

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**

Synthèse et traduction finale

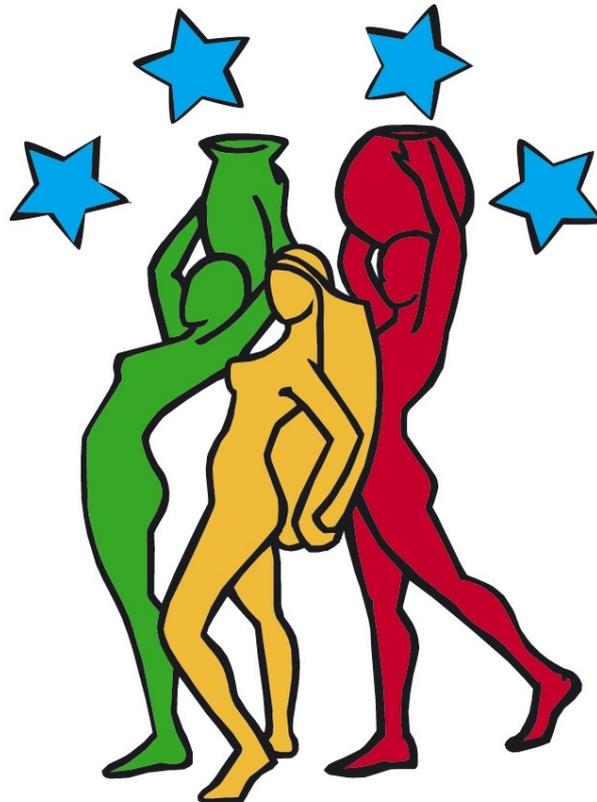
Frédéric Bouchette

Laboratoire Géosciences Montpellier, CNRS / Université Montpellier II

GEOSCIENCES-M (bouchette@dstu.univ-montp2.fr)

**RAPPORT DE PHASE B
VERSION COURTE**

En Français



MOTS-CLES

Mesure et modélisation hydrodynamique, Atlas, CSI, *Posidonia oceanica*

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.

La phase B du projet NAUSICAA (détaillée dans le dossier consolidé) est axée sur les premiers travaux de modélisation hydrodynamique, ainsi que la synthèse de données existantes concernant le forçage hydrodynamique. La réalisation des livrables finaux est bien sur le fait de la phase C, mais la phase B a également comme objectif la production d'ébauches des livrables finaux, afin d'avoir une idée de ce qui sera produit sur les différents sites étudiés.

Ce document est une version synthétique et abrégée de la présentation du bilan de la phase B.

Dans ce document, on trouve:

- 1) une ébauche d'Atlas Hydrodynamique reposant sur une charte graphique discutée avec les utilisateurs finaux de ce type de document. L'ébauche est proposée pour la partie Nord du Golfe du Lion, en France;
- 2) une présentation des Coastal State Indicators sur la côte d'Emilia-Romagna;
- 3) une présentation des climats de houle, des conditions de vents et plus généralement des différents forçages météorologiques existants sur le Nord de la Mer Egée;
- 4) une présentation de l'état d'avancement des travaux hydrodynamiques liés à la dynamique des herbiers de Posidonie en mer Adriatique, sur le secteur Terracina / Cape Circeo, en Italie.

LE MODELE D'ATLAS HYDRODYNAMIQUE DU LANGUEDOC-ROUSSILLON

Un atlas hydrodynamique est un outil amené à être manipulé par des utilisateurs finaux ayant besoin d'être guidés vers une interprétation juste et raisonnable de cartes résultants de mesures et de modélisations de l'hydrodynamique littorale. Pour répondre à cette exigence, la conception de l'Atlas Hydrodynamique comprend une phase de réflexion sur son apparence et sa structure. Un objectif essentiel de la phase B était de proposer une ébauche de ce que doit être la maquette finale de l'Atlas Hydrodynamique.

L'idée de fond est que l'Atlas en version papier est un document au format A3 en couleur. Lorsqu'il est ouvert, sur un ensemble de 2 pages A3 en regard l'une de l'autre, on trouve un ensemble de figures et d'informations textuelles qui correspondent à un forçage donné (conditions de vent et conditions de houle au large) sur un site donné. Ici, on montre un exemple de résultats de l'Atlas dans son état d'avancement actuel. L'exemple retenu pour cette version abrégée est le forçage de vent de Sud-Ouest sur l'ensemble du Golfe d'Aigues-Mortes (échelle pré-littorale, boîte Nord). Même si les modélisations de la propagation de la houle sont réalisées (voir par exemple document de présentation de la fin de PHASE B lors de la réunion de Bologne en Avril 2007), aucun résultat de couplage houle / courant n'a été représenté dans la mesure où ils sont tous en cours de validation. L'ensemble des résultats validés est disponible dans la version longue du rapport de phase B. Au 30 juin 2007, cet ensemble correspond à un peu moins de 400 cartes pour un total de plusieurs dizaines de Gb de données.

Sur les figures 1 et 2, on retrouve les deux pages A3 montrant les résultats pour l'exemple sélectionné.

Les résultats sont organisés de la manière suivante: 1) un bandeau supérieur reprenant les caractéristiques générales du cas étudié, 2) un texte commentaire sur la partie droite extrême guidant l'utilisateur dans l'interprétation des résultats reportés sur les différentes figures constituant le panneau, 3) deux cartouches, l'un rappelant la position du domaine modélisé à l'échelle du Golfe du Lion bien visible lorsqu'on effeuille l'atlas, l'autre (en bas) montrant la topobathymétrie et (à terme) de manière graphique le type de forçage appliqué pour le cas étudié, 4) un ensemble de 5 cartes, 2 coupes et 1 graphe représentant des grandeurs physiques, chaque figure étant nommée et systématiquement repérée par un code lettre qui est repris dans les explications données dans le texte.

On propose une description rapide des différentes figures sélectionnées:

Figure A: une représentation des courants de surface résultant du forçage courant. Ce forçage peut être un vent seul (comme c'est le cas dans les deux exemples ici), une houle au large seule, ou à la fois un vent et une houle. Dans le cas d'un vent seul, on a une représentation de la circulation décrite par les modèles traditionnels en océanographie. Dans le cas d'une forçage houle/courant, la circulation est la résultante du couplage complexe entre les deux forçages, comme décrit en phase A.

Figure B: une représentation des courants de fond résultant du forçage courant. Les remarques ci-dessus s'appliquent également.

Figure C: une représentation de la vitesse moyenne sur la verticale qui donne une indication du transport de masse d'eau (à ne pas confondre avec le transport sédimentaire).

Figure D: une représentation de la hauteur des vagues.

Figures E et F: des coupes verticales représentant le courant résultant du forçage. Le panneau final offrira un positionnement de ces coupes sur la figure représentant la topobathymétrie.

Figure G: une représentation de l'élévation de la surface libre résultant du forçage courant. Dans le cas d'un vent seul, on a donc une représentation du basculement du plan d'eau sous le cisaillement induit par le vent. Dans le cas de la houle, on a une représentation de la surcôte, et dans le cas d'un forçage combiné houle/vent, on a les deux.

Figure H: une représentation de l'élévation de la surface libre dans 5, 10 et 20 mètres d'eau.

4.3 Conditions de vent de Sud-Ouest à $15 m.s^{-1}$ sur le Golfe d'Aigues-Mortes

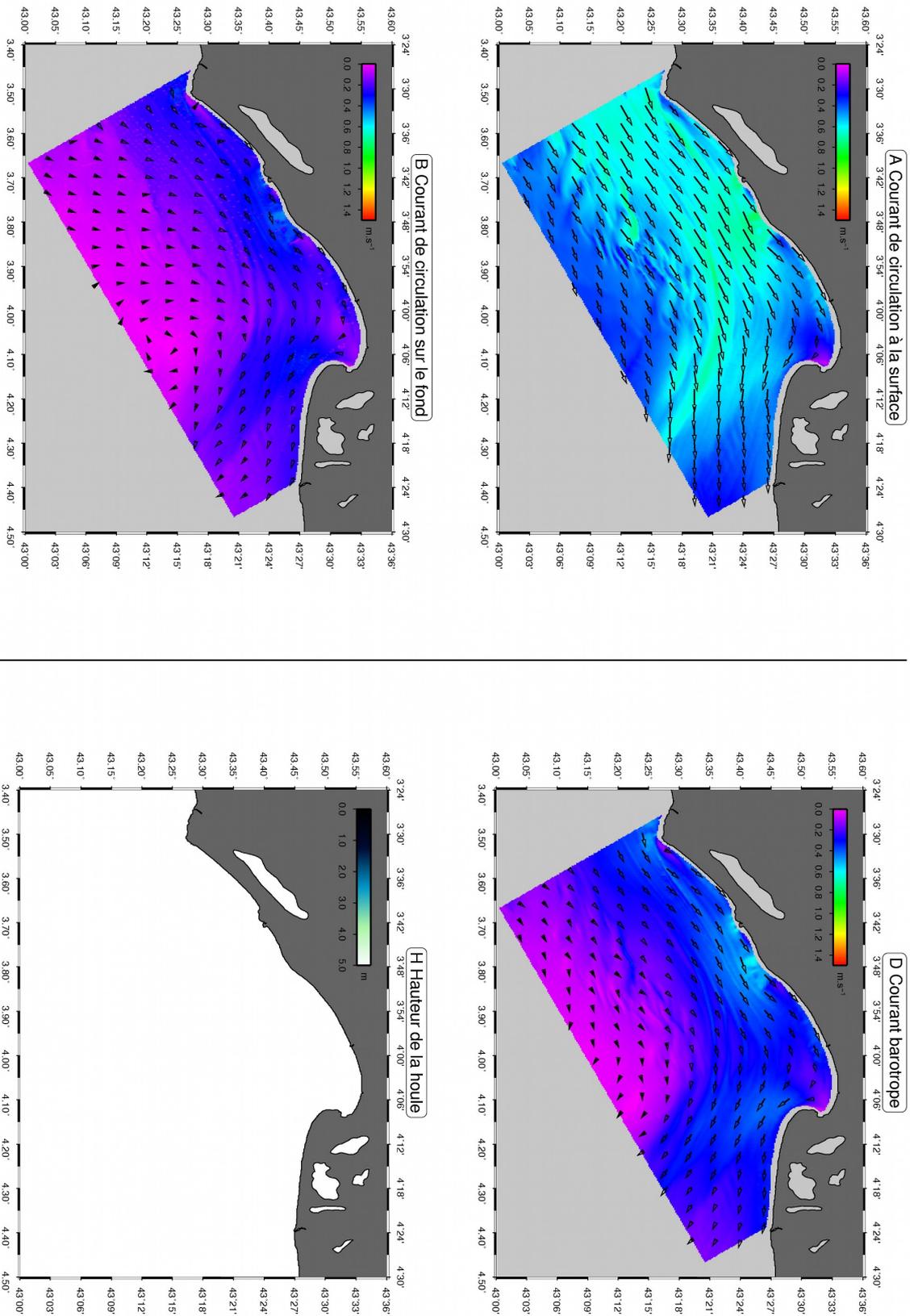
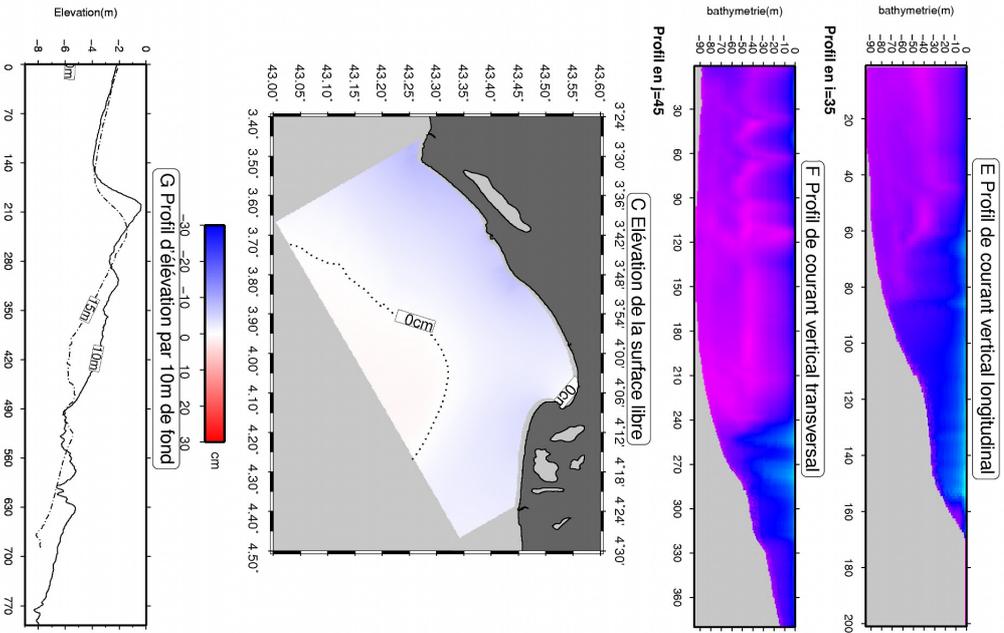


Figure 1: représentation à un format réduit du premier A3 du modèle d'atlas hydrodynamique pour le cas d'un vent de Nord-Est sur la boîte pré-littorale Nord (Golfe d'Aigues-Mortes).

Conditions de vent de Sud-Ouest à $15 m.s^{-1}$ sur le Golfe d'Aigues-Mortes



Dans ce contexte de vent marin, la circulation à l'échelle pré-littorale dans le Golfe d'Aigues-Mortes est caractérisée par un déplacement des eaux de surface du Sud-Ouest vers le Nord-Est, tournant Est au niveau de la flèche de l'Espiguette (cf. carte (A)). La circulation sur le fond décrit à peu près le même parcours, avec une virgation plus accentuée au niveau de la flèche de l'Espiguette (cf. carte (B)). La conséquence première de cette homogénéité des courants sur la verticale est un courant barotrope orienté de la même manière, avec une exagération des vitesses au niveau du plateau des Arnesquiers, Frontignan et la corniche de Stéa.

Le niveau moyen a tendance à s'abaisser à la côte (cf. carte (C)), et ne varie que peu entre 15m et 5m de bathymétrie (cf. carte (D)).

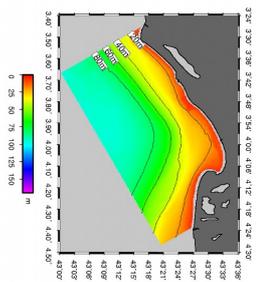
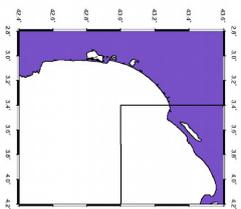


Figure 2: représentation à un format réduit du second A3 du modèle d'atlas hydrodynamique pour le cas d'un vent de Sud-Est sur la boîte littorale de l'Espiguette (Golfe d'Aigues-Mortes).

COASTAL STATE INDICATORS en EMILIA-ROMAGNA

La côte d'Emilia-Romagna s'étend du delta du Po au Nord, au cap Gabicce au Sud. C'est une côte sableuse de 130km de long percée par plusieurs petits fleuves littoraux. On trouve plusieurs Marinas ou petits ports le long de la côte et le seul port industriel de Porto Corsini à Ravenna. Le littoral est microtidal (0.4m de marée de printemps; maximum de 1.0m). Les climats de houle sont caractérisés par des hauteurs significatives de 0.5m et des périodes de 3.5-4.0 s. La tempête annuelle typique est de 3.5m de haut et de période 7s. Exceptionnellement, les vagues peuvent atteindre 6.0m de haut et 10s de période. Les vents dominants sont d'une part la « Bora », un vent froid et fort venant du Nord-st, associé à de petits fetchs, des conditions instables, des turbulences intenses, et favorisant la mise en place de vagues courtes et raides, et d'autre part le « Scirocco ». Le profil de plage émergée typique consiste en des dunes de 2-3m de haut, rarement observée si ce n'est sur le lido de Dante, puis une plage de 30-50m de long avec des pentes moyennes de l'ordre de 1/20 à 1/30. La plage immergée présente plusieurs barres sableuses; le fond est sableux jusqu'à une profondeur de 6 à 8 mètres; ce point de fermeture est distant de 600 à 1000m de la côte; plus au large, le fond est essentiellement composé d'argiles recentées et de silt jusqu'à 30 à 40 m de profondeur (soit 70km de la côte). Là, on trouve d'anciennes masses sableuses qui sont utilisées pour engraisser les plages. La plupart des ouvrages de protection sont situés à 250m de la côte. La subsidence est un point clé. Dans la partie Nord, elle est de -1cm/an et absorbe approximativement 10^6 m³/an le long de la côte, c'est à dire le même ordre de grandeur que dans les milieux lagunaires situés dans le delta du Po. L'érosion sableuse coûte 10^5 m³/an.

Les enjeux et les problèmes sont les suivants:

- 1) le divertissement et le tourisme littoral sont à l'échelle de la Région l'une des entrées financières les plus importantes;
- 2) la protection des zones urbanisées littorales;
- 3) la protection contre les inondations;
- 4) la subsidence. Mais son importance est moindre que dans les années 60 où l'on observait des pics à 20cm/an sur la plaine du Po du fait d'extraction de gaz Methane du sous-sol;
- 5) La pêche est d'importance intermédiaire sur le secteur;
- 6) Le port de Ravenna n'influe pas de manière importante la dynamique des littoraux alentours; les activités littorales récréatives et la nécessité de faciliter l'accès des services de secours et sécurité par la mer doivent être pris en compte lors de la conception des structures de protection;
- 7) la zone de delta fait partie d'un parc s'étendant au Sud vers Ravenna. Les zones protégées sont des zones humides, des lagunes et des bois. Ils sont mis en danger par la pression anthropique et par la subsidence. Les bois souffrent d'intrusion d'eau salée.
- 8) La qualité de l'eau et l'eutrophisation sont omniprésents mais en régression apparente.

CSI sur l'EMILIA-ROMAGNA

L'action du gouvernement régional est basée sur de très simples indicateurs, qui sont spécifiques aux conditions Méditerranéennes:

- 1) la position du trait de côte et la largeur de la plage sont surveillées par photo aérienne tous les ans,
- 2) des profils (jusqu'à 8m de bathymétrie) sont réalisés tous les 10 ans avec espacement approximatif de 500 mètres,
- 3) dans certaines zones critiques, la submersion de la plage est surveillée dans la mesure où c'est un indicateur précoce de l'érosion;
- 4) la hauteur des dunes aériennes est suivie par des mesures irrégulières souvent liées à d'autres travaux sur site;
- 5) la subsidence est estimée à partir du marégraphe de Porto Corsini qui donne entre autres le niveau moyen annuel. Un levé topographique le long de lignes guides repères est réalisé tous les 5-10 ans;

- 6) les vagues sont mesurées sur les plateformes d'extraction du gaz en mer de puis longtemps. AGIP a installé un réseau de mesures dans les années 1990. Les observations sont faites pour 10 minutes toutes les 30 minutes. Les données comprennent la direction, mais elle n'est pas accessible. Cette donnée n'est pas assurée car la propriété d'une compagnie privée;
- 7) la mesure de vent se fait en plusieurs endroits: phares, stations de mesures, plateforme d'extraction du gaz,...
- 8) utilisation récréative de la plage: les agences municipales enregistrent la présence de touristes;
- 9) La qualité des eaux est suivie par le centre de Cesenatico.

Un risque fort est déclaré dès lors que la largeur de la plage tombe en dessous d'un seuil. Une largeur de 20 mètres est le minimum absolu en dessous duquel les structures sont sérieusement exposées aux risques. 50m est une cible raisonnable pour une plage qui est moyennement utilisée pour les activités touristiques. Pour les plages les plus fréquentées, une largeur critique de 100m est considérée. Au dessus de cette valeur, l'intérêt de la plage n'augmente pas de manière significative. Une largeur de plage supérieur à 200m induit même d'autres problèmes. Pour protéger l'arrière côte, les dunes naturelles ou artificielles devraient être de 2.5 mètres de haut. Près du delta du Po, cette valeur monte à 4m car la morphologie du littoral induit des phénomènes de surcôte singuliers.

CSI du lido de Dante

Le lido de Dante est situé à 7km de Ravenne. La plage sableuse de ce lido est située entre l'exutoire du Fiumi au Nord et celui de la Bevano au Sud. La zone couverte par un système de suivi vidéo comprend des zones naturelles non protégées et une zone protégée par une structure de 770m de long composée de brise-lames semi-immérgés, ainsi que 3 groins. L'utilisation de la plage pour le tourisme associée aux problèmes d'érosion observés dès les années 70 en font un site idéal pour l'ingénierie littorale, les études morphodynamiques et les études de gestion du littoral. Les conditions locales sont celles présentées pour la région Emilia-Romagna.

La valeur de largeur de plage minimale nécessaire pour maintenir l'activité touristique a été estimée à 20m, avec une cible à 50m (Lamberti, 2002).

Dans la zone protégée par les ouvrages, les courants interagissent avec les structures et ceci résulte en la mise en place de forts courants peu adaptés pour la natation. Sur la partie non protégée, l'existence de rip-current gêne également la baignade. Dans les deux cas, le suivi vidéo est utilisée pour estimer l'importance de ces phénomènes.

Sur le lido de Dante, les enjeux et les problèmes sont les suivants:

- 1) la protection du littoral (plages aménagées et bâtiments à l'arrière);
- 2) protection de la dune (notamment pour la protection des bois contre l'intrusion d'eau salée);
- 3) l'utilisation récréative des plages. La plage est traditionnellement utilisée pour la baignade, notamment celle à coté du village. La plage du Sud est fréquentée par les naturistes et les personnes logés sur le camping avoisinant;
- 4) Le problème de la qualité des eaux est commun à toutes les plages, notamment celles situées à sud du Po. Les blooms algaires ont diminué ces dernières années;
- 5) la sécurité des baigneurs est moindre en présence de forts courants. La baignade est théoriquement interdite dans les conditions de forte mer et de fort vent de mer.

Les CSI retenus sur le Lido di Dante sont les suivants:

- 1) concernant la plage: volume sableux, position du trait de côte, largeur de plage, élévation de la plage
- 2) concernant les dunes: position du pied de dune, hauteur des crêtes, présence d'overwash, état de la végétation

- 3) concernant l'hydrodynamique: hauteur de houle, période, direction, marée, caractéristiques du vent, largeur de la zone de surf, courants de plage;
- 4) concernant les barres sédimentaires: localisation des barres, hauteurs des barres
- 5) concernant les aspects anthropiques: utilisations de la plage, engraissement

CONDITIONS DE VENTS ET DE HOULE EN NORD MER EGEE

La synthèse des données de vents et de houle a été réalisée sur des extractions à partir de plusieurs sources de données: 1) le réseau de mesure POSEIDON, des stations en haute mer situées entre Lemnos et le Mont Athos, 2) le centre météorologique de l'Institut de Nea Peramos, 3) le centre météorologique de l'aérodrome de Kavala (Hrisoupoli), 4) le centre météorologique du ministère de l'agriculture de Komotini, et 5) le centre météorologique à Kamariotissa sur l'île de Samothrace. Le dispositif utilisé et les caractéristiques des mesures réalisées sont reportés respectivement sur la figure 4 et le tableau 1.

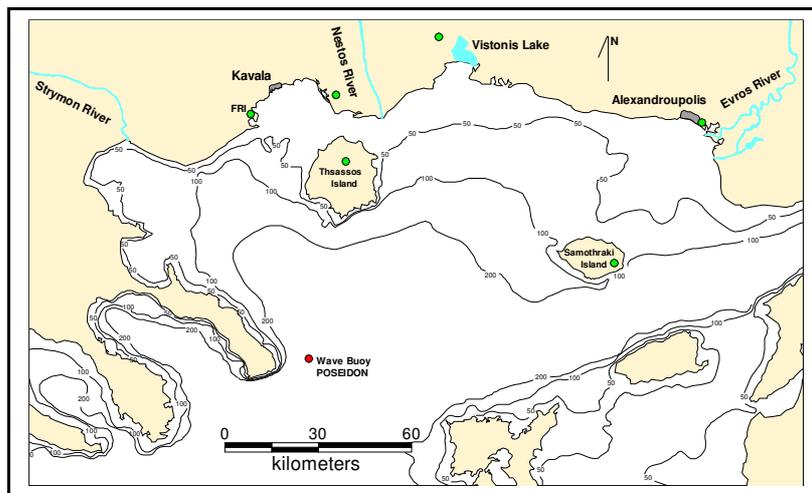


Figure 4 : Localisation des centres et stations utilisées pour réaliser la synthèse des données hydro-météorologiques sur le Nord de la mer Egée.

Station	Longitude	Latitude	Alt (m)	Mesure	Paramètres mesurés
Fisheries Research Institute, Nea Peramos	24° 40'E	40° 55'N	30	5/1998 12/2005 (toutes les 30 min)	- Température de l'air (moyenne, minimum, maximum), humidité, pression baro, précipitations, vitesse du vent et direction
station POSEIDON	24° 31' 16.73"E	40° 10' 6.86"N	0	5/2000 6/2006 (toutes les 3 hrs)	- Direction moyenne du vent et vitesse
Kavala Airport, Chrisoupolis	24° 36' 0"E	40° 58' 48"N	5.4	1/1984 12/1993 (toutes les 8 hrs)	- Fréquence mensuelle (%) d'occurrence d'une vitesse de vent par direction
Diomidia Meteorological station, Komotini	24° 56' 34"E	41° 06' 04"N	40	5/2003 12/2004 (toutes les 8 hrs)	- Direction moyenne du vent et vitesse
Meteorological station of Samothraki Island, Kamariotissa	25° 46' 07"E	40° 48' 03"N	0	4/2001 12/2005 (valeur quotidienne moyenne)	- Direction moyenne du vent et vitesse

Tableau 1 : Localisation et caractéristiques des mesures réalisées aux différents centres et stations utilisées pour réaliser la synthèse des données de vent et de houle sur le Nord de la mer Egée.

L'étude de l'ensemble des données montre qu'au coeur de la zone de haute mer (SE Mont Athos), les vents dominants sont ceux du Nord-Est à 40%. La vitesse moyenne de ces vents sur la région est de 4.49 m/s, la vitesse maximale observée étant de 21.96 m/s en Mars. Les vents de Sud-Est à Sud-Ouest forcent 23.6% du temps (86 jours par an), surtout de Septembre à Avril avec un pic en Décembre (15% du vent du Sud-Ouest). Les vents de Sud portent 14-18% de l'énergie et leur intensité en haute mer peut atteindre 17-18m/s.

La région du Sud de Samothrace est caractérisée par 13% de vent du Nord et 19% de vent du Nord-Est. La vitesse moyenne des vents sur la région est de 5.71m/s et la vitesse maximale enregistrée est de 22.67m/s pendant le mois de Novembre. Les vents du Sud-Est à Sud-Ouest ont une fréquence de 24.5% annuelle (soit 89 jours par an), et sont particulièrement fréquents de Août à Décembre. Les vents du Sud-Est ont une intensité qui atteint 12-13m/s dans 0.435% des cas et ceux de Sud-Ouest une intensité qui atteint 20-21m/s dans 0.145% des cas.

Dans la région de Diomidia à la côte, le vent du Nord-Nord-Est à une fréquence de 30% et celui du Nord une fréquence de 26%. La vitesse du vent moyenne diminue sensiblement par rapport à celle mesurée sur la mer ouverte (à peine 0.71m/s), avec une vitesse maximale de 4.2m/s. Les vents de Sud-Est à Sud-Ouest ont une fréquence de 20.1% (soit un total de 73 jours par an). Les vents de Sud plus particulièrement d'une intensité de 1.5 à 1.75m/s ont une fréquence de 0.171%; ceux du Sud-Ouest avec une intensité maximale de 2.5 à 2.75 m/s ont une fréquence de 0.171% également.

Sur la région de Hrisoupoli à la côte, le vent du Nord-Est a une fréquence de 13%, le vent d'Est à une fréquence de 12% et celui de sud-Ouest une fréquence de 10%. Ce sont les vents dominants. Les vents de Sud-Est à Sud-Ouest ont une fréquence totale de 23.7% (soit 86 jours). Les vents de Sud-Est d'intensité à 17.8m/s ont une fréquence de 0.016%; ceux de Sud d'intensité 12.6m/s ont une fréquence de 0.022% et ceux de Sud-Ouest d'intensité 15.1m/s ont une fréquence de 0.01%

Dans la zone de Nea Peramos, le vent du Nord-Ouest est prédominant, avec une fréquence de 21.37%, le vent de Sud a une fréquence de 9.534% et celui du Nord une fréquence de 8.965%. Les vents de Sud-Est à Sud-Ouest ont une fréquence totale de 14.6% (soit 53 jours dans l'année). L'intensité maximale est de 7.5 m/s en provenance du Sud avec une fréquence de 0.002%.

La figure 5 reprend l'essentiel de ces résultats sous forme graphique.

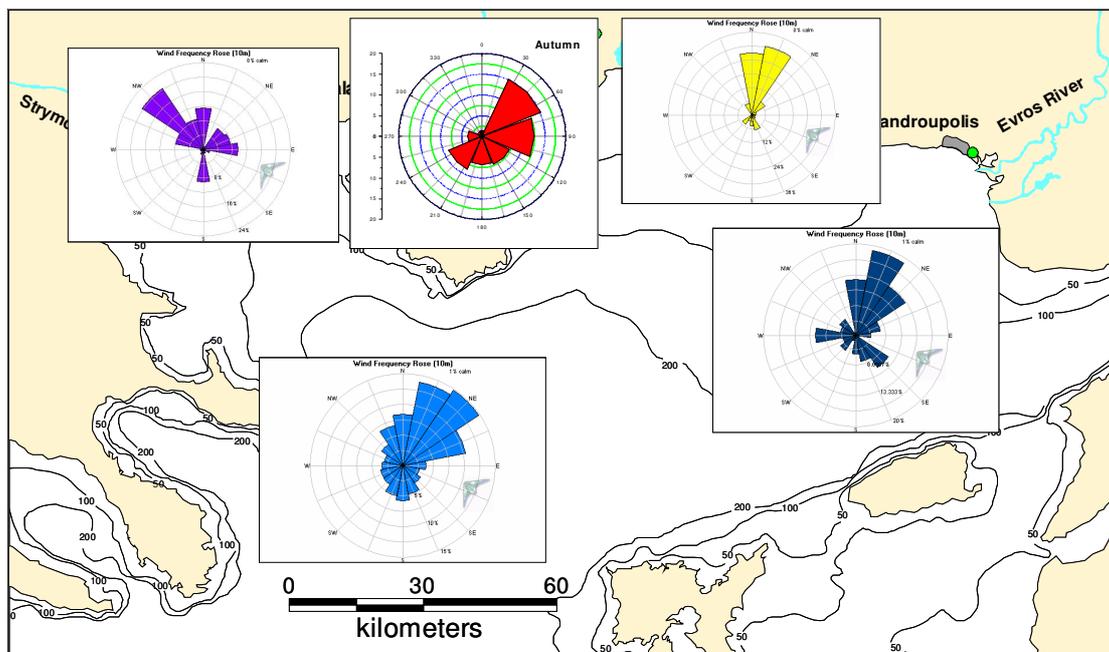


Figure 5: une représentation en carte de l'ensemble des régimes de vents à l'échelle du Nord de la mer Egée.

CLIMAT DE HOULE SUR LE SECTEUR TERRACINA / CAPE CIRCEO

Une bonne compréhension des relations qui existent entre la dynamique des herbiers de posidonia, l'hydrodynamique et les processus d'érosion passe par une étude combinée des trois types de phénomènes. Durant la phase B, l'étude de la dynamique des herbiers à continué (voir version longue) dans le prolongement strict de la phase A. Ici, on présente donc plutôt un résumé des travaux de traitement des données et modélisation hydrodynamique sur le site de Terracina / Cape Circeo (Italie, littoral Lazio) où sont étudiées les herbiers de Posidonie. L'objectif principal était d'établir les climats de houle au large, et de propager correctement ces valeurs à la côte, à l'aval de la zone étudiée pour ses herbiers de Posidonie.

Les climats de houle ont été obtenus à partir de séries temporelles d'une durée de 10 ans, avec un pas temporel de 6 heures (juillet 1992 – juin 2002). Ces séries sont extraites de résultats de modélisation WAM, comme décrit dans WAM-DI (1988) et Komen et al. (1994). Elles ont été calibrées avec des données satellites comme proposé par Cavaleri et Sclavo (2006). Pour valider cette procédure, les séries obtenues ont également été comparées à des mesures acquises à la bouée Ponza (www.indromare.com), avec une distance entre le point WAN et la bouée de 20km. De manière générale, le modèle est capable de reproduire les mesures de la bouée, le maximum et l'évolution des tempêtes les plus significatives. Le modèle surestime certains pics de tempête certainement à cause d'un lissage réalisé en interne par la bouée. La figure 6 représente le diagramme de corrélation (hauteur significative mesurée vs modélisée) pour l'année 1999 et montre la bonne adéquation entre les deux.

Les séries temporelles ont été traitées pour déterminer les climats de houle par classe et fréquence, pour la hauteur de houle, la période et la direction. On a donc distingué:

- 1) une partition PH pour H_{m0} : 0 - 6 m avec des intervalles de 0.5 m, 6 - 8 m avec intervalles de 1.0 m, et une classe de 8 à 10 m;
- 2) une partition PT pour la période T_{01} : 2 - 12 s avec des intervalles de 1 s, et une classe de 12 à 14 s;
- 3) une partition PA pour les directions des vagues incidentes: 0 - 360° avec des intervalles de 10°.

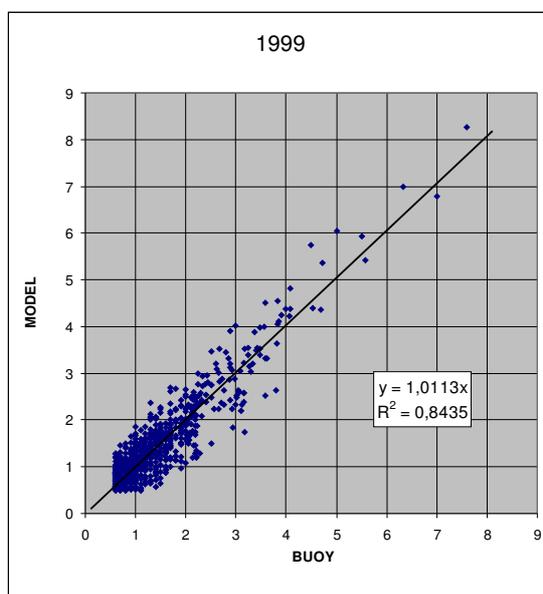


Figure 6. Scatter diagram, modeled VS measured data (RON buoy). Note that only events where H_s is greater than 0.5 m have been considered. In general, the model tends to overestimate the significant wave height of about 1%. The linear regression gives back a rather low correlation coefficient (0.84). If we take into account the whole time series (10 years) and all the wave heights, the model response results different, showing an underestimation of about 10%. Nevertheless, considering the good general agreement between calibrated model and measured data for the most severe year and the different position of the buoy and the WAM point, a further calibration for the point (41 N, 13 E) was not taken into account and the calibrated data were eventually analyzed without further treatment.

Le transfert à la côte des climats de houle déterminés au large a été réalisé en utilisant le modèle SWAN sur une grille de résolution spatiale 200m et de dimension 40x60km, le coin Sud-Ouest correspondant au point WAM (13.0° E, 41.0° N). Les vagues représentatives de chaque classe dans les partitions PH et PA ont été propagées, en associant à chaque vague une période moyenne correspondant à celle de la classe à laquelle la vague appartient. Ceci étant, 276 simulations ont été réalisées.

Une grille intermédiaire et deux petites grilles de haute résolution ont également été créées, pour préciser les climats de houle à la côte. Ces 3 grilles ont les caractéristiques suivantes:

- 1) une grille de 34400x8200, avec une résolution spatiale de 50m, concerne une section de la côte entre Circeo et Sperlonga;
- 2) une grille de 8000x4500 avec une résolution spatiale de 10m correspond au coeur de la zone entre les rivières Sisto et Badino;
- 3) une grille de 13000x4000 de résolution spatiale 10m correspond à la zone au droit du canal Saint Anastasia.

L'ensemble des grilles utilisées est porté sur la figure 7.

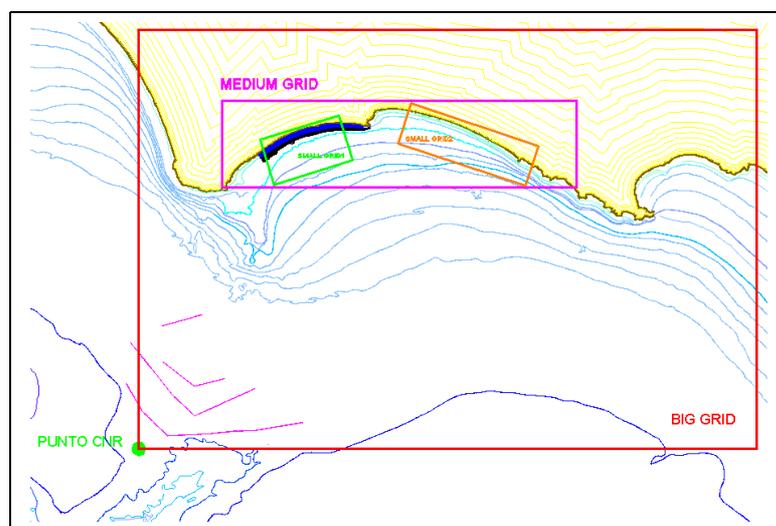


Figure 7. Représentation de l'ensemble des grilles utilisées pour transférer avec SWAN les climats de houle du large vers la côte.

Les résultats des simulations ont surtout été utilisées et traitées en 12 points dans la zone étudiée; ces points sont localisés le long des lignes topobathymétriques -30 (P4,P8,P12), -20 (P3,P7,P11), -15 (P2,P6,P10) et -10 (P1,P5,P9). Les résultats de simulation ont en ces points été utilisés pour reconstruire les partitions PA et PT, et déterminer les produits H^2T représentant l'énergie portée par la houle. On a représenté sur la figure 8 les résultats obtenus aux points P1 (10 mètres) et P4 (30 mètres) pour l'exemple (ces points sont situés dans la boîte comprenant le segment entre les rivières Badino et Sisto).

Une analyse de l'ensemble des résultats montre que le promontoire du cap Circeo réduit fortement l'énergie des vagues dans la région des rivières Sisto et Badino. Les vagues subissent en effet une forte réfraction (leur crête tend à se mettre parallèle aux lignes bathymétriques), comme le montre la différence d'orientation des pics de la figure 8; ces mêmes vagues sont fortement dissipées du fait du frottement sur le fond (le flux d'énergie décroît de 30% entre le point P4 et le point P1).

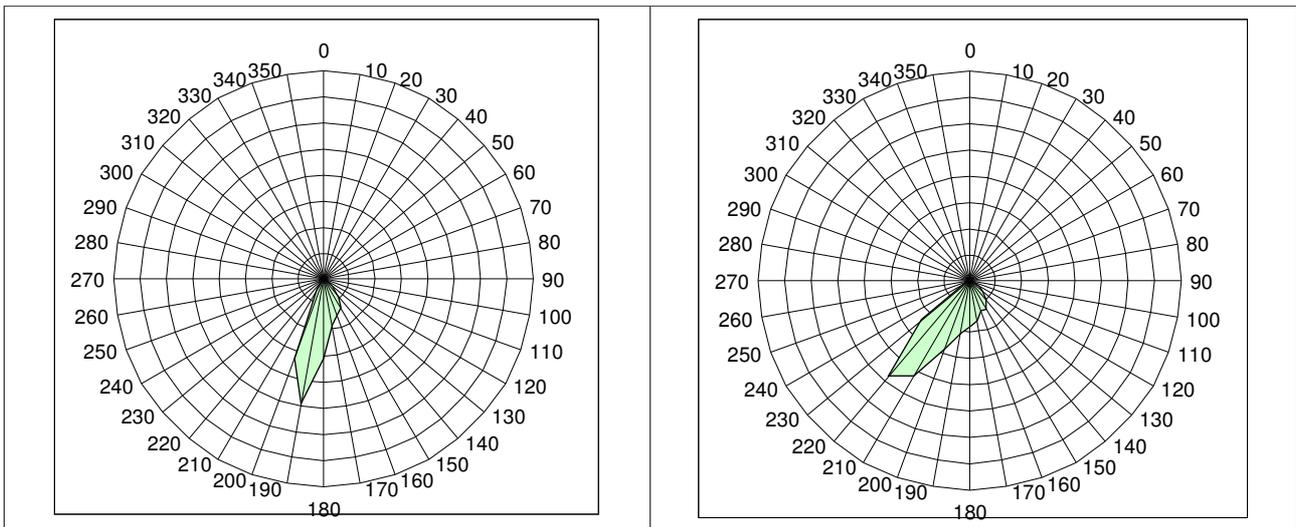


Figure 8. A gauche: distribution cumulée de l'énergie relative pour la partition PA au point P1. L'énergie à une distribution unimodale avec un pic central dans le secteur 190°N. A droite: distribution de l'énergie relative pour la partition PA au point P4. L'énergie est unimodale avec un pic central dans le secteur 220°N.

Finalement, pour rendre compte du rôle de la houle sur l'hydrodynamique dans les deux zones d'intérêt à la côte, afin de la relier à la dynamique des Posidonie, deux tests avec des forçages académiques ont été réalisés. Les conditions retenues sont les suivantes:

Test 1 $H_s = 5.25 \text{ m}$ $T_{01} = 9.5 \text{ s}$ $\text{Dir} = 145^\circ \text{N}$

Test 2 $H_s = 5.25 \text{ m}$ $T_{01} = 10.0 \text{ s}$ $\text{Dir} = 225^\circ \text{N}$

Ces conditions correspondent à des tempêtes extrêmes lorsqu'on les compare aux données acquises et traitées au large (comme ci-dessus). Les directions de propagation des vagues (Sud-Ouest et Sud-Est) ont été choisies pour mettre en évidence une réponse différente des deux zones étudiées en fonction de l'orientation (dans la mesure où l'orientation moyenne du trait de côte n'est pas la même sur les deux zones). Les résultats obtenus sont la hauteur, la vitesse orbitale sur le fond, la dissipation de l'énergie et le cisaillement sur le fond.

On a représenté dans la figure 9 quelques résultats caractéristiques.

L'ensemble des résultats montre que les boîtes Ouest et Est répondent de manière différente aux tempêtes en provenance du Sud-Est et Sud-Ouest. Les vitesses orbitales sur le fond sont différentes sur les deux sites. La dissipation de l'énergie due au frottement sur le fond et au déferlement est en général un bon indicateur de la turbulence induite par les vagues dans la colonne d'eau, et donc peut être lié à la présence de Posidonie.

Pour donner une première estimation de la réponse morphodynamique de la zone littorale au champ de houle, on peut s'attarder sur le cisaillement sur le fond. Ce cisaillement a été calculé avec une granulométrie constante de 200 microns et en suivant la méthode de Soulsby (1997) et Fredsoe & Deigaard (1992).

Tous ces résultats acquis pour deux exemples de tempêtes sévères doivent être replacés dans un cadre plus général, en tenant compte de tous les climats caractéristiques sur la zone (climats moyens annuel,...).

Le modèle SWAN montre qu'il est capable de reproduire des paramètres utiles pour la quantification des forçages de la circulation littorale et du transport sédimentaire. Ainsi, SWAN a pu être couplé avec un modèle de circulation 3D. Les paramètres concernés sont la hauteur de houle, sa direction, la période, la vitesse orbitale sur le fond et le cisaillement sur le fond. D'autre part, le modèle de circulation apporte à SWAN le champ de courant 3D et permet de rendre compte des interactions houle/courant qui contrôlent, au moins sur la zone la plus littorale, des retro-actions importantes sur la propagation de la houle et la circulation. La prise en compte de telles interactions est particulièrement importante lorsqu'on s'intéresse à des processus à seuil.

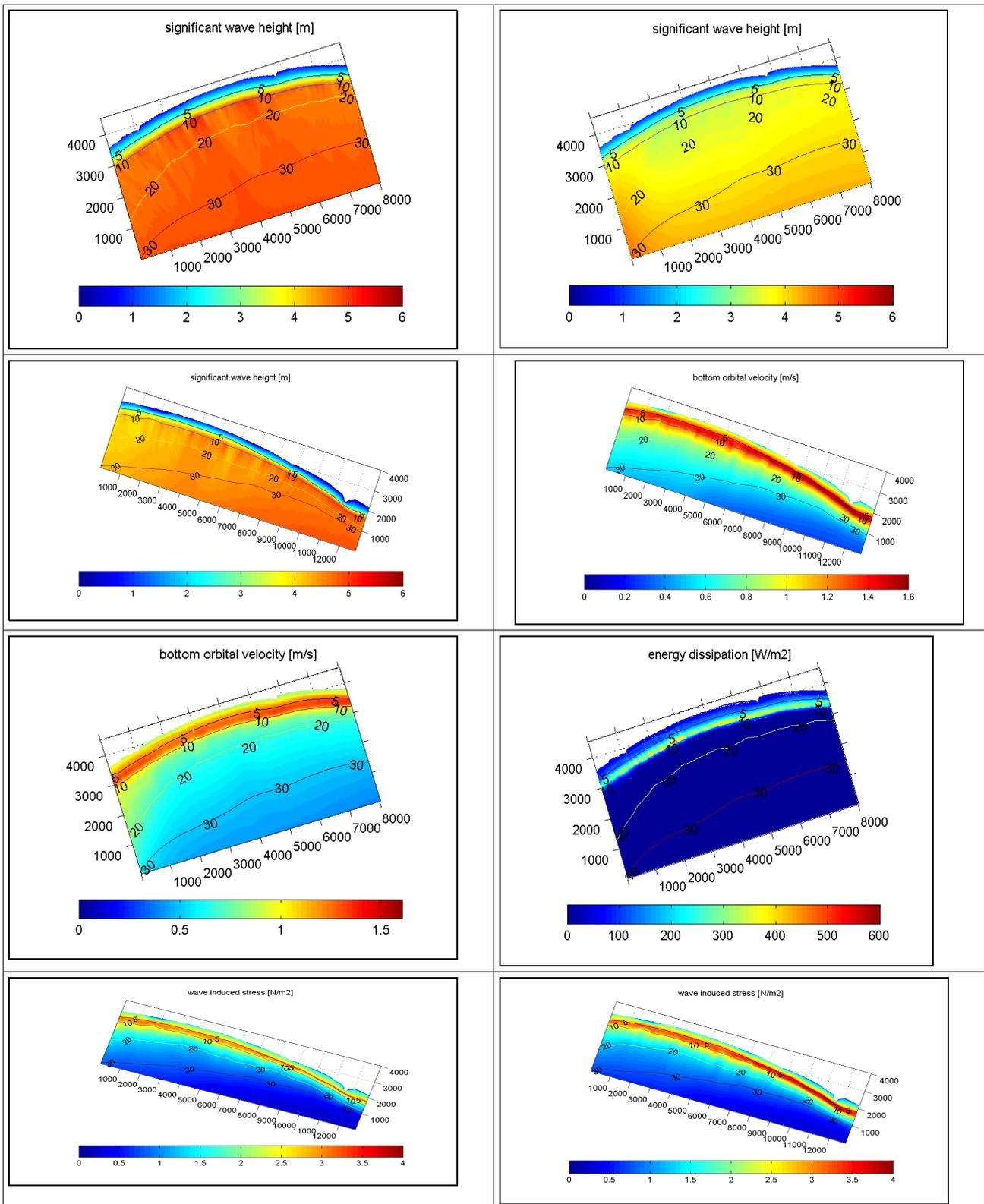


Figure 9. De gauche à droite et de bas en haut: 1) hauteur significative pour le Test 1 sur la boîte Ouest; 2) hauteur significative pour le Test 2 sur la boîte Ouest; 3) hauteur significative pour le Test 2 sur la boîte Est, 4) vitesse orbitale sur le fond pour le Test 2 sur la boîte Est, 5) vitesse orbitale sur le fond pour le Test 2 sur la boîte Ouest, 6) dissipation de l'énergie pour le Test 1 sur la boîte Est, 7) cisaillement sur le fond pour le Test 1 sur la boîte Est et 8) la même chose mais pour le Test 2.

références:

- Cavaleri L., Sclavo M., 2006 - The calibration of wind and wave model data in the Mediterranean Sea. *Coastal Engineering* 53, 613-627.
- Fredsoe J., Deigaard R., 1992 - *Mechanics of Coastal Sediment Transport*, World Scientific, Singapore.
- Holthuijsen, L.H., Booij N., Herbers T.H.C., 1989 - A prediction model for stationary, short crested waves in shallow water with ambient currents. *Coastal Engineering*, 13:23-54.
- Komen, G.J., Cavaleri L.; Donelan M., Hasselmann K.; Hasselmann S., Janssen P.A.E.M., 1994 - *Dynamics and Modelling of Ocean Waves*, Cambridge University Press, pp. 532.
- Soulsby R., 1997, *Dynamics of Marine Sands*, Thomas Telford, London.
- WAM-DI Group, 1988 - The WAM model—a third generation ocean wave prediction mode. *J. Phys. Oceanogr.* pp. 1775-1810