



BEACHMED-E SOUS-PROJET 2.2

Caractérisation des conditions hydro-météorologiques en zone littorale et analyse des risques littoraux, du comportement des ouvrages de protection et de la dynamique des prairies de *Posidonia oceanica* – NAUSICAA

Fred Bouchette
Laboratoire Géosciences Montpellier, CNRS / Université Montpellier II
GEOSCIENCES-M (bouchette@dstu.univ-montp2.fr)

RAPPORT DE PHASE A
VERSION ABREGEE
En Français



MOTS-CLES

Mesure hydrodynamique, CSI, *Posidonia oceanica*, modélisation houle/courant

INTRODUCTION

Dans ce projet, on s'intéresse à la dynamique littorale et ses conséquences au travers des 4 problématiques scientifiques suivantes: 1. la caractérisation des climats de houle et des conditions hydrodynamiques et météorologiques, sur la base de mesures et de modélisations; 2. l'étude des phénomènes d'érosion et de surcôte de tempête en zone littorale; 3. l'étude des processus d'endommagement des ouvrages artificiels de protection en zone littorale et le développement de méthodes pour le suivi et la prédiction de leur comportement; 4. l'étude des processus d'interaction entre la houle et les biotopes marins (exemple des prairies de *Posidonia oceanica*). Ces questions sont traitées sur un certain nombre de chantiers répartis sur l'ensemble des régions d'origine des partenaires. L'ensemble des sites retenus concerne des littoraux à dominante sableuse, avec présence éventuelle de structures artificielles de protection du littoral et/ou de prairies de *Posidonia oceanica*. Le traitement de ces questions repose avant tout sur une bonne détermination de l'hydrodynamique côtière à littorale sur les zones étudiées. L'ensemble des travaux menés par les équipes de recherche a donc pour dénominateur commun la modélisation numérique et la mesure in-situ des processus hydrodynamiques et hydrosédimentaires littoraux. En outre, la méthodologie employée est commune à l'ensemble des partenaires et peut être résumée de la manière suivante: 1. Sélection de chantiers d'études cohérents pour les problématiques traitées et synthèse bibliographique des données hydrodynamiques et autres disponibles sur ces chantiers; 2. organisation et réalisation de campagnes de mesures hydrodynamiques à différentes échelles de temps et d'espace sur les chantiers retenus; 3. modélisation des processus hydrodynamiques, hydrosédimentaires et/ou hydrobiologiques validés et calibrés par les mesures d'archives et/ou acquises sur les chantiers retenus dans le cadre du projet; 4. Réalisation de produits spécifiques pour répondre aux différents problèmes traités: atlas hydrodynamique du littoral (érosion et surcôte), détermination de CSI (Coastal State Indicators), cartes de la dynamique des prairies de *Posidonia oceanica*, documents synthétiques; 5. Réalisation (ou amélioration) de bases de données et sites web permettant le stockage de la donnée mesurée et des résultats des modélisations afin de constituer un fond documentaire utilisable par les gestionnaires du littoral à court terme.

La phase A du projet NAUSICAA (détaillée dans le dossier consolidé) repose sur la réalisation de travaux préparatoires pour les phases B et C: recherches bibliographiques, états de l'art, analyses préliminaires de données existantes, échanges d'expérience et définition d'activités communes, achats d'équipements, appels d'offre pour les expertises extérieures et engagements de travaux-tests *in-situ*. Ce document est une version abrégée de la présentation du bilan de la phase A et des premiers résultats obtenus.

ACHAT ET PREPARATION DU DEPLOIEMENT DES EQUIPEMENTS DE MESURE

Pour les campagnes de mesure programmées en phase B et C, les partenaires ont du choisir (ou acquérir) des équipements spécifiques et définir des modes de déploiement.

Equipements achetés dans le cadre du projet

En complément du parc d'instruments mis à disposition par le laboratoire pour le projet NAUSICAA, GEOSCIENCES-M a réalisé l'achat d'un ADCP RD-Instruments Workhorse Sentinel cadencé à 300 kHz, équipé d'une mémoire 1Go et d'un module de mesure des caractéristiques de la houle directionnelle, déployé sur un socle TRBM avec un largueur acoustique. L'appareil acheté sera plus particulièrement dédié à la mesure des caractéristiques de la houle et des courants 3D en zone pré-littorale, et sera déployé à partir de Février 2007 par 90 mètres de fond sur le proche plateau continental au Sud de Sète, à proximité de la Bouée d'Eaux Saines (3°52'E, 43°15'N). Cette station posée sur le fond sera protégée en surface par une bouée du SMNLR (Service Maritime Navigation Languedoc-Roussillon). Elle permettra de définir les forçages houle et courants au large à l'entrée des domaines utilisés pour la modélisation littorale, elle constituera un point de validation des résultats de modélisation à l'échelle pré-littorale, et elle servira également à travailler sur la caractérisation des échanges de masses d'eau large-côte dans la partie Nord du Golfe du Lion.

ARPA a bien déterminé les spécifications techniques pour acheter la station océanographique à déployer le long de la côte Emilia-Romagna. L'appel d'offre sera officiellement publié courant novembre 2006. La station sera équipée d'une bouée de houle, d'une sonde température et d'un GPS. Pour acquérir les données, un récepteur sera déployé à la côte, équipé d'un système HF connecté au réseau ARPA. Les données acquises seront stockées sur les bases ARPA-SIM. L'étude visant à définir la position de la station est

terminée. Pour assurer la sécurité du matériel, l'emplacement est une zone où l'activité anthropique est interdite. La bathymétrie est de l'ordre de 10 mètres, sur fond sableux.

FRI-NAGREF a modifié un équipement ADCP existant, avec l'ajout dans le cadre de ce projet d'un module permettant de calculer les caractéristiques de la houle directionnelle. Cet équipement sera déployé par 12 mètres de fond au droit du delta du fleuve Nestos.

Equipements sélectionnés pour la mesure in-situ

FRI-NAGREF utilisera l'ADCP mentionné précédemment, ainsi que la station-bouée du Mt Athos (partie intégrante du système de surveillance POSEIDON) apportant des données hydrodynamiques et météorologiques.

GEOSCIENCES-M a retenu la liste des équipements suivants pour un déploiement sur les chantiers définis avec le partenaire OCR SMNLR et d'autres organismes travaillant sur le littoral Languedoc-Roussillon: 1 pressiomètre à ancrage sur le fond pour la mesure haute fréquence de houle non directionnelle sur le très long terme (périodes continues de 6 mois), 2 stations météorologiques déployées à Port-Camargue et Agde, 3 Acoustic Doppler Velocimeter (ADV) couplés à des OBS pour la mesure ponctuelle du courant sur la couche limite de fond et un estimation de la charge sédimentaire en déplacement, 7 profileurs ADCP, tous équipés avec un module de houle permettant une mesure combinée des courants 3D et de la houle directionnelle (fréquences: 300kHz, 600kHz, 600kHz, 1200kHz, 1200kHz, 1200kHz et 1200kHz) et un réseau VHF de pressiomètres permettant la mesure haute fréquence de la houle directionnelle.

ARPA-SIM déploiera la station présentée ci-dessus.

LA SAPIENZA utilisera des ROV (Remoted Operated Vehicle) pour positionner précisément la limite coté plage d'herbiers de *Posidonia Oceanica*.

Protocoles de déploiement

Les ROV utilisés par LA SAPIENZA circuleront selon des trajets perpendiculaires à la côte entre 5m et 15m de bathymétrie. Ces campagnes permettront de définir une typologie et une forme de la limite supérieure des herbiers de *Posidonia*, de caractériser le phénomène érosif, la présence de sable ou de boues, la présence de matière organique fossile. Le dernier paramètre est clairement un indicateur de la présence passée d'un herbier, qui a été ensuite détruit ou déplacé.

Une fois établie la liste des appareils retenus pour les mesures *in-situ*, GEOSCIENCES-M a travaillé sur les différentes manières de déployer ces équipements en mer pour répondre au mieux aux objectifs des campagnes de mesure: 1) validation des modèles numériques utilisés pour la conception de l'Atlas Hydrodynamique, 2) caractérisation des climats de houle et des conditions de circulation littorale typiques sur les sites étudiés, 3) questions plus spécifiques sur chaque site (mesure de surcôte, mesure de transfert longshore, perte au large,...). La figure 1 montre un exemple de différents types de déploiement envisagés sur le site n°1 (Espiguette) et en zone pré-littorale. Une démarche similaire est réalisée sur l'ensemble des chantiers retenus.

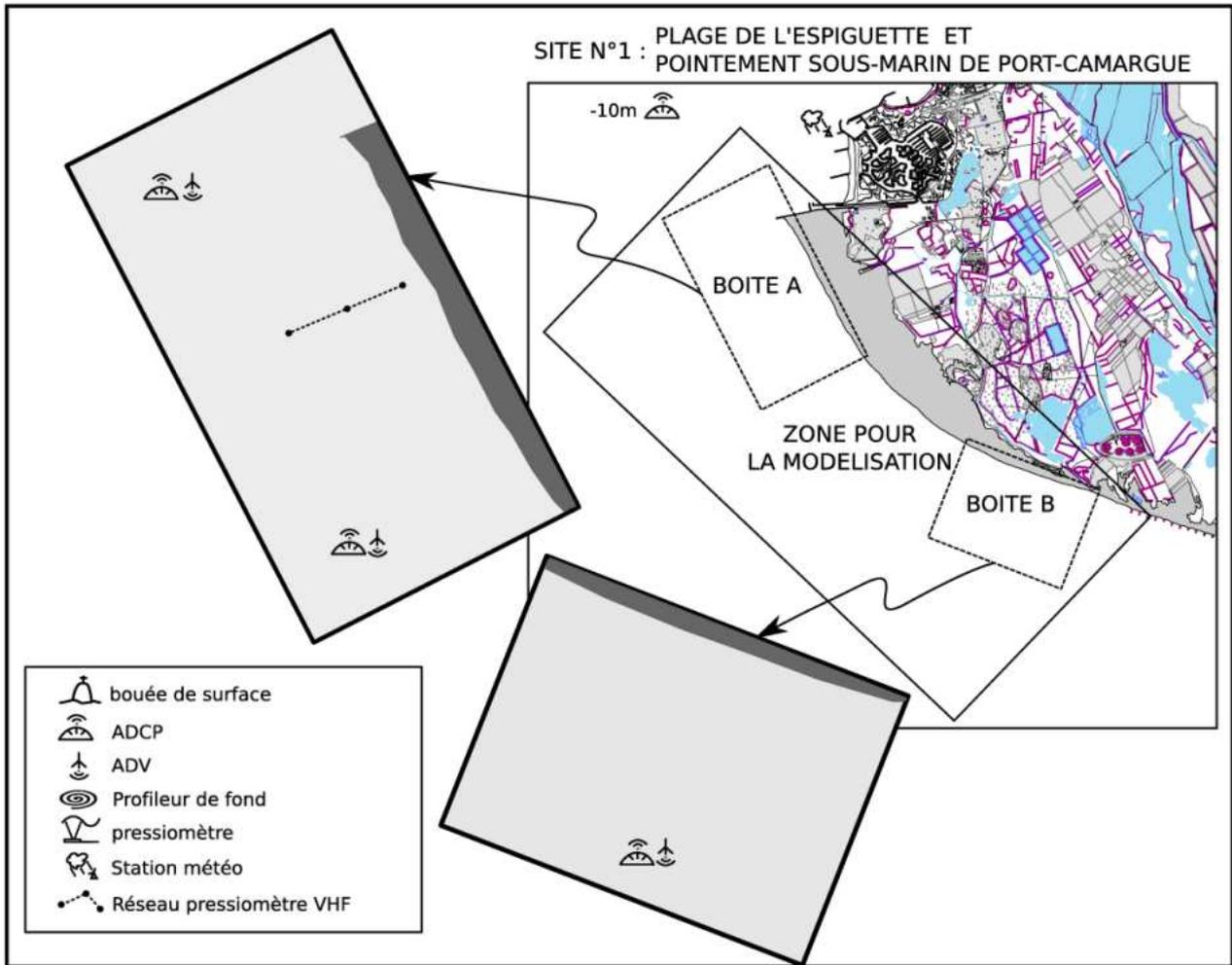


Figure 1: Exemple de fiche de déploiement pour la campagne mars 2007 sur le site n°1 (Espliguetta, Gard)

Sources de données

GEOSCIENCES-M utilise les données météorologiques de l'organisme Météo-France sur les différentes stations de mesure du littoral Languedoc-Roussillon. Par ailleurs, le laboratoire utilisera les données hydrodynamiques régionales de Méditerranée Nord-Occidentale issues des projets MF-STEP (EVK3-CT-2002-00075), Mediterranean ocean Forecasting System Toward Environmental Predictions, les résultats des modèles très grande échelle Aladdin.

ANALYSE DE DONNEES HYDRO-METEOROLOGIQUES EXISTANTES

La caractérisation de l'hydrodynamique littorale passe pour l'ensemble des partenaires par la réalisation de campagnes de mesures, programmées pour l'essentiel en phases B et C. Comme travail préalable, les partenaires ont réalisé une synthèse des données disponibles sur les différents chantiers du projet NAUSICAA.

DEFINITION D'ACTIVITES TRANSVERSALES PRECISES

Il a été décidé:

- 1) que FRI-NAGREF et GEOSCIENCES-M réalisent des travaux de modélisation en commun sur les sites retenus pour le projet NAUSICAA en Macédoine de l'Est / Thrace; sur ce point précis, des membres de l'équipe GEOSCIENCES-M se rendent à Kavala 3 jours avant la réunion de fin de Phase A pour prendre connaissance des zones à modéliser, extraire les topobathymétries, formater les conditions hydro-météorologiques utilisées pour la modélisation. Courant 2007, des membres de

GEOSCIENCES-M dont un post-doctorant recruté pour ce projet réaliseront un séjour sur Kavala pour discuter les résultats de modélisation obtenus au cours du premier semestre 2007.

- 2) que GEOSCIENCES-M (+ partenaire extérieur au projet NAUSICAA, I3M Montpellier) étudie l'intérêt d'une collaboration avec UNIBO-DISTART sur le développement d'un outil numérique d'aide à l'optimisation de forme des structures de protection du littoral;
- 3) que l'ensemble des partenaires travaille durant toute la durée du projet sur la comparaison des outils de traitement et de représentation des mesures hydrodynamiques. Une première séance de travail sur ce point aura lieu à Alexandroupolis avant la réunion officielle de fin de phase A.

SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE

Les partenaires ont réalisé un certain nombre de synthèses bibliographiques portant sur les sujets suivants:

- 1) description de l'hydrodynamique du littoral et de la zone pré-littorale dans le Golfe du Lion (GEOSCIENCES-M);
- 2) compréhension de l'hydrodynamique en région Lazio centrale (LA SAPIENZA);
- 3) dynamique des herbiers de *Posidonia Oceanica* (LA SAPIENZA);
- 4) propagation de la houle et modélisation des courants à l'échelle littorale et pré-littorale ; étude critique et comparée des outils de modélisation hydrodynamique (GEOSCIENCES-M, LA SAPIENZA et FRI-NAGREF);
- 5) processus hydrosédimentaires induits par les houles et les courants, analyse et présentation technique (FRI-NAGREF);
- 6) rôle et importance des CSI (Coastal State Indicator) dans la gestion littorale (UNIBO).

Cette revue bibliographique continuera d'être alimentée durant toute la durée du projet, via un fichier régulièrement mis à disposition sur le site web <http://www.beachmed.it>, sur la page du projet NAUSICAA, ainsi que sur le site de la base de données du partenaire GEOSCIENCES-M (<http://www.gladys-littoral.org/nausicaa>).

REALISATIONS CARTOGRAPHIQUES

Les partenaires doivent produire en phase B et C des documents cartographiques portant sur différentes grandeurs physiques mesurées ou modélisées: caractéristiques de la houle, des courants et des surcôtes, état des herbiers de *Posidonia Oceanica*,...

GEOSCIENCES-M a travaillé sur des modèles de documents pouvant servir de base à la confection de l'Atlas Hydrodynamique du Littoral Languedoc-Roussillon (exemple sur figure 2).

LA SAPIENZA a utilisé les logiciels ArcView 9.0 et 3.2 pour homogénéiser les cartes d'herbiers de *Posidonia* depuis 1959. Des exemples de cartes sont présentés plus loin.

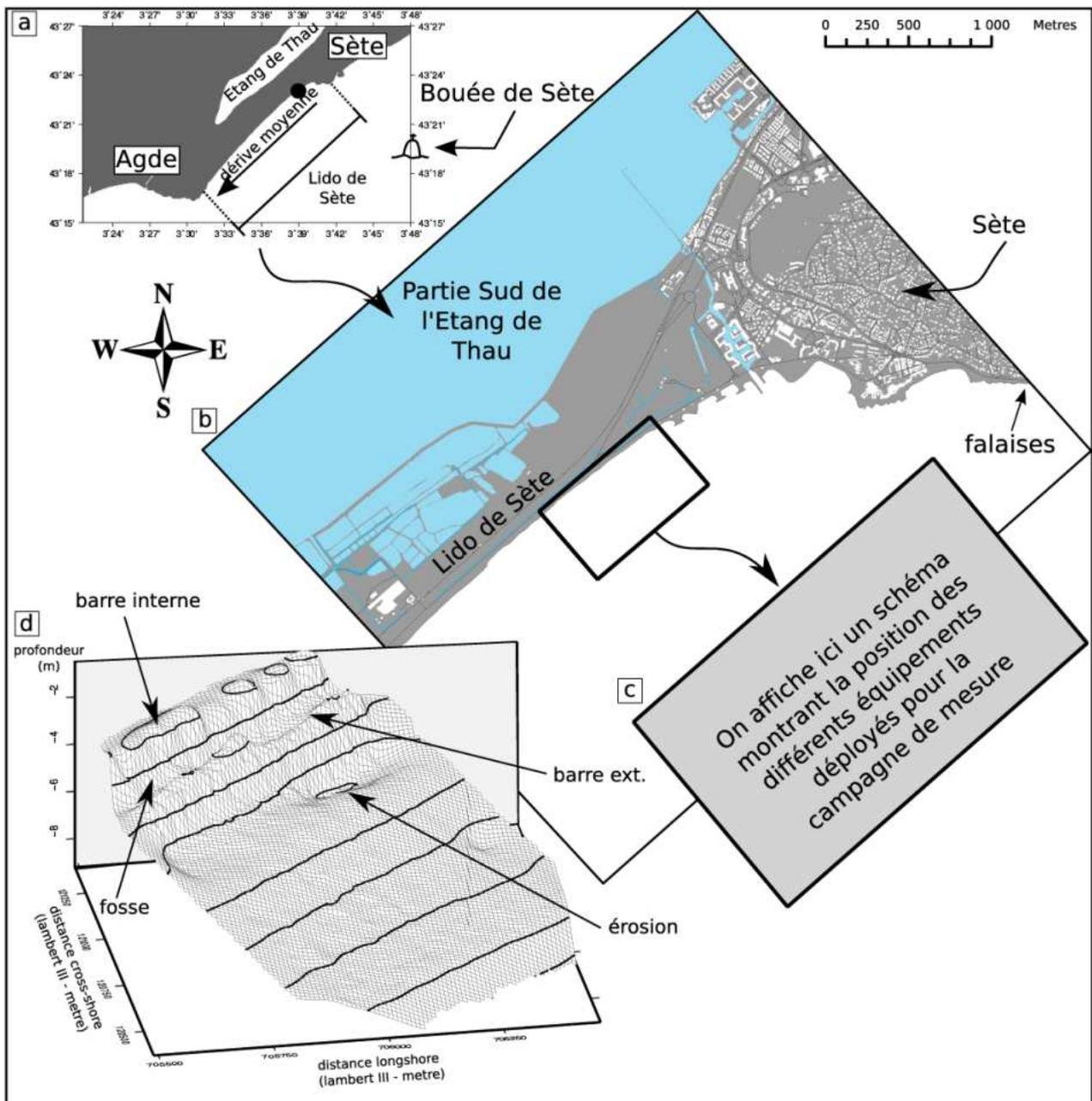


Figure 2: Un exemple de présentation du chantier n°5 (Lido de Sète) proposé par GEOSCIENCES-M. a) schéma présentant la terminologie importante et les caractéristiques générales du trait de côte et de la dynamique littorale à l'échelle de la cellule sédimentaire englobant le chantier. Permet également de localiser les appareils de mesure à l'échelle pré-littorale; b) carte détaillée de la zone entourant le chantier, avec informations sur les caractères morphologiques susceptibles d'influencer l'hydrodynamique; c) schéma du déploiement retenu pour les équipements de mesure sur ce chantier. Un exemple de déploiement est présenté plus loin dans ce rapport; d) représentation 3D et/ou 2D de la morphologie sous marine dans la zone du chantier (ici, d'après Certain et al., 2002, données retraitées à partir des fichiers originaux).

MISE EN PLACE DE BASES DE DONNEES

GEOSCIENCES-M a commencé la mise en place d'un outil de diffusion de l'Atlas Hydrodynamique du littoral par internet. Le laboratoire a acheté deux serveurs web sous Linux équipés notamment des logiciels Apache (avec PHP,GD), MySQL, Generic Mapping Tools et Image Magick, constituant la base du système de publication de l'Atlas via Internet. Tous ces logiciels sont libres et gratuits. Durant toute la phase A, plusieurs codes numériques de publication de données spatiales ont été spécialement écrits pour la diffusion des résultats de l'Atlas, et rassemblés dans une bibliothèque C/PHP appelée MAPOTO, publiée sous licence GPL également. Actuellement, on peut tester une version très rudimentaire de la future interface vers cette

bibliothèque MAPOTO. Les données commenceront à être stockées sur les serveurs dans le courant de la phase B, comme prévu.

PREMIERS RESULTATS

Modélisation hydrodynamique multi-échelle et couplage 3D houle / courant

GEOSCIENCES-M s'est proposé de construire un Atlas Hydrodynamique du littoral basé sur de la modélisation hydrodynamique aux échelles pré-littorale et littorale. En parallèle, le laboratoire s'est engagé à réaliser des campagnes de mesure hydrodynamique aux mêmes échelles pour valider les modèles utilisés d'une part, et pour définir les climats de houle et les caractéristiques générales de la circulation sur les différents chantiers d'autre part.

GEOSCIENCES-M se propose d'utiliser quatre modèles principalement:

- 1) un modèle de circulation 3D appelé SYMPHONIE (Estournel *et al.*, 2003) capable de calculer la circulation pré-littorale à sub-littorale en 3D, avec forçage par les vents, les gradients de salinité et de température, et les apports par les fleuves côtiers;
- 2) un modèle de propagation de la houle (Stokes 1re ordre / Stokes 2ième ordre) appelé REFDIF (Kirby & Dalrymple, 1995) capable de tenir compte à la fois de la réfraction et de la diffraction de la houle en zone sub-littorale et littorale;
- 3) un modèle couplé houle / courant quasi 3D (Q3D) capable de calculer la circulation littorale forcée par la houle et le vent. Ce modèle s'appelle SHORECIRC (Svendsen *et al.*, 2002);
- 4) un modèle de dernière génération (le premier implémenté dans sa catégorie) couplé houle / courant, réellement 3D, capable de rendre compte de la circulation forcée par le vent, les gradients de température et salinité, les apports fluviaux ET la houle. Ce modèle, développé par GEOSCIENCES-M (Denamiel, 2006; articles en cours de publications) est appelé RESYFE.

Lors de la phase A, GEOSCIENCES-M a réalisé un travail de synthèse sur la modélisation hydrodynamique couplée houle / courant, qui est susceptible d'être la plus performante et précise aux échelles pré-littorale à littorale. Par ailleurs, des essais de validation des modèles mentionnés ci-dessus ont été réalisés, surtout sur les modèles SHORECIRC et RESYFE qui n'avaient jamais été utilisés dans le Golfe du Lion. Le modèle RESYFE a été validé à la fois sur des données expérimentales académiques (Dolata et Rosenthal, 1984), et sur le cas réaliste d'une tempête en novembre 1999 ayant touché la baie de Banyuls (Grémaré *et al.*, 2003; Ferré *et al.*, 2005; Ulses, 2005; Denamiel, 2006), dans le Sud du Golfe du Lion.

Le modèle SHORECIRC a été pour l'instant validé par comparaison avec les résultats donnés par RESYFE sur un domaine académique identique et soumis à des forçages identiques. On constate que la reconstitution Q3D proposée par SHORECIRC reproduit correctement les profils verticaux de différentes grandeurs (courants, vitesse de Stokes,...). Le module REFDIF a été utilisé pour générer les forçages par la houle. D'autres tests et validations sont en cours et leur utilisation sur les différents chantiers du projet NAUSICAA a commencé.

Références:

- C. Estournel, X. Durrieu de Madron, P. Marsaleix, F. Auclair, C. Julliard, and R. Vehil. Observation and modelisation of the winter coastal oceanic circulation in the gulf of lions under wind conditions influenced by the continental orography (fetch experiment). *Journal of Geophysical Research*, 108(C3):8059, 2003.
- B. Ferré, K. Guizien, X. Durrieu De Madron, A. Palanques, J. Guillén, and A. Grémaré. Fine-grained sediment dynamics during a strong storm event in the inner-shelf of the gulf of lion (nw mediterranean). *Continental Shelf Research*, 25:2410-2427, 2005.
- A. Grémaré, J. M. Amouroux, G. Cauwet, F. Charles, C. Courties, F. De Bovée, A. Dinet, J. L. Devenon, X. Durrieu de Madron, B. Ferré, P. Fraunié, F. Joux, F. Lantoiné, P. Lebaron, J. J. Naudin, A. Palanques, M. Pujol-Pay and L. Zudaire. The effects of strong winter storm on physical and biological variables at a shelf site in the mediterranean. *Oceanologica acta*, 26:407-419, 2003.
- J.T. Kirby and R.A. Dalrymple. Refdif1 v2.5. refraction diffraction model. Technical report, CACR, Delaware, 1995.
- I. A. Svendsen, K. Haas, and Q. Zhao. Shorecirc- the quasi-3d nearshore circulation model. Technical Report CACR-02-01, Center for Applied Coastal Research, University of Delaware, 2002.
- Caroline Ulses. Dynamique océanique et transport de la matière particulaire dans le Golfe du Lion : Crue, tempête et période hivernale. PhD thesis, Université de Toulouse III, Laboratoire d'Aérodynamique - UMR CNRS/UPS 5560 - Observatoire Midi-Pyrénées 14 avenue Edouard Belin - 31440 Toulouse FRANCE, 2005.

Les « Coastal State Indicators » : où en est-on ?

Lorsqu'on travaille sur des ouvrages prototypes, la meilleure méthode pour vérifier la qualité d'une structure de défense littorale anti-érosion est de procéder à l'analyse de l'évolution temporelle de séries de mesure de la bathymétrie et de la position du trait de côte, finement couplées à un suivi temporel des climats de houle

et des caractéristiques du sédiment sur la zone étudiée. Ces observations sont techniques et très coûteuses, et des méthodes plus faciles à mettre en œuvre (permettant donc d'augmenter la fréquence des observations) sont souvent utilisées: modélisation numérique, suivi vidéo du littoral. La modélisation numérique est très utile lorsqu'il s'agit de prédire l'effet des structures sur l'hydrodynamique et sur la morphodynamique, et participe de fait à l'optimisation de ces structures.

Les modèles morphodynamiques littoraux sont utilisés généralement pour estimer les changements bathymétriques court terme (quelques heures à quelques jours) et moyen terme (quelques semaines à quelques mois) induits par la présence de groins, brise vagues,... Depuis 20 ans, des modèles 2DH intégrés ont été développés, suite aux travaux de Fleming et Hunt (1976). Plus tard, des modèles quasi-3D (Q3D) et réellement 3D ont été développés (voir la revue de de Vriend, 1996). On trouve dans la littérature quelques travaux portant sur l'application de tels modèles 2DH ou Q3D sur des zones présentant des ouvrages prototypes; mais comme ces approches nécessitent des temps de calcul importants et requièrent des acquisitions lourdes de données sur le terrain, ces travaux sont généralement des approches simplifiées, soit au niveau des forçages hydrodynamiques, soit au niveau des bathymétries utilisées. Un article récent de Elias *et al.* (2006) présente une simulation de plusieurs mois sur un site instrumenté pour la mesure bathymétrique, les caractéristiques du vent, de la houle, de la marée et de l'élévation du niveau marin.

Les systèmes de suivi vidéo en zone littorale ont été développés au début des années 80 par l'Oregon State University dans le but d'utiliser les images produites pour étudier les processus dans la zone de swash, les modes de déferlement et mieux comprendre la dynamique des barres sédimentaires d'avant-côte (Holman and Guza, 1984; Holman, 1986). Le suivi vidéo a ensuite été utilisé pour analyser les évolutions du trait de côte et plus récemment pour cartographier les zones intertidales (voir CoastView project, www.thecoastviewproject.org).

Pour faire la synthèse de toutes les informations acquises sur la dynamique littorale, la notion de CSI (Coastal State Indicator) a été élaborée par Davidson (2002). Les CSIs sont définis comme « a reduced set of parameters that can simply, adequately and quantitatively describe the dynamic state of a coastal system ». Leur objectif est de rendre plus simple le travail de gestion du littoral. Les CSIs peuvent être considérés comme le point de rencontre entre le scientifique qui observe et quantifie et le gestionnaire du littoral qui utilise l'information. La détermination d'un CSI, qui doit être à la fois précis comme le veut le scientifique, et à la fois facilement accessible pour le gestionnaire, n'est pas aisée (Van Koningsveld et Mulder, 2004; Van Koningsveld *et al.*, 2005).

Références:

- Davidson, M. 2002. Resulting CSIs. Coastal State Indicators Report, 1st report of CoastView Project, <http://141.163.79.209/web/CSI%20Report%20ver%208.pdf>.
- De Vriend, H. J., 1996. Mathematical modelling of meso-tidal barrier island coasts, Part I: empirical and semi-empirical models, *Adv. in Coastal and Ocean Eng.*, 2, World Scientific, 115-149.
- Elias, E. P. L., Cleveringa, J., Buijsman, M. C., Roelvink, J. A. and Stive, M. J. F., 2006. Field and model data analysis of sand transport patterns in Texel Tidal inlet (the Netherlands), *Coastal Eng.*, 53 (5-6), 505-529.
- Fleming, C. A. and Hunt, J. N., 1976. Application of a sediment transport model, *Proc. 15th Int. Conf. on Coastal Eng.*, Honolulu, ASCE, I, 1184-1202.
- Holman, R. A. and R. T. Guza, 1984. Measuring run-up on a natural beach *Coastal Eng.*, 8 (2), 129-140.
- Holman, R. A., 1986. Extreme value statistics for wave run-up on a natural beach, *Coastal Eng.*, 9 (6), 527-544.
- Van Koningsveld, M., and Mulder, J.P.M., 2004. Sustainable coastal policy developments in The Netherlands. A systematic approach revealed. *Journal of Coastal Research*, 20(2): 375-385.
- Van Koningsveld, M., Davidson M.A., Huntley D.A. 2005. Matching science with coastal management needs: the search for appropriate coastal state indicators. *Journal of Coastal Research*, 21(3), 399-411.

Le problème de l'érosion à l'Ouest du fleuve Nestos (Grèce): le choix des données pour la caractérisation de la houle à la côte

La zone littorale est très dynamique car les variations de l'énergie portée par les masses d'eau s'oppose au transfert de sédiments en provenance du continent. Le résultat est une dénudation de certains segments littoraux et de forts phénomènes d'accrétion sur d'autres (Davis, 1958, 1964). Ainsi, l'étude de la morphodynamique littorale passe par l'acquisition et le traitement de séries long-terme de données de vagues, tout particulièrement pendant les périodes de tempêtes qui caractérisent plus que tout les climats de houle, à l'origine de l'essentiel des transferts de sédiment en zone littorale (Stoddart, 1969; Shepard, 1973). Une synthèse sur les types de houle a été réalisée par LeBlond & Mysak (1978); une synthèse sur les mers de vent a été menée par Lavrenov (2003). Les phénomènes d'accrétion et d'érosion long-terme sur les

plages sableuses sont contrôlés par l'obliquité des vagues, l'impact des tempêtes, les bilans de flux de sédiment, et potentiellement l'élévation du niveau marin (Bruun, 1972).

FRI-NAGREF a sélectionné un littoral grec pour réaliser une étude basée sur ces hypothèses.

La Grèce a une côte d'environ 13.800 km de long faite de paysages littoraux variés: falaises, côtes rocheuses, plages et zones deltaïques. Des 6.200 Km de plages, presque 1.700 sont en érosion, portant la Grèce à la première place de l'Europe Méditerranéenne par l'importance absolue des processus érosifs (Eurosion 2004).

La région de Macédoine de l'Est – Thrace comprend 300 km de littoral, caractérisée par des grès et des marnes à l'Ouest (près de l'embouchure du fleuve Strymon) et le long de la lagune Vistonis – côte du Makri, où on trouve des falaises et des côtes rocheuses, des roches ignées le long de la partie Ouest du littoral du golfe de Kavala et des alluvions dans les zones deltaïques des fleuves Nestos et Evros. La présence de falaises de schistes et de flysch le long du transect Makri – Alexandroupolis semble être responsable de processus d'érosion observés sur les littoraux sableux. Une partie importante du littoral est en accrétion grâce à la sédimentation deltaïque des fleuves Nestos et Evros. Mais une zone où des taux d'érosion significatifs ont été observés depuis quelques décennies se développe dans la partie Ouest du delta du fleuve Nestos, entre Keramoti et l'embouchure du fleuve Nestos (Figure 3). La zone est faite d'une succession de plages sableuses et de lagunes protégées par un lido, et d'avancées sableuses en mer (Perissoratis *et al.*, 1984).



Figure 3. A gauche: carte présentant la zone choisie pour réaliser l'étude. A droite: une plage sableuse sur la côte Ouest du delta du fleuve Nestos.

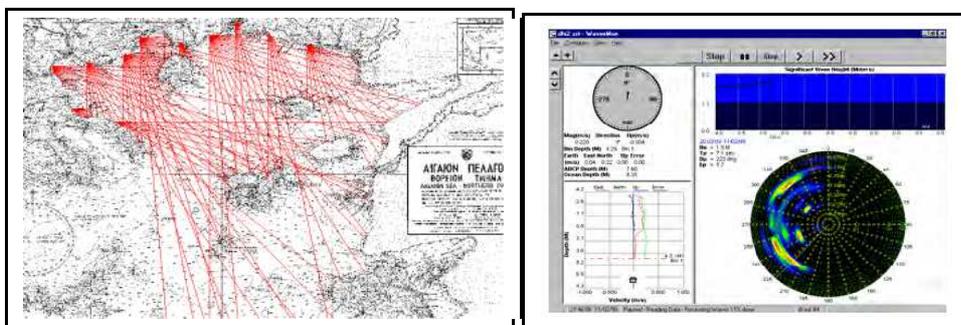


Figure 4. A gauche: Analyse du fetch pour la région de Macédoine de l'Est – Thrace. A droite: traitement de données de houle directionnelle provenant d'un ADCP.

La rivière Nestos longue de 230km avec un bassin versant de 5800 km² (48% en Grèce, et 52% en bulgarie) est la source principale de sédiments terrigènes pour le littoral. Toutefois, la construction récente de barrage sur la rivière (deux barrages hydro-électriques, respectivement Thisavros et Platanoviisi) semble réduire la charge sédimentaire atteignant la côte, et favorise les processus d'érosion long-terme. En outre, les vents du Sud, augmentant le transfert d'énergie de houle vers la côte par une augmentation du fetch (Figure 4), combinés à la présence du détroit de Thassos (7.3km de long, et 27m de fond, entre le delta du Nestos et l'île de Thassos), accentuent sur cette zone littorale les transports sédimentaires longshore et cross-shore.

Par analyse des climats de houle, on comprend dans cette étude l'étude des tendances long terme des paramètres essentiels comme la hauteur significative des vagues, leur période, et ce à différentes échelles spatiales. Le HCMR a réalisé un système de mesure systématique des caractéristiques des vagues appelé POSEIDON (soukission *et al.*, 1999). L'utilisation d'un modèle WAM permet de produire des prévisions pour la Mer Egée, avec une résolution grossière (grille de 0.5° par 0.5°). Les données sont des résumés

mensuels et annuels de la vitesse des vents, la hauteur significative des houles, leur direction, leur forme, leur période sous la forme de différents documents (Soukissian, 2003). Ces données montrent que la hauteur significative des vagues varie entre 0.2m et 0.4m au printemps et en été, et entre 0.5 et 0.75m durant l'hiver, le long de la côte des îles Samothraki et Thassos et dans la zone de Makri – Vistonis.

Des données météorologiques et des données de houles sont accessibles via la station du Mont Athos, faisant partie du système POSEIDON. FRI-NAGREF prépare ces données pour qu'elles soient utilisées comme forçage pour des travaux de modélisation permettant de calculer les caractéristiques des houles à la côte. Coté traitement, la méthode Sverdrup-Munk-Bretshneider (SMB) sera utilisée pour les données de houle. Ces traitements vont permettre que les sorties de modèles soient comparées à la mesure des caractéristiques de la houle directionnelle et des courants 3D obtenue avec l'ADCP équipé d'un module de houle décrit précédemment.

Références:

- Bruun, P. (1972). The history and philosophy of coastal protection. Proc. 13th Intern. Conf. Coastal Engin., ASCE 1, 33-74.
- Capobianco, M., Hanson, H., Larson, M., Steetzel, H., Stive, M.J.F., Chatelus, Y., Aarninkhof, S. & T. Karambas (2002). Nourishment design and evaluation: applicability of model concepts. Coastal Engineering 47, 113-135.
- Davis, J. L. (1964). A morphogenic approach to world shorelines. Annals of Geomorphology 8, 127-142.
- Davis, J.L. (1958). Wave refraction and the evolution of shoreline curves. Geogr. Stud. 5, 1-14.
- Lavrenov, I.V. (2003). Wind-waves in oceans: Dynamics and numerical simulations. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 376 p.
- LeBlond, D.H & L.A. Mysak (1978). Waves in the ocean. Elsevier Oceanography Series. Amsterdam, 602 p.
- Perissoratis, K., Aggelopoulos, I., Mataragas, D., Mitropoulos, D., Konispoliatis, N., 1984. Bathymetry, morphology and characteristics of surface sediments at Ierissos-Alexandroupolis area. Proc. of 1st Panhell. Conf. in Ocean. & Fish, Athens, 1, pp. 14- 18.
- Shepard, F. P. (1973). Submarine Geology. 2nd Ed. New York, Harper Row.
- Soukissian, T.H., Chronis, G. T. & K. Nittis (1999). POSEIDON: Operational Marine Monitoring System for Greek Seas. Sea Technol. 40 (7), 32-37.
- Soukissian, T.H. (2003). An Enhanced Operational System for Wave Monitoring and Prediction with Applications in Hellenic Navigation. Research project financed by the General Secretariat of R&D.
- Stoddart, D. R. (1969). World erosion and sedimentation. In: Water, Earth and Man, ed. R.J. Chorley, London, Methuen.

Dynamique des herbiers de Posidonia Oceanica

Une étude envisagée dans NAUSICAA a pour objectif l'évaluation des interactions entre l'érosion, la houle ; et les herbiers de *Posidonia oceanica*. Dans cette optique, le rôle des herbiers sur l'atténuation des houles et la réduction consécutive de l'érosion littorale des plages sableuses sera mis en évidence. Une zone située le long de la côte du Lazio, où la plage est couramment en érosion et les herbiers en régression systématique, sera utilisée comme chantier d'étude.

Au cours de la phase A, le partenaire LA SAPIENZA a réalisé une analyse historique de la distribution des herbiers de *Posidonia oceanica* le long de la côte étudiée (synthèse des cartes précédemment relevées, uniformisation et géoréférencement de l'état actuel).

Une première étape a consisté à acquérir et référencer le trait de côte et les données topobathymétriques. Le travail de cartographie des herbiers de *Posidonia Oceanica* est ensuite reporté sur cette base cartographique.

La distribution actuelle des *Posidonia* dans la zone d'étude a été comparée avec les trois cartes historiques disponibles couvrant les 50 dernières années et basées sur: le suivi de 1959 de Fusco (1961), le suivi de 1980 d'Ardizzone et Migliulo (1982) et le suivi de 1990 de Diviacco *et al.* (2001). La première carte a été réalisée par la flotte marchande italienne à partir de données échosondeurs partielles et d'observations par dragage. L'échelle originelle était de 1:100.000. La seconde carte a été établie à partir de la première, en ayant recours à une campagne de plongée précise. La troisième carte a été réalisée lors d'une campagne d'étude des herbiers de *Posidonia* le long de toute la côte du Lazio. La carte actuelle, à l'échelle du 1:10000 a été réalisée par la Région Lazio et LA SAPIENZA à partir de données Side Scan Sonar, ROV, plongée et positionnement DGPS lors d'une campagne en 2005.

La couverture actuelle des herbiers de *Posidonia* a changé du tout au tout par rapport aux périodes de références précédentes. Le suivi de l'année 2005 a permis de déterminer une surface approximative de 2899ha de *Posidonia* et 1800ha de tapis végétal mort. On observe de grandes différences spatiales. La première zone (zone Ouest) est celle des herbiers reposant au droit du Cap Circeo et a été la moins affectée ces dernières années, peut-être parce que ces herbiers sont situés plus au large que les autres, et donc moins influencés par les apports continentaux, mais aussi parce que la zone est moins chaulée illégalement car située sur des substratum durs. La seconde zone (zone centrale) est comprise entre le Cap Circeo et

Terracina et présente la régression la plus marquée. Ce littoral a largement été anthropisé ces dernières années et on y enregistre une forte dégradation de la qualité des eaux et des modifications du type de sédiment. La troisième zone (zone Est), de Terracina à Sperlonga, montre une régression modérée, caractérisée par un retrait de la limite des herbiers coté large.

Pour ces trois zones, on a calculé la réduction de la couverture en Posidonia et les déplacements de la limite inférieure. En 1959, la limite inférieure des herbiers de Posidonia était à 35m sur toute la zone (Fusco, 1961), mais la situation avait largement évolué vingt ans plus tard (Ardizzone & Migliuolo, 1982) avec une valeur moyenne autour de 22-24m dans la partie centrale la plus réduite, et de l'ordre de 25m à l'est de Terracina. Lors des suivis de 1990, la limite inférieure des herbiers n'était pas positionnée de manière homogène: à peu près à la même profondeur (30-35m) au large du Cap Circeo, à 20-22m dans la partie centrale, et à 24-25m à l'Est de Terracina (Diviacco *et al.*, 2001). Lors du suivi 2005, la zone autour de Circeo est encore la moins affectée, alors que la zone centrale est réduite encore, la limite inférieure atteignant une profondeur de l'ordre de 18-20m. La limite inférieure dans la zone Est est de l'ordre de 23-25m.

La limite supérieure des herbiers a moins évolué que la limite inférieure, passant de 14m en 1959 à 17-18m dans l'étude actuelle sans différences notables dans les trois zones sus-mentionnées. La seule exception à noter est au large du port de Circeo. Cet ouvrage portuaire important réalisé dans les années 60 a largement influencé l'herbier de Posidonia, créant un large trou.

La couverture de Posidonia était de 7290 ha en 1959, puis 5054 ha en 1980, puis 3581 ha en 1990, et finalement 2899 ha actuellement. Dans le même temps, il n'y a pas eu d'augmentation importante du tapis végétal mort.

Les différences spatiales d'évolution des herbiers de Posidonia montrent la nécessité d'une étude à plus grande échelle pour mieux comprendre le phénomène de régression. La régression rapide observée peut être résumée en chiffres: diminution de la couverture de 60% depuis 1959, dont 19% depuis 1990. La perte totale de Posidonia avoisine les 4391 ha en 50 ans.

La validation des cartes est nécessaire pour quantifier l'évolution des herbiers (Leriche *et al.*, 2004). Les cartes de 1990 et actuelle sont valides, la dernière ayant été réalisée par une couverture totale à l'imagerie Side-Scan Sonar, validée par des observations vidéos. Les cartes plus anciennes sont importantes pour le positionnement de la limite supérieure et inférieure des herbiers.

La situation n'est pas le résultat d'une pollution catastrophique mais sans aucun doute le fait des transformations du littoral dues à l'homme, très communes sur le pourtour Méditerranéen (Boudouresque *et al.*, 2006): urbanisation du littoral, construction de ports et d'ouvrages littoraux, produits provenant de l'agriculture intensive dans les plaines littorales, chalutage illégal (Ardizzone *et al.*, 2000) sont les moteurs de cette régression.

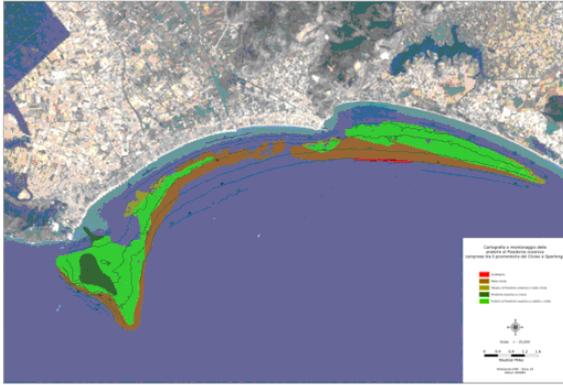
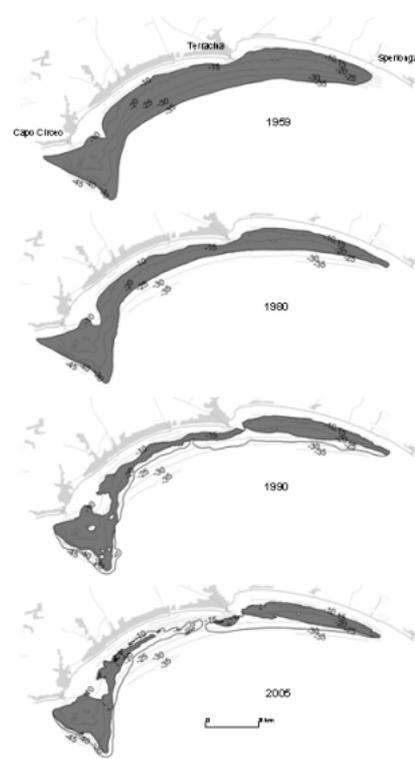


Figure 5. Ci-dessus: les herbiers de *Posidonia* étudiés par LA SAPIENZA. Extension actuelle des herbiers de *Posidonia Oceanica* et état (vert: herbier sur substrat rocheux; vert clair: herbier clair sur fond sableux ou tapis végétal mort; marron: tapis végétal mort). Ci-contre: l'herbier de *Posidonia* sur des cartes historiques (1959: d'après Fusco, 1961; 1980: d'après Ardizzone et Migliuolo, 1982; 1990: d'après Diviacco et al., 2001), et la campagne 2005.



D'autres preuves de la relation entre transformation du littoral et régression de la *Posidonia* peuvent être trouvées lorsqu'on compare les herbiers présentés ci-dessus et les herbiers des Iles Ponziene (Pontines). Sur cette archipel, aucun des facteurs à risques mentionnés n'est présent, et les herbiers sont stables, et ceci depuis au moins 15 ans (Ardizzone, 1991, non publié). On n'observe actuellement aucune trace d'évolution passée (absence de tapis végétal mort par exemple).

La deuxième étape des activités poursuivies pendant cette première phase a intéressé l'élaboration d'un plan d'étude pour déterminer les effets atténuants des herbiers, dans leur différent état de conservation, par rapport au climat houleux.

LASAPIENZA a déjà choisi un partenaire chargé des travaux de modélisation numérique et de la caractérisation des climat de houles pour les phases B et C: l'Institut des Sciences Marines, du Conseil National de la Recherche de Venise.

L'activité proposée se concentrera sur un secteur pilote, la région littorale de Terracina, encadrée entre le promontoire du Circeo et le port de Terracina (Latina), généralement considérée comme représentant d'une situation de dégénération à différent niveau du lit de la *Posidonia* le long de la côte du Latium et intensivement surveillée dans le passé.

Le meteo-dimat marin et les études numériques se focaliseront principalement sur:

1. le rassemblement des données de vague et vérification de leur qualité pour les deux régions proposées (Terracina west and Terracina est)
2. l'élaboration des résultats du modèle numérique meteo-marin WAM. Analyse de la série chronologique 10-years résultant d'un modèle dans les points de grille les plus proches des régions étudiées. Calibrage de la série chronologique en utilisant des données satellites. Comparaison entre model/data là où disponible.
3. L'analyse statistique de la dimatologie considérée comme représentant du dimat marin de mer ouverte des régions investiguées
4. le transfert de la dimatologie de mer ouverte à la côte, employant le modèle de vague de la troisième génération SWAN
5. les simulations numériques en utilisant SWAN, afin d'estimer les vitesses et l'effort au fond de la mer induit par les vagues. Les essais considéreront également la taille de grain du fond, qui sera déduite des cartes thématiques rendues disponibles par la Région Latium.

6. l'évaluation des probables modifications du fond par rapport aux mouvements des vagues et des caractéristiques du sédiment
7. le plan de l'effort de cisaillement critique pour le deux régions choisies (à une taille de grille approximativement de 50 mètres)
8. la sélection des scénarios visant à l'évaluation de l'impact de la *Posidonia oceanica* sur le climat marin à la côte et à ses rétroactions possibles.

Des expérimentations pour évaluer la mesure dans la quelle la *Posidonia* affecte réellement le mouvement de vague sont projetées pour être aussi bien effectuées dans le laboratoire (canal à houle) ou, si les conditions seront possibles, dans les mêmes sites pilotes (champ de bouées).

Références:

- Arduzzone G.D., Migliuolo A. (1982). Modificazioni di una prateria di *Posidonia oceanica* (L.) Delile del Medio Tirreno sottoposta ad atti vità di pesca a strascico. *Naturalista Siciliano*, S. IV, **VI** (Suppl.3), 509-15.
- Arduzzone G.D. (1991). Cartografia bentonica con sistemi video controllati a distanza. *Oebalia*, suppl., **XVII**, 421-452.
- Arduzzone G.D., Tucci P., Somaschini A., Belluscio A. (2000). Is bottom trawling responsible for the regression of *Posidonia oceanica* meadows in the Mediterranean Sea? In: M.J. Kaiser and S.J. de Groot (Eds.), *Effects of Fishing on non-target species and Habitats*. Blackwell Science, 37-46.
- Leriche A., Boudouresque C.F., Bernard G., Bonhomme P., Denis J. (2004). A one-century suite of seagrass bed maps: can we trust ancient maps? *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, **59**, 353-362.
- Boudouresque C.F., Bernard G., Bonhomme P., Charbonnel E., Diviacco G., Meinesz A., Pergent G., Pergent-Martini C., Ruitton S., Tunesi L. (2006). Preservation et conservation des herbiers a *Posidonia oceanica*. RAMOGE Pub., 1-202.
- Diviacco G., Spada E., Virno Lamberti C. (2001). Le Fanerogame marine del Lazio. Descrizione e cartografia delle praterie di *Posidonia oceanica* e dei prati di *Cymodocea nodosa*". *Quaderno ICRAM*, 113 pp.
- Fusco N. (1961). Carta da Pesca n. 3. Da Capo Circeo a Capo Miseno. Ministero Marina Mercantile. Direzione Generale Pesca Marittima.
- Bretschneider C. L., Reid R. O. (1954) - Modification of wave height due to bottom friction, percolation, and refraction. *Beach Erosion Board, Corps of Engineers, Technical Memorandum*, **45**: 21
- Brampton A. H., Allen J. R. L., Pye K. (1992) - *Saltmarshes, Morphodynamics, Conservation and Engineering Significance*, Cambridge University Press, Cambridge.
- Burchard H. (2001) - Simulating the wave-enhanced layer under breaking surface waves with two-equation turbulence models. *Journal of Physical Oceanography*, **31**: 3133-3145.
- Camfield F. E. (1983) - Wind-wave growth with high friction *Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering*: 115-116.
- Carollo F.G., Ferro V., Termini D. (2002) - Flow velocity measurements in vegetated channels *J. Hydraul. Eng.*: 664-673
- Carniel S., Sclavo M., Kantha L., Clayson, (2006) - Langmuir cells and mixing in the upper ocean. *Il Nuovo Cimento*, **28C**: 33-54.
- Carniel S., Kantha L.H., Sclavo M. (2004) - The influence of Langmuir cells on the velocity structure in the mixed layer. *Annales Hydrographiques*, SHOM Ed., 6e série, Vol. **3**, n. 772: 8-1/8-5.
- Dubi A. (1995) - Damping of water waves by submerged vegetation: A case study on *Laminaria hyperborea*, PhD thesis, University of Trondheim, The Norwegian Institute of Technology, Trondheim, Norway.
- Elwany, M.H.S., O'Reilly, W.C., Guza, R.T., Flick R.E. (1995) - Effects of Southern California kelp beds on waves *J. Waterw. Port Coast. Ocean Eng.*: 143-150.
- Fonseca M. S., Cahalan J. A. (1992) - A preliminary evaluation of wave attenuation by four species of seagrass *Estuarine, Coastal and Shelf Science*: 565-576.