fort Belvoir, VA.
- USACE (1992) - *Coastal littoral transport*. U.S. Army Corps of Engineers, Engineer Manual 1110-8-3, Washington, D.C.
- USACE (2002) - *Coastal Engineering Manual*. US Army Corps of Engineers, EM 1110-2-1100.

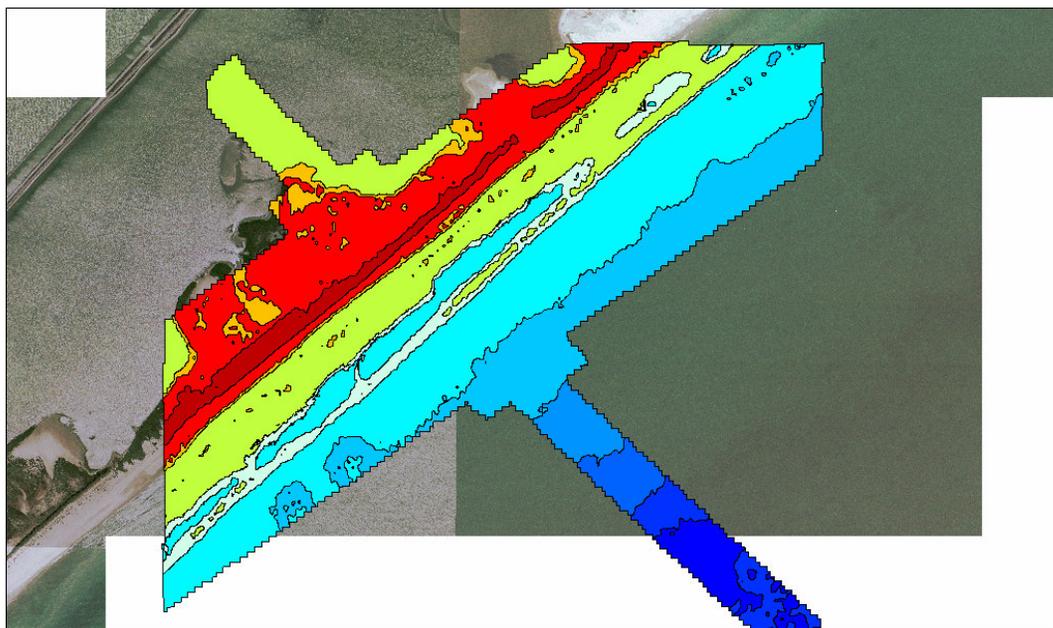
- USACE (2002 a) - *Beach Fill Design*. Coastal Engineering Manual, US Army Corps of Engineers, EM 1110-2-1100 (Part V, chapter 4). pp. 1-109.
- USACE (2002 b) - *Cross-shore sediment transport processes*. Coastal Engineering Manual, US Army Corps of Engineers EM 1110-2-1100 (Part 3, chapter 3). pp. 1-109.
- USACE (2006) - *Home page US Army Corps of Engineers*. <http://www.usace.army.mil/>
- USGS.-Remote Video Monitoring Image Processing Software Tools. U.S. Department of the Interior. U.S. Geological Survey, Center for Coastal Geology, <http://www.coastal.er.usgs.gov>.
- Ustun B., Ekercin S. et Musaoglu N. (2003) - *A performance analysis of the classification and manual digitising methods for the detection of coastline by using satellite image data*. Proc. 23th EARSel Symposium. Ghent.
- Valverde H.R., Trembanis A.C. et Pilkey O.H. (1999) - *Summary of beach nourishment episodes on the US East Coast Barrier Islands*. J. Coastal Research, 15 (4): 1100-1118.
- Van De Graav J., Niemeyer H.D. et Van Overeem J. (1991 a) - *Artificial Beach Nourishments*. Coastal Engineering, SI 16(1):164.
- Van De Graav J., Niemeyer H. D. et Van Overeem J. (1991 b) - *Beach nourishment, philosophy and coastal protection policy*. In: J. Van De Graav, H.D. Niemeyer et J. Van Overeem (Eds.), *Artificial Beach Nourishment*. Coastal Engineering, 16: 3–22.
- Van Duin M.J.P., Wiersma N.R., Walstra D.J.R., Van Rijn L.C. et Stive M.J.F. (2004) - *Nourishing the shoreface: observations and hindcasting of the Egmond case, The Netherlands*. Coastal Engineering, 51: 813- 837.
- Van Enckevort, I.M.J. et Ruessink B.G. (2001) - *Effect of hydrodynamics and bathymetry on video estimates of nearshore sandbar position*. Journal of Geophysical Research, 106: 16969-16980.
- Van Enckevort, I.M.J. et Ruessink B.G. (2003 a) - *Video observations of nearshore bar behaviour. Part 1: alongshore uniform variability*. Continental Shelf Research, 23: 501-512.
- Van Enckevort, I.M.J. et Ruessink B.G. (2003 b) - *Video observations of nearshore bar behaviour. Part 2: alongshore non-uniform variability*. Continental Shelf Research, 23: 513-532.
- Venema V. (2000) - *Cloud boundary height measurements using lidar and radar*. Physics and Chemistry of the Earth, 24, No. 2, pp. 129-134.
<http://arxiv.org/ftp/physics/papers/0306/0306069.pdf>.
- Vespe F., Bianco G., Fermi M., Nardi A. et Sciarretta C. (2000) - *The Italian GPS fiducial network: Services and products*. Journal of Geodynamics, 30: 327-336.

- Villaret C. et Latteux B. (1992) - *Long-term simulation of cohesive sediment bed erosion and deposition by tidal currents*. Int. Conf. on Comp. Modeling of Seas and Coastal Regions. Southampton.
- Volpe F. et Rossi L. (2003) - *Processamento geometrico di dati Quickbird tramite RPC*. Atti 7^a conf. ASITA. Verona. pp.1873-1878.
- Wagle B. G. et Veerayya M. (1996) - *Submerged sand ridges on the western continental shelf off Bombay, India: evidence for Late Pleistocene-Holocene sea-level changes*. Marine Geology, 136 (1-2): 79-95.
- Wang L.T. (2003) - *Delaware Inland Bays shoreline extraction using Landsat7 satellite imagery*. Digital Mapping Techniques '03_Workshop Proceeding, U.S. Geological Survey Open-File Report 03-417. <http://pubs.usgs.gov/of/2003/of03-417/wang/index.html>.
- Warrick R.E. et Winslow J.D. (1960) - *Application of the seismic methods to a groundwater problem in norteastern Ohio*. Geophysics, 25: 505-519.
- Water research laboratory, school of civil and environmental engineering, University of New South Wales – Coastal imaging @ UNSW. <http://www.wrl.unsw.edu.au/coastalimaging/index.php>
- White, S.A. et Wang Y. (2003) - *Utilizing DEMs derived from LIDAR data to analyze morphologic change in North Carolina coastline*. Remote Sensing of Environment, 85(1): 39-47.
- Wiegel R.L. (1994) - *Ocean Beach Nourishment on the USA Pacific Coast*. Shore & Beach, 62(1): 11-35.
- Wijnberg K. M. et Holman R. A. (1997) - *Cyclic bar behaviour viewed by video imagery*. Proc. Coastal Dynamics '97, New York. ASCE. pp. 375-384.
- Wijnberg K.M. et Terwindt J.H. (1995) - *Extracting decadal morphological behavior from high resolution, long term bathymetric surveys along the Holland coast using eigenfunction analysis*. Marine Geology, 126: 301-330.
- Wikipedia (2006) - *Dredging techniques*. en.wikipedia.org/wiki/Main_Page, <http://en.wikipedia.org/wiki/Dredging>
- Winant G.A., Inman D.L. et Nordstrom C.E. (1975) - *Description of seasonal beach changes using empirical eigenfunctions*. J. Geophy. Res., 80: 1979-1986.
- Work P.A. et Dean R.G. (1995) - *Assessment and prediction of beachnourishment evolution*. Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering, 121(3): 182– 189.
- Wozencraft J.M. (2002) - *Complete coastal mapping with airborne Lidar*. Proceedings Oceans 02. Honolulu. V2. pp. 1194-1198.

- Wozencraft J.M. et Lillycrop W.J. (2003) - *SHOALS Airborne coastal mapping, past, present, and future*. Journal of Coastal Research, SI 38: 207-215.
- Wozencraft J.M. et Millar D. (2005) - *Airborne Lidar and integrated technologies for coastal mapping and charting*. Marine Technology Society Journal, 39(3): 27-35.
- Wright L.D. et Short A.D. (1984) - *Morphodynamic variability of surf zones and beaches: A Synthesis*. Marine Geology, 56: 93-118.
- Wright L.D. et Thom B.G. (1977) - *Coastal depositional landforms: a morphodynamic approach*. Prog. Phys. Geogr., 1: 412-459.
- Wright L.D., Short A.D. et Green M.O. (1986) - *Short-term changes in the morphodynamic states of beaches and surf zones: an empirical predictive model*. Marine Geology, 62: 339-364.
- WRL (2006) - *Coastal Imaging at UNSW*. Water Research Laboratory, School of Civil and Environmental Engineering University of New South Wales, <http://www.wrl.unsw.edu.au/coastalimaging/index.php>
- Yamaguchi M. et Nishioka Y. (1984) - *Numerical simulation on the changes of bottom topography by the presence of coastal structures*. 19th ICCE. Houston. pp. 1732-1748.
- Yang C., Everitt J.H. et Bradford J.M. (2006) - *Comparison of QuickBird satellite imagery and airborne imagery for mapping grain sorghum yield patterns*. Precision Agric, 7: 33-44.
- Jeremy M., Beaudoin A., Beaudoin J. et Walter G. (2001) - *Global Shoreline Mapping from an Airborne Polarimetric SAR, Assessment for RADARSAT 2 Polarimetric Modes*. Defence Research Establishment Ottawa, Technical Report DREO TR 2001-056.
- Zaggia R. (1998) - *Analisi critica degli interventi di ripascimento in Italia*. Degree Thesis, Università di Padova, Facoltà di Ingegneria, Dipartimento di Ingegneria Idraulica, Marittima e Geotecnica. 160 pp.
- Zeiler M., Schulz-Ohlberg J. et Figge K. (2000) *Mobile sand deposits and shoreface sediment dynamics in the inner German Bight (North Sea)*. Marine Geology, 170: 363-380.
- Zheng J. et Dean R.G. (1997) - *Numerical models and intercomparison of beach profile evolution*. Coastal Engineering, 30: 169-201.
- Zuzek P.J., Nairn R.B. et Thieme S.J. (2003) - *Spatial and temporal considerations for calculating shoreline change rates in the Great Lakes Basin*. Journal of Coastal Research, SI 38: 125-146.

ANNEXE I

VISUALISATION PAR CONTOUR D'UN MNT SUR L'ETANG DE PIERRE BLANCHE.



ANNEXE II

REFERENCES ADDITIONNELLES

- AA. VV. (2002) - *The coast view project. Initial report on video-derived Coastal State Indicators (CSIs)*. In: M. Davidson (Ed.) EU Fifth Framework Research, Technology and Development Project, Environment & Sustainable Development. 78 pp.
- Aarninkhof S.G.J. et Ruessink B.G. (2004) - *Video observations and model predictions of depth-induced wave dissipation*. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 42(11): 2612- 2622.
- Acosta A., Stanisci A., Ercole S. et Blasi C. (2003) - *Sandy coastal landscape of the Lazio region (Central Italy)*. Phytocoenologia, 33 (4): 715-726.
- Albertazzi C., Archetti R., Armaroli C., Ceroni M., Diavola P., Lamberti A. et Medri S. (2005) - *Monitoraggio video di processi costieri in supporto alla gestione della costa: il progetto CoastView*. AIOM Bollettino 32: 5-11.
- Aminti P. (2004) - *Metodi di rilievo integrati per la realizzazione del modello della Laguna di Orbetello – GPS, livellazione geometrica, batimetria, fotogrammetria aerea*. Boll. SIFET, 1/05: 35-42.
- Aminti P. et Aminti P.L. (1999) - *L'accuratezza dei rilievi batimetrici per il monitoraggio del volume di spiaggia*. Studi costieri, 1: 103-115.
- Aminti P., Iannotta P. et Pranzini E. (1999) - *Morfodinamica di un sistema costiero intensamente protetto: il litorale di Marina di Massa*. Atti Accademia Nazionale dei Lincei, Roma, 1-2 ottobre 1998. 154: 263-270.
- Aminti P., Pranzini E. et Tecchi M.G. (1999) - *Modello di previsione del profilo di una spiaggia artificiale in ghiaia per la protezione di litorali o di opere costruite sulla costa*. Atti Accademia Nazionale dei Lincei, Roma, 1-2 ottobre 1998. 154: 257-262.
- Archetti R. et Lamberti A. (2005) - *Il progetto CoastView: applicazioni per la nautica e per la difesa costiera*. Atti della III edizione delle Giornate Italiane di Ingegneria Costiera. Civitavecchia 23-25 Novembre 2005.
- Aubrey D. G. (1983) - *Beaches changes on coasts with different wave climates*. In: A. McLachlan et T. Erasmus (Eds.) Sandy Beaches as Ecosystems. W. Junk, The Hague. pp. 63-85.

- Bailey D.G. et Shand R.D. (1994) - *Determining wave run-up using automated video analysis*. Proceedings of the second New Zealand Conference on Image and Vision Computing, Palmerston North. pp. 2.11.1-2.11.8.
- Barakat H.F., Eman H.A. et Abdel-wahab M.S. (2004) - *Assessment of a developed combined point/line-based projective equations*. Geo-Imagery Bridging Continents, 20th ISPRS Congress, Istanbul, Commission III papers, part B3. Proceedings IAPRS. Vol.35. pp.1682-1750.
- Barale V. et Folving S. (1996) - *Remote sensing of coastal interactions in the Mediterranean region*. Ocean & Coastal Management, 30 (2-3): 217-233.
- Benedet L., Finkla W., Campbella T. et Klein A. (2004) - *Predicting the effect of beach nourishment and cross-shore sediment variation on beach morphodynamic assessment*. Coastal Engineering, 51: 839-861.
- Biasini A. et Salvatore M.C. (1995) - *Fotorestituzione digitale della linea di riva: area campione del Delta Tiberino*. Il Quaternario, 8 (1): 263-266.
- Blaschke T. (2004) - *Object-based contextual image classification built on image segmentation*. Advances in Techniques for Analysis of Remotely Sensed Data, 2003 IEEE Workshop. pp. 113-119.
- Bowman D. et Pranzini E. (2003) - *Reversed responses within a segmented detached breakwater, the Tuscany coast Italy — a case study*. Coastal Engineering, 49: 263–274.
- Butman B. (2002) - *Mapping the sea floor of the Historic Area Remediation Site (HARS) offshore of New York City*. U.S. Geological Survey Fact Sheet FS-001-02.
- Camfield F.E. et Morang A. (1996) - *Defining and interpreting shoreline change*. Ocean and Coastal Management, 32(3): 129-151.
- Capobianco M. et Stive M.J.F. (1997) - *Soft protection technologies as a tool for integrated coastal zone management*. Proc. 3rd Int. Conf. on the Mediterranean Coastal Environment (MEDCOAST '97), Malta, November 11– 14. pp. 469–484.
- Capobianco M., Stive M.J.F., Jimenez J.A. et Sanchez-Arcilla A. (1998) - *Towards the definition of budget models for the evolution of deltas*. J. Coast. Conserv., 4: 7-16.
- Capraro A., Casacchia R., Salvatori R. (2000). *Integrazione dei dati multisensore per lo studio multitemporale di indicatori ambientali*. Atti 4^a Conferenza Nazionale ASITA, Genova 3-6 Ottobre. Vol. 1. pp. 341-346.
- Caputo C., Chiocci F. L., Ferrante A., La Monica G. B., Landini B. et Pugliese F. (1993) - *La ricostruzione dei litorali in erosione mediante ripascimento artificiale e il problema del reperimento degli inerti*. In: P. Aminti et E. Pranzini (Eds). La Difesa dei Litorali in Italia, Edizioni delle Autonomie. pp. 121-151.

- Caputo C., D'Alessandro L., La Monica G.B., Landini B. et Lupia Palmieri E. (1991) - *Present erosion and dynamics of Italian beaches*. Zeitschrift Geomorphology, Suppl. 81: 31-39.
- Caputo C., La Monica, G.B. Lupia Palmieri E. et Pugliese F. (1986). *Physiographic Characteristics and Dynamics of the Shore of Rome (Italy)*. In: V. Gardiner (Ed.) International Geomorphology, Part 1. John Wiley & Sons Ltd. pp. 1185-1198.
- Casacchia R., A. Grignetti A., Salvatori R. et Tinelli A. (2001) - *Change Detection in a Dune System by Aerial Photographs and MIVIS Data*. Proc. Fifth Int. Airborne Remote Sensing Conf. and Exhibition, Sept. 17-20, San Francisco, CA. (CD-ROM).
- Chaney P.L. et Stone G.W. (1996) - *Soundside erosion of a nourished beach and implications for winter cold front forcing: West Ship Island Mississippi*. Shore and Beach, 64 (1): 27-33.
- Chavez P.S. et Bauer B. (1982) - *An automatic optimum kernel-size selection technique for edge enhancement*. Remote Sensing of Environment, 12: 23-38.
- Clark J.R. (1996) - Coastal Zone Management Handbook. Lewis Publisher, CRC. 694 pp.
- Comanicu D. et Meer P. (1997) - *Robust analysis of feature spaces: color image segmentation*. Proceedings of IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. San Juan, Puerto Rico. pp. 750-755.
- Congalton R. G. (1991) - *A review of assessing the accuracy of classification of remotely sensed data*. Remote Sensing of Environment, 37: 35-46.
- Costas S., Alejo I, Vila-Concejo A, et Nombela, M.A. (2005) - *Persistence of storm-induced morphology on a modal low-energy beach : A case study from NW-Iberian Peninsula*. Marine Geology, 224: 43-56.
- Cowell P.J., Stive M., Niedoroda A.W., De Vriend H.J., Swift D.J.P., Kaminsky G.M. et Capobianco M. (2003) - *The Coastal-Tract (Part 1): A Conceptual Approach to Aggregated Modeling of Low-Order Coastal Change*. Journal of Coastal Research, 19(4): 812-827.
- Cowell P.J., Stive M., Niedoroda A.W., Swift D.J.P., De Vriend H.J., Buijsman Nicholls R.J., Roy P.S., Kaminsky G.M., Cleveringa J., Reed C.W. et De Boer P.L. (2003) - *The Coastal-Tract (Part 2): Applications of Aggregated Modeling of Lower-order Coastal Change*. Journal of Coastal Research, 19(4): 828-848.
- Daniels R.C., Ruggiero P. et Weber L.E. (1999) - *Washington geodetic control network: Report and station index*. Coastal Monitoring & Analysis Program, 99: 103-268.
- Davidson M.A., Aarninkhof S.G.J., Van Koningsveld M. et Holman R.A. (2004) - *Developing coastal video monitoring systems in support of coastal zone management*. Journal of Coastal Research, SI 39: pp.

- Dean R.G. (1996) - *Beach nourishment performance: planform considerations*. Shore and Beach, 64(3): 36-39.
- Dean R.G. et Yoo C. (1993) - *Predictability of beach nourishment performance*. In: D.K. Stauble et N.C. Kraus (Eds.). Beach nourishment engineering and management considerations, ASCE. pp. 86-102.
- Dette H.H. (1998) - *Management of beach nourishment in an open sand system*. Abstracts of the 26th International Conference on Coastal Engineering, ASCE, Copenhagen, Denmark. pp. 332-333.
- Donoghue, D.N.M. et Shennan, I. (1987) - *A preliminary assessment of Landsat TM imagery for mapping vegetation and sediment distribution in the Wash estuary*. International Journal of Remote Sensing, 8 (7): 1101–1108.
- Donoghue, D.N.M., Reid Thomas D.C. et Zong, Y. (1994) - *Mapping and monitoring the intertidal zone of the east coast of England using remote sensing techniques and a coastal monitoring GIS*. Marine Technology Society, 28: 19–29.
- Duda R.O. et Hart P.E. (1973) - *Pattern Classification and Scene Analysis*. Wiley Ed., New York. 482 pp.
- Durand D., Bijaoui J. et Cauneau F. (2000) - *Optical Remote Sensing of Shallow-Water Environmental Parameters: A Feasibility Study*. Remote Sensing of Environment, 73: 152-161.
- Ehlers M. (1995) – *Integration of Remote Sensing with Geographic Information System: a necessary evolution*. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 55: 1431-1434.
- Elkoushy A. A. et Tolba E. R. A. (2003) - *Prediction of Shoreline Change by Using Satellite Aerial Image*. Faculty of Engineering-Suez canal university-42352 Port Said-Egypt, poston2002@nilesat.net, ehab@sedapnet.org.eg.
- Evangelista S., La Monica G.B. et Landini B. (1992) - *Beach-fill performance at Terracina (Latium-Italy)*. Abstracts International Coastal Congress, Kiel, September 7-12.
- Fierro G. (2004) – *Il degrado dei litorali*. Atti Convegni Lincei, XXI Giornata dell’Ambiente, Aree Costiere. Roma. 205 : 37-50.
- Frihy, O.E. (1996) - *Some proposals for coastal management of the Nile Delta coast*. Ocean and Coastal Management, 30: 43–59.
- Frouin, R., Schwindling, M. et Deschamps P.Y. (1996). *Spectral reflectance of sea foam in the visible and near-infrared. In situ measurements and remote sensing implications*. Journal of Geophysical Research, 101: 14361–14371.

- Fung, T. et LeDrew, E. (1988) - *The determination of optimal threshold levels for change detection using various accuracy indices*. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 54 (10): 1449–1454.
- Gary C. Guenther, A. Grant Cunningham, Paul E. La Rocque et David J. Reid (2000) – *Meeting the accuracy challenge in airborne LIDAR bathymetry*. Proceedings of EARSeL-SIG-Workshop LIDAR, Dresden/FRG.
- Giannetti F., Montanarella L. et Salandin R. (2001) – *Integrated use of satellite images, DEMs, soil and substrate data in studying mountainous lands*. JAG, 3 (1): 25-29.
- Gould R.W.Jr et Arnone R.A. (1997) - *Remote sensing estimates of inherent optical properties in a coastal environment*. Remote Sensing of Environment, 61: 290-301.
- Guillén J. et Hoekstra P. (1996) - *The equilibrium distribution grain size fractions and its implications for cross-shore sediment transport: a conceptual model*. Marine Geology, 135: 15-33.
- Guillén J., Chic O., Ojeda E., Palanques A. et Aarnikhoff S. (2003) - *Monitorización de las playas de la ciudad de barcelona utilizando imágenes de video: evolución de la línea de costa en respuesta a temporales y regeneración artificial (2001-2002)*. In: M. Lasada et M. Castillo (Ed.) VII Jornadas Españolas de Ingeniería de Costas y puertos, Libro de resúmenes; pp. 254-256.
- Hall, F.G., Strelbel, D.E., Nickeson, J.E. et Goetz, S.J. (1991) - *Radiometric rectification: toward a common radiometric response among multirate, multisensor images*. Remote Sensing of Environment, 35: 11–27.
- Hesselmans G. H. F. M., Wensink G. J. et Calkoen, C. J. (1997) - *Possibilities of remote sensing technologies in coastal studies*. Geojournal, 42 (1): 65-72.
- Holman R.A., Lippmann T.C., O'Neill P.V. et Hathaway, K. (1991) - *Video estimation of subaerial beach profiles*. Marine Geology, 97: 225-231.
- Holthuijsen L.H., Booij N. et Herbers T.H.C. (1989) - *A prediction model for stationary, short-crested waves in shallow waters with ambient currents*. Coastal Engineering, 13: 23-54.
- Houston J.R. (1991) - *Beachfill performance*. Shore and Beach, 59(3): 15-24.
- Houston J.R. (1996) - *Engineering practice for beach-fill design*. Shore and Beach, 64(3): 27-35.
- Huaguo Z, Donglin L. et Weigen H. (2005) - *Scale Characteristics of Remote Sensing Information: A Case of Shoreline*. Proceedings of Geoscience and Remote Sensing Symposium. IGARSS '05, Seoul, Korea, 25-29 July 2005. Vol. 8. pp. 5383- 5385.

- Iannantuono E., Roskopf C.M., Stanisci A., Acosta A. et Augelli P.P.C. (2004) – *Effetti della dinamica costiera sull'evoluzione dei sistemi dunali presenti lungo la costa molisana*. Atti Convegni Lincei, XXI Giornata dell' Ambiente, Aree Costiere, Roma. 205: 321-331.
- Jackson D.W.T., Cooper J.A.G. et Del Rio L. (2005) - *Geological control of beach morphodynamic state*. Marine Geology, 216: 297-314.
- Jackson L.A. et Tomlinsen R.B. (1990) - *Nearshore nourishment implementation, monitoring and model studies of 1.5 Mm³ at Kirra beach*. Proc. 22nd Int. Conf. on Coastal Engineering, Delft, Netherlands. ASCE. New York. pp. 2241-2254.
- Kaminsky R. et Gelfenbaum R. (1988) - *Monitoring coastal change in Southwest Washington and Northwest Oregon during the 1997/98 El Nino*. Shore and Beach, 66(3).
- Kana T. (1989) - *Erosion and beach restoration at Seabrook Island, South Carolina*. Shore and Beach, 57(3): 3-18.
- Kana T. (1993) - *The profile volume approach to beach nourishment*. In: D.K. Stauble et N.C. Kraus (Eds.). Beach Nourishment Engineering and Management Considerations, ASCE. pp. 176-190.
- Kana T. (1996) - *United States, South Carolina: soft engineering beach restoration*. In: J.R. Clark (Ed.), Coastal Zone Management Handbook. Lewis, Boca Raton, FL. pp. 622-626.
- Kana T. et Mohan R.K. (1998) - *Analysis of nourished profile stability following the fifth Hunting Island (SC) beach nourishment project*. Coastal Engineering, 33: 117-136.
- Kraus N.C. et Larson M. (1995) - *Depth of closure in beach fill design*. Coastal Engineering Technical Note, U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station, Coastal Engineering Research Center, Vicksburg, MS.
- Kraus N.C., Larson M. et Wise R.A. (1999) - *Depth of Closure in Beach-Fill Design*. Proceedings 12th Annual National Conference on Beach Preservation Technology, Florida Shore and Beach Preservation Association, Tallahassee, FL. pp. 271-286.
- Lillesand T.M. et Kiefer R.W. (1979) - *Remote Sensing and Image Interpretation*. New York, Wiley. 612 pp.
- Marinelli O. (1926) - *Sull'eta dei delta italiani*. La geografia, 1-2: 21-29.
- Mason D.C., Gurney C. et Kennett M. (1999) - *Beach topography mapping – a comparison of techniques*. Journal of Coastal Conservation, 6(1): 113-124.
- Mazzanti R. et Pasquinucci M. (1983) - *The evolution of the Luni-Pisa coastline*. In: E.C.F. Bird et P. Fabbri (Eds.) Coastal problems in the Mediterranean Sea, IGU, Commission on Coastal Environment, Bologna.

- Mcbeth, F.H. (1956) - *A method of shoreline delineation*. Photogrammetric Engineering, 22: 400-405.
- Monti C., Guerra F., Balletti C. et Miniutti D. (1999) - *Geometric operations in digital images*. Atti XVI International Symposium CIPA. Olinda.
- Moore B.D. (1982) - Beach evolution in response to changes in water level and waves height. NCE thesis, Department of Civil Engineering, Newark, University of Delaware.
- Morton R., Leach M., Paine J. et Cardoza M. (1993) - *Monitoring Beach Using GPS Surveying Techniques*. Journal of Coastal Research, 9(3): 702-720.
- Mulder J.P.M., Van De Kreeke J. et Van Vessem P. (1994) - *Experimental shoreface nourishment, Terschelling (NL)*. Proc. 24th Coastal Engineering Conference. American Society of Civil Engineers, New York. pp. 2886- 2899.
- Mumby P.J., Raines P.S., Gray D.A. et Gibson J.P. (1995) – *Geographical Information System: a tool for integrated coastal zone management in Belize*. Coastal Management, 23: 111-121.
- National Research Council (1990) - *Managing Coastal Erosion*. Washington, B.C., National Academy Press. 182 pp.
- NOURTEC (1997) - *Innovative nourishment techniques evaluation*. Final report. Coord. Rijkswaterstaat, National Institute for Coastal and Marine Management/RIKZ, The Hague, Netherlands. 105 pp.
- Pacini M., Pranzini E. et Sirito G. (1999) - *La ricostruzione delle spiagge di Cala Gonone*. Studi Costieri, 1: 43-55.
- Paine D.E. (1981) – *Aerial photography and Image Interpretation for resource Management*. John Wiley and Sons. New York. 571 pp.
- Paskoff R. (1992) - *Eroding Tunisian beaches: Causes and mitigation*. Bollettino di Geofisica Teorica ed Applicata 10(22): 85-91.
- Pasqualini V., Pergent-Martini C. et Pergent G. (1999) - *Environmental impact identification along the Corsican coast (Mediterranean sea) using image processing*. Aquatic Botany, 65: 311–320.
- Phinn S.R., Menges C., Greg J. E., Hill G.J.E. et Stanford M. (2000) - *Optimizing Remotely Sensed Solutions for Monitoring, Modeling, and Managing Coastal Environments*. Remote Sensing Environment, 73: 117–132.
- Phinn, S. R. (1998) - *A framework for selecting appropriate remotely sensed data dimensions for environmental monitoring and management*. Int. J. Remote Sens, 19:3457–3463.
- Pilkey O. (1992) - *Another view of beachfill performance*. Shore and Beach, 60(2): 20-25.

- Pilkey O., Young R., Bush D. et Thieler E. (1994) - *Predicting the behaviour of beaches: alternatives to models*. Proceedings of Littoral '94 Conference EUROCOAST, Lisbon, Portugal. pp. 53-60.
- Plant, N.G., Aarninkhof, S.G.J., Turner, I.L. and Kingston, K. (in press). *The performance of shoreline detection models applied to video imagery*. Journal of Coastal Research. In press.
- Pranzini E. (2001) - *Updrift river mouth migration on cusped deltas: two examples from the coast of Tuscany Italy*. Geomorphology, 38: 125–132.
- Psuty N.P. et Namikas S.L. (1991) - *Beach nourishment episodes at the Sandy Hook Unit, Gateway National Recreation Area, New Jersey, USA: a preliminary comparison*. Proceedings of Coastal Sediments '91 Conference, ASCE, Seattle, U.S.A. pp. 2116-2129.
- Quartel S., Addink E.A. et Ruessink B.G. (2006) - *Object-oriented extraction of beach morphology from video images*. International Journal of Applied Earth Observation and geoinformation, JAG. 24 pp.
- Queilenec, R.E. (1989) - *The CORINE "Coastal Erosion Project": Identification of coastal erosion problems and data base on the littoral environment of eleven European countries*. Proceeding 6th Symposium on Coastal and Ocean Management (Coastal Zone '89), Charleston, South Carolina, July 11-14 1987. Vol. 5. pp. 4594 - 4601.
- Ramsey III E.W., Nelson G.A. et Sapkota S.K. (2001) - *Coastal change analysis program implemented in Louisiana*. Journal of Coastal Research, 17: 53-71.
- Richards J.A. (1994) - *Remote Sensing Digital Image Analysis*. Springer Verlag, Berlin. 340 pp.
- Ricketts P.J. (1992) – *Current approach in geographic information systems for coastal management*. Marine Pollution Bulletin, 5: 82-87.
- Robinson E. (2004) - *Coastal changes along the coast of Vere, Jamaica over the past two hundred years: data from maps and air photographs*. Quaternary International, 120: 153–161
- Sardà R., Avila C. et Mora J. (2005) - *A methodological approach to be used in integrated coastal zone management processes: the case of the Catalan Coast (Catalonia, Spain)*. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 62: 427–439
- Schoones J.S. et Theron A.K. (1993) - *Review of the field-data base for longshore sediment transport*. Coastal Engineering, 19: 1-25.
- Seymour R., Guza R.T., O'Reilly W. et Elgar S. (2005) - *Rapid erosion of a small southern California beach fill*. Coastal Engineering, 52: 151-158
- Seymour R.J., Bockstael N.E., Campbell T.J., Dean R.G., Komar P.D., Pilkey O.H., Pratt A.P., Snow M.R., Dolah R.F.V., Weggel J.R. et Wiegel R.L. (1996) - *Beach nourishment and protection: executive summary*. Shore and Beach, 64(1): 5-10.

- Sistema de Modelado Costero. Manual del usuario 2.0. Grupo de Ingeniería Oceanográfica y de Costas de la Universidad de Cantabria et Ministererio de Medio Ambiente Ed. España. 167 pp.
- Stafford D.B. (1971) – *Air photo survey of coastal erosion*. Photogrammetric engineering, 3: 562-575.
- Stauble D.K. et Bass G.P. (1999) - *Sediment dynamics and profile interactions of a beach nourishment project*. Proceedings of Coastal Sediments '99 Conference. ASCE. New York. pp. 2567-2581.
- Stockdon H. F. et Holman R. A. (2000) - *Estimation of wave phase speed and nearshore bathymetry from video imagery*. Journal of Coastal Research, 105 (C9): 22015-22033.
- Torres-Pulliza D., Brock J., Lea C. et Duffy M. (2001) - *Classification of barrer island land-cover using aerial photography and lidar airborne remote sensing*. Fifth International Airborne Remote Sensing Conference. San Francisco, California. (CD-ROM).
- Van Alphen J.S.L.J., Hallie F.P., Ribberink J.S., Roelvink J.A. et Louisse C.J. (1990) - *Offshore sand and extraction and nearshore profile nourishment*. Proc. 22nd Intern. Conf. on Coastal Eng. ASCE. New York. pp. 1998-2009.
- Van Der Wal D. (1998) - *The impact of the grain-size distribution of nourished sand on aeolian sand transport*. Journal of Coastal Research, 14(2): 620-631.
- Van Duin M.J.P., Wiersma N.R., Waltraa D.J.R., Van Rijn L.C., Stive M.J.F. (2004) - *Nourishing the shoreface: observations and hindcasting of the Egmond case, The Netherlands*. Coastal Engineering, 51: 813-837.
- Van Koningsveld, M., Stive M.J.F., Mulder J.P.M., de Vriend H.J., Ruessink B.G. et Dunsbergen D.W. (2003) - *Usefulness and effectiveness of coastal research: a matter of perception?*. Journal of Coastal Research, 19: 441-461.
- Verhagen H.J. (1996) - *Analysis of beach nourishment schemes*. Journal of Coastal Research, 12(1): 179-185.
- Victorov, S., Bychkova I., Popova T. et Sukhacheva L. (2004) - Remote Sensing Change Detection in Coastal Zone Landscapes: Case Study of St. Petersburg Region. Research Institute of Remote Sensing Methods for Geology (VNIKAM) 6 Birzhevoy Proezd, St.Petersburg, 199034, Russia, EcoSys Suppl.-Bd. 42.
- Vidal S., Graham D. et Sault M. (2004) - CSCAP: Coast and Shoreline Change Analysis Program; Using High-Resolution Satellite Image for Shoreline Change Evaluation Within Ports. The Hydrographic Society of America (THSOA), thsoa.org, http://thsoa.org/hy01/5_2.pdf
- Walton T.L.Jr., Cheng J., Wang R. et Manausa M. (2005) - *Modeling of three beach fill projects*. Ocean Engineering, 32: 557-569

- White K. et El Asmar H.M. (1999) - *Monitoring changing position of coastlines using Thematic Mapper imagery, an example from the Nile Delta*. *Geomorphology*, 29: 93–105.
- Wright L.D. et Short A.D. (1984) - *Morphodynamic variability of surf zones and beaches: a synthesis*. *Marine Geology*, 56: 93-118.
- Zakariya R., Rosnan Y., Saidin A., Yahaya M. H., Kasawani I. et Lokman H. (2006) - *Shoreline Detection and Changes for Terengganu River Mouth from Satellite Image (LANDSAT 5 and LANDSAT 7)*. *Journal of Sustainability Science and Management*, 1(1): 47-57.
- Zhu Xiaoge (2001) - *Remote Sensing Monitoring of Coastline Change in Pearl River Estuary*. Proc. ACRS 2001. 22nd Asian Conference on Remote Sensing. Singapore. Vol. 2. pp. 1362-1366.