



GESA

Gestion des stocks sableux interceptés par les ouvrages côtiers et fluviaux. Récupération du transport solide.



Mots clés: dépôts sableux, dynamique sédimentaire, dragages, systèmes sédimentaires.

Authors:

- Instituto de Ciencias del Mar-CSIC: B. Alonso, R. Durán, A. Bernabeu, G. Ercilla.
- Universitat de Barcelona : J. Serra, X. Valois.
- Università di Bologna/DISTART : Authors : A. Lamberti, L. Martinelli, E. Clementi
- Università degli Studi di Firenze/ Dip. di Ingegneria Civile: A. Aminti, C. D'Eliso, G. Barbieri, A. Battistini, L. Cappiotti, E. Mori, G. Tecchi.
- Registro Italiano Dighe, A. Petaccia, A. Greco, A. Maistri.
- Laboratoire d'Études des Géo-Environnements Marins-LEGEM: R. Certain.
- Democritus University of Thrace-School of Engineering: N. Kotsovinos, G. Xeidakis, V. Hrissanthou, P. Angelidis, P. Delimani, A. Georgoulas, M. Andredaki.
- Foundation of Research and Technology-Hellas, Inst. of Applied Mathematics: E.V. Kountandos, N.A. Kampanis, Th.V. Karambas, M. Kazolea Msc.

Introduction

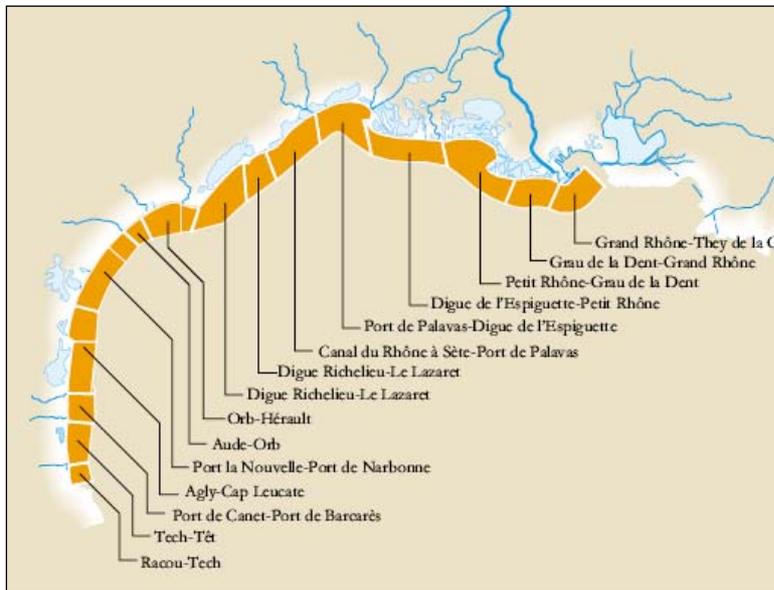
Dans ce projet, on s'intéresse à la gestion des stocks sableux interceptés par les ouvrages côtiers et la récupération du transport solide dans le lit des fleuves. Une compilation bibliographique exhaustive a été menée sur les quatre grandes thématiques abordées dans le sous projet GESA, qui sont les suivantes : i) Problématique générale concernant la dynamique sédimentaire et l'érosion/accumulation; ii) Interventions de gestion des stocks sableux d'origine fluviale; iii) Interventions de gestion des stocks sableux d'origine marine; et iv) Modèles numériques et physiques comme aide à la décision de rechargements et prévision de l'évolution côtière. Cette revue bibliographique thématique a été aussi complétée par un recensement régional des informations regroupant le travail sur les bases de données existantes pour les sites du programme nécessitant une activité préparatoire. Ces informations seront nécessaires pour la compréhension des sites d'étude choisis dans le programme et leur fonctionnement. On conclura cette étude dans divers secteurs des côtes de quatre pays européens : (i) Espagne, (ii) Italie, (iii) France et (iv) Grèce.

Problématique générale

Les urbanisations actuelles et la construction croissantes d'infrastructures côtières/fluviales le long du littoral de la Méditerranée ont eu effets néfastes sur la sédimentation des sables littoraux. Les entités touristiques représentent un poids économique important pour la région et vont être amenées à se développer encore du fait des flux migratoires prévus pour les prochaines décennies. Cette situation a provoqué la multiplication des études traitant de l'influence des structures artificielles sur les courants littoraux et leurs effets sur la côte. Actuellement, l'état et l'évolution de l'environnement côtier sont au cœur des préoccupations des institutions européennes. Tous les États côtiers européens sont touchés par l'érosion du littoral. Pour pouvoir comprendre et résoudre le problème de l'érosion côtière, il est important d'aboutir à une meilleure connaissance des zones d'études, de la dynamique sédimentaire et aussi des problèmes d'érosion/accumulation des régions étudiées.

Problèmes d'érosion/accumulation et dynamique sédimentaire côtière pour la gestion des stocks sableux

La présence d'infrastructures côtières et fluviales provoque des variations dans le cycle sédimentaire, en particulier des problèmes d'érosion/accumulation. Pour pouvoir comprendre et résoudre les problèmes de l'érosion côtière, il est important de préparer une stratégie axée sur la notion de cellule sédimentaire côtière, qui a été définie pour la première fois au Congrès International de Géologie de Copenhague (Inman et Chamberlain, 1960). Elles sont généralement délimitées par deux obstacles au transit sédimentaire longitudinal, naturels (promontoires, fleuves) ou artificiels (ouvrages construits) à l'intérieur desquels se produit une redistribution de sédiments (fig. 3.3.1). Tout littoral peut donc être partagé en plusieurs unités, les cellules sédimentaires (fig. 3.3.1).



(promontoires, fleuves) ou artificiels (ouvrages construits) à l'intérieur desquels se produit une redistribution de sédiments (fig. 3.3.1). Tout littoral peut donc être partagé en plusieurs unités, les cellules sédimentaires (fig. 3.3.1).

Figure 3.3.1 - Les cellules sédimentaires dans le golfe du Lion (Source: Comité de Bassin, Agence de l'eau RMC, 1995).

Pour évaluer la dynamique sédimentaire et les variations sur la côte à l'intérieur d'une cellule littorale, il faut identifier l'entrée,

le transfert, l'accumulation et la perte de sédiments dans ces compartiments côtiers différents et imbriqués (Short, 1999). Ainsi les mesures de gestions côtières proposées actuellement essaient-elles de conserver l'équilibre des sédiments dans chaque cellule. Aborder le problème de l'érosion à partir de la notion de cellule sédimentaire est assorti de limitations qui sont déterminées par plusieurs facteurs, généralement externes à la cellule. En ce qui concerne le dépôt de sédiments, ce qui se passe en terre ferme n'est pas pris en considération malgré son influence sur la variation du volume d'entrée, cas par exemple de la réduction de l'apport fluvial. Le transfert entre cellules n'est pas davantage étudié ; or la cellule ne peut être considérée comme un compartiment isolé que sur le court terme, pas à long terme.

On peut citer les problèmes suivants d'érosion/accumulation dans les régions étudiées de ce projet : (A) Bilan sédimentaire négatif des formations deltaïques et de la côte ; (B) Érosion de certains segments de côte et l'accumulation de gros volumes de sable autour des infrastructures côtières; et (C) Risque hydrogéologique le long de la côte et dans le bassin fluvial.

(A) *Le bilan sédimentaire négatif des formations deltaïques et de la côte.* En particulier, dans la Région de Catalogne, la cellule sédimentaire du Maresme présente depuis les années 60 un déficit sédimentaire qui se traduit par un recul généralisé des plages. Le problème du bilan sédimentaire négatif s'avère grave ou très grave sur certaines formations deltaïques largement étudiées comme les deltas de l'Ebre, du Llobregat et de la Tordera, où il peut arriver (Ebre) aux 2.000.000 de m³/a. On a pris en charge l'analyse d'un des systèmes, celui de la Tordera, car c'est une unité simple et singulière avec une influence directe sur la cellule sédimentaire nord barcelonaise, d'une importance socio-économique claire. Le déficit sédimentaire existant, visible sous la forme d'érosion des plages, est une

conséquence attribuée aux interventions directes telles que la construction des marinas, protections dures et autres, mais il faut encore analyser d'autres éléments influençant la morphodynamique. En particulier l'analyse des transits sédimentaires le long des cellules, comme celle de La Tordera, dont on engage ici son étude.



Figure 3.3.2 - Accumulation et érosion du granulat (Port de Masnou).

(B) L'érosion de certains segments de côte et l'accumulation de gros volumes de sable autour des infrastructures côtières. On peut considérer que la quasi-totalité des secteurs ouvragés en mer souffrent de problèmes d'érosion aval-transit et d'accumulation amont-transit. On peut citer les exemples suivants. Les ports du Maresme (Catalunya) (fig. 3.3.2) et

Canet (Languedoc-Roussillon) qui accumule en amont transit une belle plage de sable fin et qui induit en aval transit une érosion aigue.

De même, pour les ports de la Région de Toscana, on peut citer que le port de Marina di Carrara (MS) qui a causé l'érosion des plages de Marina di Massa (MS), interceptant le sable apporté par le fleuve Magra (fig. 3.3.3). Le port de Viareggio (LU) a causé des conséquences mineures sur les plages adjacentes, parce que les sédiments érodés du delta du fleuve Arno ont été transportés jusqu'à venir alimenter les plages situées au sud du port. Des ports touristiques plus petits ont aussi engendré des phénomènes d'érosion dans les zones adjacentes.



Figure 3.3.3 - Principales infrastructures portuaires toscanes.

Dans la Région de Emilia-Romagna, pour protéger le secteur intérieur et préserver les côtes de la régression du littoral, le Gouvernement italien a financé plusieurs structures de défense. Au début quelques brise-lames isolés ont été construits, très efficaces pour la réduction de l'énergie de l'onde incidente et pour l'interférence avec le transport longitudinal. Cependant, le mécanisme bien connu de déplacement des problèmes érosifs aux secteurs adjacents non protégés a porté à la construction d'autres structures, pour un total de 40 km de barrières le long de la côte. Les brise-lames ont empêché le transport sédimentaire le long de la côte et donc la distribution des sédiments, exacerbant le déficit local. La Région Macédoine de l'Est, est sujette à des problèmes d'érosion à proximité de l'embouchure de Nestos avec un taux accéléré d'érosion après la construction du barrage (Xeidakis et al, 2006) (figs. 3.3.4, 3.3.5). La bibliographie indique que le taux d'érosion change de zéro à 25 mètres par an. En Crète, les problèmes graves de dépôt et d'érosion, principalement dans la partie du nord de l'île qui est touristique développé, semblent dus aux nombreux travaux côtiers.



(Juillet, 1999)

Figure 3.3.4- Côte de Piges, 10 kilomètres à l'occidental de la bouche de Nestos de fleuve, Juillet 1999. Le tas de sol pour la base du poteau topographique a été approché par la mer et commencé pour être érodé.



(Avril, 2000)

Figure 3.3.5- Le même poteau topographique qu'en photo 3.3.4, en Avril 2000. La retraite de rivage due à l'érosion dans cet endroit s'est avérée par des mesures pour être autour 1 m par an. Il y a deux ans (2004), le poteau topographique a été perdu à la mer.

L'accumulation de sable dans les ports, associé à l'érosion, est la conséquence de quatre processus qui peuvent se manifester isolément ou conjointement, à savoir : (i) L'interruption du transport longitudinal de sable par la construction de nombreuses infrastructures portuaires sur le rivage ; ces nombreux ouvrages portuaires permettent la navigation de plaisance mais perturbent fortement la dérive sédimentaire longitudinale et créent localement de fortes érosions. (ii) Le transport de sédiment par la houle, en direction de l'entrée du port, cette accumulation importante de sable réduit la profondeur du fond, en limitant l'accès au port. (iii) La sédimentation sous l'effet de la diffraction des vagues dans la partie la plus externe de la digue du port. (iv) Les sédiments provenant des fleuves qui se jettent directement dans le port. L'érosion, quant à elle, est due aussi à la diminution des apports des fleuves, maintenant barrés et anthropiques, et dont les arrivées sédimentaires sont très réduites en matériaux sableux; en conséquence, on observe la rétrogradation des lidos sur



les lagunes en arrière et ce processus est particulièrement aigu dans la partie septentrionale du Languedoc-Roussillon. Il faut aussi mentionner les perturbations de l'équilibre de sédiment le long de la côte de la Région de East-Macedonia-Thrace menant à l'érosion à cause de la construction du grand barrage dans le bassin hydrologique du fleuve Nestos (fig. 3.3.6).

Figure 3.3.6- Le haut barrage au fleuve Nestos (Le barrage de Thisavros).



(C) *Le risque hydrogéologique le long de la côte et bassin fluvial.* On peut citer le risque hydrogéologique le long de la côte de la Région Emilia-Romagna mis en évidence par Viel et al. (2002) (fig. 3.3.7). Le risque est donné dans la balance des gris (les degrés plus élevés sont représentés par une tonalité plus foncée), en plus d'un plan du système de la défense de la côte (lignes noires). Il est facile de voir que la côte est complètement protégée et tous les secteurs habités sont sujets au risque d'inondation. Dans la Région de Toscana, un diagnostic sur le bassin versant a amené à la localisation de 11 zones à risque hydraulique élevé dans le bassin de Magra, caractérisées par des phénomènes d'accumulation évidente de sédiments ou d'effondrement du lit d'étiage avec une augmentation de la vitesse de flux et des situations de risque en proximité d'infrastructures particulières et/ou de centres habités.

Figure 3.3.7 - *Risque hydrologique le long de la côte de la Région Emilia-Romagna et indication des barrières pour la protection côtière contre l'érosion. Adapté de Viel et al. (2002).*

Interventions des gestions de stocks sableux d'origine fluviale

Considérations générales

Le procédé de comblement des réservoirs artificiels représente un aspect "gestionnaire" du système de retenue parce qu'il influence la vie utile du barrage, le bon fonctionnement des œuvres réalisées, la capacité d'accumulation de la ressource hydrique et les problèmes liés à la sûreté du barrage par rapport aux aspects statiques et par rapport aux aspects du fonctionnement des organes de déversement profonds. Les facteurs principaux qui influencent le comblement sont les caractérisations géologiques, pédologiques et les régimes hydrologiques des bassins qui confluent dans les contenances. À l'analyse de ce procédé on répond déjà dans la phase du projet par l'estimation d'une aliquote de la capacité globale du réservoir (capacité morte) à prédestiner à l'accumulation de la fraction solide qui revient aux afflux afférents le réservoir.

L'approche méthodologique dans la phase du projet, qui a le but de prévoir le taux de comblement moyen annuel, se base communément sur les données de débit solide, rapportées dans les Annales Hydrologiques du Service Hydrographique et Maréographique/Marégraphique National, relatives aux stations de mesure situées dans les limites du bassin hydrographique sous-tendu par le barrage. Dans ce sens, face à des carences informatives qualitatives et quantitatives, l'analyse de projet se fondait sur l'extrapolation, au bassin à l'examen, des données qui provenaient des bassins limitrophes aux mêmes caractéristiques géomorphologiques, en les conjuguant, ensuite, avec le contexte local.

L'évaluation de du comblement se produit en considérant la contribution unitaire du bassin, la capacité unitaire de contenance et la vitesse de comblement considérée comme

la quantité de sédiment qui s'accumule dans le réservoir dans l'unité de temps. Pour ce qui concerne l'Italie, les problématiques liées au phénomène de comblement des réservoirs artificiels sont devenues de grande actualité à la suite du "Projet de gestion des contenances" contenu dans le Décret Ministère Environnement et Tutelle du Territoire du 30 juin 2004 pour la réalisation de ce que dispose l'art. 40 de l'Acte Législatif 11 mai 1999 n. 152 (assimilation des instructions 91/271/CEE et 91/676/CEE qui concernent le traitement des eaux urbaines qui refluent et la protection des eaux par rapport à la pollution). Le Décret a innové profondément la réglementation de secteur précédente, en prévoyant une discipline spécifique à caractère d'état en matière de relâchements hydriques des réservoirs artificiels, en élargissant les tâches du Registre Italien Barrage (RID) en matière d'atterrissement des contenances, jusqu'à présent limitées aux aspects liés à la sûreté des barrages et des organes de déversement relatifs. Particulièrement, l'alinéa 2 de l'art. 40 cités ont introduit l'obligation pour les Gérants des contenances de prévoir le "Projet de gestion de la contenance". L'approbation du document est de compétence des Régions italiennes après l'avis du Registre Italien Barrages qui s'occupera aussi de le joindre à la Feuille de Conditions pour l'exercice et l'entretien du barrage.

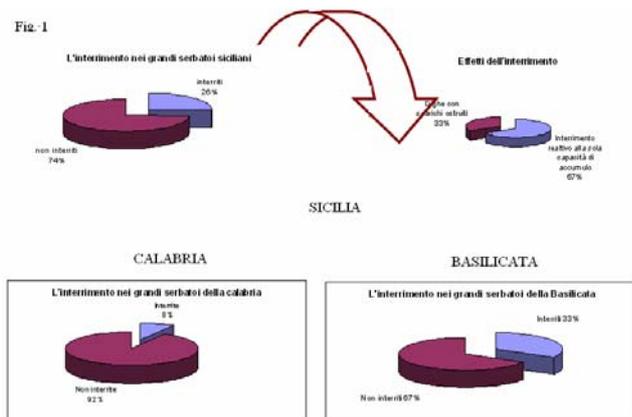
À cette fin, il faut analyser, dans la prédisposition des Projets de gestion, les problématiques décrites par la suite :

(A) *Degré de comblement du réservoir.* La connaissance du degré de comblement de la contenance afin d'évaluer le caractère fonctionnel des déversements profonds, et éventuellement des poussées sur la structure, représente un aspect de considérable intérêt pour la sûreté. Par conséquent, le Projet de gestion doit quantifier, en principe par relief bathymétrique ou par relief topographique à réservoir vide, l'état actuel de comblement du réservoir et le comparer aux conditions originelles définies dans la phase de projet du barrage. Le Projet de gestion doit en outre contenir une évaluation quantitative de l'apport moyen annuel des sédiments, afin de pouvoir définir la cadence des reliefs bathymétriques ou topographiques successifs.

(B) *Caractère fonctionnel des déversements profonds.* Dans le Projet de gestion il faut indiquer explicitement l'état des déversements profonds et les interventions, ordinaires ou extraordinaires, qu'on veut réaliser pour maintenir ou rétablir le fonctionnement des susdits organes de sûreté. Dans le cas où l'efficacité des déversements ne soit pas garantie, le même projet doit prévoir des interventions à caractère extraordinaire pour la récupération de leur efficacité.

(C) *Stabilité des berges de la contenance.* Les opérations éventuelles d'embrasure du réservoir doivent se réaliser avec des vitesses compatibles avec la nature des versants. Particulièrement, pour les contenances qui présentent des phénomènes d'instabilité des berges, les vitesses d'embrasure doivent être évaluées de façon appropriée. Dans les cas où le Projet de gestion prévoit l'aménagement sur les berges du matériau enlevé, il faut demander des vérifications de stabilité en considérant la géométrie et les caractéristiques mécaniques et du matériau accumulé, et des terrains naturels et d'œuvres éventuelles de limitation.

(D) *Débits maximum dans le cas de relâchement dans la vallée des sédiments.* Dans le cas où soit prévu le relâchement des sédiments dans le cours d'eau dans la vallée, le Projet de gestion doit indiquer le volume d'eau à relâcher, le débit moyen et maximum qui devra de toute façon être inférieur à la valeur du débit maximum de crue praticable dans le lit aux termes du point B de la Circulaire PCM DSTN/2/22806. Dans cette phase, a été réalisée la récolte des données relatives au degré de comblement des grands barrages italiens en "fonction normale", en réalisant aussi des élaborations des mêmes données qui



se réfèrent en particulier à trois régions méridionales (fig. 3.3.8). Les données ont été tirées aussi des informations contenues dans les Projets de gestion parvenus au R.I.D. jusqu'à présent.

Figure 3.3.8 - Degré d'atterrissement des grands barrages italiens en "fonction normale"

Transport solide fluvial pour la gestion de stocks sableux

Une étude complète pour la gestion des sédiments devrait tenir compte de plusieurs problématiques liées à la vitesse du processus de sédimentation du fleuve analysé, aux lieux préférentiels, à la façon dont la sédimentation influence la morphologie et l'écologie du fleuve, à la quantité de sédiments qui pourrait être enlevée pour contourner le risque de débordement, à un changement des écosystèmes suite à l'enlèvement du matériel, et aussi comment et jusqu'à quel point l'enlèvement altérerait l'écologie et les écosystèmes. De plus, il faut considérer aussi l'entretien éventuel de quelques points particuliers, qui, à cause par exemple d'œuvres transversaux ont la tendance à accumuler de façon localisée le matériel transporté par les fleuves ; dans ces cas, l'Autorité du bassin prédispose des plans spécifiques pour l'entretien (en prévoyant aussi des actions de rechargement en aval). Dans cette optique, le choix du bassin du Magra (à la limite entre les Régions Liguria et Toscana) résulte approprié, surtout dans la partie la plus haute du bassin, parce qu'il présente des conditions des sédimentations en cours qui causent actuellement des situations au niveau local de réduction des sections fluviales en particulier près des centres urbains.

Les dépôts du fleuve Magra (fig. 3.3.9) présentent une tendance progressive à la réduction du diamètre moyen des sédiments en direction de la vallée; on y trouve de gros cailloux et des graviers dans la partie haute du bassin et avec une prévalence des sables moyens et fins dans la partie de la vallée près de l'embouchure (Bartolini et al. 1973). En ce qui concerne le transport solide du fond du fleuve Magra, dans la partie la plus haute du bassin, il est caractérisé par des rochers de dimension impor-



Figure 3.3.9- Bassin hydrographique interrégional du Magra.

te là où la pente forte en permet le mouvement. Par contre on y trouve des dépôts de matériel plus fin là où les pentes apparaissent notamment réduites (par exemple : Calamazza), mais aussi des dépôts de mesures intermédiaires, avec des volumes souvent plus importants, en aval de lieux avec des pentes fortes où l'on y trouve des sédiments qui n'ont pas été retenus dans la partie en amont. Le matériel est constitué presque toujours par l'arénaire *macigno* et par des calcaires marneux, arénacés et argilo schistes. En ce qui concerne le transport solide en suspension, le fleuve Magra est caractérisé par des dépôts très fins de matériel silteux limo-argileux, constitués par du quartz, des phyllo-silicates, de la calcite; ils sont à rattacher aux deux formations rocheuses prédominantes, l'arénaire *macigno* et les sédiments composés par des alternances avec une épaisseur variable de calcaires marneux et/ou des parties calcareuses avec des argilo-schistes. Les bassins de rive gauche ont la tendance à fournir la quantité de matériel la plus grosse aussi bien en tant que transport solide de fond, qu'en tant que transport en suspension; dans ces zones on assiste souvent à des phénomènes ébouleux le long des bords des afflux qui, ajoutés à une forte tendance à l'érosion des formations rocheuses présentes, apportent du gravier au lit du fleuve. Les bassins de rive droite concernent des formations géologiques avec une tendance réduite à l'érosion et par conséquent, elles contribuent en mesure inférieure au 50% au transport solide global.

Rechargements/dragages d'origine fluviale

En ce qui concerne le dépôt de sédiments dans les bassins fluviaux, on n'a commencé que récemment à étudier la gestion des sédiments accumulés dans le lit du fleuve et la façon de les réutiliser pour le remblayage de la côte. L'autorité de bassin du Magra est un de premiers organismes qui aborde ce problème. Les excavations dans le lit sont désormais interdites depuis des années dans le sens commercial du terme, bien que la loi permette des déplacements de matériel sédimentaire afin de garantir la fonctionnalité hydraulique et fluviale. Le problème reste, donc, technique et concerne le rôle réel que les dépôts provenant du transport solide jouent en augmentant le risque d'alluvionnement. Un accord existe maintenant pour utiliser une partie des sédiments du fleuve Magra, creusés à la suite d'interventions de re-profilage et récupération environnementale et hydraulique de sections fluviales bloquées par des dépôts alluvionnaires qui, au fil des années, se sont déposés sur les fonds des cours d'eau, qui maintenant ne sont plus fonctionnels pour l'entretien de l'écoulement naturel des eaux.

Interventions de gestion de stock sableux d'origine marine

Disponible sédimentaire d'avant côte pour la gestion des stocks sableux

Pour une meilleure gestion des stocks sableux, il paraît donc nécessaire de contrôler l'importance volumétrique des réserves sableuses de l'avant-côte et aussi dans les fleuves, jusqu'alors peu connues, et le taux annuel moyen des échanges entre cellules (caractérisés par exemple par les cubatures aux ouvrages portuaires aval-transit). La quantification des stocks sableux sur la façade des régions côtières qui sont associés à la morphodynamique et au transport sédimentaire constitue aussi une étape essentielle et primordiale pour arriver à une gestion pérenne du trait de côte. En ce sens, il est important de tenir compte que la formation d'une plage résulte principalement de l'apport de sédiments détritiques transportés par les cours d'eau ou produits par l'érosion marine des côtes rocheuses. L'équilibre entre le dépôt de sédiments et leur redistribution par les courants côtiers détermine la stabilité de la plage, tandis que le déséquilibre en faveur de l'un de ces deux mécanismes entraîne respectivement engraissement ou érosion. La notion de plage doit être étendue à un espace qui comprend non seulement l'étroite bande sableuse émergée mais aussi les zones dunaires et lagunaires en amont et l'avant côte jusqu'à vers -10 m de profondeur, en aval. La

réalisation de bilans sédimentaires des volumes déplacés sur la seule base de profils bathymétriques ne suffit plus à une analyse pertinente de la vulnérabilité des côtes. Il faut maintenant aussi considérer les volumes globaux de sédiments disponibles pour ces échanges sur l'ensemble du littoral, allant des systèmes lagunaires jusqu'au plateau interne, et en particulier sur l'avant côte qui renferme les plus grands stocks. L'essentiel de cette analyse peut être par contre réalisé à partir d'imagerie géophysique qui permet de visualiser et de quantifier ces stocks.

Rechargements/dragages d'origine marine

Pour résoudre le problème d'érosion des plages du littoral méditerranéen, ces plages sont régulièrement draguées et rechargées depuis 1980. On dénombre plus de 600 rechargements sur le littoral méditerranéen depuis 1998, concernant environ 400 zones côtières et représentant 110 Mm³ de sable déversé (Hanson et al. 2002).

-Dans la Région Catalogne, l'incessante accumulation de sable dans les ports préoccupe les administrations publiques catalanes qui se voient obligées de réaliser des dragages périodiques et des rechargements sur tout le littoral catalan. Dans la zone du Maresme, notamment dans le port de Masnou, des dragages du sable accumulé à l'extérieur du port, devant l'entrée, sont effectués tous les ans et le sable est déposé sur la plage située au sud du port. Cette année, Le Generalitat de Catalunya a dragué 396 517 m³ sur la côte du Maresme pour assurer la fonctionnalité des ports (Tableau 1), dont 92 456 m³ proviennent du port de Masnou. Le système fluvial de la Tordera a suivi une activité d'exploitation de ces ressources sableuses de plus de 2 000 000 de m³ au cours du dernier siècle. Ce fait est un facteur d'influence directe sur le bilan négatif de la côte et d'une réponse morphodynamique remarquable. A partir des années 80, toute exploitation a été interdite. En mer, seule une intervention mineure de dragage a été faite face à Blanes, hors de la portée des transits sédimentaires actuels.

Tableau 1.- Inventaire des volumes de sable : (A) sable dragué pour régénérer les plages de la côte du Maresme (Sener, 2002, DGC, Direcció General de Costas) ; (B) sable dragué pour maintenir les ports en service et déposé sur les plages érodées (Generalitat de Catalunya et Port d'Masnou). (C) sable dragué pour le rétablissement du transport longitudinal de sable Generalitat de Catalunya) et déposé sur les plages érodées.

	Année	Dragage	Rechargement	Vol. estimé	Décideur
A	1988	Besós-Premiá	Nova Icaria, Ferrocarril Poble Nou	101465 m ³	DGC
A	1988	Masnou et Premiá	Platge Mar Bella Masnou-Premiá	904517 m ³	DGC
A	1990	Premiá	Malgrat	145000 m ³	DGC
A	1991	Premiá	Bogatell Mar Bella Nova Icaria, Bogatell	494877 m ³	DGC
A	1993	Tordera-Sta. Susana	Malgrat	145000 m ³	DGC
A	1993	Premiá	Premiá	610452 m ³	DGC
A	1994	Tordera-Sta Susana	Malgrat-Sta Susana	944 810 m ³	DGC
B	2002	Masnou	Alella	6500 m ³	Port d'El Masnou
B	2003	Masnou	Alella	41600 m ³	Port d'El Masnou
B	2004	Masnou	Alella	22700 m ³	Port d'El Masnou
B	2005	Masnou	Alella	38000 m ³	Port d'El Masnou
B	2006	Masnou	Alella	42000 m ³	Port d'El Masnou
A	2006	Masnou	Barceloneta	96287 m ³	DGC
C	2006	Maresme	Platges del Maresme	396517m ³	Generalitat Catalunya

- La Région- Languedoc-Roussillon, a fait l'objet de nombreuses études préliminaires sur les parties sensibles de son littoral, qui ont abouties à l'élaboration de schémas directeurs d'aménagement. Jusqu'à une époque récente, les ouvrages en dur ont été privilégiés sur les secteurs souffrant d'érosion sévère mais des techniques ou des approches plus « douces »

commencent à voir le jour. On peut citer, à titre d'exemple, le lido de Sète pour lequel il est proposé actuellement de réaliser des rechargements massifs en sédiment et d'effectuer un recul stratégique des infrastructures menacées. Jusqu'à présent les rechargements réalisés sur les secteurs menacés correspondaient à de faibles volumes en raison du manque de sources utilisables (le matériel communément utilisé provient pour l'instant du dragage régulier des avant-ports), mais le programme Beachmed-e a mis en évidence des sources potentielles sur le plateau continental.

-*Dans la Région Toscane*, au cours de ces dernières années, la défense des littoraux est confiée à des structures qui ont un impact limité sur l'environnement : des structures submergées, aussi bien parallèles que perpendiculaires au rivage, comme celles de Marina di Massa e Marina di Ronchi (MS) et des rechargements en sable (embouchure du Palmignola, MS) ou en gravier (Marina di Pisa, PI). Mais il s'agit toujours d'actions de faible ampleur. Il a été nécessaire de recourir à des opérations de dragage en considération du phénomène d'ensablement qui a constamment concerné l'embouchure du port de Viareggio (LU), avec le but d'en assurer l'accès. En 1980 les conduits assurant le transfert des sables a commencé à fonctionner : il est consacré à desservir tout l'avant-port et tout la zone de l'embouchure. Cette installation est restée en activité jusqu'au 1995, quand on a introduit un bypass qui a fonctionné jusqu'en 1998. Il n'y a pas d'autres exemples importants de gestion de stock sédimentaires pour les autres ports.

-*Dans la Région Emilia-Romagna*, un plan côtier datant de 1981 a décrit le bilan des sédiments le long de la côte, la nécessité de rechargements périodiques et il a été très efficace pour la réduction de certaines des causes de subsidence. Un nouveau plan côtier de 1996 a déclaré que le besoin de rechargements le long de la côte est de l'ordre de 2 '000' 000 m³/année. La disponibilité de sable à bon marché et de haute qualité est donc le problème principal à être résolu. Des dépôts de sable submergés ont été trouvés, mais, en raison du manque de ressources financières, seulement un dixième de cette quantité a été porté aux côtes (2.000.000 m³ dans 10 ans), avec des conséquences évidentes (l'érosion générale des côtes). Une petite (mais non négligeable) source des sédiments a été considérée pour le dragage de l'entrée des ports, qui est en général normalement perdue. Les secteurs qui sont régulièrement dragués sont, commençant du nord et vers le sud: embouchure de Goro Po; Goro siège; Porto Garibaldi; embouchure de Logonovo; Ravenna Port; Cervia Port; Cesenatico Port; Bellaria Port; Rimini Port; Riccione Port; Porto Verde; Cattolica Port. La recherche et récolte de l'information disponible pour déterminer les quantités annuelles de dragage nécessaire à maintenir l'équilibre de la plage ont été réalisées : Dragages (depuis 1998 au janvier 2005 pour un total de 64.000 m³) et Remblaiement (depuis 1983 au janvier 2005 pour un total de 598.000 m³).

-*Pour la Région East-Macedonia-Thrace*, la revue de littérature indique la tendance ces dernières années à contrôler les sédiments déposés sur le lac artificiel des barrages. Cependant, il n'y a aucune obligation (jusqu'ici) du propriétaire de barrage d'assurer le transport partiel du sédiment de fleuve en aval du barrage, pour l'enrichissement de la plage et pour la protection de la côte contre l'érosion. L'éclusage se fonde sur la disponibilité de l'eau "en surplus" pour conduire le sédiment au delà du réservoir avant qu'il soit enfermé. L'eau en surplus est la partie d'apport annuel au delà de la capacité de stockage qui est involontairement renversée. Quand l'eau en surplus est disponible, le directeur doit compter sur l'apport qui autrement serait confisqué dans le réservoir pour la future consommation dans une utilisation profitable telle que la production d'hydro-électricité (l'eau de "non-excédent").

Modélisation numérique: érosion et rechargements des plages

Concepts fondamentaux de modèles numériques

IACM/FORTH contribue grâce à l'étude bibliographique de méthodes de calcul de simulation directe de la procédure d'érosion de la côte (De Vriend, 1987; 1991; Karambas, 2002; Tsanis et al. 2006). La nécessité de telles méthodes est fondée sur le fait qu'ils peuvent prévoir l'évolution du phénomène d'érosion dans le temps de manière clairement plus rapide et moins onéreuse que l'observation sur place quand l'enregistrement des données le permet. À travers cette recherche bibliographique il est apparu quelles sont les méthodes modernes de simulation qui sont appliqués à partir des processus côtiers, quelles sont leurs possibilités et leur efficacité par rapport à la spécificité des régions où elles ont été appliquées. Les trois modèles ISE (*Modèles Initiaux de Sédimentation/Erosion*), LTM (*Modèles Morphologiques à Long Terme*) et MTM (*Modèles Morphodynamiques à Moyen Terme*) sont mentionnés dans le Sous-projet 2.1 Optimal. La côte, qui a été choisie, à la suite d'un accord avec les autorités locales et avec la coordination des autorités de la Région de Crète, pour que se réalise l'étude pilote dans le cadre du Sous-projet 3.3, se trouve dans la ville de Rethymnon en Crète du nord, une côte d'intérêt touristique particulier. Elle se trouve à l'est du port de la ville et a une direction est-ouest qui reçoit des flux du nord-ouest, nord et nord-est.

Modèles numériques : aide à la décision des rechargements et prévision de l'évolution côtier

Les Régions de Catalunya, Languedoc-Roussillon, Toscana, East-Macedonia, Crète, souhaite faire utiliser la contribution des modèles numériques comme aide à la décision, qui devient essentielle à l'heure où les rechargements apparaissent comme une solution possible dans la protection des plages. Ceci dans le but d'établir des stratégies et des méthodologies viables de rechargement. En la Région de Languedoc-Roussillon, le code numérique MODHYS a été développé au sein de l'IMFT (Spielmann, 2002) pour analyser les bénéfices que l'on pourrait retirer d'une modification des profils de plage vis-à-vis de l'érosion littorale. Ce modèle permet de prédire l'évolution à court et moyen terme d'un profil de plage, essentiellement dans des conditions hydrodynamiques de moyenne et de forte houle. L'évolution des structures morphologiques comme les barres littorales est relativement bien estimée par cet outil. Les Régions de Toscana et Catalunya font la prévision de l'évolution des zones d'érosion et d'accumulation tout comme les effets, en termes de morpho dynamique, engendrés par le dragage ou le remblayage artificiel d'une plage. Ces prévisions sont typiquement estimés avec des modèles simplifiés de calcul de transport solide et avec des modèles numériques morphodynamiques (par exemple : formulaire CAMS du paquet MIKE21, SMC). Mais souvent on se limitera à la description du potentiel d'érosion ou d'accumulation, c'est-à-dire au taux d'érosion ou d'accumulation initiale, lié à la bathymétrie d'un trait de la côte.

Base de données sur les systèmes sédimentaires

Dragages

-*Région Catalunya* : à partir de l'information fournie par la Direcció General de Costas (Direction générale des côtes), de rapports techniques de dragages, d'articles scientifiques et de l'information collectée auprès du gouvernement catalan, la Generalitat de Catalunya, sur les dragages effectués chaque année, le volume de sable dragué à l'entrée des ports et employé à la régénération des plages adjacentes est plutôt constant depuis 1990. Le volume de sable mobilisé sur la côte du Maresme est de 492 804 m³/an et dans le port de Masnou de 188 743 m³/an.

-*Région Languedoc-Roussillon* : quasi annuellement tous les avant-ports de la région sont dragués en sédiment sableux pour permettre la navigation. En effet, la dérive sédimentaire longitudinale, qui peut être estimée à plusieurs dizaines de milliers de mètres cubes par an, vient colmater par contournement les digues portuaires. Les volumes extraits représentent

pour chaque port des volumes de plusieurs milliers de mètres cubes annuellement qui, après avoir été rejeter au large pendant longtemps, sont maintenant déposés sur la plage à l'aval transit du port si les analyses chimiques sont favorables.

-*Région Toscana* : Seul le cas du Port de Viareggio a pu être chiffré précisément, avec des quantités draguées importantes pour une analyse de l'évolution morphologique des fonds. En ce qui concerne le port de Viareggio, dans les années 80-98 ont été dragué environ 1100000 m³ à l'entrée du port et 1000000 m³ à l'extérieur du port. Environ 1800000 ont été transporté sur les plages au nord du port. En ce qui concerne le port de Marina di Carrara, on estime environ 10000 m³ par an de matériel dragué afin de laisser ouvert le canal d'accès.

-*Région Emilia-Romagna* : La recherche et récolte de l'information disponible a été réalisée autour de Port Cervia pour déterminer les quantités annuelles de dragage nécessaire à maintenir l'équilibre de la plage : i) Dragages (depuis 1998 au janvier 2005 pour un total de 64.000 m³) et Remblaiement (depuis 1983 au janvier 2005 pour un total de 598.000 m³). Le choix prévu de la meilleure technologie pour le traitement des sables dragués par le chenal d'accès du port relativement au cas d'étude en Emilia-Romagna sera effectué après une meilleure caractérisation du sable disponible.

Bathymétries

-*Région Catalunya* : la recherche et récolte des bathymétries du port de Masnou a été réalisée pour novembre 2004, décembre 2005 (INSTECTOP), mars 2006 (03-03-06 et 29-03-06), au début (09-04-06) et à la fin (21-06-06), ainsi que pour les activités de dragage réalisées dans le port la topographie de la plage de Masnou, avant les régénérations (08-04-06) et après (21-06-06). Les travaux et études bathymétriques plus récents de la Tordera qu'on va utiliser sont de 1997 (MMA). Ils vont être complétés par d'autres études de détail à réaliser au long du présent projet.

-*Région Languedoc-Roussillon* : Les profils bathymétriques du Service Maritime et de Navigation du Languedoc-Roussillon (SMNLR) réalisé jusqu'à une époque récente des campagnes annuelles de profils bathymétriques tout le long du littoral sont disponibles. L'EID réalise maintenant dans l'Hérault des levés tridimensionnels sur les secteurs sensibles.

-*Région Toscana* : afin de caractériser l'évolution morphologique à long terme des fonds sur la base aussi bien des données mesurées, que sur les valeurs estimées avec des prévisions de modèles numériques, des relevés bathymétriques ont été recensés par des explorations des fonds à la fin du XIX^{ème} siècle en format papier, jusqu'aux relèvements bathymétriques plus récents effectués avec la technique «Single Beam» en format digital. A ce stade de la recherche sont disponibles 3 levés pour Marina di Carrara (1882, 1977 levés effectués avec des navires océanographiques de la Marine Militaire, 2001 levés effectués avec la technique «Single Beam»), 2 pour Viareggio (1997, 2005 levés effectués avec la technique «Single Beam») et 5 pour Livorno (1881, 1958, 1976 levés effectués avec des navires océanographiques de la Marine Militaire, 1997, 2002 levés effectués avec la technique «Single Beam»).

-*Région Emilia-Romagna* : pour le cas d'étude du Port Cervia, ont été recompilés les profils bathymétriques des dates suivantes (novembre 2003, janvier 2004, avril 2004, juin 2004, décembre 2004, janvier 2005).

Photos aériennes

-*Région Catalunya*, les photos aériennes des ports de Masnou, Premiá de Mar, Arenys de Mar, Mataró et El Balís, ont été archivées avant et après les remblaiements effectués entre février et mai 2006.

-*Région Languedoc-Roussillon*, des campagnes aériennes ont été réalisées dans le golfe du Lion depuis la fin de la seconde guerre mondiale. Elles ne font pas l'objet d'une couverture

systematique et leur espacement est fonction des études qui se sont déroulées dans le temps sur le littoral.

-*Région Toscana*, des photos aériennes des ports de Marina di Carrara, Viareggio et Livorno prises en 1976 par la Région de la Toscane ont été recueillies. Egalement, des photos aériennes des ports de Marina di Carrara, Viareggio et Livorno prises en 1999-2000 par le service aérien de la police de la côte de la ville de Sarzana (SP).

-*En la Région Emilia-Romagna*, pour le cas d'étude du Port Cervia a été archivées des photographies aériennes (1945, 1976, 1982, 1991, 1998, 2003).

Climat meteomarin

-*Région Catalunya*, dans le cadre de l'étude du climat maritime de la zone du Maresme, les données suivantes ont été collectées : (a) valeurs moyennes et valeurs des crêtes maximales de houle pour les bouées REMRO de Tarragone, Barcelone et Palamós, de la banque de données des Ports nationaux ; (B) données de la bouée du réseau côtier Cost-Barcelone depuis son mouillage en mars 2004 ; données des cinq dernières années des bouées 2065050, 2066051, 2067051, 2068052, 2059062, 2070053, 2071053, 2072054, 2075055. Valeurs de hauteur significative, période de pic, roses de houle d'une hauteur significative et période de pic, tableaux de hauteur significative versus période de pic; (C) rapports sur le climat maritime des cinq dernières années pour le littoral catalan. Valeurs des crêtes maximales de houle.

-*Région Toscana*, afin de déterminer le transport solide du littoral, le climat météo marin a été caractérisé en correspondance des trois ports en employant des données du Réseau Ondemétrique National italien (RON) de La Spezia pour le port de Marina di Carrara et des données du World Wave Atlas (WWA) pour les ports de Viareggio et de Livorno. Analyses effectuées : analyse directionale et analyse statistique des ondes maximales avec une hauteur importante pour des temps de retours fixés et pour les niveaux de risque.

-*Région Crête*, la recherche sur le climat de vague a été fait dans la région de Rethimno. En utilisant les données de vent de la station Rethimno pendant les dix dernières années nous devons les résultats suivants (Tableau 2).

Tableau 2 - Données de vent de la station Rethimno pendant les dix dernières années (Région Crête).

BF	Nord-Ouest				Nord				Nord-Est			
	U (m/s)	Fréq. %	H _{os} (m)	T _p (sec)	U (m/s)	Fréq. %	H _{os} (m)	T _p (sec)	U (m/s)	Fréq. %	H _{os} (m)	T _p (sec)
4	7,0	1,878	1,21	5,80	7,0	3,535	1,21	5,80	7,0	1,127	1,21	5,80
5	9,8	1,016	1,72	6,54	9,8	1,491	1,97	7,16	9,8	0,552	1,90	7,00
6	12,7	0,784	2,22	7,13	12,7	1,248	2,63	7,98	12,7	0,508	2,46	7,63
7	15,7	0,376	2,75	7,65	15,7	0,696	3,26	8,57	15,7	0,309	3,04	8,19
8	19,0	0,077	3,33	8,16	19,0	0,221	3,94	9,13	19,0	0,044	3,68	8,73
9	22,5	0,000	3,94	8,41	22,5	0,000	4,67	9,41	22,5	0,000	4,36	9,00
10	26,0	0,000	4,55	8,84	26,0	0,000	5,40	9,88	26,0	0,000	5,04	9,45
>11	31,0	0,000	5,43	9,38	31,0	0,000	6,43	10,49	31,0	0,000	6,01	10,03
total		4,131				7,191				2,54		

Données sedimentologiques

Pour la Région Catalunya, a été reconstitué l'interprétation des paramètres physiques, chimiques et bactériologiques des sédiments; interprétation des paramètres granulométriques; concentration de matières organiques, concentration de micro-organismes (coliformes fécaux, streptocoques fécaux et champignons) et concentration de métaux lourds dans la fraction de sédiments inférieurs à 2 mm. L'analyse sédimentaire fait auparavant du

système Tordera dans les travaux de thèses ou rapports est large (Serra, 1975; Generalitat de Catalunya 1989). Il s'agit dans cette étude de faire une définition et une cartographie des unités deltaïques, et au même temps de sa chronologie, dans le but d'établir son évolution et influence sur la dynamique sédimentaire de l'ensemble côtier. Pour la Région Emilia-Romagna, pour le cas d'étude du Port Cervia a été inventorié (1993 et 2004).

Bibliographie

- BARTOLINI C., CELESTRE P., FIERRO G., GAZZI P., GNACCOLINI M., LA MONICA G.B., PAOLETTI A. (1973) - Area Campione Alto Tirreno fra le foci del Magra e dell'Ombrone. In: *Ricerche sul Regime e la Conservazione dei litorali*. Progress Report N. 1. Consiglio Nazionale delle Ricerche, Roma, 27-38.
- 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 and D.L.Kreibel, *Proc. Coastal Sediments '91*, Seattle, WA., ASCE, New York, 356-370.
- HANSON H., BRAMPTON A., CAPOBIANCO, M., DETTE H. H., HAMM L., LAUSTRUP C., LECHUGA A., PANHOFF R. (2002) – Beach nourishment projects, practices, and objectives—a European overview. *Coastal Engineering*, **47** (2): 81-111.
- INMAN, D. L., AND CHAMBERLAIN, T. K., 1960. Littoral sand budget along the southern California coast. In Volume of Abstracts, Report of the 21st Int Geological Congress, Copenhagen, Denmark, pp. 245-246.
- KARAMBAS TH.V., KOUTANDOS E.V. CHRISTOPOULOS S., KOUTITAS C.G., 2002, Méthodes douces de protection des côtes : description et simulation mathématique, Congrès Panhellénique «Helleco 2002», Athènes, volume A, p. 481-488 .
- SENER (2002). Estudi, definició i dimensionament del Server de dragatges de Catalunya. Encargado por la Generalitat de Catalunya. Departament de Política Territorial i Obres Públiques. Direcció General de Ports i Transports Clav. P210393. Juny 2002.
- SERRA, J. (1975) - El precontinent catalán entre Cap Begur y Arenys de Mar. Tesis doctoral. Universitat de Barcelona.
- SHORT A.D. (1999) - Wave-dominated beaches. In : A.D. SHORT (ed.) - Handbook of beach and shoreface morphodynamics. *John Wiley and sons Ltd*, **7**: 174-203.
- SPIELMANN, K. (2002) - Modélisation de la dynamique morphologique d'un profil de plage, Doctorat de l'Université d'Aix-Marseille II.
- VIEL G., M.T. DE NARDO, M. MONTAGUTI, G. MANIERI, L. MARTELLI, L. PERINI (2002) - Schema direttore della pericolosità geo-ambientale, Servizio Geologico d'Italia & Regione Emilia Romagna, Servizio Geologico, Sismico e dei Suoli, System Cart, Roma.
- TSANIS I.K., SAIED V.M., VALAVANIS V., (2006), Impacts of coastal protection strategies on the coast of Crete: numerical experiments, International Conference 'Protection and Restoration of the Environment VIII, Chania, Greece (full paper available in CD-ROM).
- XEIDAKIS, GEORGE S., DELIMANI, P.K., SKIAS S.G. (2006) - Sea Cliff Erosion in the Eastern Part of the North Aegean Coastline, Northern Greece. *Journal of Environmental Science and Health Part A*, **41**: 1989–2011.