



BEACHMED-E **MESURE 2.2 / NAUSICAA**

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*

Version complète en Français/Anglais

Version finale



Fred Bouchette

Laboratoire Géosciences Montpellier, CNRS / Université Montpellier II
cc60 Université Montpellier II, 34095 Montpellier cedex 5, France
GEOSCIENCES-M (bouchette@dstu.univ-montp2.fr)

4 juin 2007

Table des matières

Présentation du projet NAUSICAA	5
I Contribution de Géosciences-M	7
1 Atlas Hydrodynamique du littoral	8
1.1 Qu'est-ce qu'un Atlas ... ?	8
1.2 Contenu de l'Atlas Hydrodynamique	10
1.3 Etape de la réalisation de l'Atlas Hydrodynamique	10
1.4 Quelques notions d'hydrodynamique littorale	11
2 Les appareils de mesure	12
2.1 Le parc d'appareils de mesure pour le projet NAUSICAA	12
2.1.1 Caractéristiques générales et limitation des différents équipements	14
2.1.2 Achat d'un appareil dans le cadre de NAUSICAA	14
2.2 modes de déploiement...	14
2.2.1 protocole1 : déploiement "en ligne"	14
2.2.2 protocole2 : déploiement "en profil"	15
2.2.3 protocole3 : déploiement "suivi long terme"	17
2.2.4 protocole4 : déploiement "étude surcôte"	18
2.2.5 protocole5 :	18
2.3 modes de déploiement...	19
2.3.1 déploiement pré-littoral d'un ADCP de fond	19
2.3.2 déploiement pré-littoral d'un ADCP de coque	20
2.4 positionnement...	20
2.4.1 Positionnement GPS sur le littoral	21
2.4.2 Acquisitions topobathymétriques	22

3 Domaines et chantiers	23
3.1 Présentation des domaines pré-littoraux	23
3.2 Présentation des chantiers littoraux	25
3.2.1 Chantier A : Pointe de l’Espiguette	25
3.2.2 Chantier B : plage de Carnon Est / Petit Travers	26
3.2.3 Chantier C : grand système Dent Creuse à Maguelone	27
3.2.4 Chantier D : lido Ouest de Sète	28
3.2.5 Chantier E : lido de la Tamarissière	28
3.2.6 Chantier F : lido de Gruissan / Saint-Pierre-la-mer	30
3.2.7 Chantier G : lido de l’étang de Leucate	31
3.2.8 Chantier H : pointe du Racou	31
3.2.9 Chantier I : baie de Banyuls	32
4 Données existantes et conditions académiques	33
4.1 Données existantes	34
4.1.1 Campagne de mesures pré-littorales ADCP/CTD par TETHYS	34
4.2 Données semi-quantitatives	35
4.2.1 Conditions de Vent	36
4.2.1.1 Secteur du chantier D (lido de Sète)	36
4.2.1.2 Secteur des chantiers A et B (Espiguette et Petit Travers	36
4.2.1.3 secteur chantiers C à A (Entre Frontignan et Espiguette)	38
4.2.1.4 Secteur des chantiers C à F (Leucate et centre Golfe)	39
4.2.1.5 Secteur du chantier H (Pointe du Racou / Tech)	40
4.2.1.6 Agly / Cap Leucate	40
4.2.1.7 Secteur Orb-Aude (chantier F)	41
4.2.1.8 secteur chantier C et D (Sète à Villeneuve Les Maguelone)	42
4.2.2 Conditions de houle et agitation	42
4.2.2.1 secteur du chantier H (Tech et Pointe du Racou)	42
4.2.2.2 Secteur de Leucate à Sète (centre golfe)	43
4.2.2.3 secteur chantier A à C (Golfe d’Aigues-Mortes)	45
4.2.3 Conditions de courants	45
4.2.3.1 Secteur des chantiers A à D (Golfe d’Aigues-Mortes)	45
4.3 Conditions académiques	47

5	Présentation des outils numériques...	51
5.1	Le modèle REFDIF...	52
5.1.1	REFDIF : Aspects théoriques et numériques	52
5.1.2	REFDIF : limitations du modèle	55
5.2	Le modèle Symphonie	56
5.2.1	SYMPHONIE : cadre théorique et aspects numériques	56
5.2.2	SYMPHONIE : Conditions d'utilisation du modèle	58
5.2.2.1	Forçages grande échelle	58
5.2.2.2	Forçages atmosphériques	59
5.3	Le modèle RESYFE...	60
5.3.1	Module de houle du modèle RESYFE	60
5.3.2	Module de courant du modèle RESYFE	61
5.3.3	Les modules de transfert : SYMtoREF et REFtoSYM	63
5.3.3.1	Les problèmes rencontrés	63
5.3.3.2	Utilisation pratique du modèle RESYFE en zone pré-littorale	65
5.4	Le modèle SHORECIRC	66
6	Résultats de validation	68
6.1	L'expérience VENT 99	68
6.1.1	Site d'étude et précédents résultats	68
6.1.2	Observations et forçage du modèle	71
6.1.2.1	Les conditions de vent et de houle observées	71
6.1.2.2	Initialisation et forçages aux frontières latérales	71
6.1.2.3	Forçages atmosphériques	71
6.1.2.4	Forçage par la houle	72
6.1.3	Pertinence de l'utilisation du modèle RESYFE	73
6.2	Forçage du modèle RESYFE avec la houle modélisée par WaveWatch3	75
6.2.1	Analyse des résultats du modèle WW3 au site Sola	75
6.2.2	Modification des tensions de cisaillement de surface par la houle WW3	77
6.2.3	Première période : Vent de Sud Ouest puis vent de Nord Ouest	78
6.2.4	Deuxième épisode : Vent de Nord Ouest	79
6.2.5	Troisième période : Vent de Sud Est	79
6.2.6	Quatrième période : Vent de Nord Ouest	82

6.3	Forçage du modèle RESYFE avec la houle modélisée par SWAN	83
6.3.1	Analyse des résultats du modèle SWAN au site Sola	83
6.3.2	Résultats obtenus sans le forçage par le vent local	87
6.3.3	Mise en évidence des causes provoquant la divergence du modèle	87
6.3.4	Résultats du modèle RESYFE forcé par SWAN sur la période de tempête	87
6.4	Forçage du modèle RESYFE avec la houle modélisée par REFDIF	90
6.4.1	Analyse des résultats du modèle REFDIF au site Sola	90
6.4.2	Résultats du modèle RESYFE sur la période de tempête	90
6.5	Conclusions	91
7	Outil de publication des données	100
7.1	Qu'est-ce que CRT ?	100
7.1.1	Principe de fonctionnement de CRT	100
7.1.2	CRT : aspects matériels et logiciels	101
7.2	Bases de données...	102
7.3	formulaire test...	102
II	Contribution de UNIBO-DISTART	
	by UNIBO-DISTART staff	105
8	Coastal State Indicators (CSI) : a review	106
III	Contribution de FRI-NAGREF	
	par Georgios Sylaios, FRI-NAGREF	107
9	Présentation...	108
IV	Contribution de ARPA-SIM	109
10	Préparation...	110
V	Contribution de La Sapienza	111
11	Dynamique des Herbiers...	112

Présentation du projet NAUSICAA

La mesure 2.2 du projet BEACHMED-E, appelée NAUSICAA, regroupe les cinq partenaires suivants : le laboratoire Géosciences du CNRS et de l'Université Montpellier II en France (**Géosciences-M**, chef de file du projet), le laboratoire UNIBO du DISTART de Bologne en Italie (**UNIBO-DISTART**), l'institut de recherche Halieutique de Kavala en Grèce (**FRI-NAGREF**), l'ARPA-SIM de Bologne en Italie (**ARPA-SIM**) et l'Université de Rome La Sapienza en Italie (**La Sapienza**).

Dans le projet NAUSICAA, on s'intéresse à la dynamique littorale et ses conséquences au travers des 4 problématiques scientifiques suivantes :

- la caractérisation des climats de houle et des conditions hydrodynamiques et météorologiques, sur la base de mesures et de modélisations ;
- l'étude des phénomènes d'érosion et de surcôte de tempête en zone littorale ;
- l'étude des processus d'endommagement des ouvrages artificiels de protection du littoral et le développement de méthodes pour le suivi et la prédiction de leur comportement ;
- 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 :

- sélection de chantiers d'études pertinents pour les problématiques traitées et synthèse bibliographique des données hydrodynamiques et autres disponibles sur ces chantiers ;
- organisation et réalisation de campagnes de mesures hydrodynamiques à différentes échelles de temps et d'espace sur les chantiers retenus ;
- 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 ;
- 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 ;
- 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 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 regroupe les différents

travaux réalisés dans le cadre de cette première phase du projet.

On rappelle ci-dessous les tâches des différents partenaires programmées pour la phase A :

- **Géosciences-M** : synthèse des données hydrodynamiques et météorologiques pertinentes existantes sur le domaine étudié, définition de conditions hydrodynamiques typiques qui seront utilisées pour la réalisation de l'Atlas Hydrodynamique, base de données de l'ensemble des MNT topobathymétriques existants et description morphodynamique de ces sites expérimentaux, synthèse et état de l'art sur les outils numériques utilisés dans ce projet, achat de l'équipement ;
- **UNIBO-DISTART** : réalisation d'une synthèse bibliographique portant sur les Coastal State Indicators (CSI) et engagement de certaines activités de terrain ;
- **FRI-NAGREF** : synthèse bibliographique sur les processus hydrosédimentaires induits par les houles et les courants, analyse et présentation technique ; synthèse bibliographique sur les capacités de différents modèles à rendre compte de ces processus hydrodynamiques ; base de données hydrodynamiques et météorologiques. La synthèse bibliographique des méthodes de modélisation et d'observation des vagues et des courants sera au centre de cette phase. Elle se concentrera sur une recherche des modèles existants, la définition de leurs caractéristiques, la caractérisation des techniques utilisées pour rendre compte des conditions aux limites, les moyens possibles pour la calibration et la validation de ces modèles. La synthèse des historiques de données hydro-météorologiques sera basée sur les stations qui existent sur la zone étudiée (Ile Thassos, Ile Samothraki, Ile Lemnos, Aéroport Chrisoupolis, Aéroport Alexandroupolis, Genisea et Nea Peramos). Ces historiques constitueront la base d'une analyse statistique visant à déterminer les conditions moyennes et extrêmes ;
- **ARPA-SIM** : synthèse de toutes les informations nécessaires pour définir de manière la plus précise possible la position de la station océanographique le long de la côte de la région Emilia-Romagna, et pour définir les caractéristiques techniques des instruments à déployer sur cette station. Ce travail sera basé sur la rédaction d'une annexe scientifique à l'appel d'offre rédigé pour l'achat de la station ;
- **La Sapienza** : analyse de la distribution des herbiers de *Posidonia Oceanica* le long de la côte étudiée ; étude de l'érosion et de l'évolution du trait de côte ; géoréférencement de l'actuelle ligne de côte. Le partenaire se mettra en contact avec un partenaire susceptible de réaliser l'étude météo-hydrodynamique et la modélisation numérique.

Dans la suite, on présente successivement les résultats de PHASE A pour les cinq partenaires.

Première partie

Contribution de Géosciences-M

Chapitre 1

Le projet d'Atlas Hydrodynamique en Languedoc-Roussillon

Dans ce chapitre, on définit la notion d'**Atlas Hydrodynamique** et on présente la démarche mise en oeuvre pour créer un Atlas Hydrodynamique du littoral Languedoc-Roussillon.

1.1 Qu'est-ce qu'un Atlas Hydrodynamique du littoral Languedoc-Roussillon ?

Tout d'abord, la fonction principale d'un Atlas Hydrodynamique du littoral est de permettre à tout gestionnaire du littoral de retrouver les caractéristiques de la houle, des courants de circulation et de la surcôte sur l'ensemble du littoral. Par ailleurs, l'idée est de réaliser un ensemble de documents adaptés aux besoins des gestionnaires :

- avoir une vision claire de l'ensemble des processus à différentes échelles spatiales ;
- avoir l'assurance que les informations produites reposent sur des données fiables, et non pas sur des données approximatives, résultant de campagnes anciennes, peu ou pas contraintes ; connaître exactement la fiabilité des documents constituant l'Atlas ;
- obtenir des informations plus précises sur des zones littorales essentielles. Ces zones essentielles sont choisies de telle sorte qu'elles sont représentatives des différents types de portions de littoral sur lesquelles les gestionnaires travaillent : littoral en érosion, littoral soumis à l'envahissement de la terre par la mer, littoral en accrétion, littoral aménagé ou en cours d'aménagement, littoral naturel soumis à de fortes contraintes environnementales...

Ainsi, on désigne par «**Atlas Hydrodynamique littoral**» un ensemble d'informations présentées sous la forme de documents (textes explicatifs, diagrammes synthétiques et cartes de grandeurs physiques) utiles et pertinents pour la compréhension de l'hydrodynamique en zone littorale. Plus exactement, un Atlas Hydrodynamique est à la fois un **ensemble de documents** répondant aux exigences mentionnées ci-dessus, et une **base de données web** permettant un accès transparent à l'ensemble des informations ayant permis la réalisation de ces documents.

Le travail de conception d'un tel Atlas Hydrodynamique s'organise autour :

- de la réalisation de nombreuses campagnes de mesures hydrodynamiques sur le littoral et la zone pré-littorale en Languedoc-Roussillon,
- de la mise en oeuvre de plusieurs outils de modélisation hydrodynamique à différentes échelles de temps et d'espace.

Les campagnes de mesures servent d'une part à valider les résultats issus de la modélisation, et d'autre part à déterminer quels sont les climats de houle et les conditions de circulation les plus caractéristiques sur les différentes zones considérées. Dans ce projet, on parle de « **conditions académiques** » pour désigner ces climats de houle et ces conditions de circulation qui ne sont pas nécessairement mesurées à un moment donné sur le littoral, mais sont représentatives des tendances hydrodynamiques sur une portion de littoral.

Les modélisations numériques permettront de caractériser l'hydrodynamique à l'échelle des différentes zones étudiées, et de proposer des résultats pour des conditions académiques pour lesquelles on ne dispose pas de données mesurées.

On a résumé sur la figure 1.1 la démarche lors de la conception d'un Atlas Hydrodynamique du littoral.

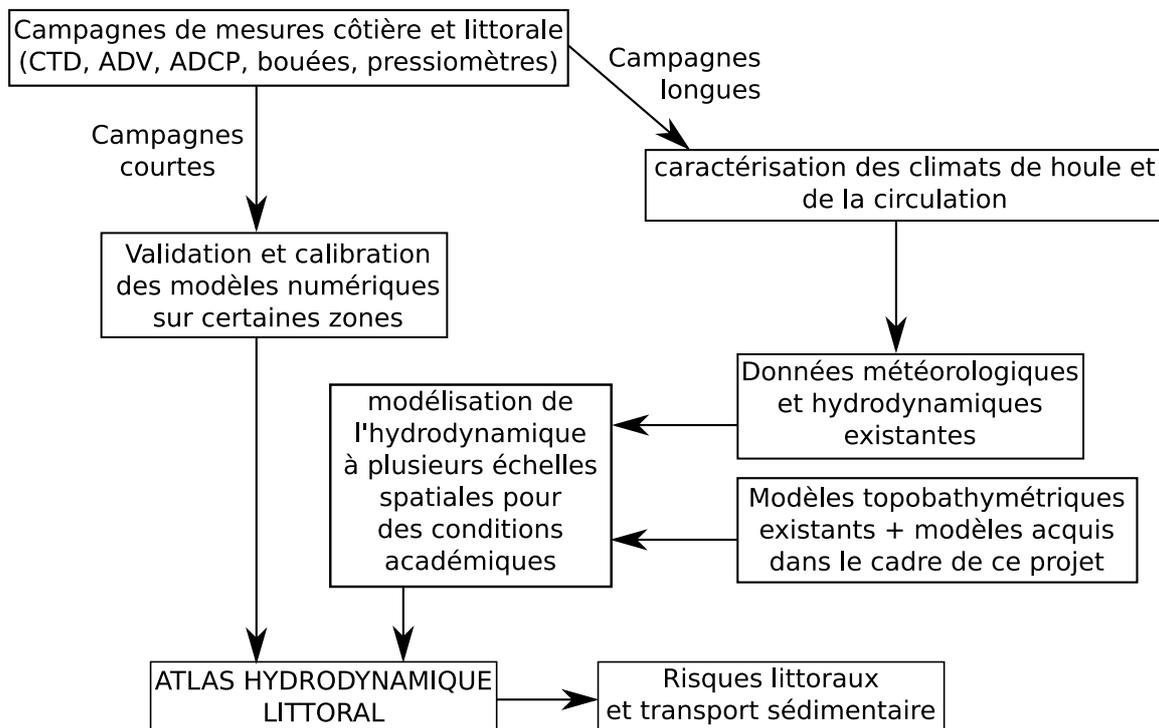


FIG. 1.1 – Le principe du projet de réalisation d'un Atlas Hydrodynamique du littoral en Languedoc-Roussillon. L'Atlas repose tout d'abord sur l'acquisition de mesures hydrodynamiques lors de campagnes court terme (quelques jours) et de campagnes long terme (quelques semaines à quelques mois). Il repose par ailleurs sur la réalisation de campagnes topobathymétriques permettant d'acquérir des données convenables et actualisées. Les données issues des campagnes de mesures courtes servent de forçages réalistes et de points de comparaison pour la validation des différents modèles numériques : on compare les résultats mesurés et modélisés, et on quantifie la fiabilité des différents modèles pour ces conditions. Les données issues des campagnes de mesures longues permettent de mieux caractériser les conditions hydrodynamiques moyennes sur un site donné. Elles participent à une amélioration de la définition des « conditions académiques » mentionnées dans le texte. Les modèles numériques correctement validés sont utilisés avec ces « conditions académiques » confortées pour donner une vision exhaustive de l'hydrodynamique sur les sites retenus. Des documents adaptés sont conçus à partir de ces derniers résultats pour aider le gestionnaire dans son approche du risque littoral et des transports sédimentaires.

1.2 Contenu de l'Atlas Hydrodynamique

Un travail de fond sur les modèles numériques retenus initialement pour la réalisation de l'Atlas Hydrodynamique a permis d'arrêter une liste de grandeurs physiques qui peuvent être correctement définies par modélisation :

- les caractéristiques de la houle et de sa propagation (amplitude, nombre d'onde, période, profil des vitesses de Stokes, angle d'incidence) ;
- les caractéristiques de la circulation 2D (vitesse moyennée sur la verticale, transport, élévation de la surface libre sous l'action des différents forçages considérés) ;
- les caractéristiques de la circulation 3D (vitesse sur le fond, vitesse en surface, vitesse à une profondeur donnée).

Ces grandeurs physiques sont présentées sous forme de carte et de coupes associées à des legendes, pour les différentes zones étudiées. Ces documents constituent le coeur de l'Atlas Hydrodynamique, une **cartographie numérique de l'hydrodynamique pré-littorale et littorale forcée par les régimes hydro-météorologiques typiques sur les zones étudiées.**

Mais l'Atlas doit comprendre également d'autres informations :

- une présentation détaillée des processus hydro-météorologiques généraux actifs en zones pré-littorale et littorale, sous la forme de textes et de documents visuels pédagogiques ;
- une présentation de l'état de l'art des connaissances sur l'hydrodynamique côtière et littorale dans le Golfe du Lion ;
- une présentation de l'ensemble des sites retenus avec leurs caractéristiques morphologiques essentielles, et une description des problèmes qui se posent sur chacun d'eux en terme d'hydrodynamique. Cette présentation permet à l'utilisateur d'exploiter plus facilement les résultats de l'Atlas sur d'autres secteurs présentant les mêmes caractéristiques ;
- une présentation des outils numériques et des instruments utilisés dans le cadre de ce projet, avec mise en évidence claire et nette des avantages et limitations de ces différents outils, afin d'éclairer l'utilisateur de l'Atlas sur la qualité et les limites des résultats présentés ;
- une présentation exhaustive des campagnes de mesures réalisées, des objectifs, du déploiement des équipements, des résultats sous la forme de graphiques interprétables ;
- une revue critique de l'ensemble des résultats de l'Atlas Hydrodynamique. Les résultats de modèles de l'Atlas seront associés à un certain nombre d'informations permettant de rendre compte de la fiabilité de la modélisation par rapport aux mesures et d'estimer la plage d'utilisation des résultats obtenus dans d'autres conditions.

1.3 Etape de la réalisation de l'Atlas Hydrodynamique

La conception de l'Atlas Hydrodynamique est envisagée selon les 4 activités suivantes qui sont menées de front pendant la durée du projet.

ACTIVITE 1 : Définir le contenu exact détaillé et la forme de l'Atlas Hydrodynamique, à la fois dans sa version online et sa version papier.

ACTIVITE 2 : Utiliser aux échelles littorale et pré-littorale les modèles hydrodynamiques retenus pour ce projet et réaliser le travail de cartographie hydrodynamique à partir de données existantes et des données acquises dans le cadre de ce projet.

ACTIVITE 3 : Planifier et réaliser des campagnes de mesure permettant d'une part de quantifier certains processus littoraux (directions des houles sur l'année, intensité de différents courants principaux sur le domaine,....) et d'autre part, de valider les modélisations.

ACTIVITE 4 : Concevoir et développer un outil web de stockage et de valorisation de l'ensemble des données mesurées et modélisées.

La suite de cette partie I est consacrée à la présentation de l'état d'avancement du projet pour ces 4 activités. Le chapitre 2 est rattaché à l'**ACTIVITE 3**. Les chapitres 3, 4, 5 et 6 sont rattachés à l'**ACTIVITE 2** et l'**ACTIVITE 3**. Le chapitre 7 est rattaché à l'**ACTIVITE 4**.

D'un point de vue plus administratif, le chapitre 2 répond aux exigences de la convention **NAUSICAA I** passée entre le partenaire OCR SMNLR et l'Université Montpellier II. Les chapitres 3, 4 et 5 répondent aux exigences de la convention **NAUSICAA II** passée entre le partenaire OCR SMNLR et l'Université Montpellier II. Les chapitres 3, 4 et 5 répondent aux exigences déclinées dans le **dossier de candidature consolidé NAUSICAA** servant de base pour déterminer les engagements de **Géosciences-M** dans le cadre du projet BEACHMED-E. Enfin, le chapitre 6 comprend de nombreuses informations qui étaient initialement planifiées dans le cadre de la PHASE B, que nous avons décidé de rapporter ici dans la mesure où nous avons pu faire avancer le projet sur ces points précis en attendant l'arrivée des équipements de mesure.

1.4 Quelques notions d'hydrodynamique littorale

Insertion du document pédagogique dans la version finale. Il s'agit d'une section de 15 pages environ rappelant ce qu'est la circulation, la houle et l'ensemble des processus associés à ces deux grands phénomènes littoraux.

Chapitre 2

Achats, mise à disposition et déploiement des appareils de mesure sur les sites expérimentaux

Le projet d'Atlas Hydrodynamique du littoral repose grandement sur le déploiement d'appareils de mesure des caractéristiques de la houle, de la surcôte et des courants de circulation aux échelles pré-littorale et littorale. L'objectif est de réaliser des campagnes de mesures permettant d'une part de quantifier certains processus littoraux (directions des houles sur l'année, intensité de différents courants principaux sur le domaine...) et d'autre part, de valider les résultats obtenus par la modélisation. Les instruments déployés seront capables de mesurer :

- les caractéristiques complètes de la houle pré-littorale (bouées houlographiques, ADCP avec module de houle posé sur le fond, pressiomètre à ancrage sur le fond),
- les caractéristiques des courants de circulation/houle en zone pré-littorale (ADCP et ADV mouillés, ADCP de coque avec les moyens à la mer locaux et ceux de l'INSU),
- les caractéristiques de la houle lors de sa propagation sur la plage immergée et les caractéristiques des courants induits dans cette zone (ADCP littoraux, ADV, réseau de pressiomètres littoraux).

Dans ce chapitre, nous établissons la liste des équipements dont l'utilisation est programmée dans le cadre de ce projet NAUSICAA.

2.1 Le parc d'appareils de mesure pour le projet NAUSICAA

Le projet NAUSICAA est organisé autour du déploiement des équipements de mesure hydrodynamique suivants :

- BARNACLE-G1 : Un Barnacle modèle 2006 ;
- BARNACLE-G2 : Un Barnacle modèle 2006 ;
- BARNACLE-G3 : Un Barnacle modèle 2006 ;
- BARNACLE-G4 : Un Barnacle modèle 2006 ;
- BARNACLE-LOBB : Un Barnacle ;
- TRBM-G1 : Une cage pour immersion pré-littorale avec bouée de positionnement et déclencheur acoustique ;
- Un ensemble de bouées avec croix de saint André et équipement de signalisation pour assurer la sécurité des équipements déployés en zone littorale ou en lagune.
- ADCP-G1 : 1 ADCP RD Instruments (Workhorse Sentinel) 600 kHz avec module de houle ;

- ADCP-G2 : 1 ADCP RD Instruments (Workhorse Sentinel) 600 kHz avec module de houle ;
- ADCP-G3 : 1 ADCP RD Instruments (Workhorse Sentinel) 1200 kHz avec module de houle ;
- ADCP-G4 : 1 ADCP RD Instruments (Workhorse Sentinel) 1200 kHz avec module de houle ;
- ADCP-LOBB : 1 ADCP RD Instruments (Workhorse Sentinel) 1200 kHz avec module de houle ;
- ADCP6-LA : 1 ADCP RD Instruments (Workhorse Sentinel) 600 kHz sans module de houle ;
- ADCP-G5 : 1 ADCP RD Instruments (Workhorse Sentinel) 300 kHz avec module de houle ;
- ADCP-KITLONG 1 et 2 : 2 kits complets d'alimentation externe pour amélioration de l'autonomie des ADCP RD Instruments
- ADV-G1 : 1 ADV Nortek modèle 2006 avec 80Go mémoire stockage ;
- ADV-G2 : 1 ADV Nortek modèle 2006 avec 80Go mémoire stockage ;
- ADV-G3 : 1 ADV Nortek modèle 2006 avec 80Go mémoire stockage ;
- ADV-G3 : 1 ADV Nortek modèle 2006 avec 80Go mémoire stockage ;
- EASYWAVE-BASE1 : 1 base de réception pour réseau de pressiomètre EASYWAVE ;
- EASYWAVE-G1 : 1 module pressiométrique EASYWAVE (bouée + connectique + alimentation + capteur + VHF). Modèle 2006.
- EASYWAVE-G2 : 1 module pressiométrique EASYWAVE (bouée + connectique + alimentation + capteur + VHF). Modèle 2006.
- EASYWAVE-G3 : 1 module pressiométrique EASYWAVE (bouée + connectique + alimentation + capteur + VHF). Modèle 2006.

En terme de moyens à la mer, le projet utilisera :

- Le navire PROGELAC : une embarcation de 8 mètres de long avec cabine, treuil, et matériel de navigation à bord (système de navigation GARMIN GPSMAP 2010C, échousonneur NAVI-SOUND 110 et centrale d'acquisition) ;
- du temps de navigation sur le Téthys II, navire de façade de l'INSU. Le Téthys II est un navire de 25 mètres de long armé pour la mesure en zone côtière (figure 2.1). L'attribution des campagnes à bord du Téthys pour l'année 2007 est effective. Nous avons été retenu pour les campagnes suivantes :
 - HYGAM07-1 : 12-13-14 février
 - HYGAM07-2 : 2-3 mars
 - HYGAM07-3 : 26-27-28 mars
 - HYGAM07-4 : 16-17 octobre
 - HYGAM07-5 : 3-4-5-6-7 novembre
- le Sinclair du SMNLR pour le déploiement de certains équipements. Une demande a déjà été faite (et acceptée sur le principe) pour la première campagne de mesure sur le chantier G (voir chapitre 3). Des demandes pour les chantiers A, C et D suivront.



FIG. 2.1 – A gauche : le navire Téthys II de façade de l'INSU. Il dispose d'un ADCP de coque permettant d'obtenir des cartes de la circulation 3D à l'échelle pré-littorale. A droite : le navire PROGELAC. Il permet de déployer les équipements en zone littorale, permet de réaliser des campagnes topobathymétriques.

2.1.1 Caractéristiques générales et limitation des différents équipements

Du fait du retard accumulé au niveau de la signature des conventions, nous ne recevons que les équipements maintenant. Nous ferons des tests de l'ensemble de ces équipements dans les mois à venir et produirons alors une fiche technique pour chacun d'entre eux avant la fin de la phase B. Ces fiches techniques seront disponibles sur le site www.gladys-littoral.org, dans la rubrique équipements.

2.1.2 Achat d'un appareil dans le cadre de NAUSICAA

Dans le cadre de NAUSICAA, il était également prévu l'achat d'un équipement supplémentaire. L'achat a été engagé en octobre 2006 ; l'équipement sera disponible pour Noël 2006 et sera déployé lors de la première campagne sur le chantier G (voir chapitre ??) . Il s'agit d'un ADCP de type RD Instrument (workhorse sentinel) équipé d'un module de houles, d'un barnacle. Le modèle est le 1200 kHz, permettant un déploiement en zone littorale (dans moins de 10 mètres d'eau). Associé à cet équipement, nous avons également acheté 2 kits d'alimentation externe pour ADCP, afin d'augmenter l'autonomie de l'appareil en période de déploiement. Ceci permet d'envisager de réaliser des campagnes long terme (plusieurs mois) en zone littorale avec cet appareil. Enfin, nous avons complété cet achat avec l'acquisition de 6 extensions mémoires permettant d'équiper tous nos ADCP de la mémoire de stockage maximale sur ce type d'appareil. Ceci nous permet de choisir véritablement les bursts (durée et fréquence des temps de mesure), afin de couvrir toutes les applications possibles : mesure de caractéristiques précises toute les heures, mesure haute fréquence pour caractériser un évènement, long bursts pour mesurer les climats de houles,...

2.2 Modes de déploiement des équipements en zone littorale

La choix du déploiement des équipements est fonction de l'objectif de la campagne. Il faut également tenir compte du fait qu'un nombre croissant d'équipement à l'eau augmente les risques d'endommagement, le temps de traitement des données sans forcément de gain sur la qualité de l'interprétation. On propose 5 exemples de scénarios pour le déploiement des appareils correspondant à des objectifs retenus sur les chantiers littoraux. Ces scénarios ne sont pour l'instant pas définitifs. Ils évolueront notamment après l'acquisition des topobathymétries détaillées sur les chantiers à instrumenter. Ils sont présentés comme base pour la réflexion. Une discussion est proposée dans le cadre de la réunion du groupe NAUSICAA à Alexandroupolis, pour des échanges d'expériences sur les protocoles de déploiement des équipements hydrodynamiques.

2.2.1 protocole1 : déploiement "en ligne"

Le protocole de déploiement "en lignes" (figure 2.3) consiste à aligner trois couples d'ADCP + ADV/OBS le long du trait de côte, dans une bathymétrie de quelques mètres, entre la barre externe et la barre interne. Le fait d'utiliser une combinaison d'ADCP et d'ADV permet d'avoir une mesure totale du profil de vitesse, y compris près du fond, dans la zone d'ombre de l'ADCP. L'OBS apporte une information semi-quantitative sur le sédiment transporté.

Le fait de placer ces couples ADCP/ADV sur une même ligne peut permettre d'identifier des boucles de circulation sur la plage immergée, en comparant en ces 3 postes la direction et l'intensité des courants. Cela peut également permettre d'étudier les variations latérales, le long du chantier, de certaines grandeurs importantes (surcôte, courant longshore, courant de retour, hauteur de houles...).

				Université Montpellier 2	
Pro-forma : 06-61-B				Service des Marchés	
Vos réf :				60, place E. Bataillon	
Att: Frédéric Bouchette				34095 Montpellier Cedex 5	
				Saint Jeannet, le 12 Octobre 2006	
PROFILÉUR DOPPLER ADAPTE POUR LA MESURE DE HOULE					
L'ADCP "WorkhorseSENTINEL est conçu pour fonctionner aussi bien en lecture directe qu'en mode enregistrement, dans des eaux de moins de 200 mètres de profondeur. Chaque système est livré dans un boîtier en plastique composite étanche et avec un connecteur					
Item	QT	Description	Ref.	P. U.	Total HT Euros
1	1	Profiléur 1200kHz équipé pour la mesure de houle	WHSWZ1200		17 714,53 €
		Capteur de pression inclus			
2	1	Cage type Barnacle			3 196,88 €
3	2	Boîtier d'alimentation extérieure avec deux blocs et câble de liaison	WHEXTBC	2 718,75 €	5 437,50 €
4	6	Carte mémoire 1 Go	WHMEM1GIG	373,17 €	2 239,03 €
TOTAL GENERAL H.T.					28 587,94 €
T.V.A. 19,6%					5 603,24 €
TOTAL T.T.C.					34 191,17 €
Items inclus dans l'équipement complet :					
<ul style="list-style-type: none"> l Transducteur moulé en plastique composite, 4 faisceaux à 20° de la verticale dans une configuration convexe, capteur de température l Boîtier en plastique composite prévu pour une immersion à 200 m, avec connecteur enfichable sous l'eau et capuchon. 25 m de câble de communication et d'alimentation. Options 1000m et 6000m sur demande. l Système électronique : châssis, circuits électroniques, compas magnétique, capteur de roulis et tangage, 1 bloc de 28 piles alcalin démagnétisées. l Ensemble de logiciels faciles à utiliser comprenant les modules suivants : (1) configuration/conséquences, (2) déploiement/initialisation (3) récupération des données, (4) effacement de la mémoire, (5) visualisation des données en temps différé, (6) listing des données (7) test automatique et étalonnage du compas. l Accessoires : kit de maintenance, guide d'utilisateur, manuel d'opération, caisse de transport en PVC. 					
Prix en Euros basés sur 1 € 1,28\$					
Matériel débloqué livré Montpellier					
Paiement: par virement administratif					
Livraison : 30 à 45 jours environ					
Validité de l'offre : 90 jours					
Patrick LEFEUVRE					

FIG. 2.2 – Descriptif et coût de l'équipement acheté dans le cadre du projet NAUSICAA (convention avec SMNLR NAUSICAA I). Cet équipement permet de renforcer le parc en mesure des courants et de la houle sur la plage immergée.

Ceci peut éventuellement mettre en évidence le rôle de structures immergées plus distales discontinues latéralement (herbiers, platiers rocheux), sur la propagation de la houle et la génération des courants de plage.

2.2.2 protocole2 : déploiement "en profil"

Le protocole de déploiement "en profil" (figure 2.4) consiste à aligner trois couples d'ADCP + ADV/OBS perpendiculaire au trait de côte. On peut associer à ces 3 couples ADV/ADCP une ligne de pressiomètres décalé latéralement. Si le décalage est important, on a une vision latérale du champ

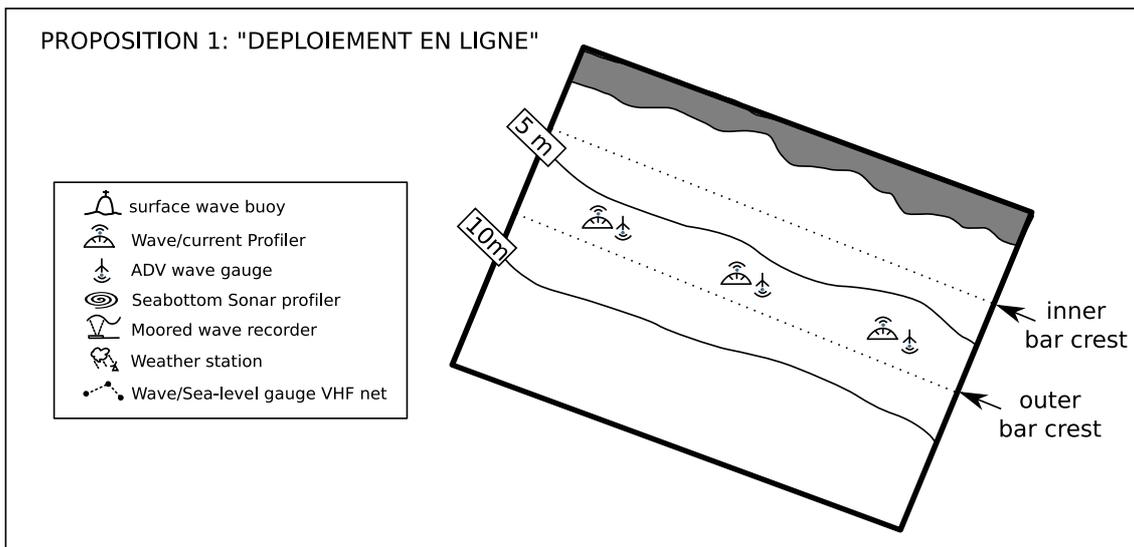


FIG. 2.3 – Protocole 1 : déploiement "en lignes". L'idée est de pouvoir, à partir de la mesure directement (avant même d'avoir recours à la modélisation), mettre en évidence des boucles de recirculation sur la plage immergée. Par exemple, si une boucle se met en place en surface, dans le sens horaire, centrée sur le couple ADV/ADCP du milieu de la boîte ci-dessus, alors les vitesses en surface à l'Ouest auront une composante Nord à Est importante, et les vitesses en surface à l'Est auront une composante Sud-Est à Sud importante. Si la circulation est parfaitement homogène longshore, les appareils fournissent des informations en phase. Le fait d'aligner les appareils permet de mettre plus facilement en évidence ce phénomène. Par ailleurs, si les 3 postes sont relativement éloignés (quelques centaines de mètres), la mesure à la même distance de la côte de toutes les grandeurs physique permet de faire une comparaison objective. On peut travailler sur la variation latérale de la surcôte, sur la variation latérale de la composante du courant de fond orientée vers le large,...

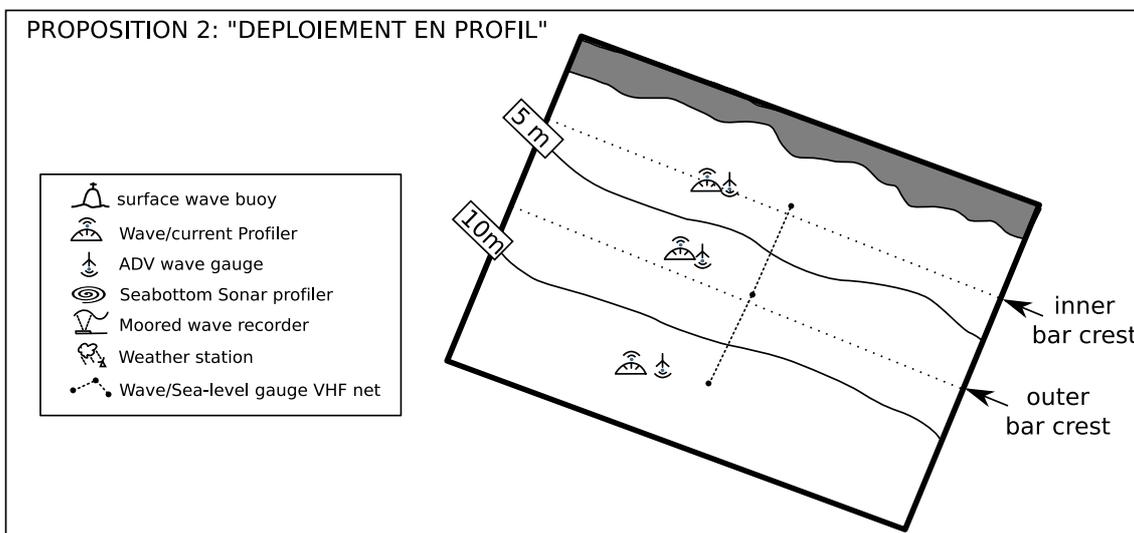


FIG. 2.4 – Protocole 2 : déploiement "en profil". Le réseau de pressiomètre est optionnel, et permet essentiellement d'avoir une vision en carte du champs de houle, et donc déterminer si la houle est latéralement homogène. Pour le reste, ce dispositif est évidemment celui qui apporte le plus d'informations sur les transferts cross-shore de masse d'eau. Le fait d'utiliser des ADCP avec module de houle permet d'avoir l'angle d'incidence de la houle et donc travailler sur l'influence de cet angle d'incidence sur la composante cross-shore des courants.

de vague en plus de la connaissance parfaite de la circulation selon un profil cross-shore.

Comme dans le cas du protocole 1, l'association ADCP/ADV permet d'avoir une mesure totale du

profil de vitesse, y compris près du fond, dans la zone d'ombre de l'ADCP. L'OBS associé à chaque ADV apporte une information semi-quantitative sur le sédiment transporté.

L'idée de ce déploiement est d'avoir une vision la plus précise possible des transferts de masse d'eau dans la direction cross-shore. Ceci peut permettre de mettre en évidence de forts courants vers le large, et la relation entre les caractéristiques de la houle incidente et les courants de plage générés (intensité du courant de retour, intensité du courant entrant, type partitionnement du profil de courant en fonction de la distance à la côte,...). Le fait de déployer un réseau Easywave à proximité permet d'avoir une vision en carte de la propagation de la houle : aux 3 ADCPs, on est capable de reconstituer les caractéristiques de la houle et sa direction. Au réseau de pressiomètre, on caractérise également la houle ; on s'appuie sur les valeurs aux ADCP pour connaître la direction. Avec ce dispositif, on peut donc travailler avec des houles obliques par rapport au trait de côte, et voir leur incidence sur l'intensité et la direction des courants de plage. Grâce au pressiomètres, on a une information sur l'homogénéité latérale du champs de houle.

2.2.3 protocole3 : déploiement "suivi long terme"

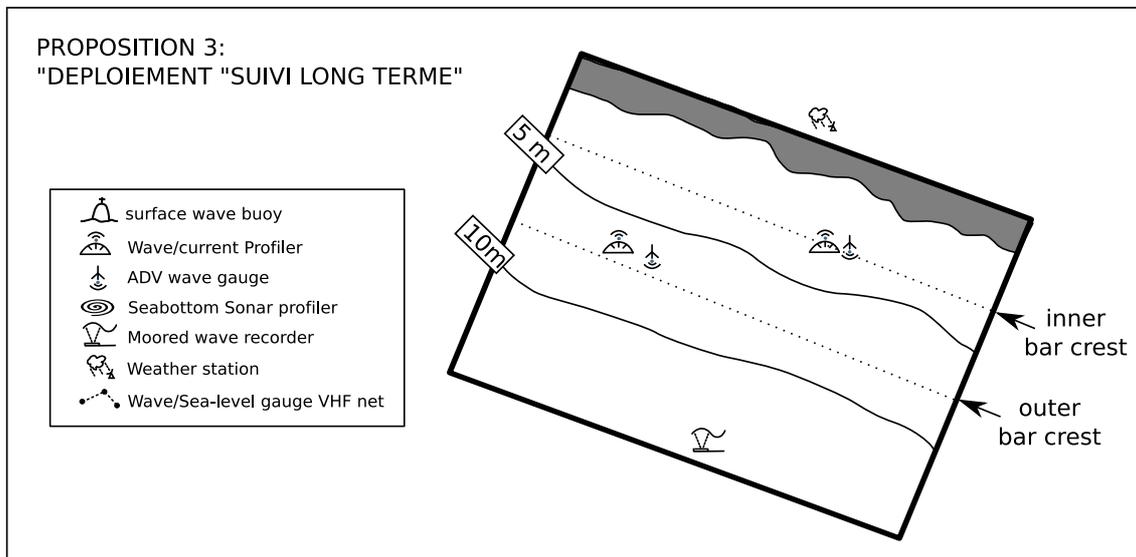


FIG. 2.5 – protocole 3 : déploiement "suivi long terme". L'idée est de disposer au large un pressiomètre à ancrage sur le fond qui peut rester 6 mois sur le même site avec un enregistrement continu des caractéristiques de la houle non directionnelle. Le point important pour ce déploiement est d'équiper tous les appareils de systèmes augmentant au maximum leur autonomie. L'achat réalisé dans le cadre de la convention NAUSICAA I permet ce type de déploiement.

Le déploiement "suivi long terme" a pour objectif la caractérisation des climats de houle et de l'hydrodynamique typique sur une zone littorale. Dans cette configuration, on souhaite appréhender les différents forçages sur une saison entière par exemple. On place au large du système un pressiomètre à ancrage sur le fond qui acquiert les caractéristiques long terme de la houle non directionnelle. On associe à ce pressiomètre deux couples ADCP/ADV répartis sur le domaine, pour servir de points de contrôle lors des modélisations numériques. On préfère deux points de contrôle dans deux parties différentes de la plage immergée (fosse de lévigation, crête de barre,) afin d'avoir plus d'informations sur la diversité des courants générés sur la période de mesure à l'échelle du chantier. On déploie également une station météorologique à terre à proximité, afin d'avoir des informations complémentaires sur le forçage météorologique. La comparaison des données de cette station avec les données générales utilisées en forçage dans les modélisations permet de conforter ou infirmer ces dernières,

et déterminer leur fiabilité. On évite de déployer les couples ADCP/ADV sur les bords du domaine modélisé pour éviter d'avoir ensuite à comparer les données mesurées avec des résultats sensibles aux effets des conditions aux limites.

Comme dans les cas précédents, l'association ADCP/ADV permet d'avoir une mesure totale du profil de vitesse, y compris près du fond, dans la zone d'ombre de l'ADCP. L'OBS associé à chaque ADV apporte une information semi-quantitative sur le sédiment transporté.

2.2.4 protocole4 : déploiement "étude surcôte"

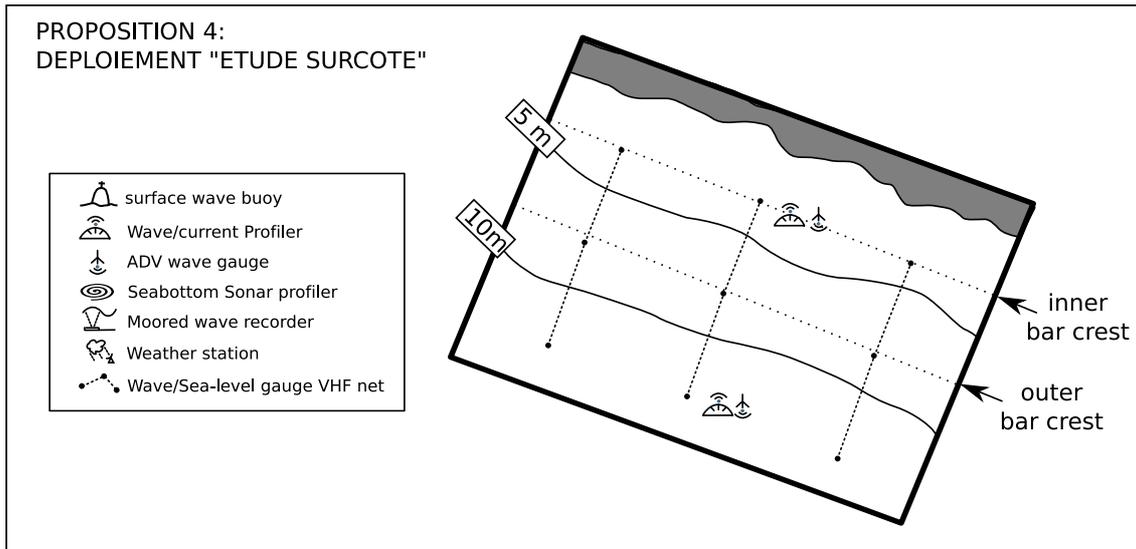


FIG. 2.6 – Protocole 4 : déploiement "étude surcôte". Ce protocole est axé sur la mesure de l'élévation de la surface libre en un nombre maximal de points plus qu'à la caractérisation 3D de la circulation. Pour cela, on donne priorité au déploiement de pressiomètres easywave en réseau.

Le déploiement "étude surcôte" a pour objectif l'étude des variations latérales de la surcôte le long du trait de côte, ainsi qu'une étude des modifications de la surface libre du large vers la côte (effet de shoaling, mise en place de la surcôte de Stokes, ...). Pour cela, on déploie plusieurs pressiomètres easywave disposés en lignes à la fois le long de la côte et du large vers la côte. L'alignement le plus proche de la côte donne la valeur la plus précise des variations longshore de surcôte. Les profils cross-shore permettent de travailler sur la transformation de la houle à l'approche du rivage. A ce réseau, on associe par exemple 2 couples ADCP/ADV. Comme dans les cas précédents, l'association ADCP/ADV permet d'avoir une mesure totale du profil de vitesse, y compris près du fond, dans la zone d'ombre de l'ADCP. L'OBS associé à chaque ADV apporte une information semi-quantitative sur le sédiment transporté.

2.2.5 protocole5 :

Le déploiement "mesure totale" montre les possibilités maximales en terme de mesure proposées dans le cadre du projet NAUSICAA. Il faut voir que le déploiement de tous les appareils n'a pas forcément d'intérêt :

- en limitant sur une boîte de mesure le nombre d'appareil, on peut envisager d'équiper deux boîtes de mesures sur la même période, ce qui peut être fort utile pour comparer l'hydrodynamique sur deux chantiers distincts lors d'un même forçage pré-littoral ;

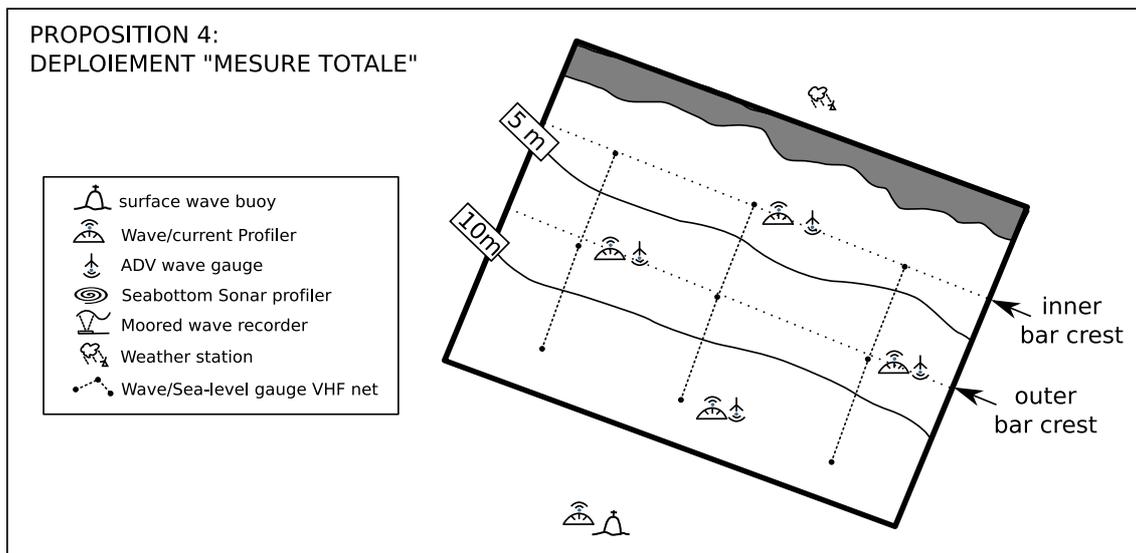


FIG. 2.7 – Protocole 5 : déploiement "mesure totale". Ce déploiement est théorique. Il est un exemple de déploiement maximal avec le parc d'appareils dont nous disposons, en gardant un appareil de chaque type en remplacement.

- l'augmentation du nombre d'appareils en mer fait croître d'autant le temps de traitement des données, et augmente le risque de perte en cas de coup de mer extrême, ou en cas de vandalisme des installations.

2.3 Modes de déploiement des équipements en zone pré-littorale

2.3.1 déploiement pré-littoral d'un ADCP de fond

Dans le cadre du projet NAUSICAA, les mesures hydro-sédimentaires concerneront avant tout le littoral, pour la caractérisation des houles, de la surcôte et des courants à la côte. Toutefois, pour caractériser les conditions hydrodynamiques aux limites du domaine littoral, nous souhaitons aussi implanter un instrument de mesure de houle et courants au large sous 90 m de bathymétrie au sud de Sète. Nous projetons de déployer un ADCP de février 2007 à février 2008 sur le plateau continental du golfe du Lion en un point à la limite ouverte de notre domaine pré-littoral. Situé à la position $3^{\circ}52'E$, $43^{\circ}15'N$ sur 90 m de fond, cette station BESSète (Bouée d'Eaux Saines du port de Sète) sera équipée d'un ADCP de fond (RDI 300 kHz) ayant fait ses preuves sur le mouillage GOLTS (projets PNEC-PATOM 2002-2005). Cet ADCP sera complété par un module de houle, un socle anti-chalutage, un système de largueurs acoustiques et une balise Argos. Cette station posée sur le fond, protégée en surface par une bouée de surface du SMNLR fournira des données précieuses relatives aux « échanges littoral-plateau-large ». Cet ADCP « plateau » aurait pour but :

- de donner des conditions mesurées (houles et courants) limites à l'entrée du système littoral,
- de servir de point de mesure pour valider les modèles à l'échelle du plateau,
- de faire le lien entre les études « côtières » du type « Intrusions du CN sur le plateau » et les études littorales.

Placé en pleine zone de pêche par chalutage, une cage de protection anti-chalutage beaucoup plus robuste que celles utilisées sur le littoral sera nécessaire. Le parc INSU d'instruments océanographiques est sollicité pour le prêt de deux largueurs acoustiques.

Le mode de déploiement de ce type d'équipement est résumé sur la figure 2.8.

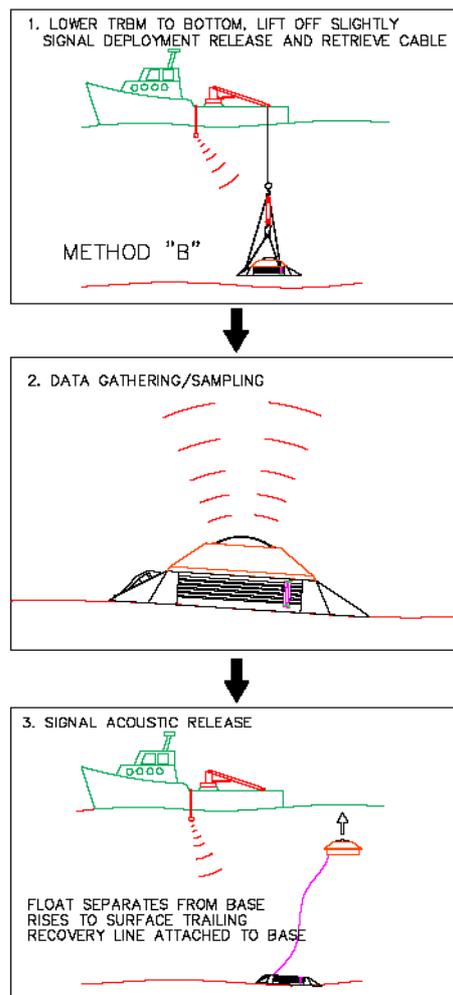


FIG. 2.8 – Principe de déploiement d'un ADCP en zone pré-littorale. La bathymétrie y est trop importante pour opérer avec des plongeurs sous-marins. On utilise alors le principe du largueur acoustique : 1) un navire immerge l'ADCP sur un socle avec largueur acoustique, c'est à dire un système composé de deux parties, dont une capable de remonter à la surface à l'aide de ballast déclenchés par un signal acoustique émis de la surface ; 2) l'appareil fait une mesure de la houle et des courants en autonomie sur le fond ; 3) lors de la récupération, la partie larguée remonte entraînant avec elle un câble qui permet de remonter le module resté au fond. Notre système sera implanté à proximité d'une bouée connue devant Sète, et sera en outre repéré par sa propre bouée de signalisation.

2.3.2 déploiement pré-littoral d'un ADCP de coque

Pendant toute la durée du projet, plusieurs campagnes en mer sont organisées à bord du Téthys II (voir liste plus haut). Le plan de navigation est conçu de telle sorte que ces campagnes fournissent une vision synoptique de la circulation à l'échelle d'un des trois domaines pré-littoraux. Les résultats complets des campagnes 2005 de ce type sont disponibles sur www.gladys-littoral.org, rubrique "Activités / campagnes HYGAM". Ce type de résultat permet de valider les modèles à l'échelle pré-littorale.

2.4 Positionnement GPS et topobathymétrie

L'ensemble des opérations menées dans le cadre du projet NAUSICAA reposent sur le positionnement d'appareils en mer, éventuellement en lagune, et l'acquisition de MNTs topobathymétriques

utilisés comme paramètres en entrée des modélisations numériques.

2.4.1 Positionnement GPS sur le littoral

Que ce soit pour le déploiement des appareils en mer ou lors des campagnes topobathymétriques, il est nécessaire de disposer d'un système de positionnement fiable. De manière habituelle, les opérateurs en zone littorale utilise un système de positionnement GPS différentiel, composé d'une "base", c'est à dire un appareil immobile déployé à un endroit donné pendant toute la durée d'une opération, et d'un mobile, un autre récepteur GPS se déplaçant au gré de l'opération. Le positionnement différentiel consiste à supprimer une partie de l'erreur sur le positionnement du mobile en partant du principe que la base est un point fixe et en recalculant la position du mobile plus précisément à partir de cette base que de manière absolue. Dans le cadre du projet NAUSICAA, nous utilisons des mobiles de type Trimble R8 avec transmission GSM. Mais l'originalité de notre approche est l'absence de base à déployer pour chaque mission. En effet, le laboratoire GEOSCIENCES-M a une équipe de recherche spécialisé en positionnement, qui dispose d'accès (et développe) plusieurs réseaux de bases de positionnement GPS (figure 2.9). Ce réseau permanent fait office de base en tout point du littoral Languedoc-Roussillon. D'autres points bases seront ajoutés dans la durée du projet NAUSICAA.

GPS-H2O : Etat du projet au 10 juin 2006



FIG. 2.9 – Les différents réseaux utilisables par GEOSCIENCES-M. Seul le réseau bleu marine (le réseau des géomètres experts) ne nous est pas autorisé. L'ensemble des autres stations est disponible au 1/10/2006, notamment les stations en zone littorale de Adge et Sainte Marie, qui permettent un positionnement très précis dans l'ensemble du Golfe d'Aigues-Mortes.

2.4.2 Acquisitions topobathymétriques

Les modélisations à l'échelle pré-littorale travaillent sur des grilles de points espacés régulièrement et distants de 200 m à 50 m selon le cas. A cette échelle, la résolution de la grille est beaucoup moins importante qu'à l'échelle pré-littorale. Toutefois, pour une utilisation du modèle REFDIF comme module de houle du modèle RESYFE, il faut envisager d'utiliser une résolution de grille proche de celles utilisées en zone littorale, pour les raisons expliquées ci-dessous. Les modélisations à l'échelle littorale travaillent sur des grilles de points espacés régulièrement et distants de 20 m à 1 m selon les applications envisagées. Par exemple, pour le calcul avec le modèle REFDIF, et tous les modèles l'utilisant, la grille doit être suffisamment fine pour que 5 points topobathymétriques au minimum couvrent une distance égale à la longueur d'onde de la houle. Si on souhaite étudier l'hydrodynamique dans les derniers mètres de bathymétrie, il faut que le modèle topobathymétrique représente correctement les barres sédimentaires, et offre donc une résolution spatiale inférieure à 5 mètres.

Dans le cadre de ce projet, on a utilisé les sources de données topobathymétriques suivantes :

- données issues des campagnes d'imagerie multi-faisceaux IFREMER. Topobathymétrie à 200 m de résolution sur l'ensemble du plateau continental du Golfe du Lion ;
- données issues des cartes SHOM ;
- données issues de la base de données GMT (Generic Mapping Tools) ;
- données issues des bases ETOPO5 à 5 minutes d'angle ;
- données issues du programme PNEC ART 7, chantier Méditerranée ;
- données issues de campagnes réalisées dans le cadre du projet NAUSICAA.

Les campagnes de mesure topobathymétriques réalisées dans le cadre du projet NAUSICAA commenceront fin novembre 2006. Elles concernent les chantiers littoraux décrits au chapitre 3, avec priorité données aux chantiers A, B, C, D et E.

Chapitre 3

Domaines pré-littoraux et chantiers littoraux

Le littoral du Golfe du Lion est essentiellement sableux, avec quelques promontoires rocheux découpant le littoral en cellules sédimentaires dans lesquelles l'hydrodynamique est globalement déterminée. L'ensemble du Golfe est soumis aux vents dominants d'Ouest à Nord et aux entrées maritimes, ainsi qu'aux houles de tempêtes de Est à Sud et occasionnellement Sud-Ouest dans le Nord du Golfe, et aux houles de Nord-Est à Sud-Est dans l'Ouest du golfe. De nombreuses zones sont totalement protégées par des ouvrages artificiels, alors que d'autres zones sont restées à l'état naturel. L'orientation des dérives longshore est variable de l'Ouest au Nord du golfe. Pour ce projet d'Atlas Hydrodynamique, on a retenu deux types de zones à étudier. D'une part, on a sélectionné 3 **domaines pré-littoraux** qui couvrent l'essentiel du Golfe du Lion de la frontière espagnole à l'exutoire du Petit Rhône, avec un certain recoupement entre zone. D'autre part, on a sélectionné 9 domaines à l'échelle littorale, appelés **chantiers**, et présentés ici d'Est en Ouest :

- **chantier A : Pointe de l'Espiguette**
- **chantier B : plage de Carnon Est / Petit Travers**
- **chantier C : système Dent Creuse à plage de Maguelone**
- **chantier D : lido Ouest de Sète**
- **chantier E : lido de la Tamarissière**
- **chantier F : lido de Gruissan / Saint-Pierre-la-mer**
- **chantier G : lido de l'étang de Leucate**
- **chantier H : pointe du Racou**
- **chantier I : baie de Banyuls**

Ces sites littoraux montrent des expositions à la houle variables, sont soit anthropisés, soit naturels, représentent des zones en accrétion ou érosion, représentent des zones où les surcôtes peuvent être anormalement élevées.

3.1 Présentation des domaines pré-littoraux

Les trois domaines pré-littoraux couvrent le Golfe du Lion de la frontière espagnole à l'exutoire du Petit Rhône (figure 3.1).

Les trois domaines concernent la zone pré-littorale du trait de côte à la ligne bathymétrique -90 mètres, et sont limités latéralement de la manière suivante :

DOMAINE NORD : du lido de Sète Ouest aux épis de la grande plage de l'Espiguette, avant la plage de Beauduc.

DOMAINE CENTRE : de l'Est du promontoire rocheux de Sète à la partie Sud de l'étang de Leu-

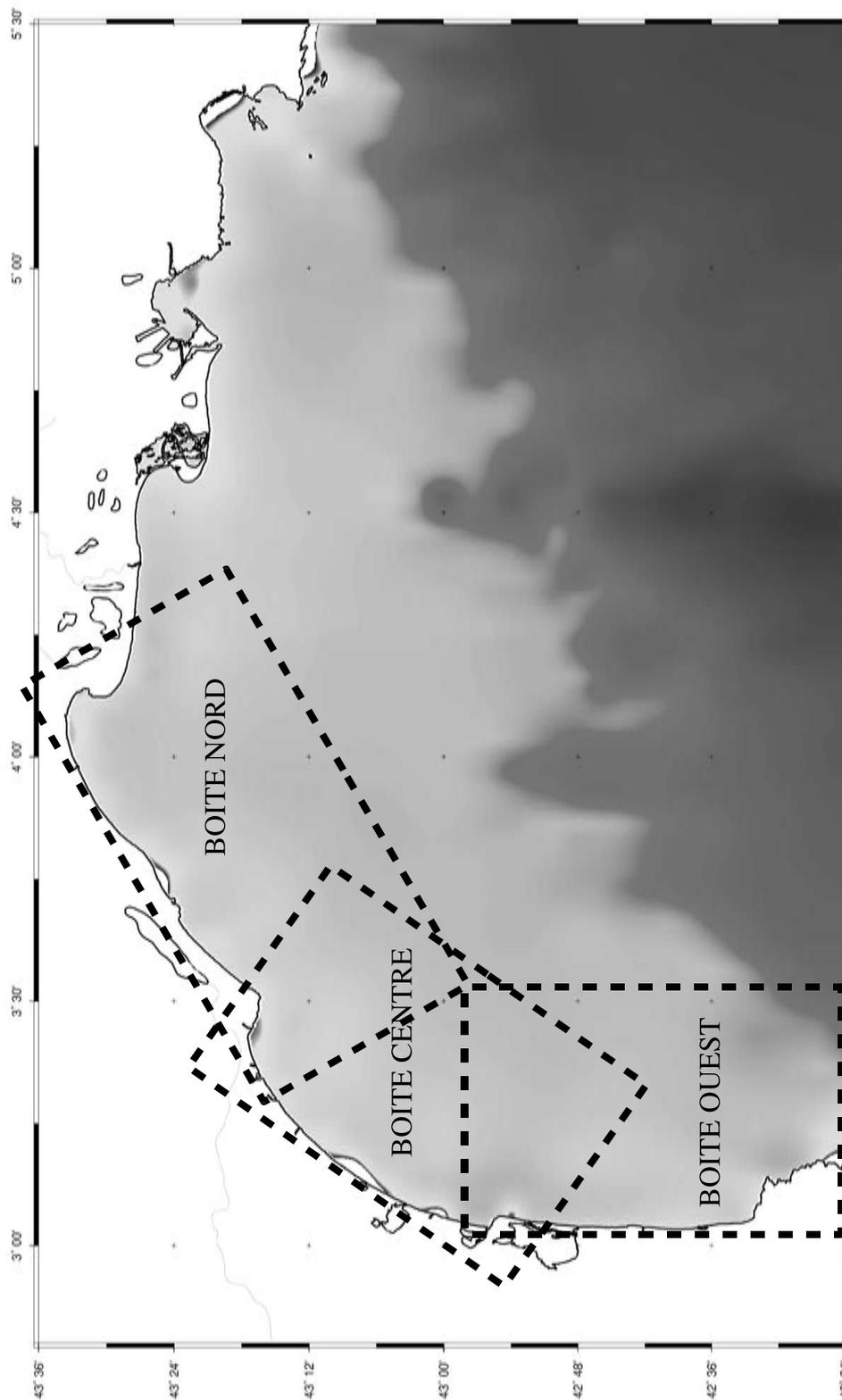


FIG. 3.1 – Représentation des trois domaines pré-littoraux à l'échelle du Golfe du Lion. Ces domaines pré-littoraux sont utilisés comme grille pour la modélisation pré-littorale, et seront instrumentés (prioritairement domaine Nord et domaine Ouest) dans la durée du projet.

cate.

DOMAINE OUEST : de la frontière espagnole à l'étang de Leucate.

Le découpage des domaines pre-littoraux a été fait de telle sorte que les linéaires de littoral sur chaque domaine sont globalement rectilignes. Ceci facilite grandement la visualisation des résultats sur des cartes orientées dans l'axe d'allongement principal du littoral.

3.2 Présentation des chantiers littoraux

Sur l'ensemble des sites, on se propose de caractériser l'hydrodynamique de manière générique, en utilisant les climats hydro-météo typiques. Mais de site à site, on privilégiera en plus tel ou tel processus hydrodynamique, afin que l'Atlas couvre un panel de problèmes le plus large possible.

3.2.1 Chantier A : Pointe de l'Espiguette

Le chantier de la pointe de l'Espiguette s'étend des 10 premiers épis Ouest à la flèche littorale de la grande digue de Port-Camargue (figure 3.2), sur une distance le long de la côte d'environ 6 km.

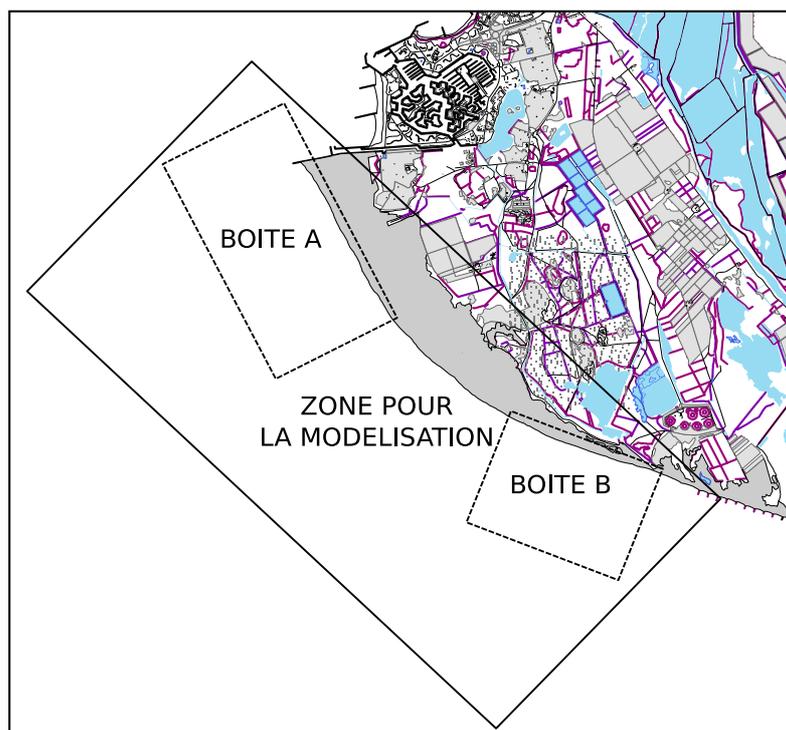


FIG. 3.2 – Une présentation de la zone d'extension du chantier A, flèche de l'Espiguette. On reconnaît au Nord de la carte Port Camargue. La boîte de modélisation s'avance devant le Port pour couvrir la zone où se développe la flèche sous-marine. Les deux boîtes de mesure (où seront déployés les instruments) sont situées au Nord et au Sud de la zone. Cette distribution permettra de comparer les courants au niveau de la flèche sous-marine et à la sortie du système d'épis. Pour un angle moyen de houle donné, ces courants seront certainement d'orientation moyenne différente, car la plage a une orientation variable. On s'attachera à comparer les composantes longshore et cross-shore des courants mesurés sur ces deux zones distinctes.

Ce site est globalement en accrétion, parfaitement exposé aux houles affectant le Nord-Est du Golfe du Lion, et sous l'influence directe du Mistral. De l'Est à l'Ouest de ce chantier, l'orientation

du trait de côte change, de telle sorte que pour une houle pré-littorale d'incidence donnée, l'angle d'incidence à la côte varie sur la longueur du site. L'objectif spécifique sur ce site est la caractérisation de la relation entre les tempêtes (effet de houle dominant), la dérive longshore qui contrôle le transport sédimentaire et la construction de la flèche littorale, les ouvrages traditionnels présents dans l'Est du domaine et le phénomène de surcôte. Une campagne de mesure de 2 mois est programmée dans la période février-avril 2007.

Points forts du chantier : transferts longshore, construction de flèche littorale, invasion par la mer de l'arrière pays lors de tempêtes.

3.2.2 Chantier B : plage de Carnon Est / Petit Travers

Le chantier de la plage de Carnon Est s'étend à l'Est du système à épis de la promenade de Carnon, jusqu'à la limite Ouest de la plage du Grand Travers, au delà de la plage du Petit Travers (figure 3.3).



FIG. 3.3 – Une présentation de la zone d'extension du chantier B, lido de Carnon Est / Petit Travers.

Ce site est totalement aménagé dans sa partie Ouest, avec de nombreux ouvrages de protection du littoral de taille réduite. Il est soumis aux houles affectant le Nord-Est du Golfe du Lion, et sous l'influence du Mistral et de la Tramontane. Au delà du système littoral sableux, on trouve rapidement de nombreux affleurement rocheux (Pléistocène) et des ouvrages artificiels immergés (revégétalisation du Golfe d'Aigues-Mortes). Coté terre, la plage est longée par des habitations et une route dans sa partie Ouest, et une route sur le reste du site. Hors Carnon, le système dunaire est rapidement remplacé par des remblais et terrains en place, localement assez élevés (altitude +7 mètres en certaines endroits), avec quelques pinèdes. La lagune est située à plusieurs centaines de mètres en retrait. L'objectif spécifique sur ce site est la caractérisation de l'hydrodynamique en présence d'ouvrages émergés et immergés traditionnels. Les résultats sur cette zone pourront être comparés avec les résultats du laboratoire UNIBO-DISTART (spécialisé dans le calcul d'impact de la houle sur les ouvrages) obtenus sur un système littoral équivalent. Une série de campagnes de mesure courtes et ciblées réparties sur la durée du projet sont prévues.

Points forts du chantier : impact sur les ouvrages, relation transferts longshore / transfert cross-shore en fonction de l'angle d'incidence de la houle, effet d'enrochements en zone sub-littorale sur la propagation de la houle à la côte.

3.2.3 Chantier C : grand système Dent Creuse à Maguelone

Le chantier C est le chantier le plus étendu. Nous avons décidé initialement de limiter ce chantier à la zone du Plateau des Aresquiers.



FIG. 3.4 – Photos d'un grau de tempête créé sur le chantier C lors d'un évènement survenu la semaine du 23/10/2006. Cette zone est relativement accessible avec un véhicule, et reste totalement vierge d'aménagement entre le parking des Aresquiers à l'Ouest et le Poste de Secours de Maguelone à l'Est. A ce titre, la zone est particulièrement intéressante pour étudier les relations entre le régime hydrodynamique de l'avant-côte et les évènements catastrophiques survenant dans la lagune : les interactions se font sans être perturbées par les habitations, routes,... occupant ailleurs le lido. *Crédits L. Dezileau / P. Sabatier*

Mais la partie plus à l'Est de ce plateau (dite plage de Maguelone) présente un grand intérêt pour la compréhension des processus de débordement de tempête en lagune (passage d'eau et de sédiment de l'avant-côte vers la lagune (figure 3.4). Dans le cadre d'un projet de recherche de type ANR (projet INTEMPERIES, coordinateur L. Dezileau), ce site a toutes les chances d'être instrumenté avec des appareils permettant le suivi de l'élévation du niveau de la lagune et la circulation lagunaire. Il est donc normale de profiter de cette opportunité pour instrumenter dans le même temps l'avant-côte et étudier simultanément l'hydrodynamique littorale et ses effets sur la circulation en lagune.

L'exposition de ce chantier est la même que celle du chantier B. La caractéristique essentielle de ce chantier est qu'il présente dans sa partie Ouest un plateau rocheux formant un pointement rocheux immergé s'avancant de plusieurs centaines de mètres vers le large. Nous avons identifié ce plateau comme étant du matériel carbonaté Pliocène, donc un substratum. Sur le littoral dans la même zone, on trouve une plage de galets (beach-rocks, morceaux de substrat carbonaté, allochtone alpin et allochtone des bassins versants Montpellierains). Cette structure correspond plus ou moins à une limite de cellule sédimentaire, puisque la dérive à l'Ouest est estimée vers l'Ouest, et la dérive à l'Est est estimée vers l'Est sur la plupart des documents s'étant intéressés à la cartographie des dérives littorales à partir des accumulations sableuses long terme. Ces informations restent à préciser. Le site est

non protégé, sauf dans sa partie extrême Ouest, au niveau de l'Est de la ville de Frontignan. Cette extrémité est une zone à enjeux très élevés. L'objectif spécifique sur ce site est la caractérisation de l'hydrodynamique en présence d'un plateau rocheux, et l'étude du rôle de ce plateau rocheux sur la circulation locale forcée par le vent et/ou la houle. Dans la partie Est de ce domaine, on trouve un linéaire côtier de type lido, très peu anthropisé sauf à l'extrême limite Est. Ce lido est régulièrement éventré par des graus temporaires formés lors de tempêtes. Dans l'avant-côte, on a une partie entièrement sableuse jusqu'à 15 mètres de bathymétrie, et une partie où on trouve de nombreux affleurements rocheux Pléistocènes.

Une grande campagne (ou une série de plusieurs campagnes) de mesure est programmée dans la période avril à juin 2007.

Points forts du chantier : relation entre ouvrages et plateau, relation entre processus hydrodynamique et formation des cônes de débordement de tempête, transferts longshore/cross-shore, étude de la dynamique d'une bordure de cellule sédimentaire.

3.2.4 Chantier D : lido Ouest de Sète

Le chantier du lido de Sète est situé à l'Ouest du promontoire rocheux de Sète, au début de la plage sableuse (figure 3.5).

Il est soumis au vent de Nord et à la Tramontane. Les houles sont de Est-Sud-Est à Sud-Ouest. Le lido est totalement rectiligne, avec deux barres d'avant-côte rectilignes. Actuellement, le cordon dunaire et la route bordière sont systématiquement détruits pendant les fortes tempêtes. Ainsi, ce site est actuellement l'objet d'un réaménagement complet programmé pour l'horizon 2010 (figure 3.6), avec déploiement de structures géotextiles immergées, réaménagement de la plage,...

Ce site est important car c'est un site historique pour l'instrumentation, sur lequel la communauté scientifique française a réalisé des campagnes (PNEC, PATOM, voir thèse Certain, 2002), ce qui permet de disposer sur la zone d'une base de mesures existantes. On a programmé des campagnes pour septembre et octobre 2007.

Points forts du chantier : seul site sur lequel il existe de réelles données hydrodynamiques sur la plage immergée. Chantier à deux barres rectilignes bien exprimées. Très forts enjeux. Implantation à venir de nouveaux types de structures de protection.

3.2.5 Chantier E : lido de la Tamarissière

Le chantier du Lido de la Tamarissière est situé sur la rive Ouest de l'embouchure du fleuve Hérault, au niveau du Grau d'Agde (figure 3.7).

Il est soumis au vent de Nord et à la Tramontane. Les houles sont de Est-Sud-Est à Sud-Ouest. Mais le site est protégé des houles les plus Est. Ce site présente la singularité d'être placé juste à coté de l'exutoire de l'Hérault, dont la charge sédimentaire va modifier l'hydrodynamique à proximité de la plage. La morphologie de plage est complexe. En effet, les barres sédimentaires ne sont ni rectilignes ni festonnées, mais forment des barres perpendiculaires à la plage, sortes de sillons ouverts vers le large. L'ensemble de la plage est aménagé avec des petits épis localement démantelés. Ce site fait actuellement l'objet de réaménagements importants, qui vont modifier complètement la morphologie de cette plage.

On dispose d'informations complètes sur ce site dans un rapport CAHM "Suivi morphologique

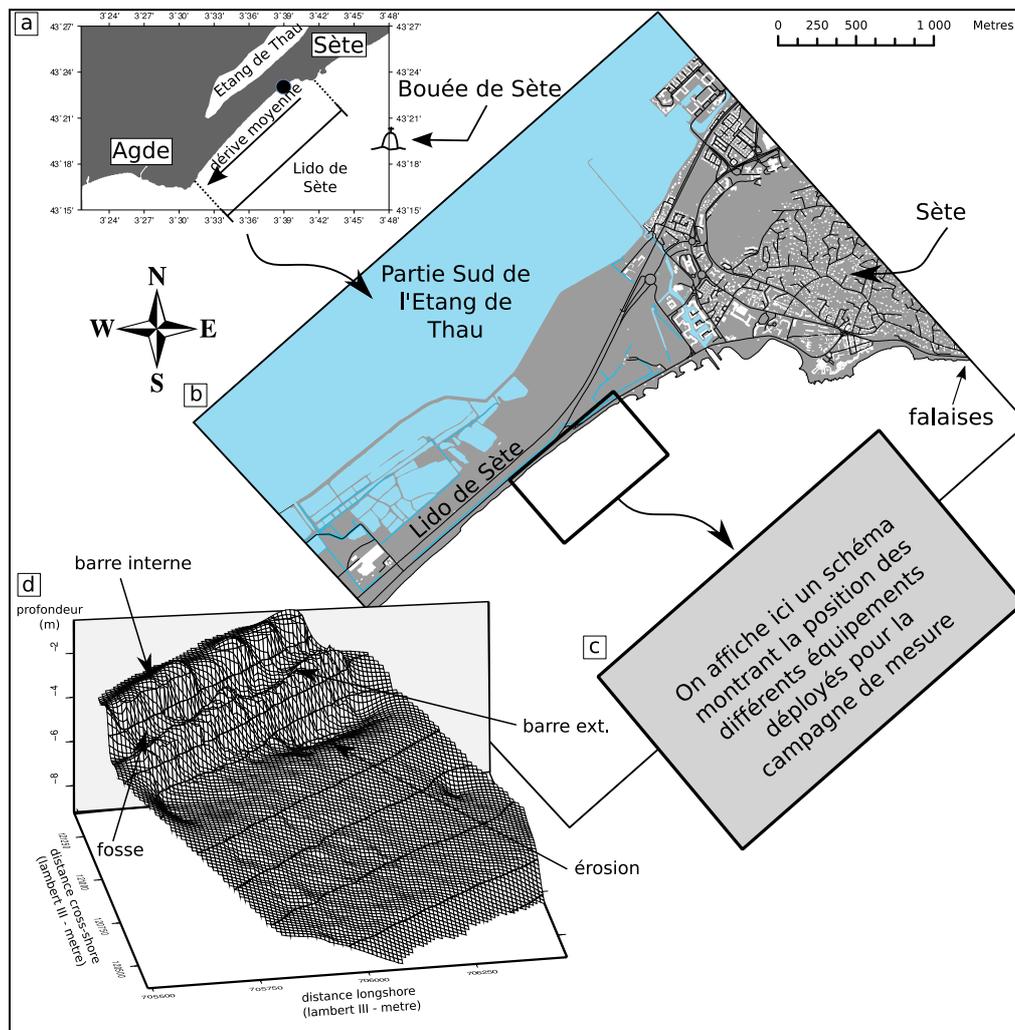


FIG. 3.5 – Une présentation de la zone d’extension du chantier D, le lido de Sète. Ce chantier reprend les boîtes utilisées dans le cadre de projets de recherche ayant permis en 1999,2000 et 2002 des campagnes de mesures (hydrodynamique et sismique / topobathymétrie dans l’avant-côte.

du littoral de Portiragnes, de Vias et d’Agde" (Bujan, 2006). On se reportera à ce document pour une description morphologique plus détaillée du site.

Nous disposons d’une topobathymétrie fine réalisée avant ces aménagements (figure 3.8, et de quelques jours de mesures des caractéristiques des courants, ce qui est insuffisant pour donner un aperçu pertinent de l’hydrodynamique sur la zone, mais permet d’effectuer des tests d’outils de modélisation. On envisage une campagne de mesure en présence des nouveaux ouvrages. Ce site a été très utile dans l’avant-projet NAUSICAA. En effet, du fait de sa complexité topobathymétrique (ouvrages et digues verticaux, structures complexes,...), il a fallu améliorer de manière significative un des codes numériques utilisés (SHORECIRC, voir chapitre 5) pour permettre son utilisation dans ce type de configuration (Bujan *et al.*, 2005). Ceci nous a permis d’obtenir un outil de modélisation numériquement stable.

On se reportera au chapitre 5 pour une présentation des travaux de modélisation sur la zone.

Points forts du chantier : chantier à morphologie complexe. Possibilité d’étude des interactions entre flux sortant à l’embouchure d’un fleuve et hydrodynamique de la plage.

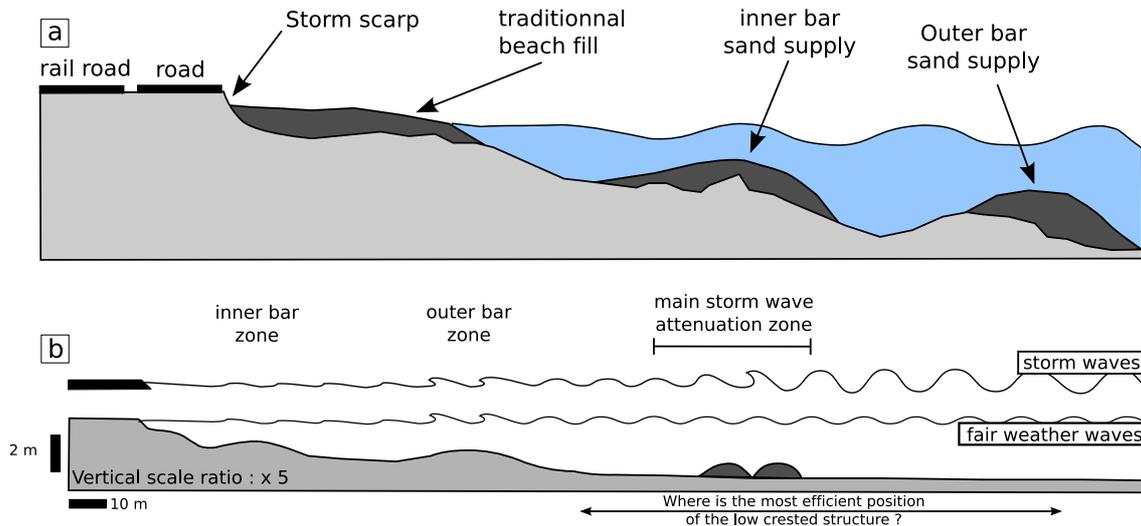


FIG. 3.6 – D’après Isèbe *et al.*, submitted. Une représentation perpendiculaire à la côte des aménagements sous-marins programmés sur le lido de Sète Ouest. Il s’agit de la première initiative menée dans le Golfe du Lion en matière de pose de géotextiles immergés à grande échelle, en position distale.

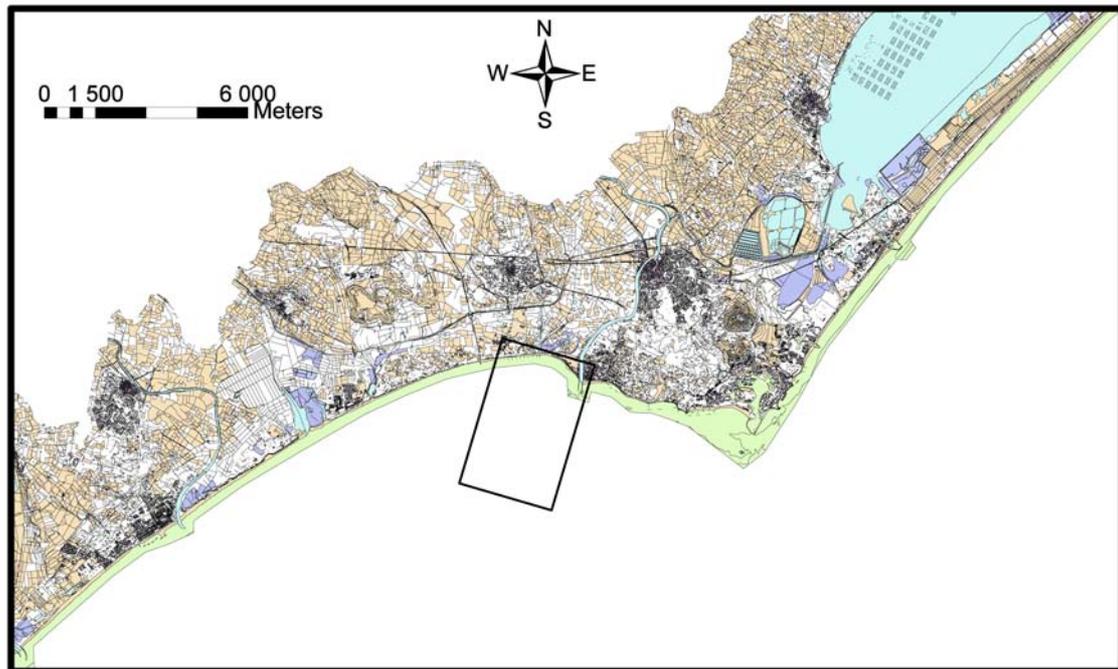


FIG. 3.7 – Une présentation de la zone d’extension du chantier E, le lido de la Tamarissière. Ce chantier est constitué d’une seule boîte ayant servi de support pour l’amélioration d’un des codes numériques exploités dans ce projet (SHO-RECIRC). La morphologie du site est complexe, certainement du fait de la présence de l’exutoire de l’hérault.

3.2.6 Chantier F : lido de Gruissan / Saint-Pierre-la-mer

Le chantier du Lido de Gruissan s’étend de la base conchilicole au grau de la vieille nouvelle.

Ce site est exposé aux houles de fond de golfe, et à la tramontane essentiellement. C’est un système à trois barres et lido de très basse altitude à l’arrière duquel se trouvent de grandes zones humides, comme la partie Est du chantier C, mais sur des domaines beaucoup plus étendus. L’objectif sur ce site

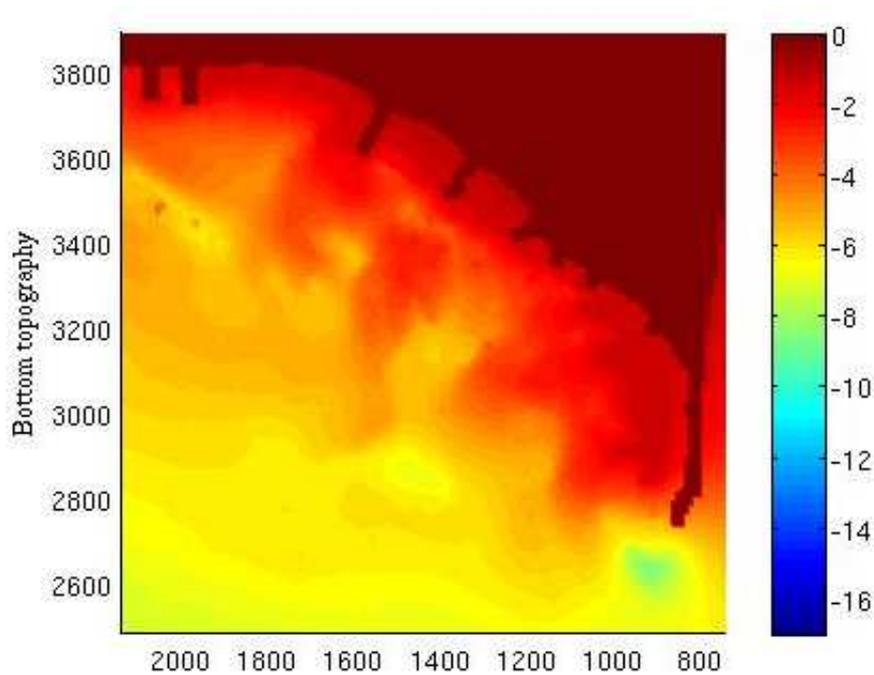


FIG. 3.8 – Représentation cartographique interpolée de la topobathymétrie de la boîte de modélisation de la Tamaris-sière. Les distances sont en mètres. On retrouve bien 4 sillons orientés vers le large, perpendiculaires au trait de côte, et l'absence de barres sableuses traditionnelles.

est de caractériser les dérives selon les conditions vent / houle typiques et de rendre compte du mécanisme d'invasion des terres par la mer lors des tempêtes. Une campagne de mesure est programmée pour l'année 2008.

3.2.7 Chantier G : lido de l'étang de Leucate

Ce chantier est situé au niveau de l'étang de Leucate. Son étude se fait dans le cadre de la thèse de Pierre Ferrer. A ce titre, une présentation de ce site sera réalisée lors de la phase B. Ce site est essentiellement exposé aux vents type Tramontane, et reçoit les houles d'Est à Sud-Est. Il est caractérisé par la présence de barres en feston, et a été retenu pour ce point précis. L'objectif est la caractérisation de l'hydrodynamique de plage immergée dans un système à barre festonnée. Une campagne de mesure est programmée en janvier et février 2007.

3.2.8 Chantier H : pointe du Racou

Le chantier de la pointe du Racou s'étend de l'embouchure de la Tech au Racou. Ce site est situé à la limite Nord des littoraux rocheux formant la terminaison Est de la chaîne des Pyrénées.

Il est caractérisé par le fait que la pente de la plage est extrêmement forte et que des jets de rives à plus de 4 mètres d'altitude ont été observés. Les forçages sont ceux de l'Ouest du Golfe du Lion (vent de Nord, houles d'Est à Nord-Nord-Est voire Sud-Est du fait de diffraction sur le cap), intrusion de la circulation générale en zone littorale du fait de l'étroitesse du plateau continental dans ce secteur). L'objectif spécifique sur ce site est la caractérisation de l'hydrodynamique dans le but de comprendre des jets de rives d'une telle importance. Une campagne de mesure pendant un événement de tempête

susceptible de générer des surcôtes importantes est envisagée.

Points forts du chantier : relations entre pointement rocheux et surcôte, rôle de la pente dans la génération de la surcôte.

3.2.9 Chantier I : baie de Banyuls

Le chantier de la Baie de Banyuls est situé dans la partie rocheuse du littoral du Golfe du Lion.

La baie de Banyuls est une baie sableuse de petite taille encadrée au Nord et au Sud par des promontoires rocheux. L'objectif spécifique sur ce site est la caractérisation de l'hydrodynamique d'une plage sableuse encadrée par des promontoires. Les forçages sont ceux de l'Ouest du Golfe du Lion (vent de Nord, houles d'Est à Nord-Nord-Est voire Sud-Est du fait de diffraction sur le cap), intrusion de la circulation générale en zone littorale du fait de l'étroitesse du plateau continental dans ce secteur). Les données de mesures sur la zone sont acquises (voir chapitre 5 et des travaux de modélisation ont déjà été réalisés sur cette zone (Denamiel, 2006). Des campagnes complémentaires seront programmées si nécessaire, après étude exhaustive des données déjà existantes.

Points forts du chantier : fonctionnement d'une plage captive, influence directe de la circulation générale sur la l'hydrodynamique littorale.

Chapitre 4

Synthèse des données hydrodynamiques et météorologiques existantes et choix des conditions académiques utilisées pour l'Atlas hydrodynamique

Dans cette partie, on présente un état des connaissances sur les mesures hydrodynamiques et forçages météorologiques existants en Languedoc-Roussillon. On a retenu dans cette liste les ensembles de données répondant aux critères suivants :

- les données brutes doivent être disponibles pour du retraitement et la production de graphes originaux ;
- les conditions d'acquisition des données (périodes, conditions techniques du déploiement,..) doivent être précisées ;
- les données doivent être délivrées avec une présentation claire de leur fiabilité ;

Après quelques mois de recherche et de démarches auprès des différents organismes et entreprises travaillant sur le Languedoc-Roussillon, la liste suivante a été retenue :

- campagne mesure hydrodynamique VENT 99, réalisée par le CEFREM à l'Université de Perpignan. Cette campagne est une instrumentation en zone pré-littorale à sub-littorale ;
- campagne mesure hydrodynamique TEMPETE 2004, réalisée par le CEFREM à l'Université de Perpignan. La campagne s'est déroulée dans le cadre du programme EUROSTRATAFORM. Elle correspond à une instrumentation en zone pré-littorale à sub-littorale ;
- campagne mesure hydrodynamique HYGAM2005-3 (voir www.gladys-littoral.org rubrique activités/HYGAM). Cette campagne a été réalisée par GEOSCIENCES-M, dans le cadre du programme national PATOM. Il s'agit d'une campagne réalisée avec le Téthys II en zone pré-littorale ;
- campagne mesure hydrodynamique CALAMAR II (voir www.gladys-littoral.org rubrique activités/CALAMAR). Cette campagne a été réalisée par GEOSCIENCES-M et le LEGEM de Perpignan. Elle correspond à un déploiement d'instruments en zone strictement littorale ;
- campagne TETHYS. Cette campagne a été réalisée par la société TETHYS, dans le cadre d'études lors de la phase préparatoire de la construction de l'émissaire en mer de Palavas. Elle correspond à un déploiement d'appareils en zone pré-littorale.
- les données de houle du site CANDHYS ;
- les données météorologiques de Météo France ;
- les données issues du système ALADIN (une association de modélisations et assimilation de données météorologiques), décrit au chapitre 5.

A cette liste répondant correctement aux critères sus-mentionnés, on a ajouté des résultats semi-quantitatifs issus de plusieurs rapports d'organismes publics et de bureaux d'études. Ces documents nous ont servi de point de départ pour la détermination des conditions académiques.

A ce jour, le constat est qu'il existe peu de jeux de données de bonne qualité pouvant servir à la conception d'un Atlas Hydrodynamique. Le fait d'axer le projet NAUSICAA sur des campagnes de mesure permettant d'obtenir des jeux de données sur lesquels on peut avoir un bon contrôle qualité est donc fondamental.

4.1 Présentation des données existantes retenues

4.1.1 Campagne de mesures pré-littorales ADCP/CTD par TETHYS

La société Téthys a organisé une campagne de mesure de la courantométrie, la températures et la salinité au large de Palavas-les-Flots sur la période du 11 mars au 25 novembre 2003. L'objectif de cette campagne était de fournir des données hydrodynamiques sur la colonne d'eau au niveau du futur point d'implantation en mer de la sortie de l'émissaire de la Cérereide (figure 4.1).

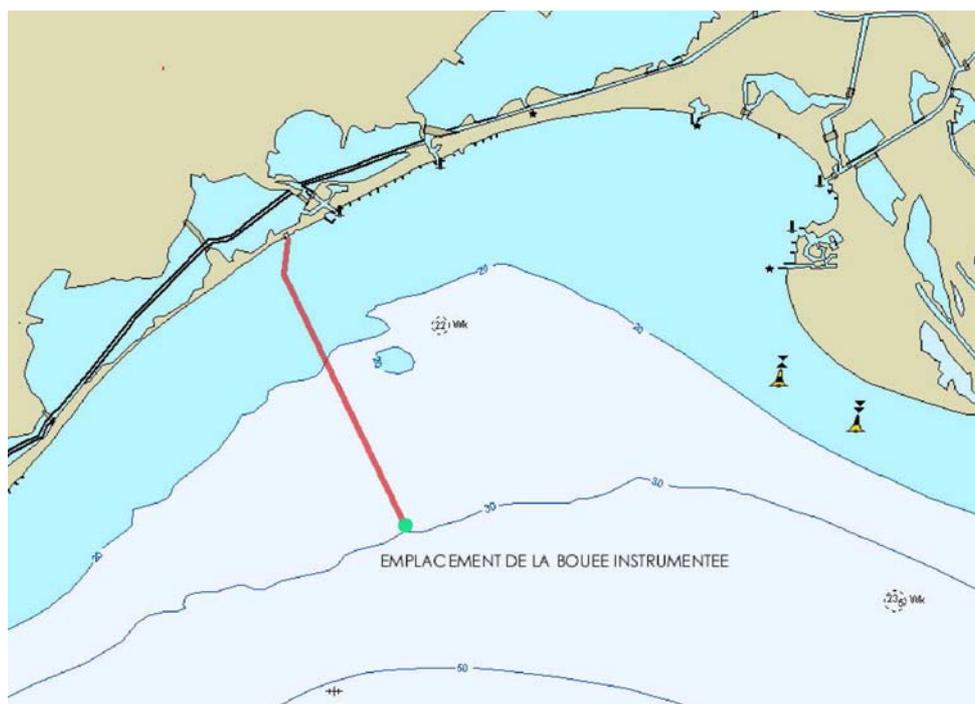


FIG. 4.1 – Le Golfe d'Aigues-Mortes et la localisation de l'émissaire en mer et de l'emplacement du point de mesure lors de la campagne organisé par TETHYS. D'après rapport TETHYS..

La mesure du courant s'est faite sur la colonne d'eau tous les 2 mètres, et celle de la salinité s'est faite en 4 points répartis régulièrement sur la verticale (figure 4.2). Les données météorologiques de vent sont obtenues auprès de la station Météo France de Montpellier-Fréjorgues. Compte tenu du fort risque de chalutage sur la zone, l'ensemble des équipements de mesure a été placé sur une bouée instrumentée, ce qui permet (d'après Téthys) d'assurer une meilleure sécurité du matériel.

TETHYS résume la campagne de la manière suivante : La campagne de mesure s'est déroulée du 11 mars 2003 au 25 novembre 2003. La première récupération des données a été effectuée le 16 mai

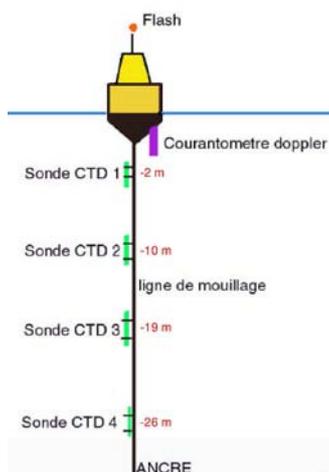


FIG. 4.2 – Principe du système déployé en mer : une bouée et une ligne de mouillage portant des CTD à des profondeurs régulièrement réparties. Le courantomètre ADCP fait sa mesure vers le bas à partir de la bouée. Ceci peut entraîner des mauvais fonctionnements en cas de tempête. Dans le cadre du projet NAUSICAA, nous avons décidé au contraire de procéder à des déploiement d'équipements sur le fond, en sécurisant en surface avec des bouées de signalisation non porteuses d'instruments.

2003. Le 9 juillet 2003, lors de la seconde récupération des données, l'équipe chargée de la récupération des données a constaté que la bouée avait été tractée sur 500 m vers l'Est à proximité de la bouée cardinale. Après inspection, des dégâts ont été constatés sur la ligne de mouillage. Entre autres, les 4 sondes CTD YSI fixées le long de la ligne avaient été arrachées. Les dernières données de température et salinité acquises depuis la récupération du 16 mai avaient donc été perdues. Le courantomètre n'a pas été endommagé et les données ont pu être correctement et intégralement récupérées. L'étude du fichier de courant a permis de déterminer que l'accrochage s'était produit le 3 Juillet 2003 au petit matin et que la bouée avait été tractée durant quelques heures (vraisemblablement par un chalutier). Suite à la perte des 4 sondes CTD YSI, du matériel neuf a été commandé (4 sondes CTD SeaBird équivalentes aux précédentes) et installé le 2 août 2003 aux mêmes emplacements que précédemment. Le 30 septembre 2003, le courantomètre s'est arrêté en raison d'un problème d'alimentation électrique : lors de l'accrochage du 3 juillet 2003 un panneau solaire avait été endommagé entraînant une décharge de la batterie. Une récupération a été effectuée le 7 novembre 2003. La récupération finale de la bouée a été effectuée le 25 novembre 2003. Ces informations apportent un bon contrôle sur la qualité des données obtenues. Le rapport délivré avec les données apportent toutes les informations nécessaires sur le matériel déployé.

L'analyse des mesures de courant est scindée en 2 parties distinctes : période 1 (11/03 - 16/05) et période 2 (16/05 - 25/11).

Téthys termine son rapport en postulant que la campagne qui regroupe presque 3 saisons (été, automne et hiver) a permis de mettre en évidence les caractéristiques principales des courants, des vents, de la température et de la salinité de l'eau, ainsi que leurs variations dans le temps.

4.2 Synthèse des données semi-quantitatives

Les données présentées dans cette section sont extraites des rapports suivants :

- rapport SMNLR. Mettre références exactes.
- rapport EID-Med. Mettre références exactes.

- rapport BCEOM

On a confronté ces différentes sources de données et regroupé les résultats en trois catégories : vents, agitation et houle, et courants.

4.2.1 Conditions de Vent

4.2.1.1 Secteur du chantier D (lido de Sète)

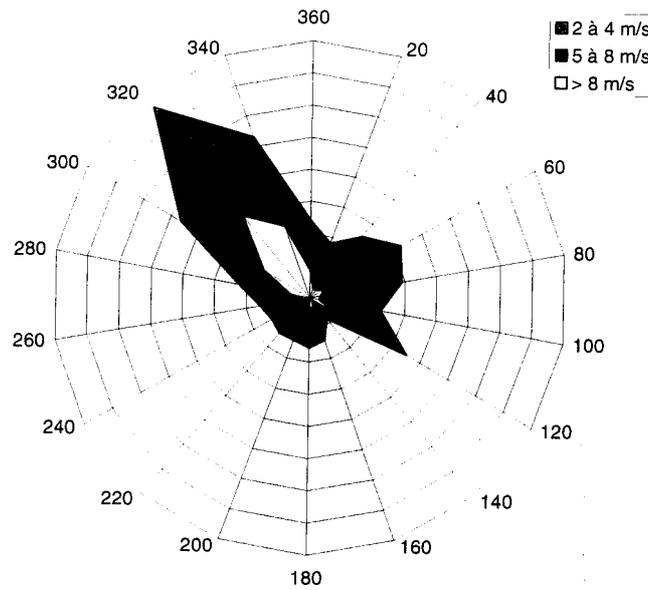


FIG. 4.3 – Rose des Vents à Sète

Sur le lido de Sète (figure 4.3), la Tramontane (vent de secteur NW) représente environ 60% de l'activité éolienne. C'est le vent le plus fort dans la région. Les vitesses moyennes varient entre 10 à 12 m/s. A Sète, le Mistral, vent de direction NE souffle environ 20% du temps. Troisième secteur dominant, les vents de SE, dont le Marin, dépassent rarement 17 à 20 m/s. Mais quelques valeurs extrêmes peuvent être mesurées. Par exemple, le record absolu pour Sète est de 46 m/s lors de la tempête de novembre 1982.

4.2.1.2 Secteur des chantiers A et B (Espiguette et Petit Travers)

On peut également rapporter une analyse des données de Fréjorgues (figures 4.4 et 4.5), sur la période juillet 2004 à mai 2005. Sur cette période, les facteurs remarquables sont l'absence de coups de vent marin, et la nette domination de longues périodes de vent de terre, principalement lors de l'hiver 2004-2005 et au printemps suivant. La période n'est donc pas marquée par la présence d'événements climatiques particulièrement violents (les vitesses de vent de terre sont restées conformes aux normales). Les données de vent acquises à Fréjorgues peuvent avoir un sens. On préférera à ces données non-littorales les valeurs mesurées sur des stations littorales, comparées aux résultats donnés par les modèles météorologiques meso-échelle.

Sur le secteur des lagunes Palavasiennes au sens large, on constate la prédominance des vents de terre sur les vents de mer. Les vents de terre représentent environ 60% du total des vents sur le littoral. Ils proviennent de deux directions différentes : la tramontane provient du NW et le mistral provient

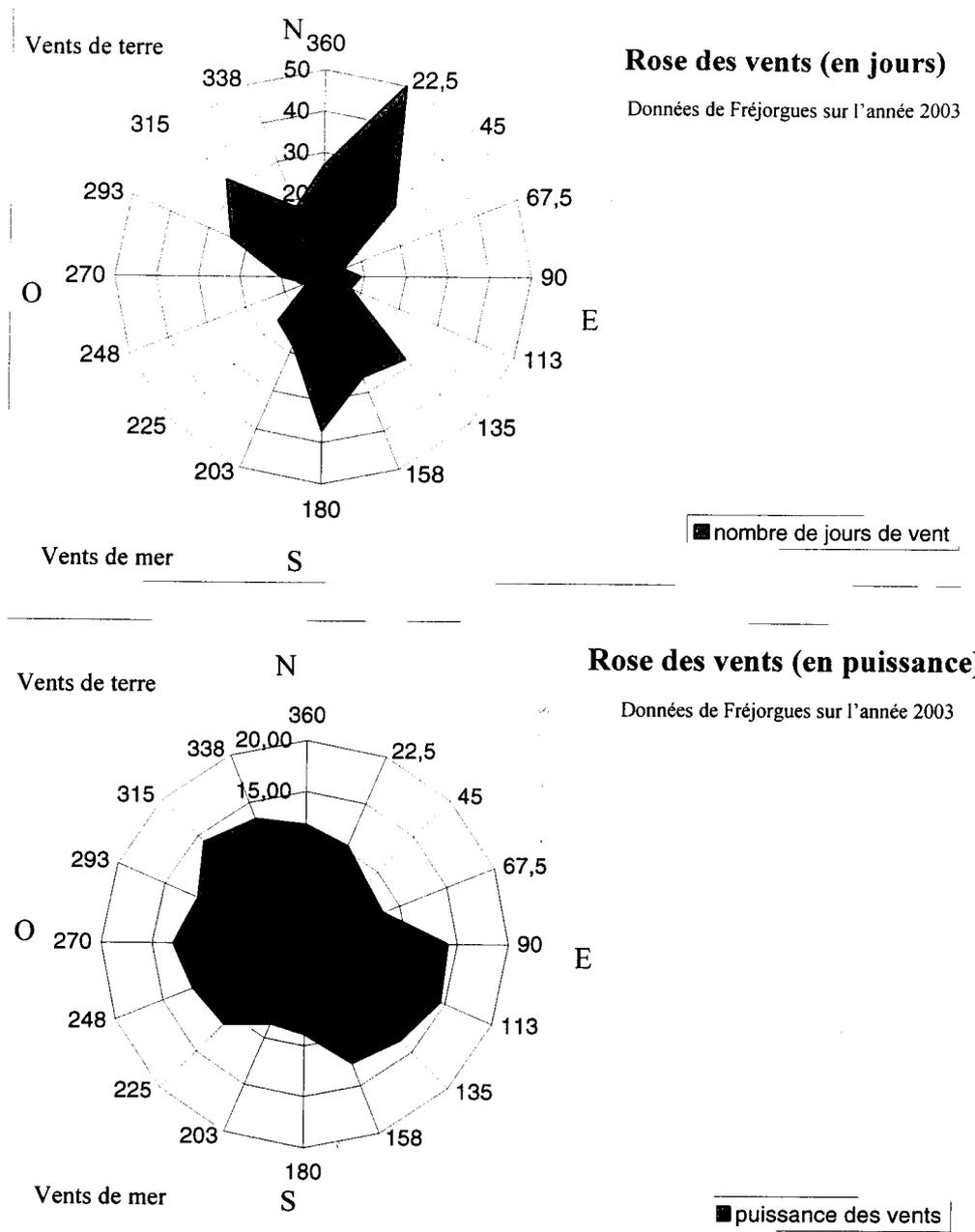


FIG. 4.4 – Rose des vents à la station de Montpellier Fréjorgues, pour des données de l'année 2003 (données Météo France, réalisation Isabelle Harranger. La figure du haut donne les distributions en jour ; la figure du bas donne les distributions en puissance.

du NNE. La tramontane souffle plus souvent que le mistral dans la région, Sa vitesse maximum est d'ailleurs assez élevée, jusqu'à 180km/h. En moyenne, c'est le mistral qui souffle le plus fort durant l'année. Les vents de mer (le Marin, le Grec, vent d'Espagne), représentent 40% des vents. Les vents de direction S-N appelés Marin ont une action importante lors des tempêtes puisqu'ils renforcent les houles (qui se déplacent en direction de la côte), et contribuent au relèvement important du niveau de la mer à la côte. Le Grec (SSE) est un vent qui souffle très fort même s'il souffle peu souvent. Le plus fort vent enregistré en 2003 était de secteur SSE, le 24 novembre : 32m/s durant une tempête. Pour l'année 2002, le plus fort vent était également de secteur SSE, le 14 novembre : 25m/s.

On peut également rapporter le fait que, dans le rapport TETHYS, sur la base des données de Montpellier Fréjorgues (figure 4.6), il est dit que les vents de secteur NNE apparaissent de façon

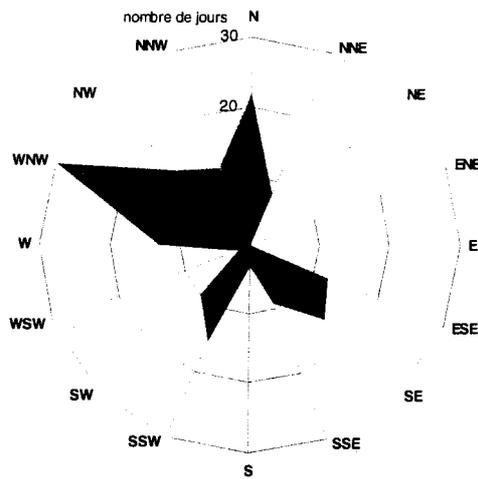


FIG. 4.5 – Rose des vents à la station de Montpellier Fréjorgues, pour des données sur la période juillet 2004 à mai 2005. Représentation des jours de vents (> 15 km/h) pour chaque direction.

quasiment exclusive durant les mois de mars et septembre. Les vents de sud sont fortement représentés en période estivale (de juin à août) : il s’agit des vents thermiques (brises de mer diurnes).

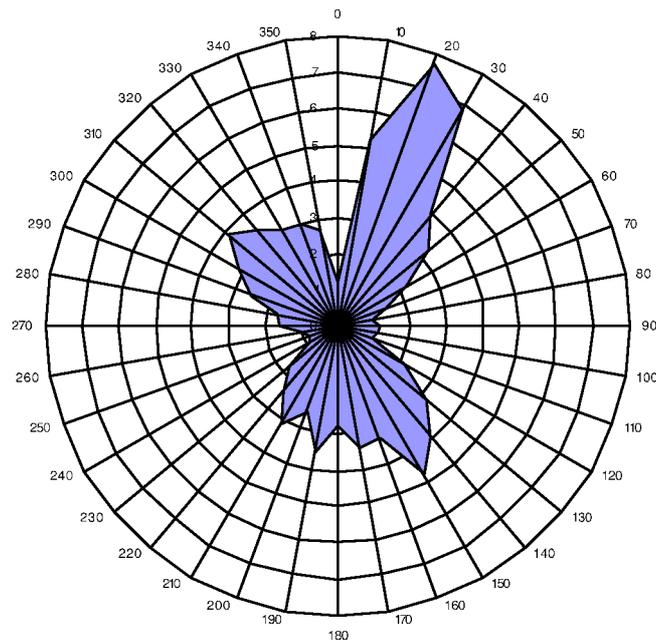


FIG. 4.6 – Rose des vents proposée dans le cadre de la campagne TETHYS, entre mars et novembre 2003, sur la base des données de la station de Montpellier Fréjorgues.

4.2.1.3 secteur chantiers C à A (Entre Frontignan et Espiguette)

On rapporte également des résultats obtenus sur le Grand Travers, à proximité du chantier B (figures 4.7 et 4.8.

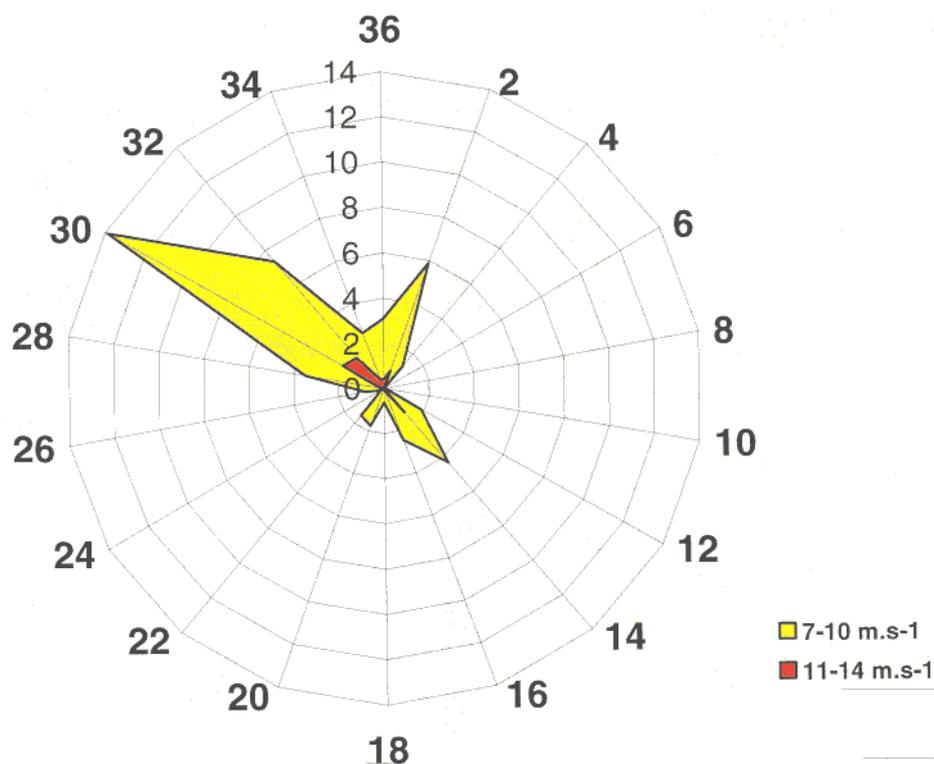


FIG. 4.7 – Rose des vents efficaces sans pluie pour des données de avril 2001 à avril 2002. Nombre de jours par mois où le vent a soufflé dans une direction donnée, dans un intervalle de vitesse défini et sans précipitations (<1mm). Le vent efficace correspond à un vent capable de transporter le sable, c'est-à-dire qu'il est au-dessus du seuil de mise en mouvement des grains. Mais cette rose des vents prend aussi en compte la pluviométrie puisque le sable mouillé ne se déplace pas sous l'effet éolien. Un vent est considéré comme efficace à partir de 6,55 m/s ce qui correspond à la classe 7 m/s. Pour les précipitations, il a été observé qu'à partir de 1 mm de hauteur de pluie par jour, il n'y avait pas de mouvement de sable. Les vents sont alors ignorés.

4.2.1.4 Secteur des chantiers C à F (Leucate et centre Golfe)

Le littoral occidental du Golfe du Lion est caractérisé par une nette prédominance des vents de terre sur les vents marins, avec les 3/4 du total (en direction) des vents des quatre stations météorologiques (Sète, cap de Leucate, Gruissan, Cap d'Agde). Les vents ont deux provenances principales (figure 4.9).

La tramontane est NW et souffle le plus fréquemment. Le mistral est NE et fait son apparition entre Gruissan et le Cap d'Agde et n'existe que de manière résiduelle plus à l'Ouest. Il est moins violent que la tramontane sur le secteur.

Les vents de mer représentent 1/4 des vents (en direction). Le vent de direction SE est appelé le Marin. Leur vitesse moyenne est nettement moins élevée que celle des vents de terre, en particulier dans le narbonnais. Ils peuvent toutefois souffler tout aussi violemment : lors d'une tempête de décembre 1997, ils ont atteint les vitesses extrêmes de 50 m/s au cap Leucate (pendant qu'ils soufflaient à 40m/s à Sète).

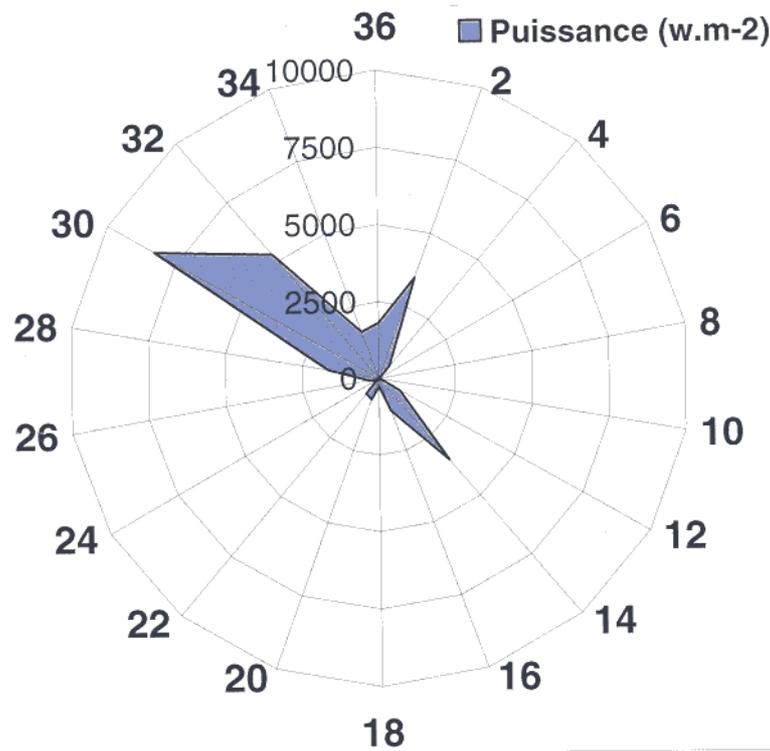


FIG. 4.8 – Roses de la puissance des vents pour des données de avril 2001 à avril 2002. Cette puissance est fonction de la vitesse du vent au cube. La puissance est donnée en W/m², Ce type de représentation n'apporte rien de plus (en terme de détermination des forçages académiques pour les modélisations pré-litorales et littorales) que celle de la figure 4.7.

4.2.1.5 Secteur du chantier H (Pointe du Racou / Tech)

La source de données la plus proche du site de l'étude est constituée par les mesures des vents au Cap Béar (figure 4.10 et 4.11). Les vents de terre représentent près de 75% des observations, ils correspondent pour l'essentiel à la tramontane qui provient du secteur 300 à 340 Nord (centré sur le NW). Les vents de mer représentent 25% des observations qui pour l'essentiel proviennent du secteur SE à S. Du point de vue de la répartition saisonnière, la tramontane représente, quelque soit la saison, au moins 60% des observations. Elle est cependant plus fréquente en automne et en hiver. C'est au printemps que la tramontane souffle le plus violemment. Les vents de mer sont plus fréquents en été (brise de mer) et au printemps. C'est en automne qu'ils sont les plus violents.

4.2.1.6 Agly / Cap Leucate

La rose des vents à Cap Leucate (figures 4.12 et 4.13) montre que les vents du secteur NW (280-340 degrés) dominent en fréquence (55% des observations) et en intensité (29,2% sont supérieurs à 8 m/s). Ensuite ce sont les vents de secteur SE (100-160 degrés) qui prédominent avec 17,6% des observations (0,8% montre des vents supérieurs à 8 m/s). Au large, les vents de terre sont dominants parmi les vents supérieurs à force 8. On retrouve néanmoins un petit pic au niveau des vents de secteur E (figures 4.14 et ??).

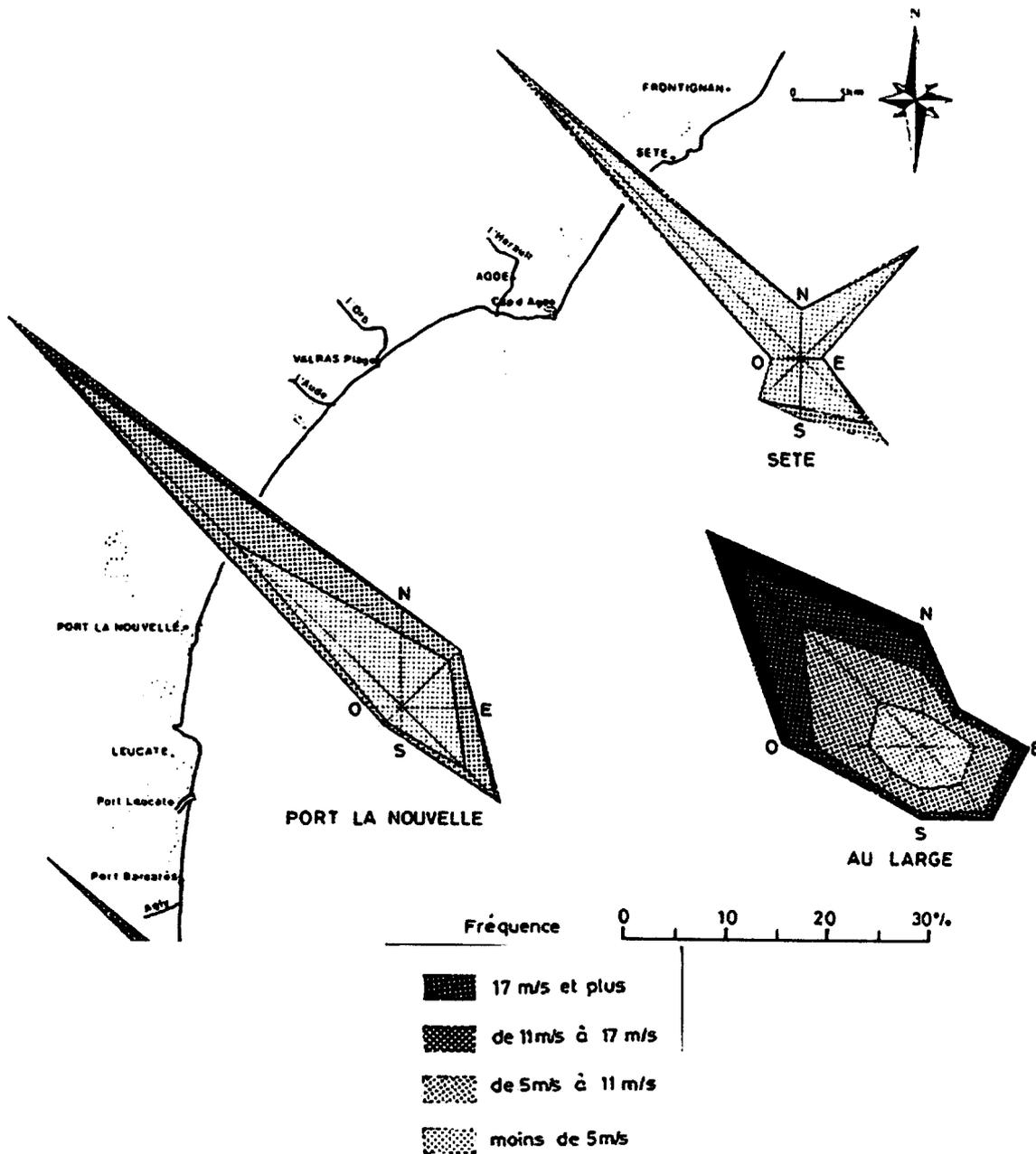


FIG. 4.9 – Rose des vents annuelle (LCHF, 1984).

4.2.1.7 Secteur Orb-Aude (chantier F)

Les enregistrements à l'aérodrome de Vias (figures 4.15 et ??) montre que les vents de secteur W (240-320 degrés) dominant en fréquence (45,5% des observations) et en intensité (5,3% sont supérieurs à 8 m/s). Ensuite se sont les vents de secteur SE (100-160 degrés) qui prédominent avec 13,5% des observations. 1,2% des observations montrent des vitesses supérieures à 8 m/s. Au large, les vents de terre sont dominants parmi les vents supérieurs à force 8. On retrouve néanmoins un petit pic au niveau des vents de secteur E

Azimuts	1 à 7 m/s	8 à 17 m/s	18 à 24 m/s	> 24 m/s	Total
20	6	2			8
40	5				7
60	5				6
80	5				5
100	5				6
120	26	12			39
140	35	20	1		57
160	31	23	1		55
180	28	17			46
200	14	6			21
220	10	3			13
240	3	1			6
260	2				2
280	10	4			14
300	94	86	23	7	210
320	115	135	39	10	299
340	29	36	13	3	82
360	15	10	1		26

FIG. 4.10 – Données de vent au Cap Béar (SMNLR).

4.2.1.8 secteur chantier C et D (Sète à Villeneuve Les Maguelone)

Un traitement de séries statistiques de vents de 1949 à 1998 enregistré à Sète permet de dégager une individualisation selon trois secteurs (figures 4.16 et 4.17) :

- Des flux de NW avec pour vent dominant la Tramontane (froid et sec de secteur 300 à 340). Ce vent violent représente 36% des observations à Sète avec une résultante orientée au NNW. Il peut atteindre 135 à 153 km/h lors des phénomènes paroxysmaux.
- Des flux de NE avec le Mistral (20 à 30) pouvant atteindre 100 km/h à Sète. Il représente 15% des vents de terre sur le secteur d'étude.
- Des flux de SE, dont le marin (120 à 140) représentent 15% des observations. Ce vent, chaud et humide, peut soulever des mers fortes en se conjuguant avec des houles venues du large, ce qui fût le cas lors de la tempête de novembre - décembre 1997 une vitesse de 44m/s est alors atteinte.

Les vents de terre sont constants sur l'ensemble de l'année climatique (50% des observations). Ces vents s'opposent au vent marin généralement plus faible en fréquence et en intensité.

4.2.2 Conditions de houle et agitation

4.2.2.1 secteur du chantier H (Tech et Pointe du Racou)

La base de données utilisée est constituée par les observations des navires entre 1961 et 1980. Dans la zone prise en compte elle comprend 27565 observations mers de vents et houles confondues.

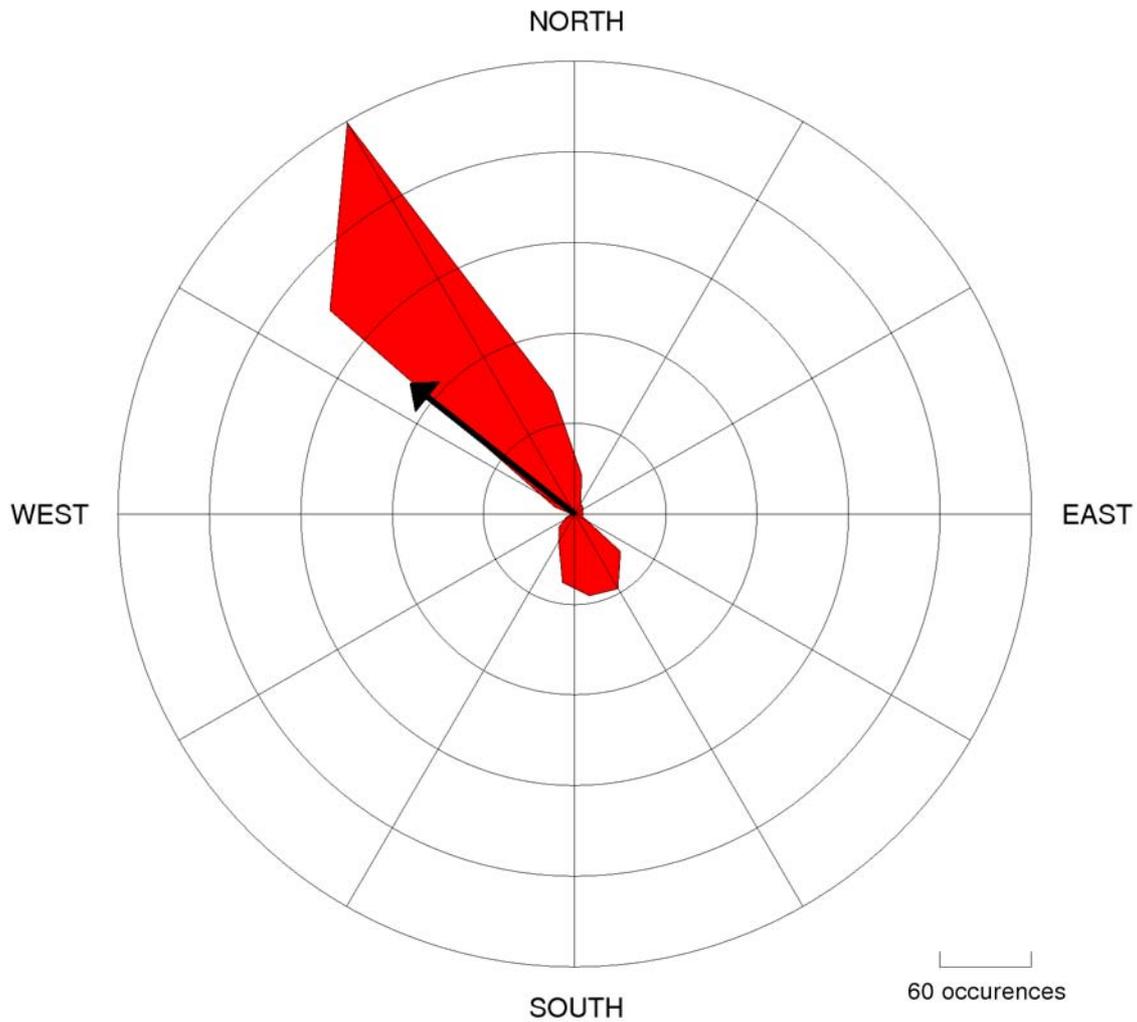


FIG. 4.11 – Rose des vents au cap Béar. Réalisée d’après les données du tableau 4.10.

Ont été prises en compte les données dont la direction de provenance est comprise entre N10 et N180, susceptibles d’affecter le littoral. Les autres données sont assimilées à des calmes. Les répartitions des hauteurs H_s toutes directions et périodes confondues sont données :

- 8,5% des agitations ont des hauteurs comprises entre 0,5 et 1m.
- 3,53% entre 1,5 et 2m.
- 1,06% entre 2,5 et 3m.
- 0,4% sont supérieures à 3,5m.

Les calmes sont de 86,8%, valeur obtenue en ajoutant les observations de $H_s = 0,1m$ à celles assimilées à des calmes mentionnées plus haut. Les périodes d’agitation sont relativement courtes puisque 95% des observations avec $H_s > 0,5m$ correspondent à des périodes inférieures à 6s. Les directions de propagation mettent en évidence des fréquences comprises entre 0,7 et 0,9% pour chacun des secteurs de 10 degrés compris entre N50 et N90, ainsi que des fréquences de 1,2 à 1,5% pour chacun des secteurs de 10 degrés compris entre N90 et N150.

4.2.2.2 Secteur de Leucate à Sète (centre golfe)

La houle du large provient du secteur E à SE. Son amplitude, sa période et sa longueur d’onde sont plus élevées que pour les houles engendrées par les vents de terre. Les houles du secteur E à SE sont

Azimuts	2 à 4 m/s	5 à 8 m/s	> 8 m/s	Total
20	2.4	1.4	0.1	3.9
40	1.4	0.8	0.2	2.4
60	1.1	0.8	0.2	2.1
80	1.1	1.0	0.3	2.4
100	1.1	1.1	0.8	2.8
120	1.5	1.7	2.9	6.0
140	1.3	1.2	2.8	5.4
160	1.0	0.7	0.5	2.2
180	1.3	1.2	0.2	2.7
200	1.1	0.4	0.0	1.6
220	1.3	0.1	0.0	1.4
240	1.0	0.4	0.0	1.4
260	0.8	0.3	0.0	1.2
280	1.8	2.5	1.1	5.4
300	2.1	7.9	18.1	28.2
320	2.0	5.3	9.9	17.3
340	2.6	2.6	0.8	6.0
360	1.9	1.0	0.0	2.9
Total	26.8	30.5	38.0	95.3

FIG. 4.12 – Données de vent au Cap Leucate (SMNLR) sur la base de données de 1995 à 2002, avec 7 observation/jour.

relativement plus fréquentes au N qu’au S, car pour les houles engendrées par les vents continentaux, le fetch est trop court dans la partie septentrionale du Golfe du Lion. Le Catalogue Sédimentologique des Côtes Françaises fournit surtout les données à une extrémité de la zone, c’est à dire à Sète.

A Sète, les plans de vague dressés par la SOGREAH (1985) pour les houles dominantes du SE révèlent une dispersion de l’énergie des houles à la hauteur de la petite baie formée par la partie orientale de la plage de la Corniche, au pied du Mont St. Clair. Les houles de SE attaquent le rivage quasi frontalement. De Vias au Cap d’Agde, les phénomènes de convergence et de divergence sont liés aux changements fréquents d’orientation du rivage, qui sont marqués par une succession de petites baies et de pointes rocheuses. Sur le plan de vague dressé pour la direction dominante des houles (SE), on observe que le littoral entre la Redoute et Vias est plus exposé que les rivages situés plus à l’Est. On notera la convergence d’orthogonales des houles à la hauteur du Libron. A l’est de Vias, le phénomène de divergence l’emporte. On remarque également que la petite île du Brescou, près du Cap d’Agde, crée derrière elle une zone d’abris : elle provoque une diffraction des vagues qui s’amortissent en arrière par divergence. Seule la plage du grau d’Agde, près de l’embouchure de l’Hérault, voit une concentration de l’énergie des houles dans sa partie occidentale (chantier E).

Mais ceci repose sur une détermination de l’hydrodynamique à la côte à partir de plans de vagues, donc de modélisations, et ne constitue pas une source fiable de données.

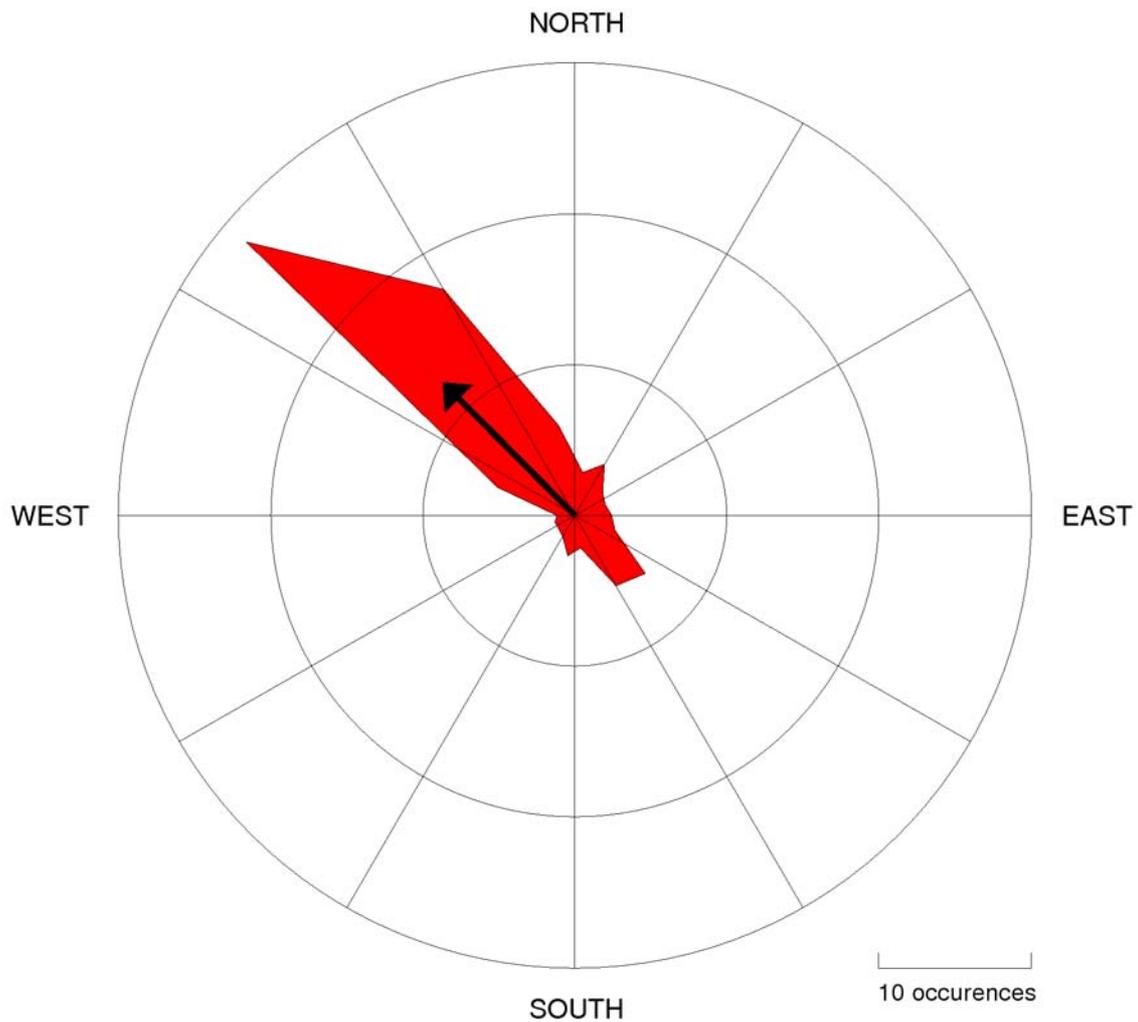


FIG. 4.13 – Rose des vents au Cap Leucate. Réalisée d’après les données du tableau 4.12.

4.2.2.3 secteur chantier A à C (Golfe d’Aigues-Mortes)

Dans le rapport SMNLR, on parle d’agitation. Le secteur de provenance de l’agitation concernant le littoral du Golfe d’Aigues-Mortes est compris entre N85 et N265. Par secteur, la répartition de l’agitation montre que les agitations prépondérantes sont celles des secteurs E et SSE. Le découpage directionnel en trois secteurs d’intérêt a été déterminé en fonction de la climatologie des états de mer sur la zone du golfe qui sont globalement représentables en trois directions équivalentes : N135 (69%), N180 (17%) et N245 (14%). L’essentiel des périodes (74%) est compris entre 3s et 7s, gamme pour laquelle la hauteur des vagues est généralement inférieure à 1,5 à 2m (hauteur significative). Pour les périodes de plus de 7s, les hauteurs significatives sont en majorité supérieures à 2m.

4.2.3 Conditions de courants

4.2.3.1 Secteur des chantiers A à D (Golfe d’Aigues-Mortes)

La campagne TETHYS a permis de mesurer les courants sur la colonne d’eau en zone pré-littorale (- 30 mètres de bathymétrie), au centre du Golfe d’Aigues-Mortes. La figure 4.19 représente les

Direction du vent	Vent > force 8
345-15	13.5
15 - 45	1.3
45 - 75	0.2
75 - 105	0.6
105 - 135	0.7
135 - 165	0.2
165 - 195	0.2
195 - 225	0.9
225 - 255	0.3
255 - 285	1.4
285 - 315	24.9
315 - 345	55.8

FIG. 4.14 – Tableau des fréquences relatives des vents < force 8 au large du système Agly Leucate, Golfe du Lion occidental

Azimuts	2 à 4 m/s	5 à 8 m/s	> 8 m/s	Total
20	4.0	0.9	0	4.9
40	2.8	1.1	0	4.0
60	2.0	1.4	0	3.4
80	1.5	1.5	0.1	3.1
100	1.4	2.2	0.5	4.0
120	1.3	2.2	0.4	3.9
140	1.7	1.0	0.2	2.8
160	2.1	0.9	0.1	3.0
180	1.4	0.5	0.0	2.0
200	0.9	0.1	0.0	1.1
220	1.3	0.2	0.0	1.5
240	3.2	1.6	0.1	4.8
260	6.7	4.7	0.8	12.2
280	5.8	4.6	1.4	12.9
300	3.5	4.5	1.8	9.7
320	2.3	3.2	1.1	5.6
340	2.3	0.9	0.2	3.4
360	2.6	0.3	0.0	2.9
Total	46.9	31.8	6.7	85.3

FIG. 4.15 – Tableau des vents mesurés à Vias

courants de surface sur les périodes 1 (mars à mai 2003) et 2 (juin à novembre 2003).

Téthys propose une analyse comparée de ces deux sets de données de courant : les directions

Azimuts	2 à 4 m/s	5 à 8 m/s	> 8 m/s	Total
20	1.25	1.59	1.00	3.85
40	1.72	2.85	0.82	5.40
60	2.20	3.73	1.24	7.19
80	2.26	3.08	0.68	6.03
100	1.76	2.21	0.79	4.77
120	2.29	2.88	2.10	7.28
140	0.37	0.46	0.27	1.12
160	0.96	1.03	0.65	2.66
180	1.26	1.18	0.58	3.03
200	1.26	1.42	0.22	2.91
220	1.08	1.56	0.52	3.16
240	1.11	1.27	0.15	2.54
260	1.06	1.56	0.52	3.16
280	1.14	2.07	1.57	4.79
300	1.18	4.15	4.42	9.77
320	1.49	5.51	8.42	15.43
340	1.42	3.10	4.13	8.66
360	1.15	1.88	1.72	4.76
Total	25.06	41.64	29.59	96.29

FIG. 4.16 – Tableau des vents donnés à Sète

principales des courants de subsurface entre les deux périodes de mesure ne correspondent pas. Pour les faibles vitesses (< 20 cm/s), la répartition des courants est plus asymétrique pour la période 2, favorisant les courant portant à l'Ouest. Concernant les vitesses les plus élevées (> 40 cm/s), les directions principales pour les deux périodes sont presque à 90 degrés l'une de l'autre. La période 1 correspond schématiquement au printemps, alors que la période 2 rassemble l'été et l'automne. La comparaison des deux séries de données, indiquerait donc que les courants de subsurface les plus forts portent principalement au SE au printemps, alors qu'ils portent au SW en été et en automne. Les courants les plus fréquents (< 20 cm/s) paraissent plus homogènes au printemps qu'en été et automne. Néanmoins, il est délicat de comparer les deux périodes de mesures : la période 1 n'intègre des données que sur 2 mois, alors que la période 2 moyenne les informations sur 6 mois.

D'autres graphes montrent que la répartition verticale des courants est relativement homogène, sans segmentation particulière. Ce qui est dit précédemment reste valable en profondeur sur la période considérée.

4.3 Détermination des conditions académiques

Sur la base de l'analyse et le recouplement des données précédentes, on propose un premier choix de condition académiques à utiliser pour la modélisation et la réalisation de l'Atlas Hydrodynamique. Il est évident que ce choix est amené à évoluer dans le temps du projet NAUSICAA.

On résume dans le tableau suivant les conditions retenues par domaine pré-littoral et par chantier.

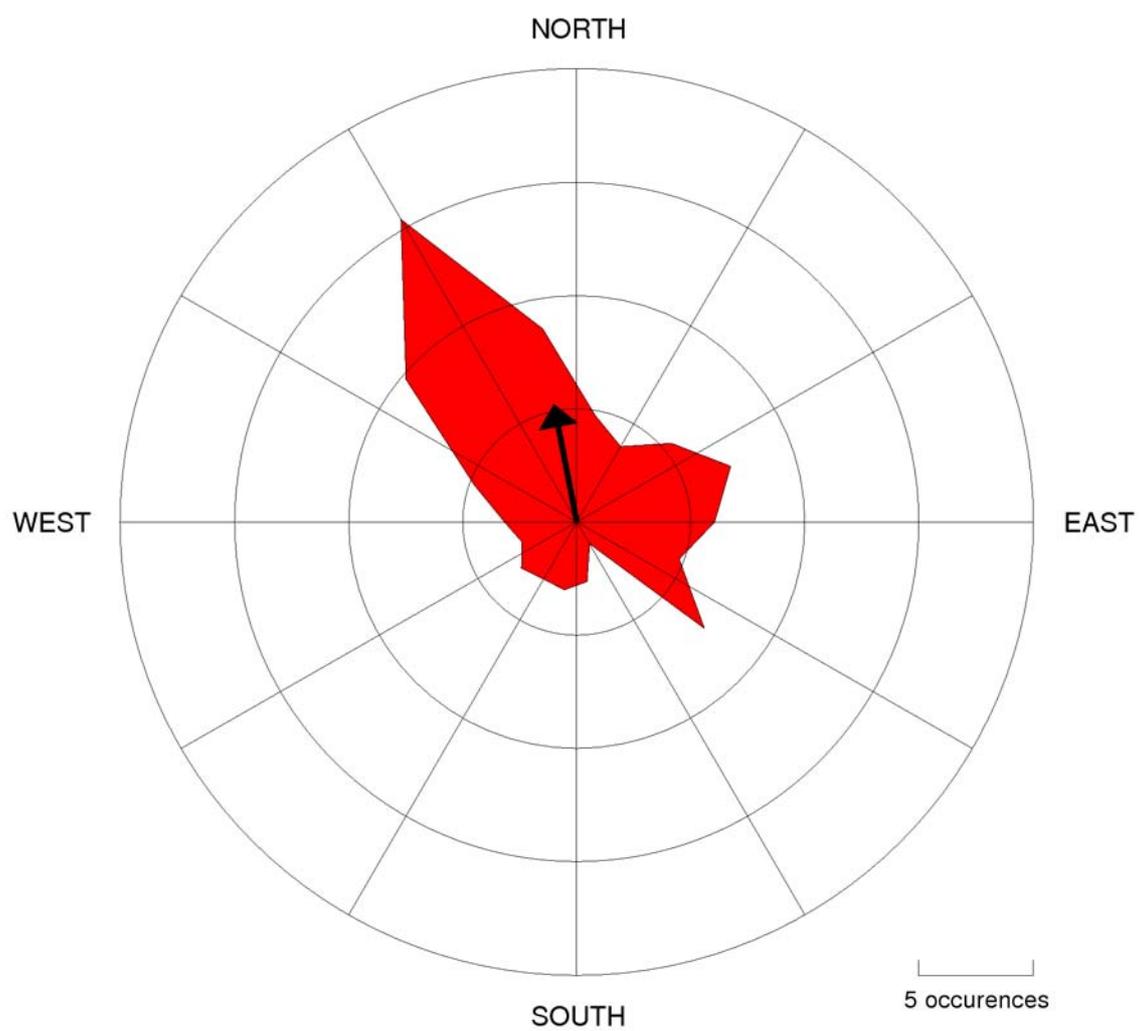


FIG. 4.17 – Rose des vents à Sète. Réalisée d’après les données du tableau 4.16.

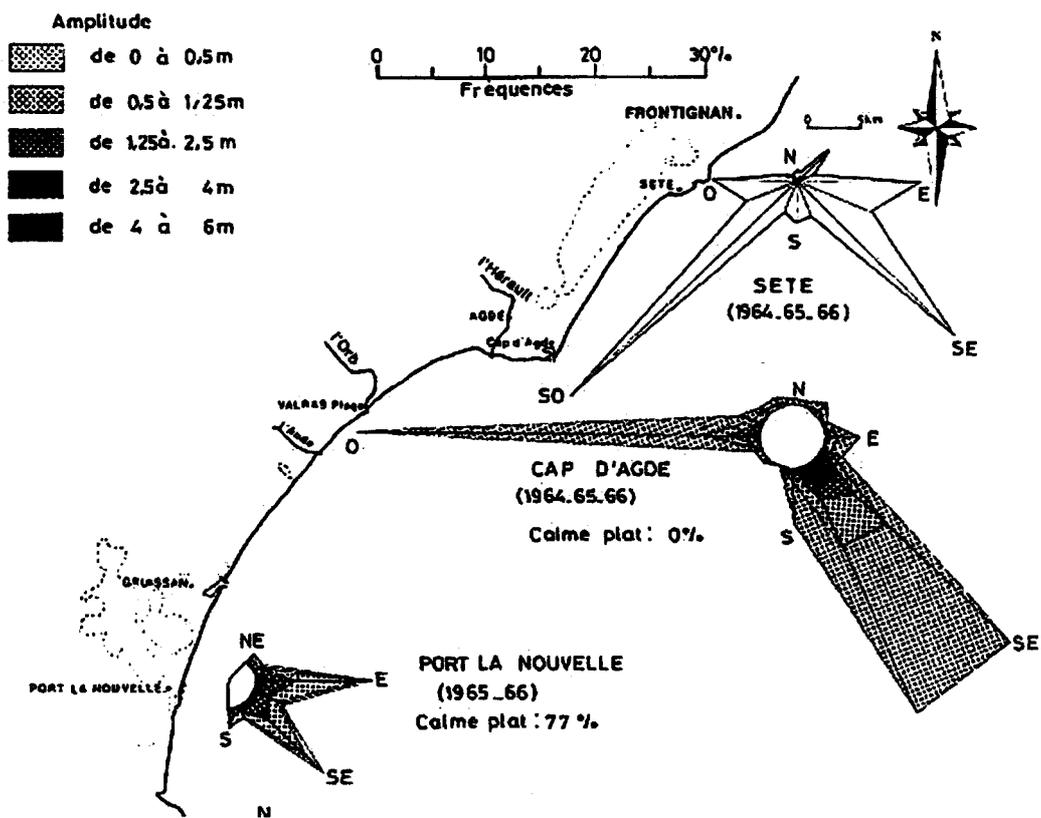


FIG. 4.18 – Rose des houles pré-littorales annuelles (LCHF, 1984). Sur le graphe, les houles sur le secteur Sète sont placées assez près de la côte, mais elles ne sont valables que pour la zone pré-littorale.

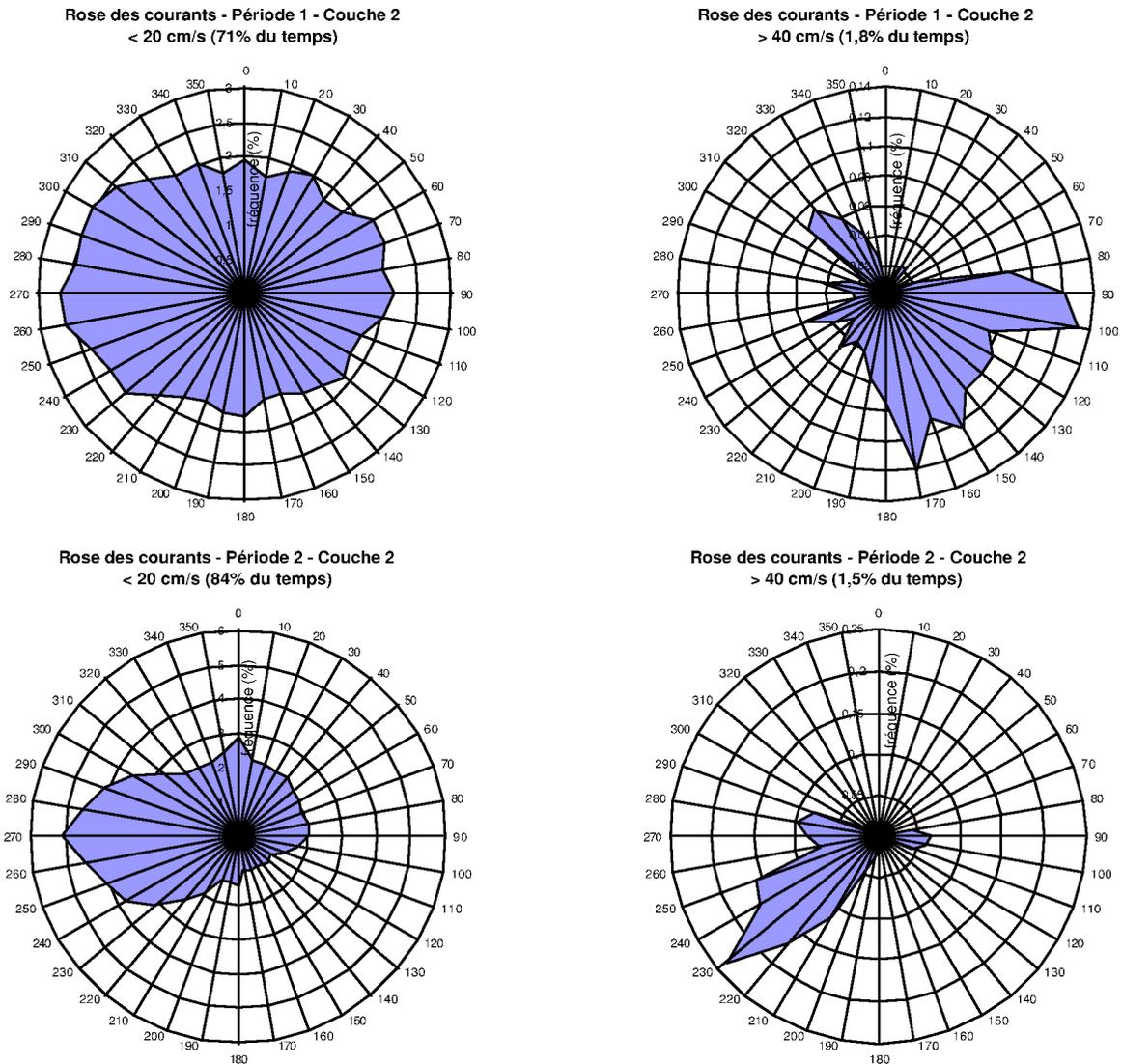


FIG. 4.19 – Rose des courants réalisées sur la base de la campagne TETHYS dans le golfe d’Aigues-Mortes en 2003. Représentation de la répartition fréquentielle des directions de courants de surface (mesurés à -5m) sur les périodes 1 (mars à mai 2003) et 2 (juin à novembre 2003). Graphique en haut à gauche : distribution pour les vitesses inférieures à 20 cm/s sur la période 1. Graphique en haut à droite : distribution pour les vitesses supérieures à 40cm/s (caractéristiques des tempêtes) sur la période 1. Graphique en bas à gauche : distribution pour les vitesses inférieures à 20 cm/s sur la période 2. Graphique en bas à droite : distribution pour les vitesses supérieures à 40cm/s (caractéristiques des tempêtes) sur la période 2.

Chapitre 5

Présentation des outils numériques utilisés

Les modélisations réalisées à l'échelle dite pré-littorale permettent de forcer les modélisations réalisées à l'échelle littorale. L'échelle pré-littorale correspond à des domaines de quelques dizaines de kilomètre de long, entre les bathymétries 60m et la côte, en excluant la zone de déferlement. La seconde échelle est une échelle littorale au sens strict, c'est à dire concernant un linéaire de plage de l'ordre de quelques kilomètres au maximum, de la profondeur de fermeture de la houle au large à la plage.

A l'échelle littorale, la modélisation sera menée sur les chantiers décrits au chapitre 3. Les caractéristiques des modèles utilisés dans des études à ces échelles pré-littorales et littorales en contexte micro-tidal doivent répondre aux contraintes suivantes :

- à l'échelle pré-littorale, les courants de circulation générés par les vents et les gradients de salinité/température sont en compétition avec les courants de houle. Une approche permettant de tenir compte des effets couplés de ces deux familles de courants est donc nécessaire, en tenant également compte des transformations importantes de la houle (réfraction, diffraction, atténuation,...) lors de sa propagation sur le domaine pré-littoral.
- à l'échelle littorale, le déferlement de la houle à une grande influence sur les courants générés, ainsi que sur la surcote. Les effets de réfraction sont importants, et la diffraction peut l'être encore plus en présence de variations topobathymétriques importantes (par exemple sur les chantiers A, F, I et J) ou en présence d'ouvrages de protection, généralement émergés.

Dans ce contexte, nous avons opté pour l'utilisation de plusieurs codes répondant à ces conditions. Tout d'abord, le modèle de circulation SYMPHONIE, écrit par le LA Toulouse. D'autre part, les codes REFDIF (Kirby et Dalrymple, 1995) et SHORECIRC (Svendsen, 2001), réalisés par l'équipe du CACR. Enfin, le code RESYFE, réalisé sur la base de Symphonie, REFDIF par GEOSCIENCES-M (Denamiel, 2006). RESYFE représente les dernières avancées en terme de modélisation hydrodynamique dans la mesure où c'est un modèle permettant de rendre compte de l'interaction houle / courant en 3D. RESYFE dispose de toutes les caractéristiques de ses codes parents : gestion des forçages grande-échelle, forçage par le vent et les gradients de salinité-température, forçage aux exutoires des fleuves, prise en compte de la réfraction et diffraction, prise en compte de l'effet de la houle sur la circulation 3D. Dans ce document, il est également question d'ALADIN. Il s'agit d'un modèle de circulation atmosphérique à "relativement" haute résolution ($0.1^{\circ} \times 0.1^{\circ}$) développé à Météo-France, utilisé dans des projets d'océanographie opérationnelle comme MFSTEP pour forcer les modèles de circulation océanique. Nous utilisons les forçages ALADIN pour les modélisations à l'échelle pré-littorale. Enfin le modèle WAVEWATCH III est un modèle de génération de vague. Il ne sera présenté qu'en fin de PHASE B. Ce chapitre est une présentation détaillée de ces modèles numériques ainsi que des outils qui permettent de les manipuler. SHORECIRC n'est présenté que de manière résumée, car des développements sont encore en cours. Une présentation détaillée sera faite au cours de la

phase B.

5.1 Le modèle de propagation de la houle REFDIF

5.1.1 REFDIF : Aspects théoriques et numériques

Comme nous l'avons vu précédemment nous avons décidé (1) de ne pas modéliser la génération et la transformation des vagues en zone pré-littorale et (2) de rendre compte des interactions houle/fond grâce à un modèle en résolution de phase.

Notre choix c'est porté sur le modèle en résolution de phase : REF/DIF, développé par le Center of Applied Coastal Research (CACR), Delaware, USA (Kirby et Dalrymple, 1983 ; Kirby, 1995). Ce modèle est particulièrement adapté à la modélisation de la réfraction, la diffraction, l'atténuation et le shoaling de la houle. De plus il avait déjà été utilisé par l'équipe d'accueil (Bouchette, 2001).

Dans cette section, le repère précédemment défini n'est plus valable. En effet, le modèle REF/DIF est tel que pour chaque domaine, l'axe Ox de vecteur directeur unitaire \vec{i} soit orienté du large vers la côte et l'axe Oy suive la frontière ouverte sur le large. L'angle de la houle θ que forme la houle est tel que : $\theta = (\vec{i}, \vec{k})$. Nous distinguerons quatre cas différents, côte à l'Est, côte à l'Ouest, côte au Nord ou côte au Sud (figure 4.1).

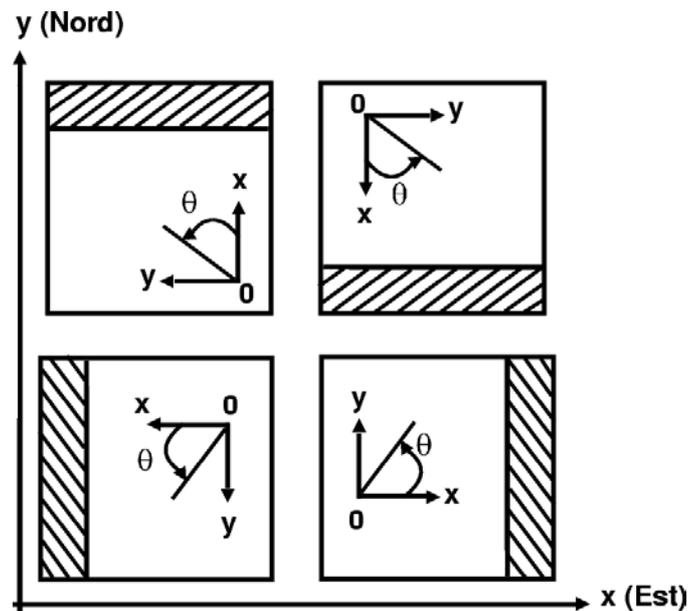


FIG. 5.1 – Définition des axes et de l'angle de propagation de la houle utilisés par le modèle REF/DIF.

En ce qui concerne la modélisation de la houle, le modèle REF/DIF prend en compte les effets non linéaires limités au troisième ordre puisqu'il génère des houles de Stokes du troisième ordre en profondeur finie. La forme de la houle (forme de la surface libre complexe) modélisée est donc donnée par :

$$\eta(x, y, t) = A e^{i(\vec{k} \cdot \vec{x} - \sigma' t)} + \alpha_2 A^2 e^{2i(\vec{k} \cdot \vec{x} - \sigma' t)} + \alpha_3 A^3 e^{3i(\vec{k} \cdot \vec{x} - \sigma' t)} \quad (4.1)$$

Avec :

- α_2, α_3 les coefficients des ordres supérieurs ;
- $A = A(x, y)$ l'amplitude complexe de la houle

En ce qui concerne la modélisation de la propagation de la houle, l'équation de Berkhoff (mild-slope equation) linéaire (Berkhoff, 1972) sous sa forme parabolique (Radder, 1979), la relation de dispersion et l'équation de diffraction sous sa forme parabolique (Mei et Tuck, 1980) sont à la base du modèle REF/DIF qui utilise une discrétisation spatiale en différences finies (mailles rectangulaires de taille constantes).

Cependant ces trois équations ont été modifiées afin d'introduire d'une part les effets non linéaires de la houle de Stokes de troisième ordre (Kirby et Dalrymple, 1984) et d'autre part les effets des courants de circulations 2D (Booij, 1981 ; Kirby et Dalrymple, 1984). Les équations régissant le modèle sont donc :

1 - Couplage entre l'équation de Berkhoff et l'équation de diffraction modifiées

$$\begin{aligned} & (C_g + U_{Doppler}) \frac{\partial A}{\partial x} + V_{Doppler} \frac{\partial A}{\partial y} + i (\ddot{k} - k) A \\ & + \frac{\sigma'}{2} \left\{ \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{C_g + U_{Doppler}}{\sigma'} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{V_{Doppler}}{\sigma'} \right) \right\} A \\ & - \frac{i}{2\sigma'} \frac{\partial}{\partial y} \left((CC_g - V_{Doppler}^2) \frac{\partial A}{\partial y} \right) - \sigma' \frac{k^2}{2} D |A|^2 A + \frac{\varpi}{2} = 0 \end{aligned} \quad (4.2)$$

Avec :

- \ddot{k} la moyenne suivant y du nombre d'onde
- $D = \frac{(\cosh(4kh) + 8 - 2\tanh^2(kh))}{8\sinh^4(kh)}$ l'apport du terme non linéaire (houle du troisième ordre)
- $\overrightarrow{U_{Doppler}} = (U_{Doppler}, V_{Doppler})$ les courants Doppler (voir chapitres 2 et 3)
- ϖ le facteur de dissipation

2 - Relation de dispersion (Hedge, 1976)

$$\sigma'^2 = gk \cdot \tanh \left(kh \left(1 + \frac{|A|}{h} \right) \right) \quad (4.3)$$

Cette équation de dispersion, différente de celle présentée au chapitre 1, permet de rendre compte des non linéarités de la houle.

D'autre part une des originalités de REF/DIF est de proposer différents types de dissipation pour modéliser le facteur de dissipation ϖ :

- dissipation par frottements visqueux :

A l'interface air/eau d'une part et à l'interface eau/sédiments, en considérant que la couche superficielle des sédiments peut être modélisée par une couche visqueuse à caractère dissipatif, la différence

de viscosité entre les deux milieux engendre une couche limite qui dissipe la houle. Le facteur de dissipation suit alors les lois de Phillips (1966) :

$$\begin{cases} \varpi_{Surf\ visqueux} = \frac{\sigma' k \sqrt{\frac{\nu}{2\sigma}} (1-i)}{\tanh(kh)} \\ \varpi_{fond\ visqueux} = \frac{2\sigma' k \sqrt{\frac{\nu}{2\sigma}} (1-i)}{\sinh(2kh)} \end{cases} \quad (4.4)$$

Avec ν la viscosité cinématique de l'eau.

- dissipation par porosité des sédiments :

Les fonds marins étant majoritairement constitués de matériaux granulaires poreux qui ont la capacité de dissiper la houle, le facteur de dissipation par porosité est donné par (Kirby et Dalrymple, 1992) :

$$\varpi_{poreux} = \frac{gkC_p(1-i)}{\cosh^2(kh)}$$

avec C_p le coefficient de perméabilité (en m^2), $C_p = 4.5 \cdot 10^{-11} m^2$.

- dissipation par turbulence :

Le facteur qui tient compte de la turbulence dans la couche limite à l'interface eau/sédiment est donné par (Dean et Dalrymple, 1984 ; Kirby et Dalrymple, 1992) :

$$\varpi_{turbulent} = \frac{2\sigma' k f |A| (1-i)}{3\pi \sinh(2kh) \sinh(kh)} \quad (4.6)$$

avec f le facteur de friction de Darcy-Weisbach, $f = 0.01$.

- dissipation par déferlement :

Lorsque la houle déferle le facteur de dissipation est modifié et se modélise par (Dally *et al.*, 1985 ; Kirby et Dalrymple, 1986) :

$$\varpi_{deferlement} = \frac{KC_g \left(1 - \left(\frac{\gamma h}{2|A|} \right)^2 \right)}{h}$$

avec : $\gamma = 0.4$ et $K = 0.017$ des constantes empiriques (Dally *et al.*, 1985)

Cette dissipation n'a lieu que lorsque le critère de déferlement est atteint. Celui utilisé par le modèle REF/DIF est donné par (Fredsoe et Deigaard, 1992) : $2|A| \geq 0.78h$

La dissipation globale de la houle peut alors s'exprimer par la somme de toutes ou partie des lois de dissipation qui viennent d'être présentées.

La dissipation liée au déferlement est toujours prise en compte alors que le choix entre les autres formes de dissipation est géré par l'utilisateur dans le modèle REF/DIF.

En ce qui concerne le choix parmi les lois de dissipation et la sensibilité du modèle à ces dernières, une étude complète a été réalisée par Bouchette (2001).

Il apparait dans cette étude que si tous les facteurs de dissipation sont pris en compte alors le point de déferlement des vagues est retardé au maximum. C'est le cas de figure qui sera toujours envisagé dans notre étude.

5.1.2 REFDIF : limitations du modèle

Au niveau des limitations liées aux processus physiques, le modèle REF/DIF ne modélise pas :

- la réflexion de la houle sur les obstacles qu'ils soient émergés ou immergés ;
- les caractéristiques de la houle lors du déferlement (par contre en dehors de la zone de déferlement, les caractéristiques de houle modélisées par REF/DIF sont valables sur la zone de surf et de swash). En effet lorsque le critère de déferlement donné par $2|A| \geq 0.78h$ (Fredsoe et Deigaard, 1992) est atteint alors le modèle REF/DIF stop la propagation de la houle définie au large et repropage jusqu'à la côte une onde monochromatique dont les caractéristiques sont celles calculées avant le déferlement ;
- l'effet du vent local sur la houle.

Au niveau des limitations d'ordre numérique, le modèle REF/DIF :

- impose que la taille des mailles de la grille soit assez fine pour permettre d'avoir 5 points de calcul par longueur d'onde de houle ;
- génère de nombreux artefacts numériques sur les bords du domaine lorsque la houle est introduite avec un angle. La conséquence de cette deuxième limitation est que l'introduction d'une houle inclinée réduit la zone dans laquelle le modèle donne des résultats valides.

Afin de montrer ces artefacts, des simulations ont été réalisées avec le modèle REF/DIF pour des houles de 2 m d'amplitude et de 10 s de période au large se propageant avec un angle d'incidence de : 0° , 20° et 40° (figure 4.2).

Lorsque la houle se propage avec un angle d'incidence nul au large alors le calcul des paramètres de houle par REF/DIF est valable sur l'ensemble du domaine. Par contre lorsque la houle se propage avec un angle d'incidence non nul (20° et 40° sur l'exemple) alors REF/DIF génère une zone de réflexion (à gauche du domaine) et une zone d'ombre (à droite du domaine) où le calcul de la houle n'est pas valable. Plus l'angle d'incidence de la houle est grand et plus les zones où le calcul de la houle n'est pas valable sont grandes.

Cette mauvaise modélisation des paramètres de la houle, pour les angles d'incidence non nuls, est caractéristique des modèles utilisant la forme parabolisée de l'équation de Berkhoff.

Les seules manières de s'en affranchir sont soit d'agrandir le domaine de modélisation afin que la zone que l'on souhaite étudier reste comprise dans la zone de validité du modèle REF/DIF même pour des angles importants (autorisé jusqu'à 60° au plus dans REF/DIF) soit de tourner le domaine de telle sorte qu'il soit incliné dans le sens de propagation de la houle (figure 4.3). Dans le cadre du projet NAUSICAA, nous envisageons d'utiliser une combinaison de ces deux méthodes en fonction du rendu souhaité sur l'atlas hydrodynamique. Le problème sera traité au cas par cas.

5.2 Le modèle de circulation océanique côtière SYMPHONIE

5.2.1 SYMPHONIE : cadre théorique et aspects numériques

Les modèles tridimensionnels de courantologie côtière reposent sur les équations primitives tridimensionnelles (par exemple Johns *et al.*, 1991).

Notre choix s'est porté sur le modèle SYMPHONIE, développé par le Pôle d'Océanographie Côtière (POC), Toulouse, France (Estournel *et al.*, 1997 ; Marsaleix *et al.*, 1998). En effet, d'une part il est particulièrement adapté à la modélisation côtière dans le Golfe du Lion où il a été validé à de nombreuses reprises et d'autre part il avait déjà été utilisé sur des zones pré-littorales comme le golfe de Fos (Ulses *et al.*, 2005). De même que REFDIF, il était utilisé par l'équipe (Petrenko *et al.*, 2005 ; Leredde *et al.*, 2006).

Modes barotrope / barocline Pour prendre en compte les ondes de gravité barotropes (2D) se propageant plus rapidement que les ondes de gravité baroclines (3D), le modèle SYMPHONIE distingue deux modes de calcul dont les pas de temps sont dissociés : le mode interne (mode barocline) et le mode externe (mode barotrope). La séparation des pas de temps entre ces deux modes est réalisée suivant la technique de Blumberg et Mellor (1987) et permet de rendre compte d'une part des courants moyennés sur la verticale réactualisés avec une résolution temporelle assez fine et d'autre part des courants tridimensionnels réactualisés avec un pas de temps moins fin.

Discrétisation spatiale des équations Le modèle SYMPHONIE utilise une discrétisation en différences finies (mailles rectangulaires de taille constante) de type Arakawa C (Arakawa et Suarez, 1983).

La discrétisation verticale est donnée en coordonnées sigma généralisées telles que : $\sigma = \frac{h+z}{D}$.

Les coordonnées sigma sont particulièrement adaptées lorsque l'on souhaite rendre compte des effets de la bathymétrie sur l'hydrodynamique cependant leur utilisation n'est pas recommandée lorsque l'on travaille avec des dénivellations bathymétriques importantes (Ulses, 2005). Récemment le modèle SYMPHONIE a été amélioré afin d'utiliser des coordonnées hybrides sigma-z qui permettent d'avoir une résolution adaptée aussi bien à la zone littorale que hauturière.

Selon la date des études menées, nous utiliserons par la suite soit les coordonnées sigma généralisées soit les coordonnées hybrides sigma-z.

Discrétisation temporelle des équations Le modèle SYMPHONIE utilise une discrétisation temporelle explicite avec un schéma saute-moutons [leapfrog] tel que la valeur au temps $t + 1$ de la variable A soit donnée par :

$$A^{t+1} = A^{t-1} + 2\Delta t \cdot F(A^t)$$

Avec :

- Δt le pas de temps du modèle
- F la fonction permettant de calculer A^{t+1} à partir de A^t

Un lissage temporel permettant d'éviter la divergence des solutions en agissant comme une force de rappel est donné par le schéma associé au filtre d'Asselin (1972) :

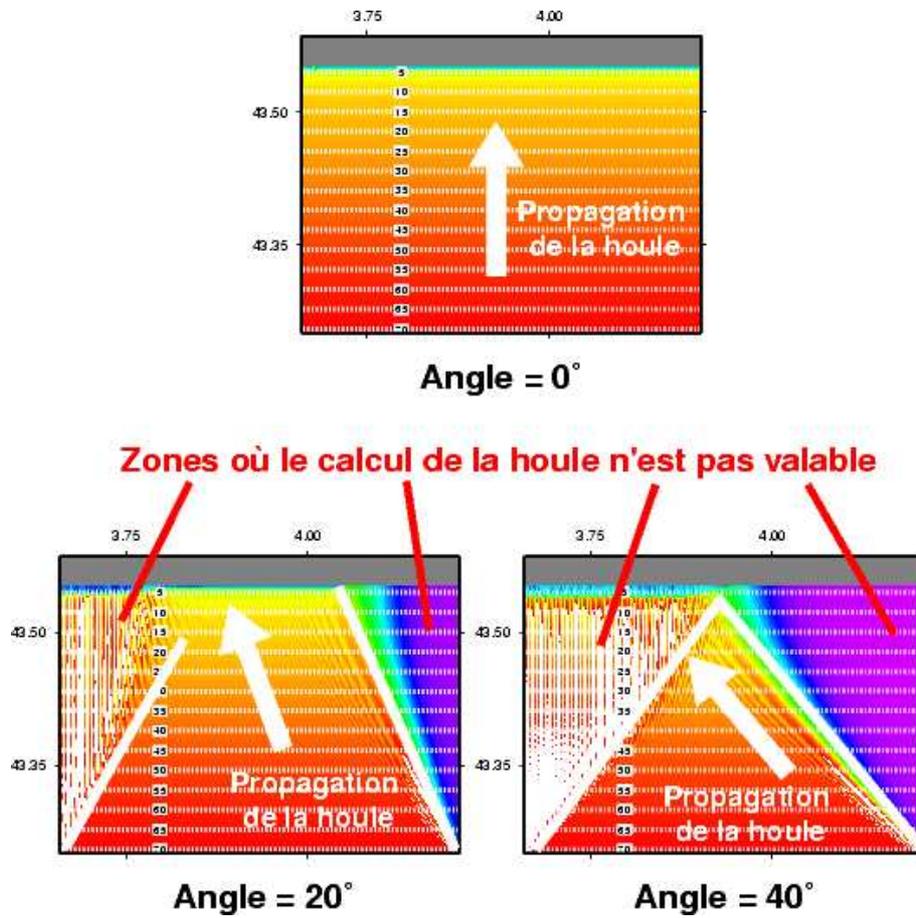


FIG. 5.2 – Mise en évidence des zones où la houle n’est pas modélisée correctement pas REF/DIF lorsqu’elle se propage avec un angle d’incidence non nul.

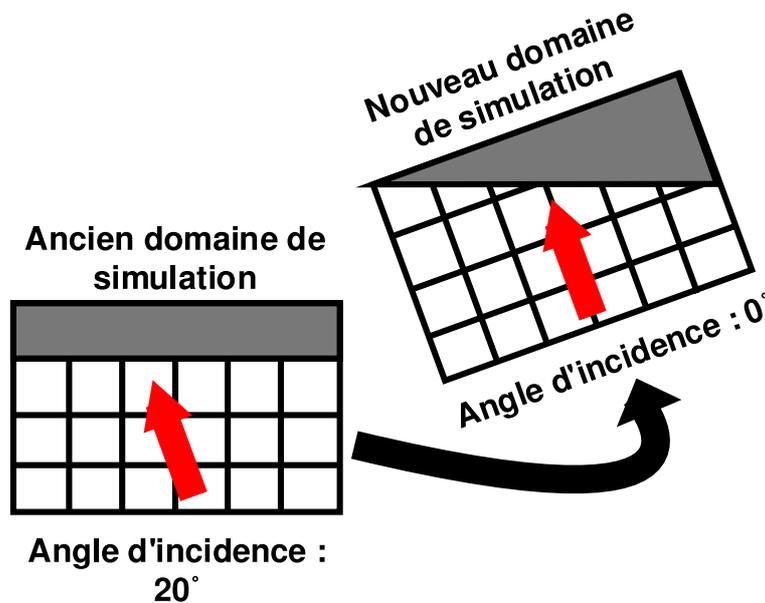


FIG. 5.3 – Inclinaison des grilles REF/DIF en fonction de l’angle d’incidence au large de la houle

$$A_{Asselin}^t = A^t + \frac{\alpha_{Asselin}}{2} (A^{t+1} - 2A^t + A^{t-1})$$

Avec $\alpha_{Asselin} = 0.3$ le coefficient du filtre d'Asselin.

Equations du modèle Les équations régissant le mode externe ont été décrites au chapitre 1 (1.67) et permettent d'obtenir les courants moyennés sur la verticale du mode externe : $\vec{u}_E = (u_E, v_E)$ tels que :

$$\vec{u}_E = \frac{\vec{Q}_c}{D} \quad (4.10)$$

Les équations régissant le mode interne et permettant d'obtenir les courants tridimensionnels $\vec{u}_I = (u_I, v_I)$ sont données en coordonnées sigma par :

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial D\bar{u}_I}{\partial t} + \frac{\partial D\bar{u}_I \bar{u}_I}{\partial x} + \frac{\partial D\bar{v}_I \bar{u}_I}{\partial y} + \frac{\partial \Omega \bar{u}_I}{\partial \sigma} - f D\bar{v}_I + \frac{\partial D P_c}{\partial x} = \\ \quad \frac{\partial}{\partial \sigma} \left(\sigma \frac{\partial D}{\partial x} P_c \right) - g D \frac{\partial \zeta_c}{\partial x} - \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial \sigma} \\ \frac{\partial D\bar{v}_I}{\partial t} + \frac{\partial D\bar{u}_I \bar{v}_I}{\partial x} + \frac{\partial D\bar{v}_I \bar{v}_I}{\partial y} + \frac{\partial \Omega \bar{v}_I}{\partial \sigma} + f D\bar{u}_I + \frac{\partial D P_c}{\partial y} = \\ \quad \frac{\partial}{\partial \sigma} \left(\sigma \frac{\partial D}{\partial y} P_c \right) - g D \frac{\partial \zeta_c}{\partial y} - \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial \sigma} \\ \frac{\partial P_c}{\partial \sigma} = -Dg \frac{\rho_c}{\rho_0} \end{array} \right. \quad (4.11)$$

Le couplage entre le mode interne et externe permet alors de calculer les courants de circulation :

$$\vec{u}_c = \vec{u}_I - \frac{1}{D} \int_{-h}^{\zeta_c} \vec{u}_I dz + \frac{1}{N} \sum_N \vec{u}_E \quad (4.12)$$

Avec N tel que le pas de temps du mode externe soit N fois plus petit que celui du mode interne.

Enfin, ces courants permettent de résoudre les équations de transport de salinité et de température (1.61) et l'équation de fermeture de la turbulence (1.62).

5.2.2 SYMPHONIE : Conditions d'utilisation du modèle

Pour utiliser le modèle SYMPHONIE en conditions réalistes il est nécessaire d'utiliser deux types de forçages :

- des forçages grande échelle,
- des forçages atmosphériques.

5.2.2.1 Forçages grande échelle

Une utilisation pratique du modèle SYMPHONIE en zone pré-littorale à sub-littorale impose d'avoir recours à une imbrication de grilles. Par exemple si l'on souhaite réaliser une simulation à l'échelle pré-littorale avec une résolution horizontale de 500 m par 500 m (application sur le golfe d'Aigues-Mortes, chapitre 8) on utilisera une première grille dont la résolution est de 1.5 km par 1.5 km qui permet de générer la circulation océanique à l'échelle régionale (par exemple : à l'échelle du Nord de la Méditerranée) puis une deuxième grille de résolution de 1 km par 1 km (jusqu'à 500 m par 500 m) qui rend compte de la circulation à l'échelle côtière et enfin une dernière grille de résolution

500 m par 500 m (jusqu'à 100 m par 100 m) qui couvre la zone pré-littorale étudiée. Si l'on souhaite encore zoomer sur la zone littorale (plateau de Frontignan, chapitre 8) on pourra réaliser une dernière imbrication avec une grille de 100 m par 100 m de résolution horizontale. Cette procédure permet d'une part d'initialiser la circulation générale et d'autre part de générer les conditions limites de la grille couvrant la zone pré-littorale.

Initialisation de la circulation générale Les deux procédés utilisés pour initialiser la circulation, à l'échelle régionale, sur la première grille sont l'aboutissement des études menées au POC sur l'initialisation des modèles à surface libre (Auclair *et al.*, 2001 ; Estournel *et al.*, 2003).

Il s'agit d'une part du procédé nommé Modified Potential Vorticity (MPV) qui repose sur la résolution des équations régissant la fonction de courant Ψ définie par :

$$\begin{cases} Q_{cx} = -\frac{\partial \Psi}{\partial y} \\ Q_{cy} = \frac{\partial \Psi}{\partial x} \end{cases} \quad (4.13)$$

Il est utilisé lorsque l'on ne connaît pas la circulation grande échelle (chapitre 6) pour générer les fichiers des transports de la circulation générale ainsi que de l'élévation de la surface libre qui permettront d'initialiser et de forcer les conditions limites de la deuxième grille. Une description plus complète du modèle est donnée par Estournel *et al.* (2003) et Auclair *et al.* (2003).

D'autre part, lorsque l'on a accès a des résultats générés par des modèles de grande échelle (OGCM), tels que OPA (Madec, G., M. Chartier, P. Delecluse, and M. Crépon, 1991 : A three-dimensional numerical study of deep water formation in the Northwestern Mediterranean Sea. *J. Phys. Oceanogr.*, 21, 1349-1371), il est alors possible de les utiliser pour initialiser le modèle Symphonie et le forcer à ses frontières ouvertes en utilisant une méthode d'initialisation variationnelle tridimensionnelle, méthode VIFOP (Auclair *et al.*, 2001). Les conditions de forçage aux frontières latérales ouvertes sont alors données par (Oey et Chen, 1992) :

$$\begin{cases} \vec{U} = U_0 \pm \sqrt{gH}(\eta - \eta_0) \\ \nabla_h \varphi = \nabla_h \varphi_0 \end{cases} \quad (4.14)$$

Avec φ la composante tangentielle du transport et des vitesses baroclines et U_0 , η_0 et φ_0 les forçages grande échelle issus de OPA.

Génération des conditions limites pour la zone pré-littorale La deuxième grille permet d'une part de générer la circulation 3D sur une zone englobant la zone pré-littorale mais aussi de générer les fichiers grande échelle des courants de circulation, des transports, de la surface libre, de la salinité et de la température. Ces fichiers permettent d'une part d'initialiser l'hydrodynamique de la troisième grille mais aussi de forcer les conditions limites de la zone pré-littorale tous les X pas de temps (par exemple toutes les 3 heures).

5.2.2.2 Forçages atmosphériques

Les forçages atmosphériques sont :

- les flux radiatifs : flux solaire et flux Infra Rouge ;
- les flux de chaleur : flux de chaleur latente et flux de chaleur sensible calculés à partir de l'humidité, de la pression atmosphérique, de la pression de la mer et des précipitations ;
- les tensions de cisaillement dues au vent.

Les flux de chaleur et les tensions de cisaillement dues au vent sont calculés, dans le modèle SYMPHONIE, à partir des formules bulk (Geernaert, 1990) et des sorties du modèle haute résolution de MétéoFrance : ALADIN. Dans certains cas, en zone pré-littorale, le vent peut être issu des mesures de stations météorologiques terrestres.

5.3 Le modèle couplé houle/courant tri-dimensionnel : RESYFE

Le modèle RESYFE est constitué de quatre modules, un module de courant, un module de houle, un module de transfert du module de courant vers le module de houle et un module de transfert du module de houle vers le module de courant. (figure 4.4)

5.3.1 Module de houle du modèle RESYFE

Le module de houle du modèle RESYFE est constitué du modèle REF/DIF auquel plusieurs améliorations ont été apportées (figure 4.5) :

(1) création d'une interface permettant d'une part de travailler dans le repère géographique décrit au chapitre 1 et d'autre part de ne modifier qu'un seul fichier d'entrée dans lequel tous les paramètres de la simulation seront inscrits. Pour réaliser cette interface nous nous sommes largement inspiré de la procédure utilisée dans le modèle SYMPHONIE.

(2) création d'un sous-module, dans le code du modèle REF/DIF, qui permet de calculer les vitesses Doppler (2D) à partir des courants 3D modélisés par le modèle SYMPHONIE suivant la procédure de Kirby et Chen (1989) décrite au chapitre 3.

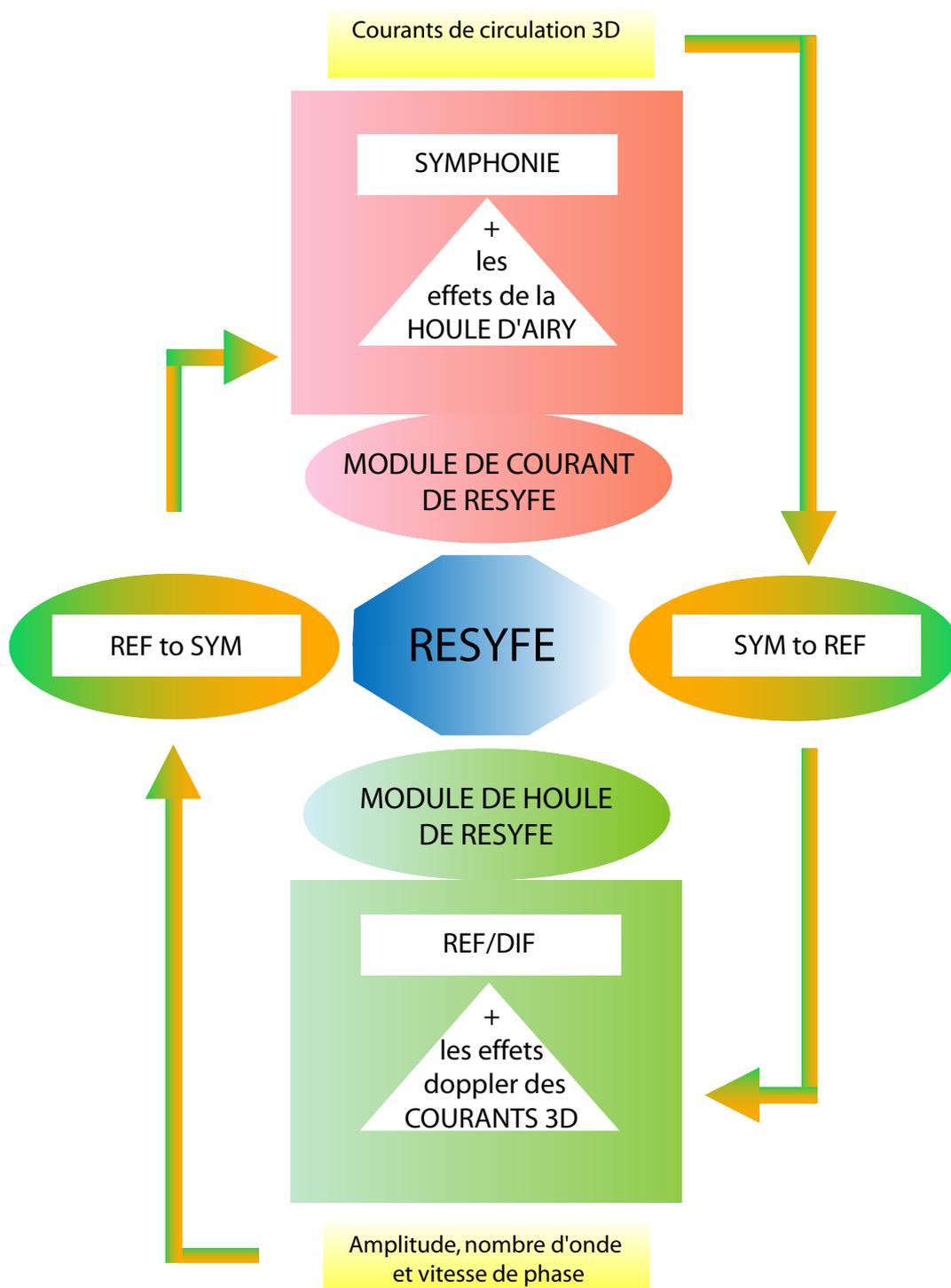


FIG. 5.4 – Modules constituant le modèle RESYFE

Les sorties du modèle REF/DIF qui vont nous intéresser sont les sorties d’amplitude, de nombre d’onde projeté sur les axes horizontaux (du repère défini au chapitre 1) et la vitesse de phase.

5.3.2 Module de courant du modèle RESYFE

Le module de courant du modèle RESYFE est constitué du modèle SYMPHONIE auquel deux modifications majeures ont été apportées :

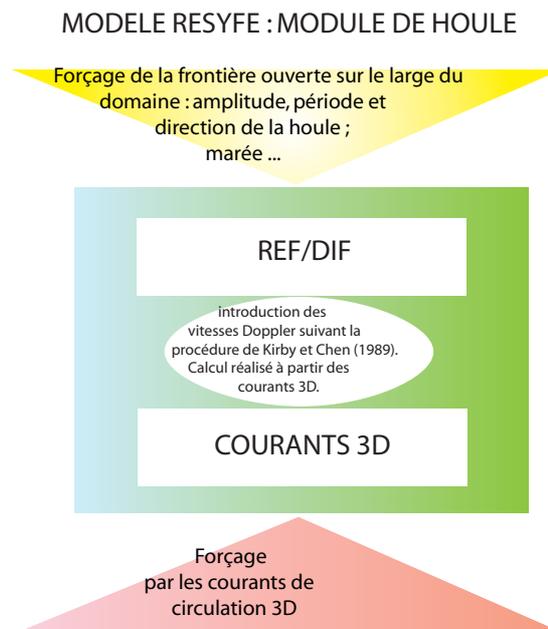


FIG. 5.5 – Module de houle du modèle RESYFE : forçages et modifications apportées au modèle REF/DIF

- création d'un fichier de paramètres qui permet de définir si l'on souhaite modéliser les interactions Houle/Courants de circulation et le cas échéant où trouver les fichiers de houle correspondants à la simulation.
- création d'une routine spécifique de calcul des effets de la houle qui permet de modifier :
 - les conditions initiales et aux limites ouvertes du domaine ;
 - les tensions de cisaillement de surface et de fond (voir chapitres 2 et 3) ;
 - les flux de chaleur latente et sensible (voir chapitres 2 et 3) ;
 - l'énergie cinétique de la turbulence (voir chapitres 2 et 3) ;
 - les équations primitives (voir chapitres 2 et 3) : introduction des tensions de radiation, des termes de suppression et éventuellement des termes correctifs proposés par Arduin (2006).

ATTENTION : La modification de l'énergie cinétique de la turbulence tout comme celle des flux de chaleur ne sont pas à ce jour fonctionnelles.

Aux forçages grande échelle et atmosphériques s'ajoutent les forçages de houle monochromatique (figure 4.6) qui sont constitués de quatre fichiers :

- amplitude ;
- nombre d'onde suivant x ;
- nombre d'onde suivant y ;
- vitesse de phase.

Ces fichiers permettent de réactualiser les conditions de houle tous les X pas de temps (par exemple toutes les 3 heures) et de calculer les forçages qui permettent de tenir compte de la houle (monochromatique) dans le calcul de la circulation.

Les sorties du modèle qui vont nous intéresser pour le couplage sont les courants de circulation 3D.

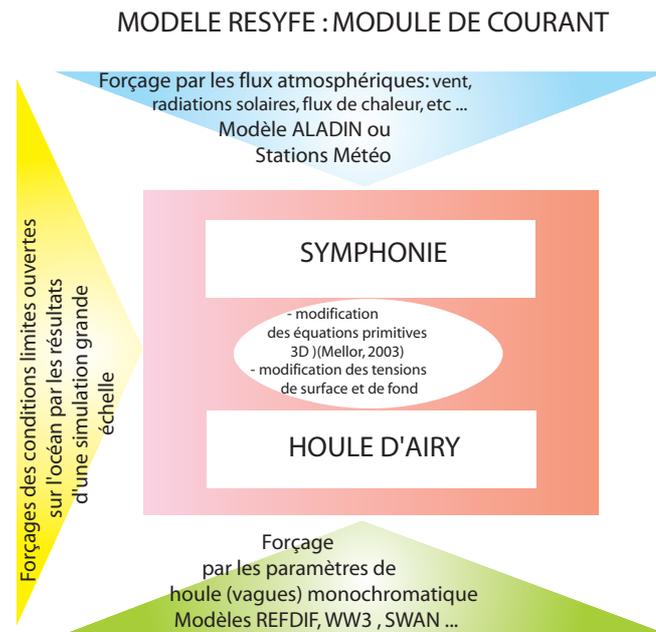


FIG. 5.6 – Module de courants du modèle RESYFE : forçages et modifications apportées au modèle SYMPHONIE

5.3.3 Les modules de transfert : SYMtoREF et REFtoSYM

5.3.3.1 Les problèmes rencontrés

Le transfert des champs de courants du module de courant au module de houle du modèle RESYFE et le transfert des caractéristiques de houle du module de houle vers le module de courant ont été l'une des principales difficultés rencontrées lors de la mise en place du modèle.

En effet, d'une part le modèle REF/DIF impose une résolution fine d'au plus 20 m par 20 m ainsi que des domaines tournés dans le sens de propagation de la houle (ou surdimensionnés) et d'autre part le modèle SYMPHONIE impose une résolution de l'ordre de la centaine de mètres pour la zone pré-littorale.

Ainsi pour forcer le modèle REF/DIF avec les courants 3D issus du modèle SYMPHONIE (ou du module de courant du modèle RESYFE), il est nécessaire d'une part d'interpoler les données afin de passer d'une résolution de par exemple 500 m par 500 m à une résolution de par exemple 20 m par 20 m et d'autre part de définir un domaine orienté dans le sens de propagation de la houle et contenu dans le domaine défini pour le calcul des courants de circulation.

De même pour forcer le modèle SYMPHONIE avec une houle d'Airy issue du modèle REF/DIF (ou du module de houle du modèle RESYFE), il est nécessaire d'une part d'effectuer une projection qui consiste à moyenniser sur les X points de grille les plus proches puis à lisser les résultats obtenus afin de passer d'une résolution de 20 m par 20 m à une résolution de 500 m par 500 m.

En pratique cette procédure pose plusieurs problèmes :

- En ce qui concerne REF/DIF (ou le module de houle de RESYFE) : le fait de devoir tourner les domaines dans le sens de propagation de la houle réduit la zone de calcul ; le surdimensionnement des domaines quant à lui impose de travailler avec des matrices énormes (de l'ordre de

3000 par 3000) qui ralentissent le calcul (figure 1.7). De plus le passage d'une résolution de 500 m à une résolution de 20 m peut générer des discontinuités si l'on n'utilise pas une interpolation adaptée.

- En ce qui concerne SYMPHONIE (ou le module de courant de RESYFE) : le fait de moyenner et lisser la donnée de houle, entraîne forcément une perte d'information sur la forme de la houle (figure 1.8).

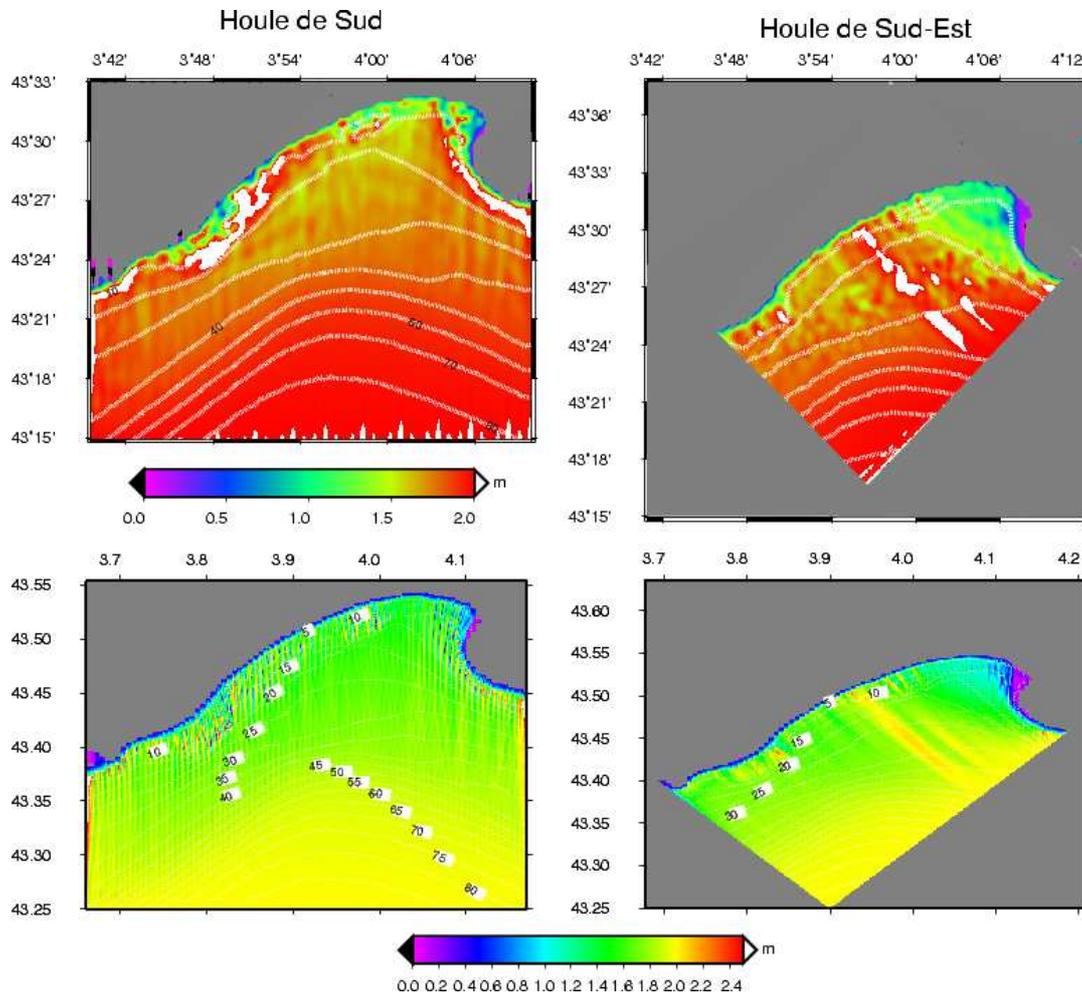


FIG. 5.7 – Mise en évidence de la perte d'information générée par la projection des données de houle sur la grille de calcul du module de courant du modèle RESYFE : lissage des bandes de réfraction et d'une partie des effets de la diffraction.

De plus, lorsque nous avons commencé à utiliser le module de houle du modèle RESYFE en introduisant les courants de circulation, nous nous sommes aperçu que, pour générer correctement la réfraction de la houle sur de forts courants, le modèle REF/DIF devait être utilisé avec un domaine de très faible résolution (maille de l'ordre de 5 m). Or les zones pré-littorale couvrent en général des domaines de l'ordre de 90 km² ce qui imposerait de travailler avec des matrices de dimensions 6000 par 6000. Au vu des moyens de calcul dont nous disposons, il n'était pas possible de travailler avec de telles matrices. Le forçage par les courants de circulation du module de houle, n'est donc, pour le moment, opérationnel que pour de petites zones littorales.

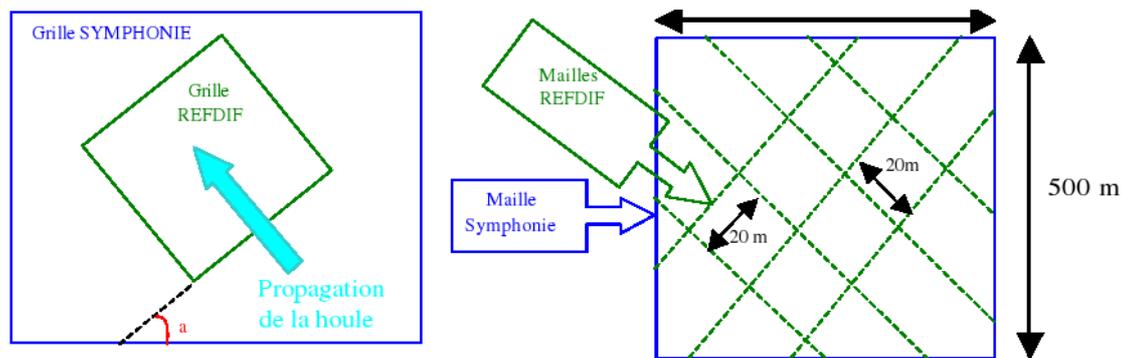


FIG. 5.8 – Passage d’une grille Symphonie (ou module de courant du modèle RESYFE) à une grille REF/DIF.

5.3.3.2 Utilisation pratique du modèle RESYFE en zone pré-littorale

Etant donné les différents problèmes rencontrés pour le passage du module de houle au module de courant du modèle RESYFE, nous avons décidé :

- de ne pas tenir compte des courants de circulation pour le calcul de la propagation de la houle ;
- de faire tourner le modèle REF/DIF sur un domaine très large englobant la zone pré-littorale étudiée incliné dans le sens de propagation de la houle dominante durant la période étudiée ;
- de faire tourner le module de courant de RESYFE sur la zone pré-littorale étudiée.

Le module SYMtoREF Le passage du modèle SYMPHONIE (ou du module de courant de RESYFE) au modèle REF/DIF consiste donc à interpoler la bathymétrie d’un grand domaine englobant la zone pré-littorale pour passer d’une maille de 500 m par 500 m à une maille de 20 m par 20 m. L’interpolation initialement utilisée était une interpolation barycentrique qui est peu coûteuse en temps de calcul mais elle engendrait de nombreuses discontinuités se traduisant par une interpolation en nid d’abeille. Afin de remédier à ce problème nous avons eu recours à une interpolation en splines bicubiques [bicubic spline] (Attéia et Gaches, 1999 ; McKinley et Levine, 2000) qui permet d’obtenir un lissage et une continuité des données interpolées ainsi que de leurs dérivées spatiales (premières et secondes). La théorie de cette interpolation a déjà été présentée dans mon rapport de DEA (Denamiel, 2003).

Le module REFtoSYM Le passage du modèle REF/DIF au module de courant du modèle RESYFE consiste d’une part à redimensionner le domaine pour qu’il ne couvre que la zone pré-littorale étudiée et d’autre part à moyenner et lisser les données de houle (amplitude, nombre d’onde suivant x et y et vitesse de phase) sur le domaine ainsi défini.

Procédure d’utilisation du modèle RESYFE Dans l’état actuel des développements, la procédure d’utilisation du modèle RESYFE sur le golfe du Lion est la suivante :

- extraction d’une bathymétrie de résolution 200 m par 200 m sur un large domaine englobant la zone pré-littorale que l’on souhaite étudier ;
- interpolation, via le module SYMtoREF, de la bathymétrie afin d’obtenir une grille de calcul de résolution 20 m par 20 m ;
- calcul des paramètres de houle, via le module de houle de RESYFE, sur toute la période de la simulation. Le modèle REF/DIF ne donnant qu’une vision instantanée de la propagation de la houle, il faut donc générer la forme de la houle à chaque fois que cette dernière est réactualisée

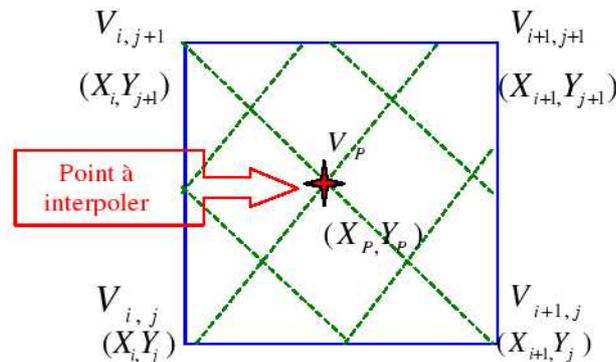


FIG. 5.9 – Interpolation bicubic spline pour trouver la valeur V_p du point (X_p, Y_p) : prise en compte des valeurs $(V_{i,j}, V_{i+1,j}, V_{i,j+1}, V_{i+1,j+1})$ aux quatre coins $((X_i, Y_j), (X_{i+1}, Y_j), (X_i, Y_{j+1}), (X_{i+1}, Y_{j+1}))$ de la maille du domaine Symphonie (ou module de courant du modèle RESYFE) ainsi que de leurs dérivées première et seconde (Denamiel, 2003).

dans le module de courant du modèle RESYFE. Par exemple : si la simulation dure 12 h et que les conditions de houle sont réactualisées toutes les trois heures, il faudra faire tourner 4 fois le module de houle du modèle RESYFE ;

- redécoupage, moyenne et lissage des données de houle, via le module REFtoSYM, afin de générer les fichiers de forçage de houle sur la grille de résolution 500 m par 500 m ne couvrant que la zone pré-littorale que l'on souhaite étudier ;
- calcul des courants de circulation 3D forcé par les résultats grande échelle, plus les conditions atmosphériques plus les conditions de houle, via le module de courant du modèle RESYFE sur la zone pré-littorale étudiée.

5.4 Le modèle houle/courant Q3D SHORECIRC

Le modèle SHORECIRC développé par l'Université du Delaware (EU) est un modèle de circulation dit quasi-3D utilisant les courants intégrés sur la verticale (équations de Saint-Venant) couplé au modèle REFDIF qui fournit les forçages de la houle (tensions de radiations et flux de masse).

Classiquement l'approche 2D seule est limitée pour l'approche du transport sédimentaire, par exemple une vitesse nulle en un point peut résulter d'un fort courant dirigé vers la plage en surface qui annule un fort courant de retour dirigé vers le large sur le fond.

Une modélisation 2D des courants n'est pas suffisante pour rendre correctement compte du transport sédimentaire.

L'originalité de ce modèle 'quasi-3D' est d'introduire une variation semi-empirique des courants sur la verticale et ainsi de mieux représenter les effets 3D de dispersion. On peut alors coupler courants sur le fond et vitesses orbitales sur le fond pour évaluer le transport sédimentaire dans les zones de la colonne d'eau où celui-ci a principalement lieu.

Les effets de dérive due aux vents, particulièrement puissants et fréquents dans la région du Languedoc, sont pris en compte. Le modèle a subi également plusieurs modifications afin de pouvoir fonctionner sur des configurations de plage possédant des traits de côte irréguliers et/ou des structures émergées (épis et brise-lames présents en nombre dans la région), de prendre en compte les effets de

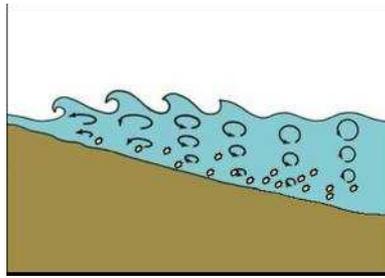


FIG. 5.10 – Shorecirc utilise REF2DIF comme module de calcul de la propagation de la houle. Les caractéristiques de la houle sur l'ensemble du domaine, dont la vitesse orbitale, sont utilisés pour déterminer la circulation induite.

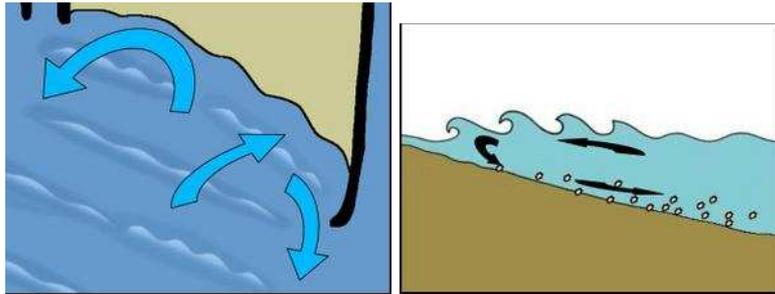


FIG. 5.11 – SHORECIRC calcule la circulation en 3D (ou plus exactement en quasi-3D, c'est à dire qu'il reconstitue le profil 3D à partir de la valeur moyenne et en faisant certaines hypothèses sur la distribution des vitesses sur la verticale. L'approche quasi 3D permet à la fois de rendre compte des déplacements latéraux de masse d'eau (à gauche) et des transferts de directions différentes sur la colonne d'eau. Sans la prise en compte de cette variabilité verticale, la modélisation numérique est totalement inadaptée à une étude fine de l'hydrodynamique littorale.

la force de Coriolis ou encore de proposer des frontières latérales ouvertes de types Neumann.

Avec des forçages pertinents et grâce à son caractère quasi 3D SHORECIRC permet de rendre compte de la dynamique des courants et des transports sédimentaires associés dans la zone littorale (entre 0 et 10m de profondeur). D'un point de vue académique on peut donc quantifier la prédominance d'un certain processus (pertes aux larges, en lagunes ou transport longshore) de transport par rapport aux autres en fonction des forçages considérés. D'un point de vue appliqué, en plaçant le modèle dans des conditions de houle et de vents typiques de la région, on est à même de caractériser la dynamique sédimentaire des sites étudiés.

Chapitre 6

Premiers résultats de validation des modèles utilisés

Dans ce chapitre, on montre tout d'abord des résultats de modélisation numériques réalisées avec des conditions réalistes, c'est à dire des forçages issus de la mesure. Les résultats de modélisation et de la mesure sont comparés. Ce type de démarche montre les étapes de la validation des modèles numériques utilisés à GEOSCIENCES-M, et en premier lieu le modèle RESYFE.

Pendant toute la durée du projet NAUSICAA, de tels travaux de validation seront menés en fonction des données acquises. Des validations sont en cours sur les sets de données suivants :

- expérience VENT 99, présentée ci-dessous ;
- expérience TEMPETE 2004 ;
- campagnes HYGAM2005-3 (voir www.gladys-littoral.org rubrique activités/HYGAM) ;
- campagne CALAMAR II (voir www.gladys-littoral.org rubrique activités/CALAMAR) ;

On présente dans ce chapitre un exemple de validation du modèle RESYFE, sur l'exemple de l'expérience VENT 99. Cette validation montre bien l'impact de la prise en compte de la houle lors d'une tempête dans la baie de Banyuls (Denamiel, 2006).

6.1 L'expérience VENT 99

Les résultats que nous allons présenter dans ce chapitre s'inscrivent dans la continuité des études menées sur le site de Banyuls sur Mer au cours de la tempête hivernale de 1999. Notre travail n'aurait pu avoir lieu sans la collaboration de Caroline Ulses (Pôle d'Océanographie Côtière, Toulouse) et de Katell Guizien (Laboratoire d'Océanographie Biologique de Banyuls).

6.1.1 Site d'étude et précédents résultats

L'objectif de l'expérience VENT 99 était de montrer l'impact d'une tempête hivernale sur la faune benthique et la remise en suspension des sédiments via des mesures hydrodynamiques, sédimentaires, chimiques et biologiques.

Cette expérience qui a eu lieu sur la période du 26 octobre au 11 décembre 1999, a été décrite en détail par Grémare *et al.* (2003) et Ferré *et al.* (2005). Elle a entre autre permis d'acquérir une série temporelle de mesures hydrodynamiques en un point de la baie de Banyuls (située au Sud-Ouest du Golfe du Lion) que nous nommerons par la suite le site Sola. La profondeur en ce point de coordon-

nées 42°29'366"N et 03°08'625"E est de 26.3 m (voir figure 6.1).

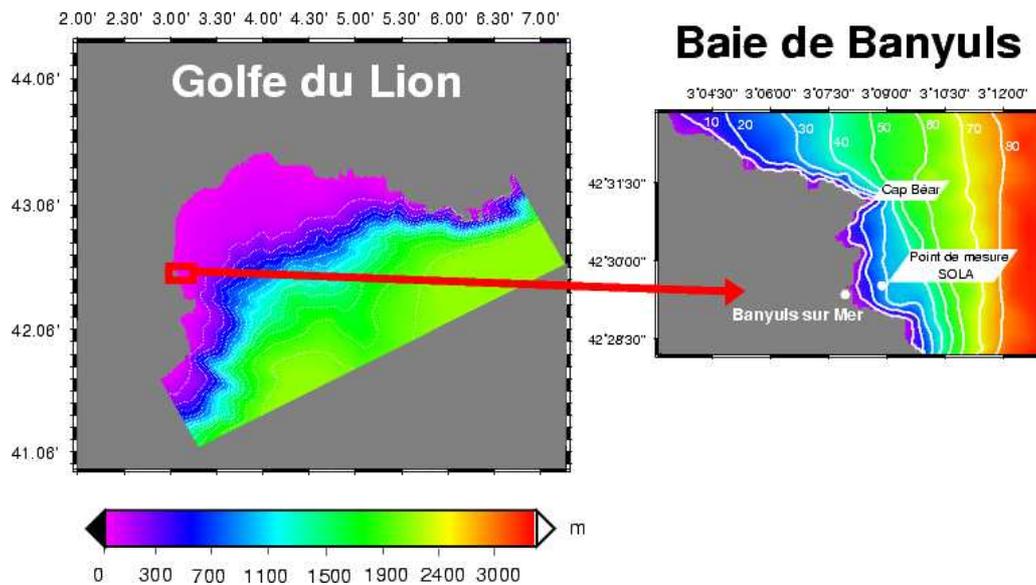


FIG. 6.1 – Position et bathymétrie de la baie de Banyuls. Positionnement spatial du point de mesure Sola et des principaux sites cités par la suite.

Durant toute l'expérience quatre mouillages ont été placés au point SOLA (voir figure ??) :

- une bouée WaveRider qui permet de mesurer la hauteur et la période des vagues ;
- un courantomètre Aanderaa RCM9 (mesure de l'intensité et de la direction des vitesses en un point) et un capteur Aanderaa OBS (mesure de la température et de la turbidité en un point) placés à 3.3 m au dessus du fond ;
- un courantomètre acoustique profileur, ADCP, placé à 5.3 m au dessus du fond qui a permis de mesurer les courants entre 0.5 m et 4.3 m au dessus du fond avec une résolution verticale de 20 cm ;
- un piège à sédiment à 6 m au dessus du fond.

De plus les conditions de vent (intensité et direction) ont été mesurées à la station Météo-France du cap Béar.

L'expérience VENT 99 a donné lieu à trois études principales, une première a consisté à réaliser les observations et à traiter la mesure, une seconde a permis de caractériser grâce à un modèle unidimensionnel (1DV) la remise en suspension des sédiments près du fond et enfin une troisième a généralisé et amélioré la modélisation du transport sédimentaire grâce à une approche tridimensionnelle.

Une tempête annuelle, caractérisée par des vents de Sud-Est très intenses et de fortes précipitations, a pu être observée au point Sola le 12 décembre 1999. Les courants mesurés durant cette tempête sont orientés Nord, Nord-Ouest et peuvent atteindre jusqu'à 0.35 m.s^{-1} à 3 m au dessus du fond ; ils sont associés à des houles de Sud-Est dont l'amplitude s'élève jusqu'à 3 m - 3.4 m pour des périodes de 10 s - 12 s (Grémare *et al.*, 2003).

La modélisation 1DV de cette tempête réalisée par Katell Guizien (Ferré *et al.*, 2004) a permis de rendre compte de la concentration de sédiments remis en suspension. Cependant, même si les résultats du modèle sont assez fidèles aux observations (comparaison avec les pièges à sédiment) au début de la tempête, le modèle 1DV s'avère incapable modéliser correctement la remise en suspension des sédiments 5h après le début de la tempête.

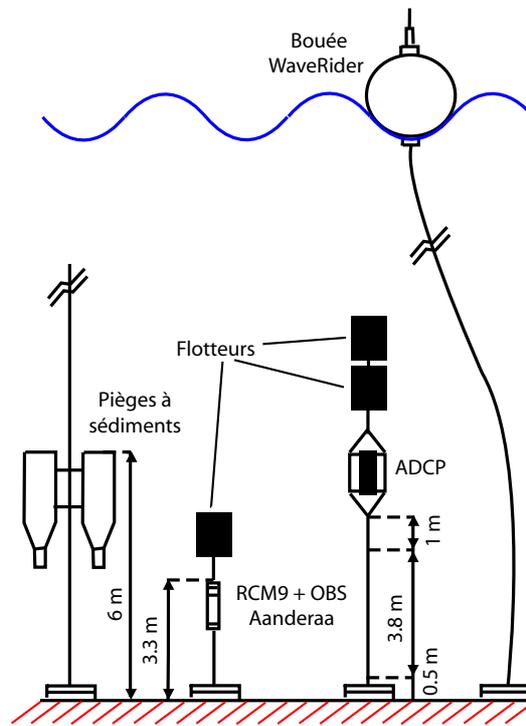


FIG. 6.2 – Représentation schématique (tirée de Ferré *et al.*, 2005) des quatre mouillages ancrés au site Sola pendant l'expérience VENT 99.

Afin d'améliorer les résultats obtenus avec le modèle 1DV, Caroline Ulses (2005) a réalisé une modélisation tridimensionnelle de l'hydrodynamique et des transports sédimentaires de la baie de Banyuls pendant la durée de l'expérience VENT 99. Pour modéliser les courants de circulation générés par la tempête, Ulses (2005) a utilisé le modèle SYMPHONIE (présenté au chapitre 5) dans sa version initiale non couplée avec la houle. Elle constate que le modèle SYMPHONIE sous-estime grandement l'intensité des courants durant la tempête ; les courants modélisés sont, en effet, deux à trois fois moins intenses que ceux mesurés. Ulses (2005) en déduit que cette sous-estimation des courants modélisés est liée au fait que ni les courants induits par la forte houle, ni les interactions non linéaires houle/courants de circulation, ni la modification des tensions de cisaillement de surface et de fond ne sont pris en considération dans le modèle SYMPHONIE.

L'utilisation d'un modèle 3D couplé houle/courants de circulation semblait donc s'imposer pour pouvoir caractériser l'hydrodynamique dans la baie de Banyuls durant la tempête. Or le modèle RESYFE, capable de rendre compte des effets de la houle sur la circulation en zone pré-littorale, semblait bien adapté à l'étude de cette hydrodynamique couplée. Son utilisation pour l'expérience VENT 99 constitue d'une part, une validation du modèle RESYFE sur un cas réaliste via la comparaison des résultats du modèle avec les mesures réalisées au point Sola et, d'autre part, un moyen de mieux caractériser les conditions hydrodynamiques utilisées comme forçage des transports sédimentaires. Nous avons donc décidé, en collaboration avec Caroline Ulses, de reprendre les modélisations 3D réalisées précédemment (Ulses, 2005) en tenant compte du couplage houle/courants de circulation sur la période du 01 au 29 novembre.

6.1.2 Observations et forçage du modèle

6.1.2.1 Les conditions de vent et de houle observées

Sur la période du 01 au 29 novembre, les conditions de vent et de houle sont très variables. L'étude de ces variations permet de distinguer 4 grandes périodes (figure 6.3) :

- du 01 au 05 novembre (période représentée en jaune), la houle est extrêmement faible, voir presque inexistante (amplitude de 0.25 m en moyenne), et le vent de direction Sud-Ouest puis Nord-Ouest est assez modéré (jusqu'à 30 m.s^{-1} mesuré au cap Béar) ;
- du 05 au 12 novembre (période représentée en vert), la houle est plus forte (amplitude de 0.75 m en moyenne) et le vent de Nord-Ouest (conditions de Tramontane) est intense (jusqu'à 50 m.s^{-1} mesuré au cap Béar) ;
- du 12 au 15 novembre (période représentée en bleu), la houle devient très forte (amplitude de 2 m en moyenne et pouvant atteindre jusqu'à 3.4 m) et le vent de Sud-Est (conditions de tempête hivernale) est lui aussi intense (jusqu'à 50 m.s^{-1} mesuré au cap Béar) ;
- du 15 au 29 novembre, on repasse en condition de houle modérée (amplitude de 0.7 m en moyenne) et de vent de Nord-Ouest intense (jusqu'à 40 m.s^{-1} mesuré au cap Béar).

6.1.2.2 Initialisation et forçages aux frontières latérales

Afin de modéliser l'hydrodynamique de la baie de Banyuls, Caroline Ulses (2005) avait mis en place une imbrication de trois grilles dont la résolution est de plus en plus fine. La troisième grille de résolution 100 m par 100 m (bathymétrie fournie par Jean-Claude Duchêne et Katell Guizien du LOBB) couvre la baie de Banyuls et est la seule que nous ayons forcée avec la houle.

Les deux premières grilles permettent de générer les sorties grande échelle de courant, de salinité, de température et d'élévation de la surface libre qui servent de forçages aux conditions limites de la troisième grille. Dans notre cas, nous initialisons le domaine et forçons les frontières latérales de la troisième grille avec 1) les résultats grande échelle et 2) les conditions de houle.

6.1.2.3 Forçages atmosphériques

La comparaison des vents mesurés au cap Béar (en bleu sur la figure 6.3) et modélisés par le modèle haute résolution ALADIN de Météo-France (en rouge sur la figure 6.3) montre que, même s'il reproduit correctement les variations de direction et d'intensité, le modèle ALADIN a tendance à sous-estimer les vitesses du vent par rapport à la mesure au cap Béar. Or Dufau-Julliand (2004) montre que les vents modélisés par ALADIN ont été systématiquement sous-estimés sur l'ensemble du Golfe du Lion pendant les hivers 1998 et 1999. Cependant, de par les effets d'accélération liés au cap, les vents mesurés au cap Béar sont des vents plus intenses que ceux qui soufflent dans l'anse nord de la baie de Banyuls (communication personnelle de Katell Guizien).

Un compromis acceptable est donc de réaliser une pondération entre les vents mesurés et modélisés de sorte à prendre en compte les vents mesurés lorsque l'on est proche de la côte et les vents modélisés par ALADIN lorsque l'on s'éloigne (communication personnelle de Katell Guizien).

Au vu de la complexité à modéliser correctement les conditions de vent dans la baie de Banyuls, nous avons choisi d'utiliser les sorties tri-horaires du modèle ALADIN comme forçage de vent.

Les tensions de cisaillement, déduites du vent à 10 m d'altitude, seront alors calculées suivant les formules bulk (Geenaert, 1990) lorsque la houle (ou les vagues) ne sont pas assez fortes pour être prises en compte et par les formules définies par Drennan *et al.* (2005) et Taylor et Yelland (2001) (2.37, 2.38 et 2.39 ou 2.40) dans le cas contraire.

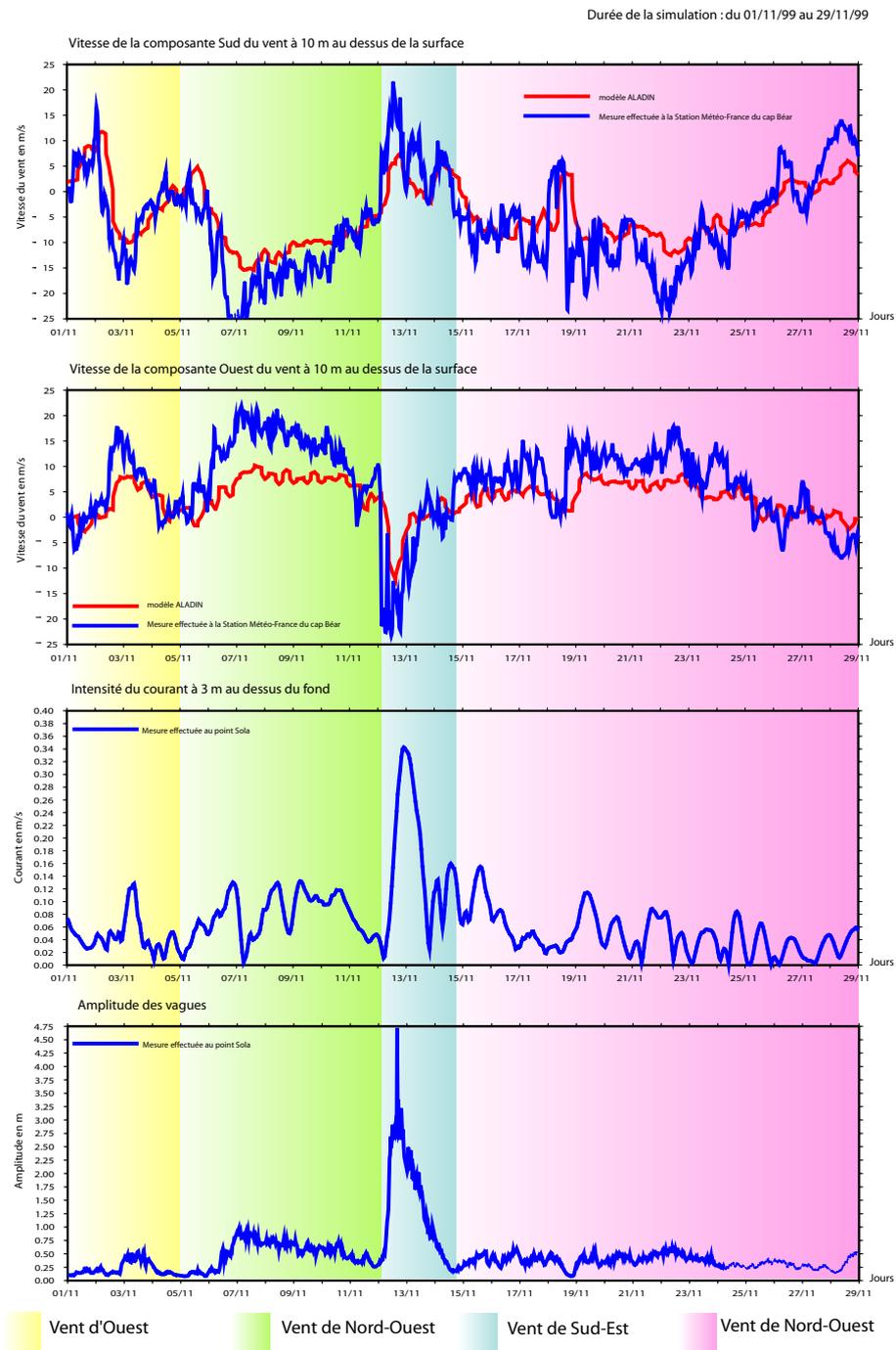


FIG. 6.3 – Mesures de vent, de courant (ADCP) et d’amplitude significative de houle au point Sola sur la période du 01 novembre 1999 au 29 novembre 1999.

De même les flux de chaleur seront calculés par les formules bulk (Geenaert, 1990) à partir de la température et de l’humidité de l’air à 2 m d’altitude, de la pression atmosphérique au niveau de la mer fournies par le modèle ALADIN et de la température de la mer modélisée par SYMPHONIE (ou RESYFE).

6.1.2.4 Forçage par la houle

De même que le forçage de vent, le forçage de houle est essentiel pour bien modéliser les courants de circulation lors des tempêtes.

Il s'avère que deux modélisations de la houle étaient disponibles sur le domaine de Banyuls pendant la période étudiée. En effet, d'une part Caroline Ulses avait utilisé le modèle WaveWatch3 (WW3) forcé par les sorties de vent ALADIN et ARPEGE de Météo-France et d'autre part Katell Guizien avait fait tourner le modèle SWAN forcé par le vent résultant de la pondération entre le vent mesuré au cap Béar et le vent modélisé par ALADIN.

6.1.3 Pertinence de l'utilisation du modèle RESYFE

Lors de l'expérience Vent 99, une forte houle et un fort vent de Sud-Est ont pu être observés et mesurés, nous sommes donc dans un cas de configuration où aucun des deux processus (vent et houle) ne peut être négligé. Ainsi cet épisode de tempête représente un intérêt évident pour nous, puisqu'il va nous permettre d'une part de vérifier dans quelle mesure les houles de tempêtes ont un effet sur la circulation en zone pré-littorale et d'autre part de valider le modèle RESYFE.

Les résultats obtenus par Caroline Ulses (2005) sans le forçage par la houle et avec le vent modélisé par le modèle ALADIN montrent que :

- la procédure d'imbrication des grilles est nécessaire pour bien rendre compte de l'hydrodynamique pré-littorale (figure 6.4). En effet, comme on le voit durant la tempête, l'hydrodynamique du domaine de Banyuls est autant influencée par la circulation grande échelle que par le vent local, qui d'ailleurs est beaucoup plus intense sur l'Est du Golfe du Lion que sur l'Ouest ;
- au point Sola, les courants modélisés par Symphonie sont en général sur estimés par rapport aux courants mesurés sauf pendant la tempête où les courants modélisés (de l'ordre de 0.12 m.s^{-1}) sont largement sous estimés par rapport à la mesure (de l'ordre de 0.34 m.s^{-1}) (figure 6.5) ;
- à la date du 13/11/99, pendant la tempête, il existe une forte accélération des vitesses au niveau du cap Béar (jusqu'à 0.4 m.s^{-1} à 3 m au dessus du fond et 0.8 m.s^{-1} en surface) liée à l'effet de cap (figure 6.6) ;
- à la date du 13/11/99, pendant la tempête, il y a formation d'une boucle de re-circulation proche de la côte sur la partie sud du domaine dont l'intensité varie entre 0.1 m.s^{-1} et 0.2 m.s^{-1} (figure 6.6). En réalité la présence de cette boucle de re-circulation n'est pas uniquement liée aux conditions météorologiques mais aussi à la configuration bathymétrique du domaine, on la retrouve donc sur toute la simulation même si sa taille, sa forme et son intensité varient ;
- à la date du 13/11/99, pendant la tempête, l'élévation de la surface libre à la côte varie entre 15 cm au nord du domaine et 9 cm au niveau de la boucle de re-circulation (figure 6.6).

Le site Sola est situé au sud de la boucle de re-circulation, il est donc soumis à de fortes variabilités des vitesses en intensité et en direction. La bonne modélisation de l'hydrodynamique au point Sola dépend donc de la bonne modélisation de la boucle de re-circulation. En effet au niveau du point Sola, à 500 m près, les courants peuvent être par exemple soit dirigés vers l'Ouest et de 0.1 m.s^{-1} d'intensité soit dirigés vers le Nord et de 0.3 m.s^{-1} d'intensité. Cet état de fait constitue un début d'explication en ce qui concerne la sur-estimation des courants modélisés par le modèle Symphonie au point Sola, hors épisode de tempête.

En ce qui concerne l'épisode de tempête, comme nous l'avons déjà vu, une forte houle (jusqu'à plus de 3.5 m d'amplitude) a été mesurée au point Sola, il est donc très probable que les courants mesurés sur cette période soient liés à l'action du vent mais aussi à celle de la houle ainsi qu'aux interactions entre ces deux forçages. Dans ce contexte, sachant que le domaine est soumis à de fortes houles et que les vitesses modélisées sans prise en compte de la houle sont 3.5 fois moins importantes que les vitesses mesurées, le recours à une modélisation couplée houle/courants de circulation est absolument nécessaire. Ainsi, durant l'épisode de tempête, pour pouvoir modéliser correctement les courants de circulation dans la baie de Banyuls et plus particulièrement au point Sola, il semble

nécessaire d'utiliser le modèle RESYFE.

Nous avons donc forcé le module de courant du modèle RESYFE avec les résultats de WW3, de SWAN et du module de houle du modèle RESYFE à savoir REF/DIF.

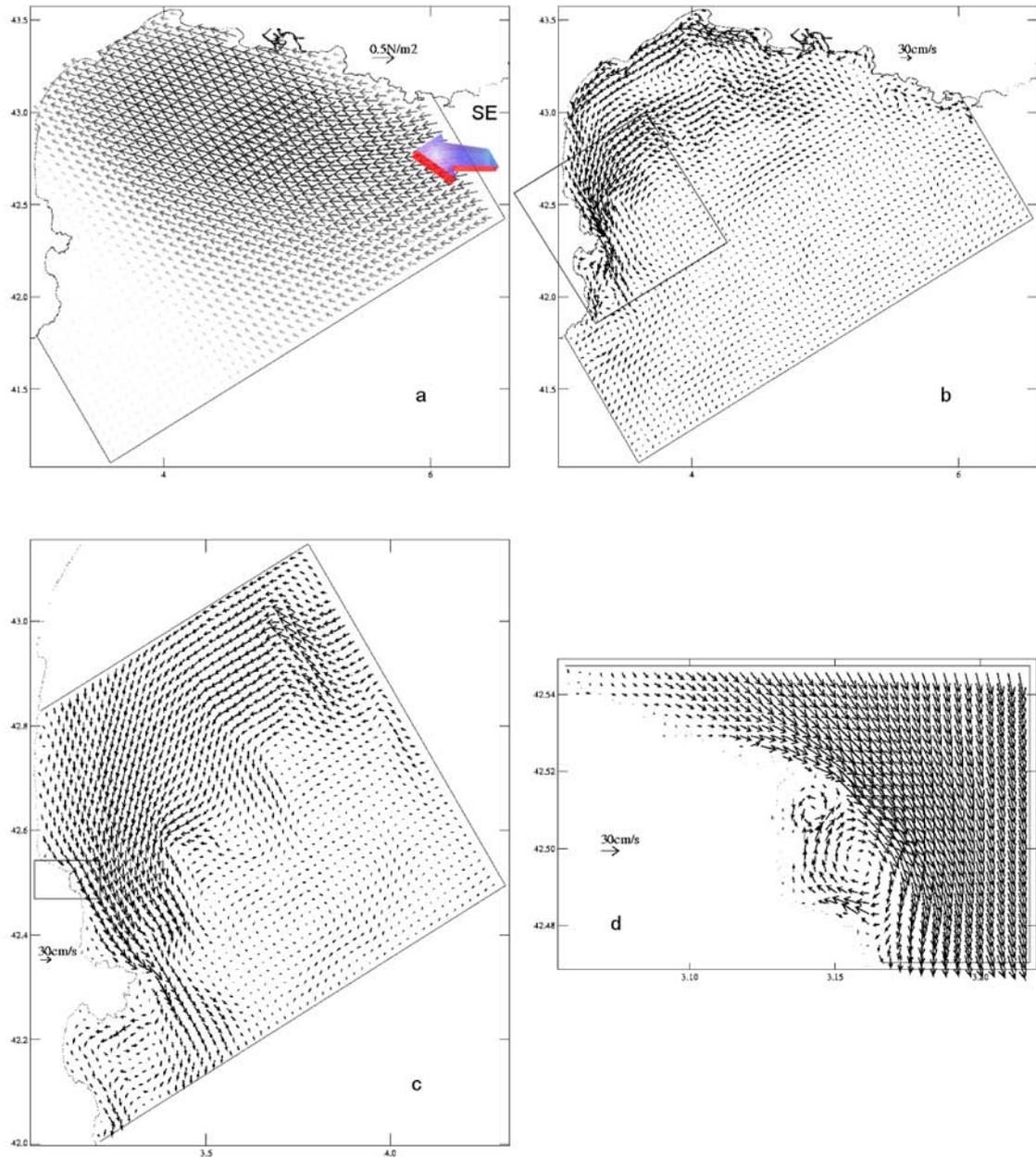


FIG. 6.4 – Champs de tension ($N.m^{-2}$) (a) et de courant moyen ($cm.s^{-1}$) (b), (c) et (d) simulés pour le 13 novembre 1999 à 0 h. (Tiré de la thèse de Caroline Ulses, 2005)

Durée de la simulation : du 01/11/99 au 29/11/99

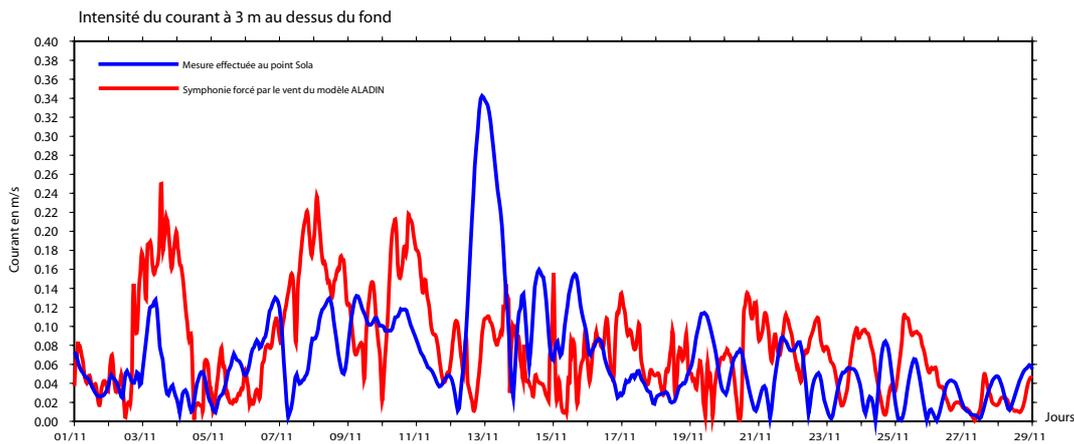


FIG. 6.5 – Représentation temporelle de l'intensité des courants de circulation mesurés (en bleu) et modélisés (en rouge) au point Sola.

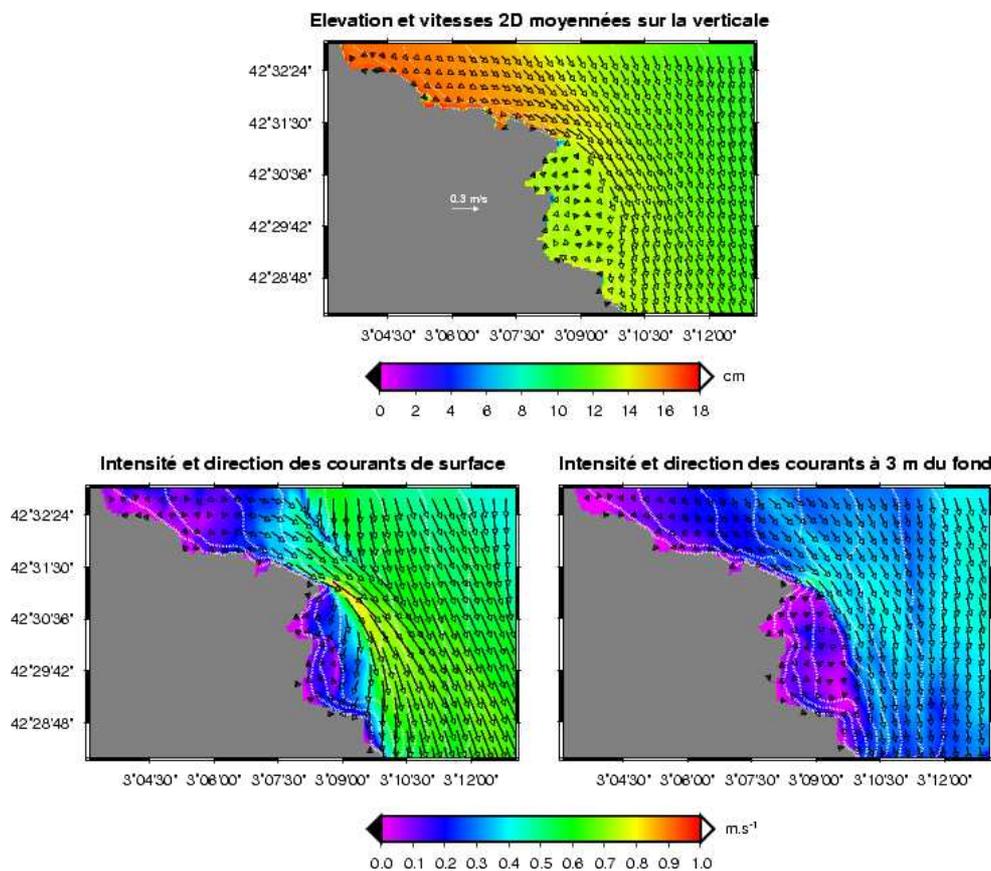


FIG. 6.6 – Circulation générale dans la baie de Banyuls à la date du 13-11-99 durant la tempête de vent et de houle de Sud-Est. Sorties graphiques du modèle SYMPHONIE forcé par le vent ALADIN sans houle. En haut : élévation de la surface libre (en dégradé de couleur) et vitesses 2D moyennées sur la verticale (en flèches). A gauche : représentation de l'intensité des courants de surface en dégradé de couleur et de leur direction en vecteurs. A droite : représentation des intensités des courants à 3 m au dessus du fond en dégradé de couleur et de leur direction vecteurs.

6.2 Forçage du modèle RESYFE avec la houle modélisée par WaveWatch3

6.2.1 Analyse des résultats du modèle₇₅ WW3 au site Sola

La première simulation que nous avons mis en place était celle forcé par les conditions de houle

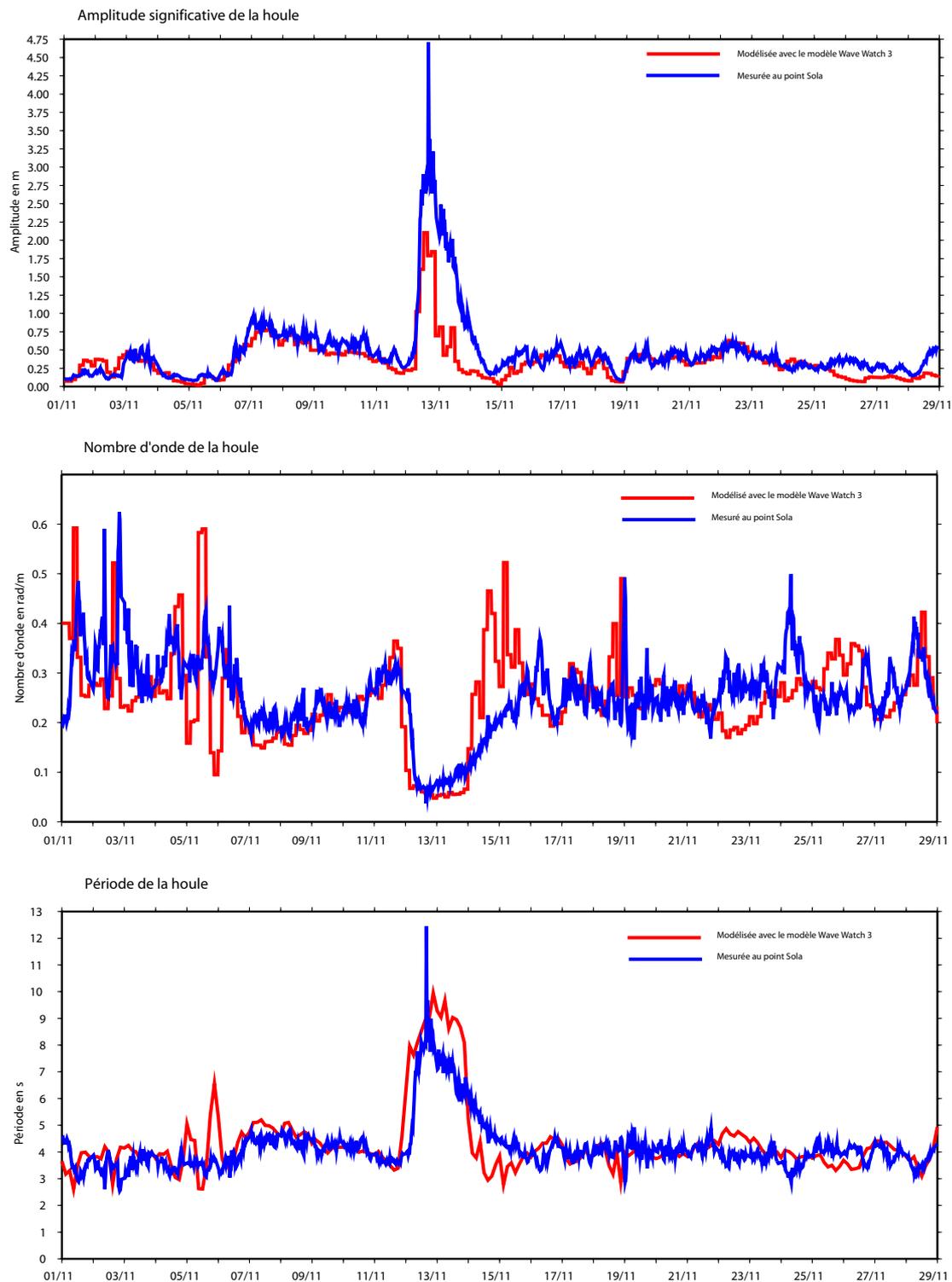


FIG. 6.7 – Amplitude significative, période moyenne et nombre d’onde de la houle au point Sola pendant la période du 01 novembre au 29 novembre 1999 (en bleu : mesure, en rouge : modélisation avec WW3).

Avant de réaliser la simulation nous avons tout d’abord comparé les résultats issus du modèle WW3 avec ceux mesurés au point Sola (figure 6.7).

Hors épisode de tempête de Sud-Est, le modèle WW3 reproduit bien les variations et les valeurs d’amplitude de la houle. Par contre lorsque l’amplitude est trop faible (par exemple du 01/11/99 au 08/11/99), la période de la houle est un peu sous estimée, ce qui a pour conséquence une sur-estimation importante du nombre d’onde. Ceci s’explique par le fait qu’à profondeur constante, la

relation entre nombre d'onde et période (relation de dispersion 1.32 du chapitre 1) n'est pas linéaire et que plus la période est faible et plus le nombre d'onde est grand (figure 6.8).

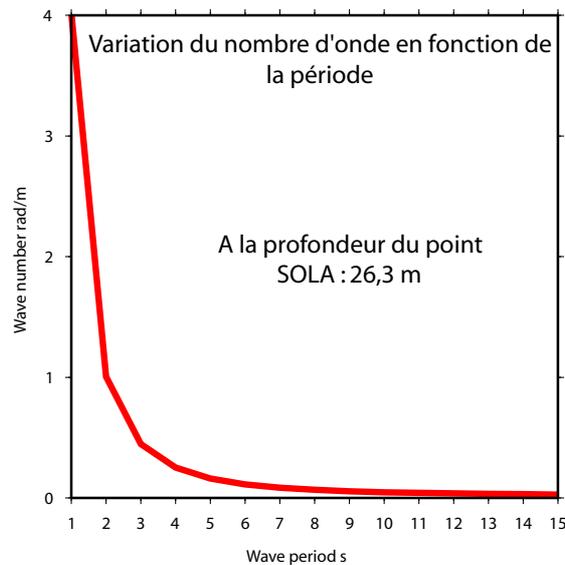


FIG. 6.8 – Variations du nombre d'onde en fonction de la période pour une profondeur constante égale à celle du point Sola.

Durant la tempête, le modèle WW3 ne reproduit pas bien les valeurs d'amplitude significative mesurées au point Sola, l'amplitude significative au point culminant de la tempête est de 2 m pour le modèle WW3 tandis que celle mesurée est de 3.4 m (ou plus si le point à 4.7 m n'est pas un point de mesure éronné). De plus, à la fin de la tempête la période moyenne est sous-estimée ce qui provoque, au niveau du nombre d'onde, de grosses différences entre modélisation et mesure.

Le modèle WW3 ne représente donc pas très bien les conditions de houle durant la tempête, les courants modélisés risquent donc d'être sous-estimés par rapport à la mesure.

6.2.2 Modification des tensions de cisaillement de surface par la houle WW3

La première conséquence de la prise en compte de la houle dans les modèles de circulation est la modification des tensions de cisaillement de surface (figure 6.9).

Sur la durée de la simulation, on constate que les tensions de cisaillement de surface vont principalement être modifiées à deux moments :

- entre le 07 et le 08 novembre, ce qui correspond aux deux jours de la deuxième période durant lesquels la houle est de 1 m d'amplitude et donc ne peut pas être négligée ;
- entre le 12 et le 13 novembre, ce qui correspond à la tempête de Sud-Est et donc aux plus fortes houles.

La différence entre les tensions de cisaillement de surface modélisées sans houle et avec houle peut atteindre jusqu'à 0.2 N.m^{-2} . La prise en compte de la houle pour le calcul des tensions de cisaillement aurait tendance à augmenter l'intensité des ces dernières. Cependant, pour que la houle ait un effet notable sur les tensions de cisaillement, il est impératif qu'elle soit relativement forte (amplitude supérieure à 0.75 m).

Les résultats présentés dans la suite représentent, pour chacune des quatre périodes précédemment définies, l'intensité des vitesses, les vitesses dirigées du Sud vers le Nord et les vitesses dirigées de l'Ouest vers l'Est, à 3 m au dessus du fond au point Sola. Les trois types de vitesses présentées sont

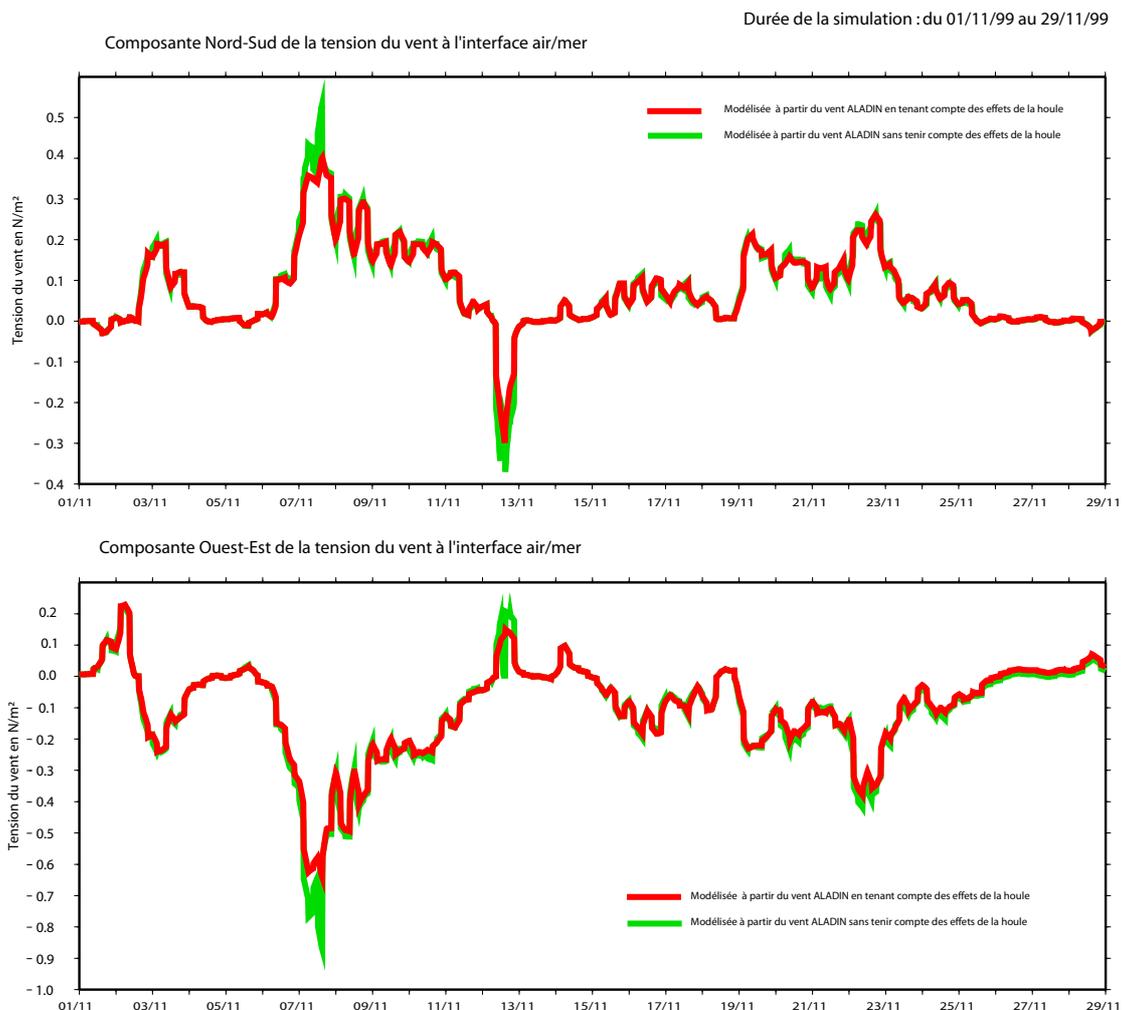


FIG. 6.9 – Tensions de cisaillement de surface induites par le vent ALADIN (en rouge) modifiées par la houle modélisée par WW3 (en vert).

la vitesse issue du modèle SYMPHONIE forcé par le vent ALADIN, la vitesse mesurée par l'ADCP et la vitesse générée par le module de courant du modèle RESYFE forcé par le vent ALADIN et la houle WW3.

6.2.3 Première période : Vent de Sud Ouest puis vent de Nord Ouest

Bien que ce premier épisode soit avant tout marqué par la quasi absence de houle, on peut constater (figure 6.10) que la modélisation des vitesses par le modèle SYMPHONIE (en rouge) forcé par le vent ALADIN ne rend pas correctement compte de la donnée mesurée (en bleu) au point Sola. En effet les vitesses modélisées ont tendance à être sur-estimées et il semblerait donc que le forçage de vent ne soit pas parfait.

D'autre part, même lorsque la houle est très faible, le fait de prendre en compte ses effets dans la modélisation hydrodynamique modifie la circulation générale comme on peut le voir au point Sola (en vert). Ce premier résultat est intéressant car il montre que les interactions houle/courants de circulation ont une influence sur la circulation même pour des houles très faible et que donc, à l'échelle pré-littorale, il faudrait dans la plupart des cas tenir compte des effets de la houle pour rendre compte de l'hydrodynamique.

6.2.4 Deuxième épisode : Vent de Nord Ouest

Sur ce deuxième épisode (figure 6.11), caractérisé par de forts vents de Nord Ouest et des houles pouvant atteindre 1 m d'amplitude pour 4 s de période, la modélisation des vitesses par le modèle SYMPHONIE (en rouge) forcé par le vent ALADIN ne rend pas mieux compte de la donnée mesurée (en bleu) qu'au premier épisode. Là encore les vitesses modélisées ont tendance à être sur-estimées.

Afin de mieux comprendre comment la houle agit sur la circulation, nous avons réalisé un zoom sur la zone du site Sola (figure 6.12).

En ce qui concerne la surface libre, pour ces conditions de houle modérée et de forte Tramontane, il y a peu de différence entre les résultats du modèle SYMPHONIE et ceux du module de courant du modèle RESYFE.

Par contre, en ce qui concerne les vitesses à 3 m au dessus du fond, la prise en compte de la houle permet de modéliser des dérives littorales dirigées vers le sud sur la partie nord du domaine et vers l'ouest pour la partie sud du domaine. Ces dérives de l'ordre de 0.3 m/s à 3 m au dessus du fond, se rejoignent au niveau de Banyuls et forment un courant dirigé vers le Nord Est dont l'intensité est de l'ordre de 0.2 à 0.3 m/s à 3 m au dessus du fond. Ce courant passe à l'ouest du point Sola. En ce qui concerne les vitesses modélisées sans prendre en compte la houle, on constate qu'il n'y a pas de dérive littorale (vitesses inférieures à : 0.05 m/s sur toute la partie nord du domaine et 0.1 m/s sur la partie sud du domaine). Cependant il existe un courant dirigé vers le nord qui passe à l'est du site Sola et dont l'intensité atteint 0.3 m/s. Ainsi, même si sur le reste du domaine les variations liées à la présence de houle modérée sont relativement faibles, au niveau de la côte la prise en compte de la houle permet de mieux représenter les dérives littorales qui lui sont associées (figure 6.13).

6.2.5 Troisième période : Vent de Sud Est

Au point Sola, les vitesses modélisées par le module de courant du modèle RESYFE (en vert sur la figure 6.14) atteignent jusqu'à 0.24 m.s^{-1} d'intensité ce qui est bien supérieur aux vitesses modélisées par SYMPHONIE mais reste en deça des valeurs mesurées qui atteignent 0.35 m.s^{-1} . Les vitesses Ouest-Est modélisées sont du même ordre de grandeur que celles mesurées. Par contre les vitesses Sud-Nord sont sous estimées par rapport à la mesure. De plus, le pic de vitesse modélisé par RESYFE est atteint 9 h après le pic de vitesse mesuré. Ce pic est dû aux variations de la composante Sud-Nord de la vitesse. Ce décalage de 9 h peut s'expliquer en partie par le forçage de vent qui est sous estimé mais aussi, probablement, par le fait que le modèle WW3 prend en compte l'augmentation de l'amplitude de la houle avec un bref retard. De plus le modèle WW3 sous estime systématiquement l'amplitude sur toute la période de la tempête. Le fait que le pic de vitesse modélisé n'atteigne que 0.24 m.s^{-1} au lieu des 0.35 m.s^{-1} mesurés peut donc s'expliquer par la mauvaise modélisation du pic d'amplitude de la houle par WW3 : la houle maximale modélisée atteint 2 m d'amplitude alors que la houle mesurée atteint 3.4 m d'amplitude.

Même si le forçage du module de courant du modèle RESYFE par la houle modélisée avec WW3 ne semble pas produire des résultats optimaux, il permet cependant d'améliorer grandement les résultats obtenus par rapport à ceux obtenus avec le modèle SYMPHONIE.

Afin de mieux comprendre comment une forte houle influence l'hydrodynamique de la baie de Banyuls, des représentations spatiales de l'élévation de la surface libre et des vitesses à 3 m au dessus du fond pour les sorties du modèle SYMPHONIE et du module de courant de RESYFE ont été réalisées (figure 6.15). Nous avons choisi la date du 12-11-99 à 18 h car c'est l'un des moments de la tempête où la houle est la plus forte.

Au niveau de l'élévation de la surface libre, tout comme pour l'épisode précédent, il n'y a guère

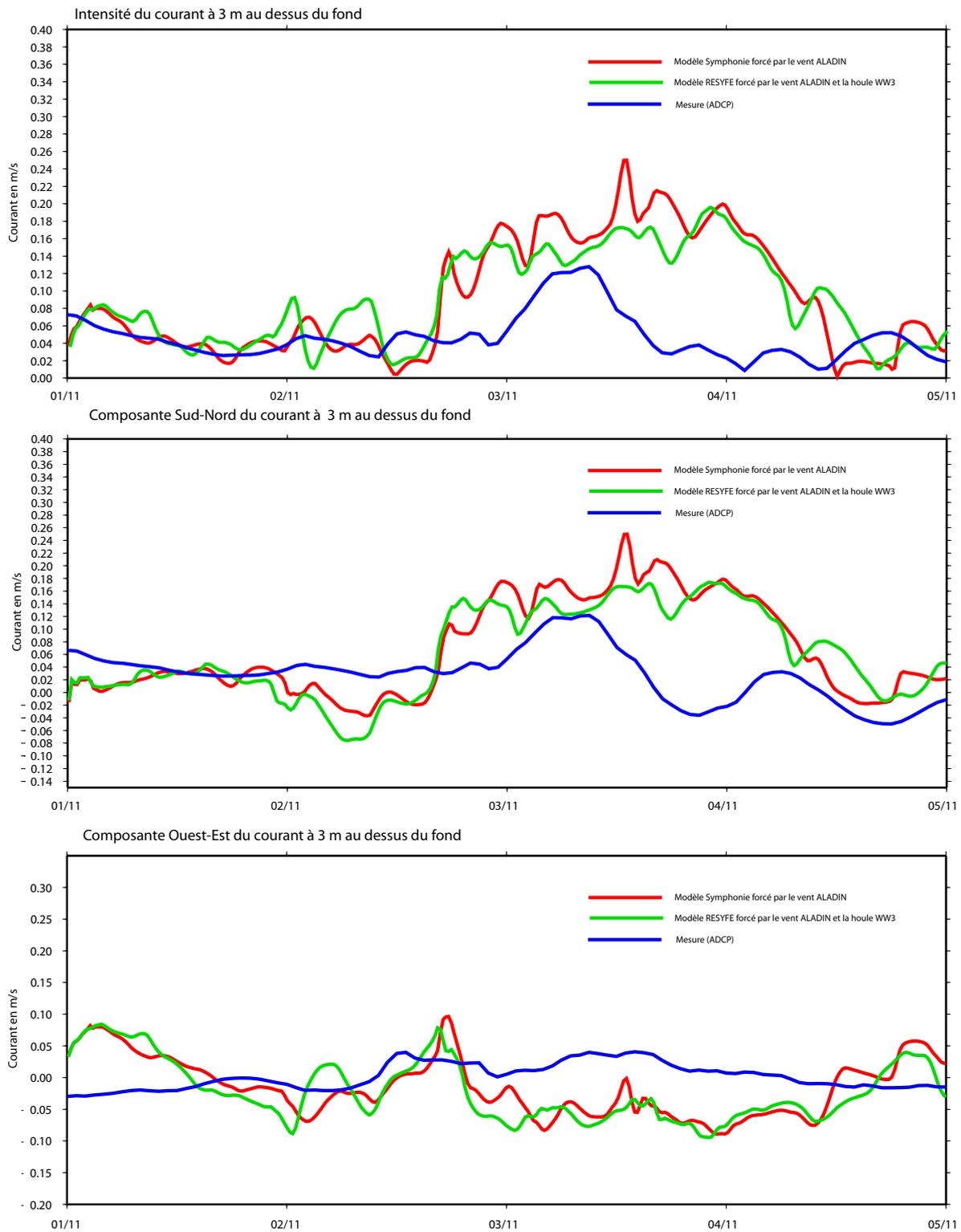


FIG. 6.10 – Vitesses au point Sola, à 3 m au dessus du fond, obtenues sur la période du 01 novembre au 05 novembre par mesure (en bleu) et par modélisation (en rouge : modèle SYMPHONIE avec le vent issu du modèle ALADIN, en vert : module de courant du modèle RESYFE avec le vent issu du modèle ALADIN et la houle issue de WW3).

de différence entre celle modélisée par SYMPHONIE et celle tenant compte de la houle. Cependant, en ce qui concerne les vitesses à 3 m au dessus du fond, la présence de la houle, génère d’une part, sur la partie Nord du domaine, une dérive littorale de 0.5 m/s d’intensité dirigée vers le Sud et d’autre part, sur la partie sud du domaine, de nombreux petits courants d’intensité 0.5 m/s dirigés vers le

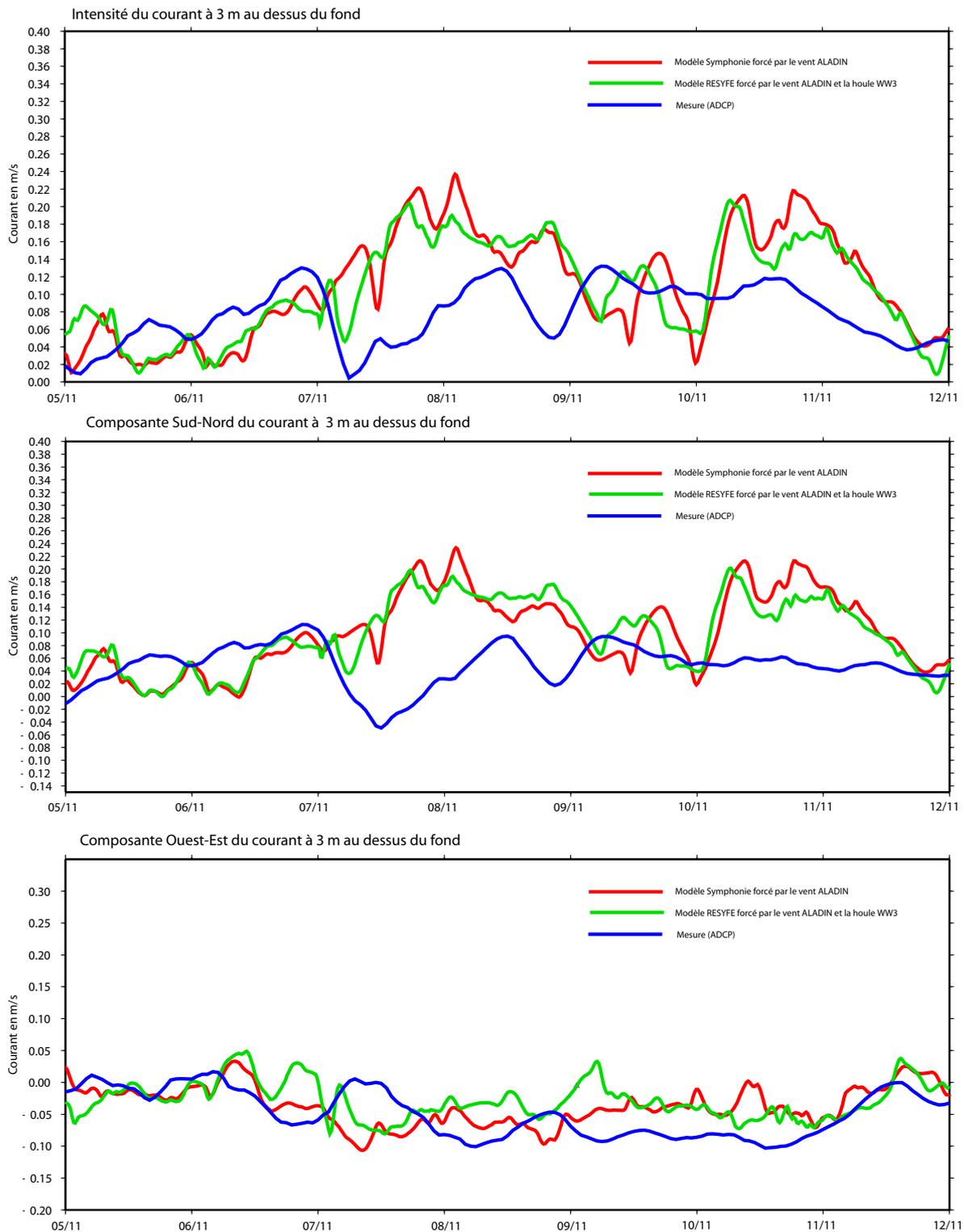


FIG. 6.11 – Vitesses au point Sola, à 3 m au dessus du fond, obtenues sur la période du 05 novembre au 12 novembre par mesure (en bleu) et par modélisation (en rouge : modèle SYMPHONIE avec le vent issu du modèle ALADIN, en vert : module de courant du modèle RESYFE avec le vent issu du modèle ALADIN et la houle issue de WW3).

Nord Nord-Est ou Nord-Ouest. Ces petits courants, résultant de la présence de houle, sont assimilables à des « rip currents » ou courants sagittaux qui résultent de la convergence de courants littoraux engendrés par les variations de niveau d'eau se produisant le long du littoral entre la côte et la zone de déferlement (figure 6.16).

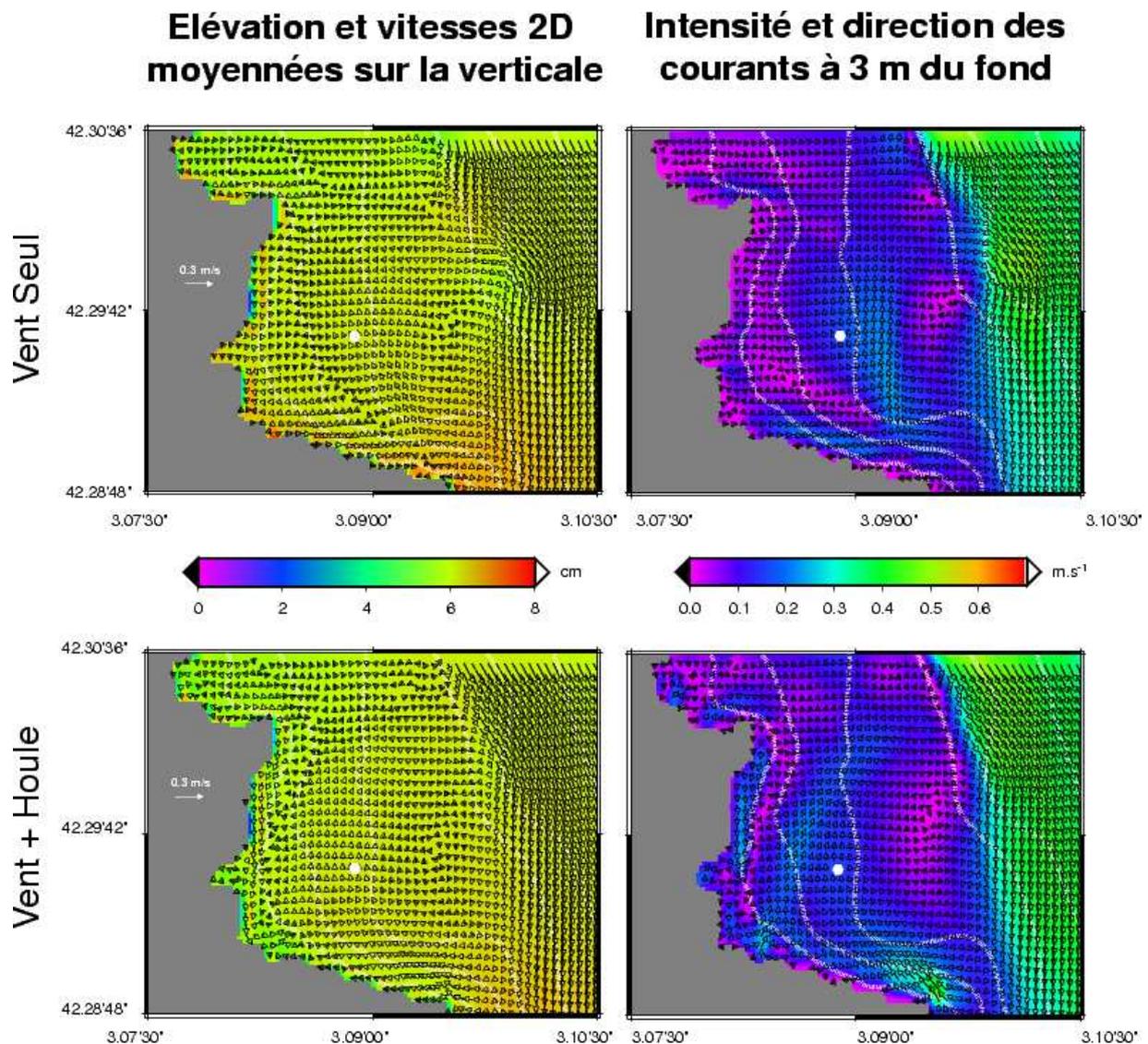


FIG. 6.12 – Vitesses au point Sola, à 3 m au dessus du fond, obtenues sur la période du 05 novembre au 12 novembre par mesure (en bleu) et par modélisation (en rouge : modèle SYMPHONIE avec le vent issu du modèle ALADIN, en vert : module de courant du modèle RESYFE avec le vent issu du modèle ALADIN et la houle issue de WW3).

Sur cet épisode de tempête nous avons pu voir que le module de courant du modèle RESYFE est capable de générer des structures associées à de fortes houles. Cependant, même si il est évident que la prise en compte de la houle permet de mieux modéliser l'hydrodynamique littorale lors des tempêtes, il s'avère que les résultats obtenus ne sont pas encore satisfaisants.

6.2.6 Quatrième période : Vent de Nord Ouest

En ce qui concerne la quatrième période (figure 6.17), les conditions de vent et de houle sont similaires à celles rencontrées au cours de la deuxième période. Les remarques concernant la comparaison entre les résultats du modèle SYMPHONIE, du module de courant du modèle RESYFE et de la mesure restent donc identiques à celles faites lors de l'étude du deuxième épisode.

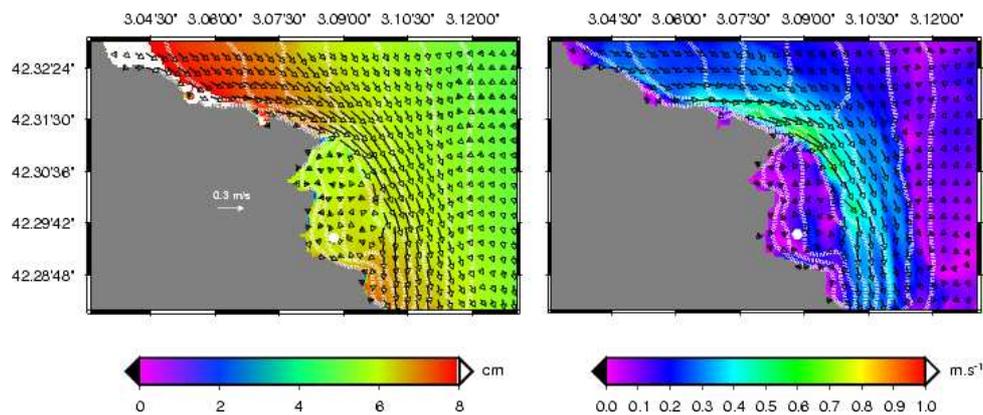


FIG. 6.13 – Circulation sur un domaine restreint au sud de la baie de Banyuls à la date du 08-11-99. Sorties graphiques du modèle SYMPHONIE (en haut) et du module courant du modèle RESYFE (en bas). A droite : représentation de l'élevation de la surface libre (dégradé de couleurs) et des vitesses 2D moyennées sur la verticale (flèches). A gauche : représentation des vitesses à 3 m au dessus du fond (dégradé de couleurs plus flèches)

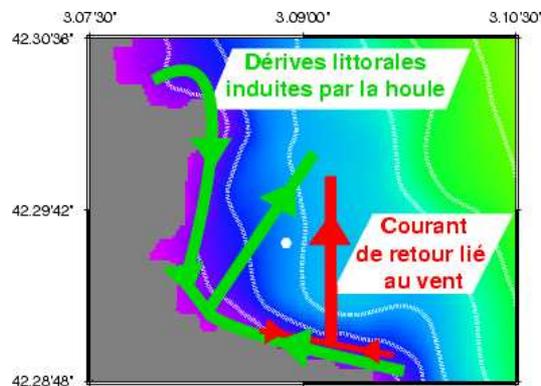


FIG. 6.14 – Schéma représentatif des dérives générées par le vent (en rouge) et par les interactions houle/courant de circulation (en vert) au site Sola à 3 m au dessus du fond.

6.3 Forçage du modèle RESYFE avec la houle modélisée par SWAN

6.3.1 Analyse des résultats du modèle SWAN au site Sola

Etant donné la mauvaise qualité des données de houle modélisées par WW3 pendant l'épisode de tempête, nous avons décidé de nous servir des données de houle modélisées par SWAN.

Ces données, générées entre le 01 et le 24 novembre 1999, ont été obtenues en forçant le modèle SWAN d'une part avec un vent résultant de la pondération entre le vent mesuré au cap Béar et le vent modélisé par ALADIN et d'autre part, avec les sorties du modèle WW3 comme conditions limites à la frontière Est du domaine. Cependant, durant la tempête, afin de mieux rendre compte de l'amplitude de la houle au point Sola, les conditions limites à la frontière Est du domaine ont été forcées avec des valeurs constantes d'amplitude et de période égales aux valeurs mesurées au point Sola à deux dates : le 12 à 12h00 et le 13 à 00h00 (communication personnelle de Katell Guizien).

Cette procédure a permis de rendre compte de manière presque parfaite de l'amplitude au point Sola sur toute la période de simulation, y compris durant la tempête (figure 6.18). En effet, la courbe rouge qui représente la modélisation de l'amplitude par le modèle SWAN au site Sola et la courbe

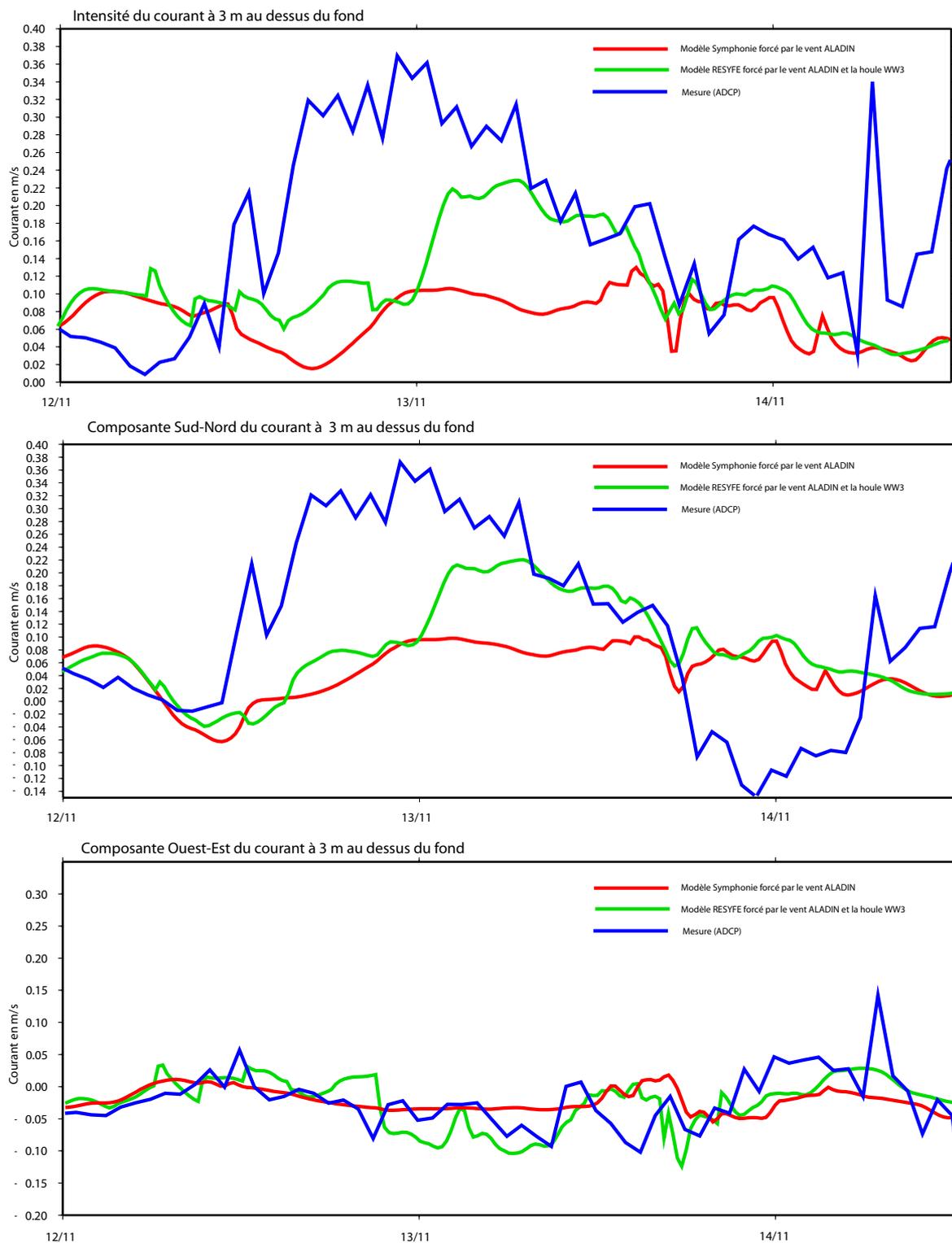


FIG. 6.15 – Vitesses au point SOLA, à 3 m au dessus du fond, obtenues sur la période du 12 novembre au 14 novembre par mesure (en bleu) et par modélisation (en rouge : modèle SYMPHONIE avec le vent issu du modèle ALADIN, en vert : module de courant du modèle RESYFE avec le vent issu du modèle ALADIN et la houle issue de WW3).

bleue qui représente la mesure au site Sola sont presque toujours confondues. Cependant, ne disposant pas d'autres points de mesure des paramètres de houle, il est impossible de savoir si le forçage des conditions limites avec les valeurs mesurées au point Sola durant l'épisode de tempête, permet de rendre compte des conditions de houle sur tout le domaine.

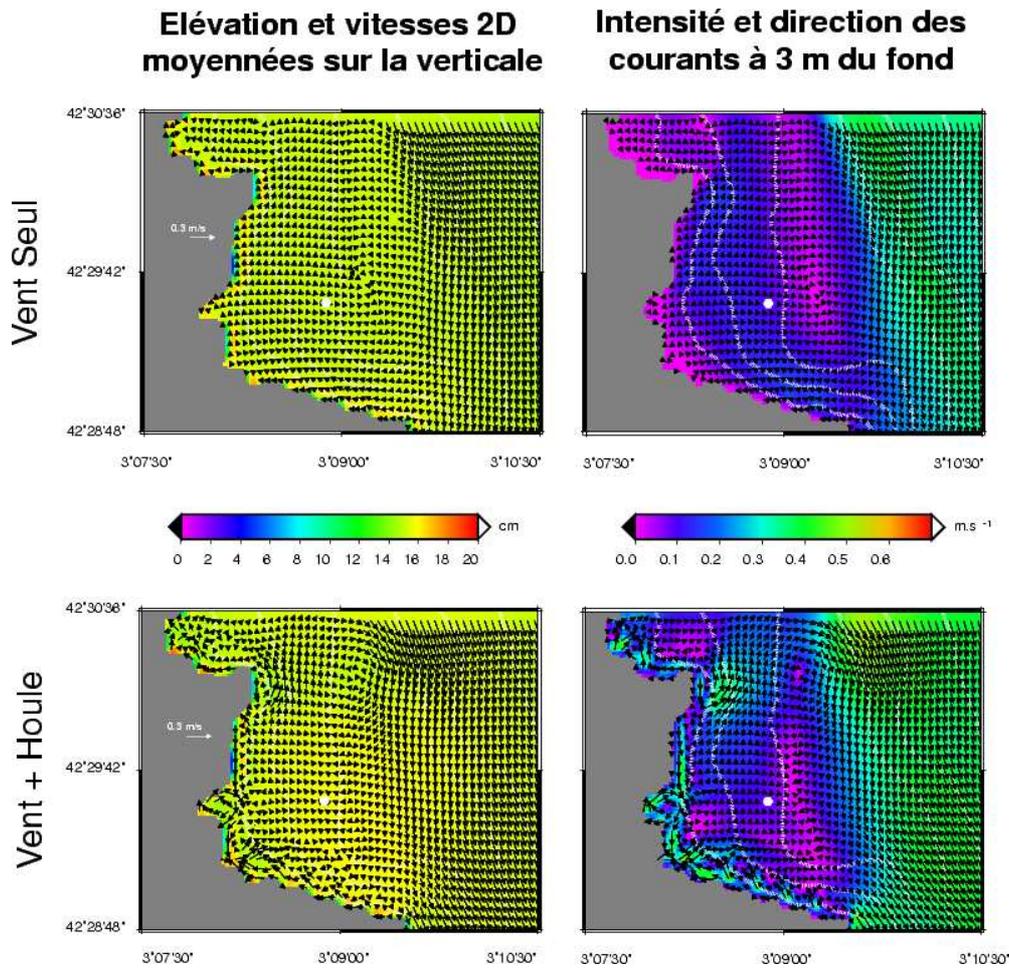


FIG. 6.16 – Circulation sur un domaine restreint au sud de la baie de Banyuls à la date du 12-11-99 à 18 h. Sorties graphiques du modèle SYMPHONIE (en haut) et du module courant du modèle RESYFE (en bas). A droite : représentation de l’élévation de la surface libre (dégradé de couleurs) et des vitesses 2D moyennées sur la verticale (flèches). A gauche : représentation des vitesses à 3 m au dessus du fond (dégradé de couleurs plus flèches).

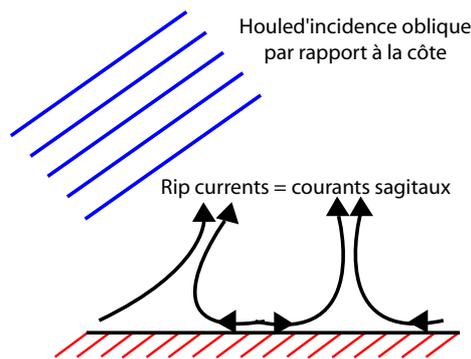


FIG. 6.17 – Représentation schématique des courants sagittaux ou « rip currents »

D’autre part, le modèle SWAN a tendance à systématiquement sous estimer la période de la houle par rapport à la mesure, ce qui, comme nous l’avons déjà vu, provoque des écarts encore plus prononcés entre le nombre d’onde modélisé et mesuré. Ces écarts atteignent jusqu’à 0.6 rad.m^{-1} et sont donc considérables.

Au final, la modélisation de la houle par le modèle SWAN reproduit très bien les amplitudes

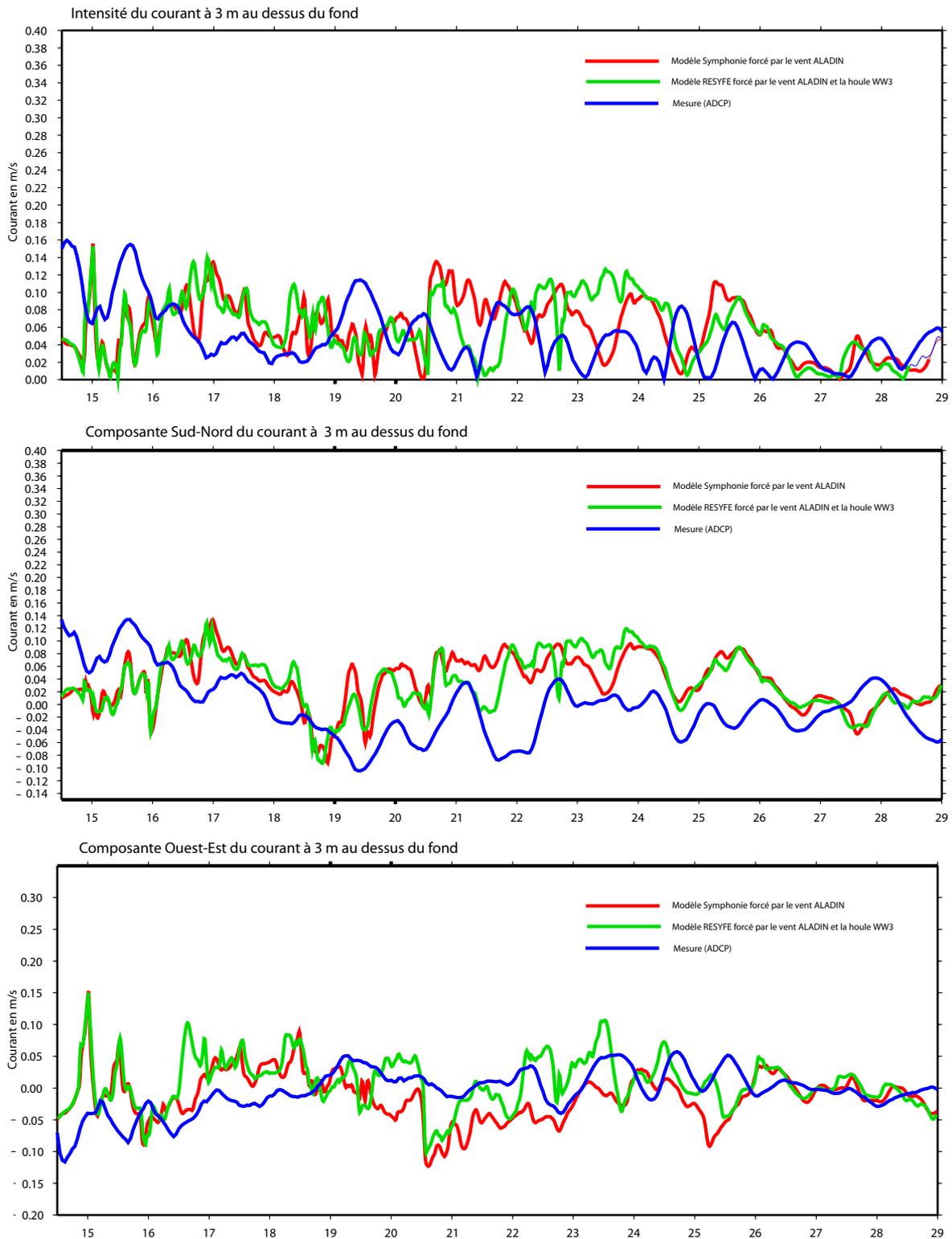


FIG. 6.18 – Vitesses au point SOLA, à 3 m au dessus du fond, obtenues sur la période du 14 novembre au 29 novembre par mesure (en bleu) et par modélisation (en rouge : modèle SYMPHONIE avec le vent issu du modèle ALADIN, en vert : module de courant du modèle RESYFE avec le vent issu du modèle ALADIN et la houle issue de WW3).

mesurées au point Sola mais génère des nombres d'ondes très différents de ceux mesurés au point Sola.

6.3.2 Résultats obtenus sans le forçage par le vent local

Avant d'utiliser le module de courant du modèle RESYFE avec tous les forçages, nous avons, dans un premier temps, préféré faire tourner le modèle sans le forçage par le vent local.

Les premiers résultats ainsi obtenus ont permis de mettre en évidence certains problèmes liés au forçage de houle modélisé par SWAN (figure 6.19). Il s'avère en effet que le module de courant du modèle RESYFE diverge à la date du 12-11-99 à 12 h.

A cette date la houle est modérée, il n'y a donc pas de raison numérique à cette divergence. De plus, après cette forte divergence (les vitesses atteignent 0.52 m.s^{-1} au lieu 0.05 m.s^{-1}) le modèle oscille (les vitesses ainsi modélisées atteignent jusqu'à 1.24 m.s^{-1}) pendant plusieurs heures avant de reprendre une modélisation plus cohérente des courants de circulations induits par la houle.

6.3.3 Mise en évidence des causes provoquant la divergence du modèle

Comme nous l'avons souligné, si le modèle SWAN modélise parfaitement les amplitudes de la houle au point Sola, il n'en est pas de même pour le nombre d'onde ; nous avons donc cherché à savoir si la divergence du modèle pourrait résulter de cet état de fait. En analysant les données houle modélisées par SWAN et les vitesses modélisées par le module de courant de RESYFE (figure 6.20), nous nous sommes rendu compte, qu'il existait en effet une corrélation entre la divergence du modèle et les paramètres de houle. Un des paramètres important dans la modélisation de la houle est sa cambrure c'est à dire le produit de son nombre d'onde par son amplitude : ka . Sur la période soulignée en jaune et pour le point repéré par des pointillés (figure 6.20), le nombre d'onde mesuré au point Sola est $k = 0.45 \text{ rad.m}^{-1}$ et le nombre d'onde modélisé par SWAN est $k = 0.95 \text{ rad.m}^{-1}$ tandis que l'amplitude mesurée est $a = 0.25 \text{ m}$ et celle modélisée est $a = 0.15 \text{ m}$ ainsi la cambrure de la houle mesurée au point Sola est $ka = 0.1125$ et la cambrure modélisée par SWAN est $ka = 0.1425$. Les cambrures de la houle modélisée et mesurée sont donc similaires et le modèle ne diverge pas même si le nombre d'onde est mal modélisé par SWAN. Par contre, sur la période soulignée en bleu et pour le point repéré par des pointillés (figure 6.20), le nombre d'onde mesuré au point SOLA est $k = 0.3 \text{ rad.m}^{-1}$ et le nombre d'onde modélisé par SWAN est $k = 0.5 \text{ rad.m}^{-1}$ tandis que l'amplitude mesurée est $a = 0.3 \text{ m}$ et celle modélisée est $a = 0.6 \text{ m}$ ainsi la cambrure de la houle mesurée au point Sola est $ka = 0.09$ et la cambrure modélisée par SWAN est $ka = 0.3$. La cambrure modélisée par SWAN est donc plus de 3 fois supérieure à celle mesurée et le modèle diverge. Il apparait donc que le modèle est très sensible à la cambrure de la houle et que si cette dernière n'est pas réaliste il risque de diverger.

6.3.4 Résultats du modèle RESYFE forcé par SWAN sur la période de tempête

Comme WW3 modélise correctement la houle sur l'ensemble de la simulation, sauf pendant la période de tempête et comme la cambrure des vagues modélisée par SWAN pendant la tempête est correcte à partir du 12-11-99 à 15 h, nous avons décidé de lancer une simulation avec comme forçage de houle : 1) la houle modélisée par SWAN pendant la tempête entre le 12-11-99 à 15 h et le 14-11-99 à 18 h et 2) la houle modélisée par WW3 sur le reste de la simulation.

Au point Sola, les vitesses modélisées par le module de courant du modèle RESYFE (en vert sur la figure 6.21) sont en moyenne de l'ordre 0.43 m.s^{-1} entre le 12 novembre à 15 h et le 13 novembre à 15 h et elles atteignent jusqu'à 0.65 m.s^{-1} ce qui est très au dessus des valeurs mesurées. Comme pour le forçage par WW3, la composante Ouest-Est des vitesses modélisées est plus proche de la

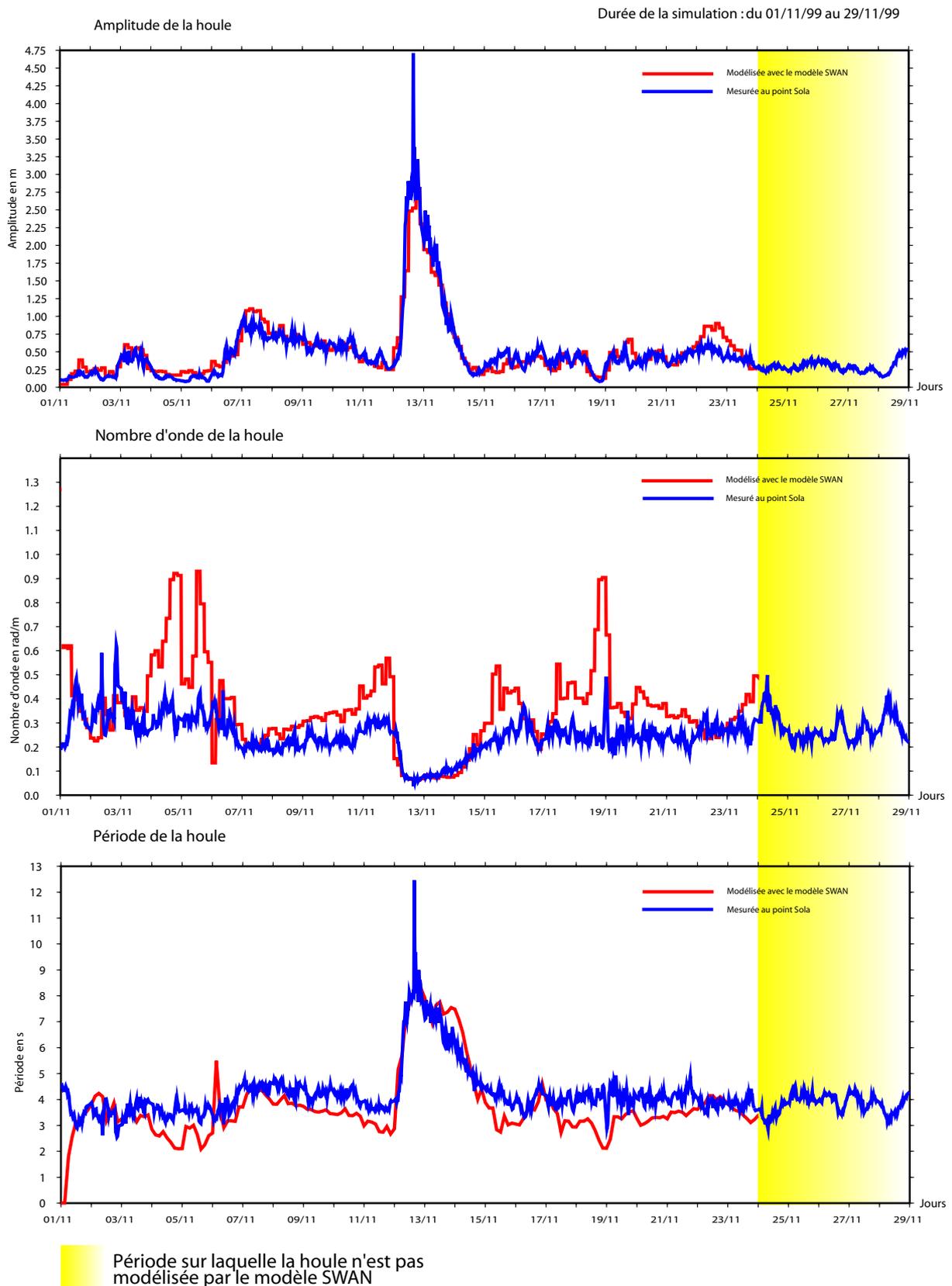


FIG. 6.19 – Amplitude, nombre d’onde et période de la houle au point Sola pendant la période du 01 novembre au 29 novembre 1999 (en bleu : mesure, en rouge : modélisation avec SWAN).

mesure que la composante Sud-Nord qui est très surestimée par rapport à la mesure. Cependant le signal temporel obtenu avec le modèle RESYFE forcé par SWAN semble assez bien se corréliser avec

le signal obtenu par la mesure. Ceci représente déjà une grande amélioration par rapport au forçage par le modèle WW3.

Comme nous l'avons vu au paragraphe précédent, les représentations spatiales de l'élévation de la surface libre et des vitesses de mieux appréhender l'influence d'une forte houle sur l'hydrodynamique de la baie de Banyuls (figures 6.22 et 6.23).

Les cartes ont été réalisées à la même date que pour le forçage de houle modélisée par WW3, à savoir le 12-11-99 à 18 h.

En ce qui concerne l'élévation de la surface libre, contrairement aux résultats obtenus avec le forçage par la houle modélisée par WW3, la différence entre celle modélisée par SYMPHONIE et celle tenant compte de la houle est très nette. En effet, l'ensemble du domaine est soumis à un set-down compris entre plus -10 cm (en noir sur la figure 6.22) et -6 cm, sauf la partie très proche du littoral qui elle est soumise à un set-up compris entre 10 cm et plus de 20 cm (en blanc sur la figure 6.22). Les vitesses 2D moyennées sur la verticale sont quant à elles très importantes (de l'ordre de 0.2 à 0.3 $m.s^{-1}$) et mettent en relief la formation d'une boucle de recirculation sur cette partie de la baie de Banyuls.

En ce qui concerne les vitesses à 3 m au dessus du fond (figure 6.22), la présence de la houle génère une boucle de recirculation dont l'intensité dépasse 0.7 $m.s^{-1}$ sur la partie Ouest du domaine et est de l'ordre de 0.6 $m.s^{-1}$ sur sa partie Est. Au centre de la boucle les vitesses sont quasi nulles (entre 0 et 0.1 $m.s^{-1}$). Le point Sola, situé au bord de la boucle de recirculation, subit son influence et est donc soumis à de forts courants (0.45 $m.s^{-1}$). Sur la partie Ouest du domaine, la boucle suit la côte et peut être assimilable à une dérive littorale dirigée, sur la partie Nord, du Sud vers le Nord et sur la partie sud, de l'Est vers l'Ouest.

En ce qui concerne les courants de surface (figure 6.23), la présence de houle génère aussi une boucle de recirculation qui est décalée vers le sud par rapport à celle générée à 3 m au dessus du fond. L'intensité des courants dépasse 0.7 $m.s^{-1}$ sur tout le pourtour de la boucle et est quasi nulle à son centre.

En ce qui concerne les vitesses de fond (figure 6.23), on retrouve encore une boucle de recirculation peu différente de celle générée à 3 m au dessus du fond.

Le 12-11-99 à 18 h, la modélisation des courants générés par le module de courant du modèle RESYFE forcé par la houle modélisée par SWAN met donc en évidence un « vortex » tel que, sur toute la colonne d'eau, les vitesses soient nulles en son centre et très intenses à sa périphérie. Ce « vortex » couvre la presque totalité du domaine et l'hydrodynamique modélisée avec le modèle RESYFE forcé par SWAN est totalement différente de celle modélisée avec le modèle RESYFE forcé par WW3.

L'utilisation du modèle SWAN afin de modéliser les paramètres de houle, semble justifiée dans le sens où le modèle reproduit bien mieux les amplitudes mesurées au point Sola que le modèle WW3. Cependant la modélisation, par le modèle SWAN, de la période de la houle est problématique car elle peut être très éloignée de la mesure et donc, comme nous l'avons vu, générer des nombre d'onde totalement différents de ceux mesurés. Cette faiblesse du modèle SWAN n'est pas négligeable car le nombre d'onde est un forçage fondamental du module de courant du modèle RESYFE et il influence grandement l'hydrodynamique modélisée par le modèle RESYFE.

6.4 Forçage du modèle RESYFE avec la houle modélisée par REFDIF

6.4.1 Analyse des résultats du modèle REFDIF au site Sola

Etant donné le problème posé par la mauvaise modélisation de la période et donc du nombre d'onde par le modèle SWAN, nous avons donc décidé d'utiliser, durant la tempête, le modèle RESYFE dans sa globalité c'est à dire de générer la houle avec le modèle REFDIF. Ces données, générées entre le 12 novembre 1999 à 12 h et le 14 novembre 1999 à 15 h, ont été obtenues en forçant le modèle REFDIF sur les conditions limites à la frontière Est du domaine avec les valeurs constantes d'amplitude et de période égales aux valeurs mesurées au point Sola. Nous avons donc appliqué la même procédure que Katell Guizien avec le modèle SWAN et nous l'avons généralisée à l'ensemble de la tempête.

Cette procédure a permis de bien modéliser les caractéristiques de la houle au point Sola pendant la tempête et de pouvoir comparer les résultats obtenus avec les modèles REFDIF et SWAN en ce même point (figure 6.24). En effet, en ce qui concerne l'amplitude, les courbes rouge (modèle REFDIF), verte (modèle SWAN) et bleue (mesure) sont presque toujours confondues. Il faut toutefois noter que le modèle REFDIF reproduit un peu moins bien l'amplitude de la houle que le modèle SWAN surtout entre le 12 novembre à 12 h et le 13 novembre à 0 h. Cependant, en ce qui concerne la période et par conséquent le nombre d'onde, si comme on l'a déjà vu précédemment, le modèle SWAN a tendance à systématiquement sous estimer cette dernière par rapport à la mesure, le modèle REFDIF, lui, la reproduit presque parfaitement.

Au final, pendant la tempête, le recours à un modèle monochromatique ne tenant pas compte de l'influence du vent local sur la houle semble justifié puisque le modèle REFDIF reproduit bien les conditions de houle même s'il sous estime un peu l'amplitude en début de tempête.

6.4.2 Résultats du modèle RESYFE sur la période de tempête

Comme au paragraphe 6.3, nous avons décidé de lancer une simulation avec comme forçage de houle : 1) la houle modélisée par REFDIF pendant la tempête entre le 12-11-99 à 15 h et le 14-11-99 à 15 h et 2) la houle modélisée par WW3 sur le reste de la simulation.

Au point Sola, les vitesses modélisées par le module de courant du modèle RESYFE (en vert sur la figure 6.25) ont une intensité du même ordre de grandeur que la mesure sur toute la période de la tempête. De plus, en ce qui concerne l'intensité des vitesses, la courbe temporelle des vitesses modélisées semblent être corrélées à + ou - 1 h près avec la courbe temporelle des mesures. Entre le 12 novembre à 18 h et le 13 novembre à 12 h cette corrélation est flagrante mais les intensités des vitesses modélisées sont de l'ordre de 0.25 m.s^{-1} au lieu des 0.3 m.s^{-1} mesurés. Ce qui s'explique assez bien par la sous estimation de l'amplitude de la houle par le modèle REFDIF sur cette période.

Cependant, la composante Ouest-Est de la vitesse modélisée est surestimée sur la période 12 novembre à 18 h au 13 novembre à 12 h, elle est d'environ 0.15 m/s alors que la mesure est de l'ordre de -0.05 m.s^{-1} . Sur cette période non seulement l'intensité mais aussi la direction de la composante Ouest-Est sont mal modélisées. Sur la même période, la composante Sud-Nord est sous estimée, son intensité est en moyenne de l'ordre de 0.2 m/s tandis que la composante Sud-Nord mesurée est de 0.3 m.s^{-1} .

Le pic de vitesses observé à la date du 12 novembre à 15 h correspond au maximum d'amplitude

modélisé par le modèle REFDIF. La houle modélisée atteint en effet 2.50 m d'amplitude à cette date et les effets de la houle sur le module de courant du modèle RESYFE sont à leur point culminant. Par ailleurs, il est possible que le modèle reçoive un « choc numérique » à cette date car la houle est modélisée en considérant que les valeurs de l'amplitude et de la période de la houle sur l'ensemble de la frontière Est du domaine sont égales à celles mesurées au point Sola et cette procédure a peut être tendance à surestimer les caractéristiques de la houle sur une partie du domaine.

Cependant l'amplitude maximale de houle mesurée est atteinte le 12 novembre entre 16 h et 17 h puis entre 18 h et 21 h et le pic d'intensité maximale des vitesses mesuré n'est atteint qu'entre le 12 novembre à 21 h et le 13 novembre à 0 h.

Le 13 novembre entre 12 h et 21 h les courants modélisés par le modèle RESYFE sont plus intenses de 0.02 m.s^{-1} à 0.1 m.s^{-1} que les courants mesurés au point Sola. La composante Ouest-Est de la vitesse a pourtant tendance à être mieux modélisée que sur la période précédente ; la différence entre les vitesses modélisées et les vitesses mesurées est de l'ordre de 0.05 m.s^{-1} . Par contre la composante Sud-Nord est sur estimée par rapport à la mesure d'environ 0.12 m.s^{-1} et de plus entre 18 h et 21 h cette composante est dirigée dans le sens opposé de la mesure. Pourtant à cette période la houle est bien modélisée par le modèle REFDIF au point Sola, il est donc possible que cette sur mauvaise modélisation des vitesses au point Sola provienne soit de la manière dont on génère la houle avec le modèle REFDIF soit du forçage de vent.

Etant donné la complexité de l'hydrodynamique sur ce domaine, la mauvaise modélisation des vitesses peut aussi résulter du fait que la boucle de recirculation modélisée soit un peu décalée par rapport à la réalité, ou que sa forme soit un peu différente. A la date du 12-11-99 à 18 h, les représentations spatiales de l'élévation de la surface libre et des transports ainsi que des vitesses (de surface, de fond et à 3 m du fond) montrent en effet la forte variabilité des intensités et des directions des vitesses (3D ou 2D) à proximité du point Sola (figure 6.26).

A une centaine de mètres près, à 3 m au dessus du fond, le point Sola est soumis soit à des vitesses beaucoup plus intenses (0.4 m.s^{-1}) et dirigées vers le Nord au lieu du Nord-Est, soit à des vitesses moins intenses (0.1 m.s^{-1}) et dirigées vers l'Est. La bonne modélisation des vitesses au point Sola est donc dépendante de la bonne modélisation de la boucle de recirculation à 100 m près. Notre domaine ayant une résolution de 100 m et les forçages de vent et de houle n'étant pas parfaits, la modélisation de la boucle de recirculation est approximative. Cependant les résultats obtenus même s'ils ne sont pas parfaits sont du même ordre de grandeur que la mesure et il semble possible de dire que l'hydrodynamique modélisée par le modèle RESYFE s'approche de la réalité même si elle n'est pas parfaite.

L'hydrodynamique du domaine est donc caractérisée :

- en ce qui concerne l'élévation de la surface libre, par un set-down pouvant atteindre jusqu'à -20 cm entre -10 m et -20 m de bathymétrie suivit d'un set-up de 10 cm à la côte ;
- et en ce qui concerne les vitesses à 3 m au dessus du fond, par une boucle de recirculation dont l'intensité proche de la côte est de plus 0.7 m.s^{-1} tandis que sur la partie Est du domaine son intensité est de 0.4 m.s^{-1} , les vitesses au centre de la boucle étant quasiment nulles (entre 0.05 m.s^{-1} et 0.1 m.s^{-1}).

6.5 Conclusions

Cet exemple aura permis de montrer l'importance de la prise en compte de la houle durant les tempêtes caractérisées par de forts vents de Sud-Est en Méditerranée. D'autre part elle a montré la validité du modèle RESYFE dans cette configuration puisque :

- les caractéristiques de houle sont le mieux modélisées avec le modèle REFDIF. Cependant, cette bonne modélisation est due au fait que l'on force la frontière ouverte sur le large avec la donnée mesurée au point Sola, ce qui n'est pas une démarche très rigoureuse ; il faudra disposer de plus de données pré-littorales pour s'affranchir de ce genre d'astuce. C'est l'objet des campagnes HYGAM et du déploiement dans le cadre du projet NAUSICAA d'appareils en zone pré-littorale ;
- le module de courant du modèle RESYFE est capable de reproduire les vitesses mesurées au point Sola avec une marge d'erreur d'en moyenne 0.05 m.s^{-1} soit 20 %. Cette marge d'erreur est identique à celle du modèle SYMPHONIE sur ce domaine durant les périodes dominées par le vent.

Cet exemple d'application du modèle RESYFE sur un cas réaliste avec confrontation des vitesses modélisées avec celles mesurées montre que RESYFE est un outil robuste et fiable dans des contextes hydrodynamiques complexes. Plusieurs applications sont en préparation sur d'autres zones du Golfe du Lion, et seront au coeur de la phase B du projet NAUSICAA.

Durée de la simulation : du 01/11/99 au 29/11/99

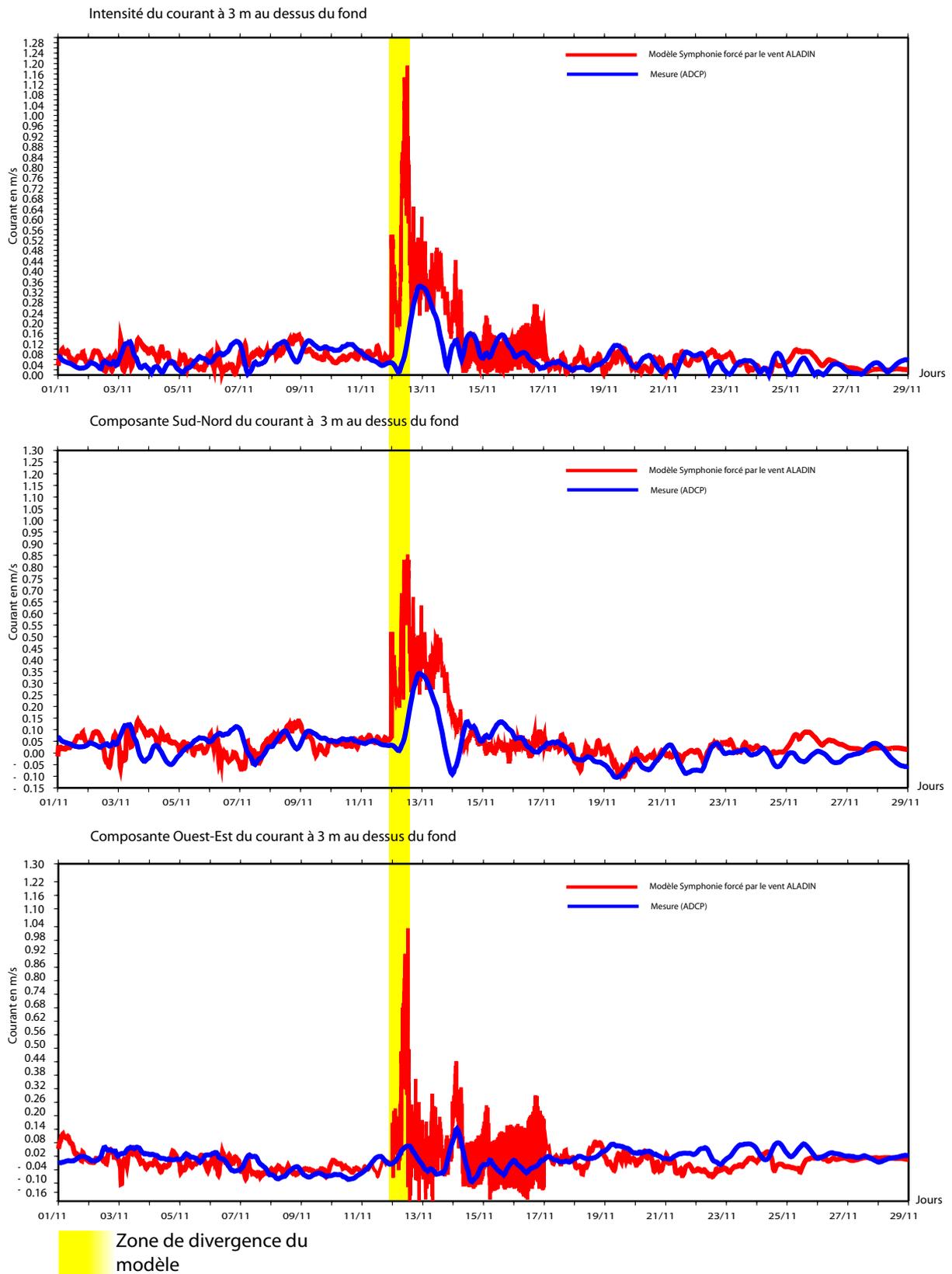


FIG. 6.20 – Résultats donnés par le module de courant du modèle RESYFE forcé par les données de SWAN sans vent local (en bleu : mesure ; en rouge : résultats du modèle). Sont représentés : en haut, la norme des courants 3D à 3 m au dessus du fond, au milieu, leur composante Sud vers Nord et en bas leur composante Ouest vers Est. La bande jaune met en évidence un problème de divergence du modèle le 12 novembre 1999 à 00h00 ainsi que les oscillations qu'elle provoquent jusqu'au 12 novembre à 18h00.

Durée de la simulation : du 01/11/99 au 29/11/99

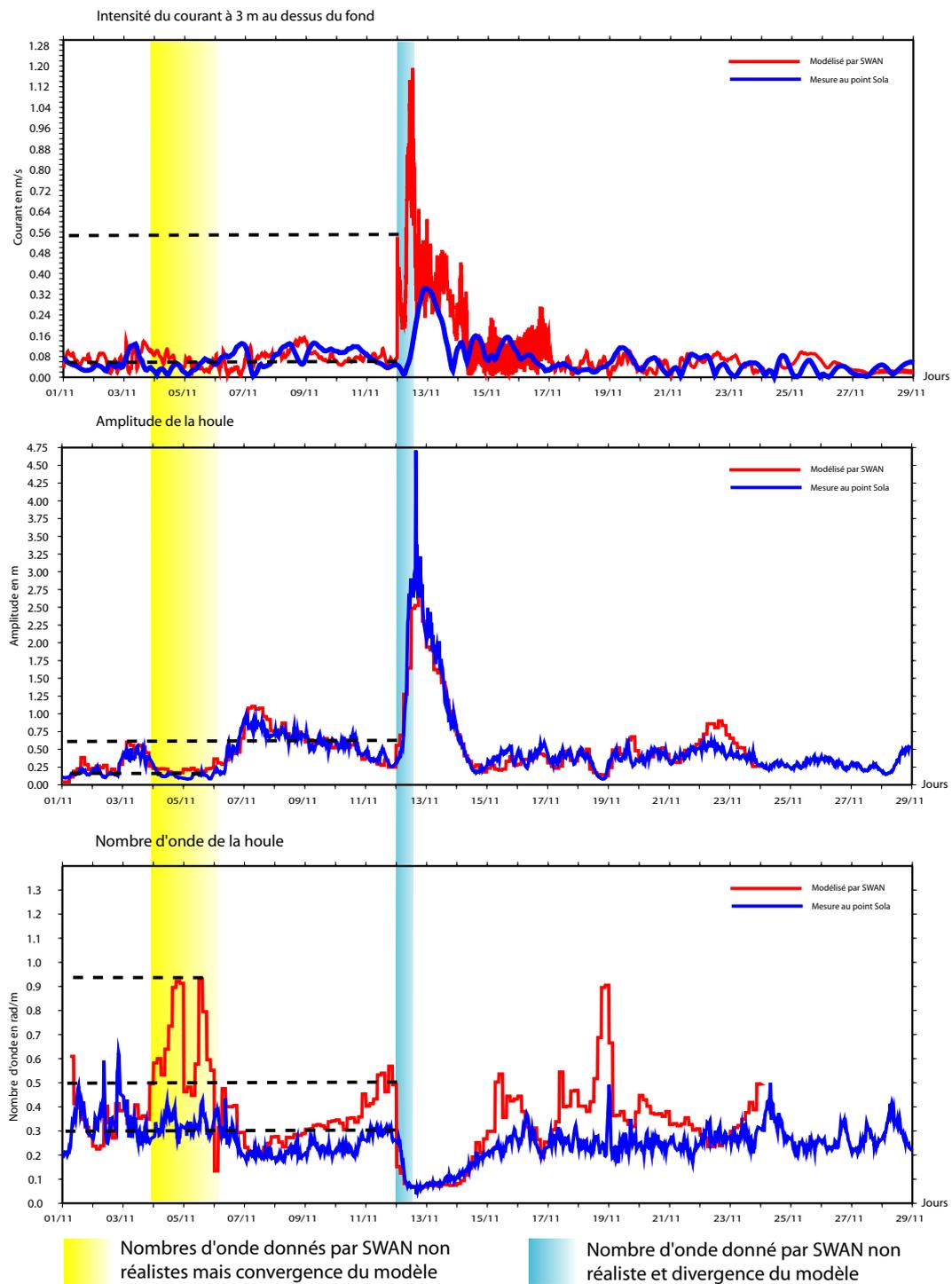


FIG. 6.21 – Analyse des raisons qui provoquent la divergence du modèle lors du forçage par les données de houle fournies par SWAN. Les zones bleues et jaunes mettent en évidence deux périodes durant lesquelles les nombres d’onde modélisés par SWAN sont très différents de ceux mesurés. En jaune, cette différence ne génère pas de divergence du modèle car l’amplitude de la houle est très faible < 0.05 m tandis qu’en bleu la houle est modérée puisque son amplitude est de 0.75 m et le modèle diverge. Les pointillés noirs permettent de pointer les valeurs des amplitudes, des nombres d’onde et des courants normés pendant les périodes colorisées en jaune et bleu.

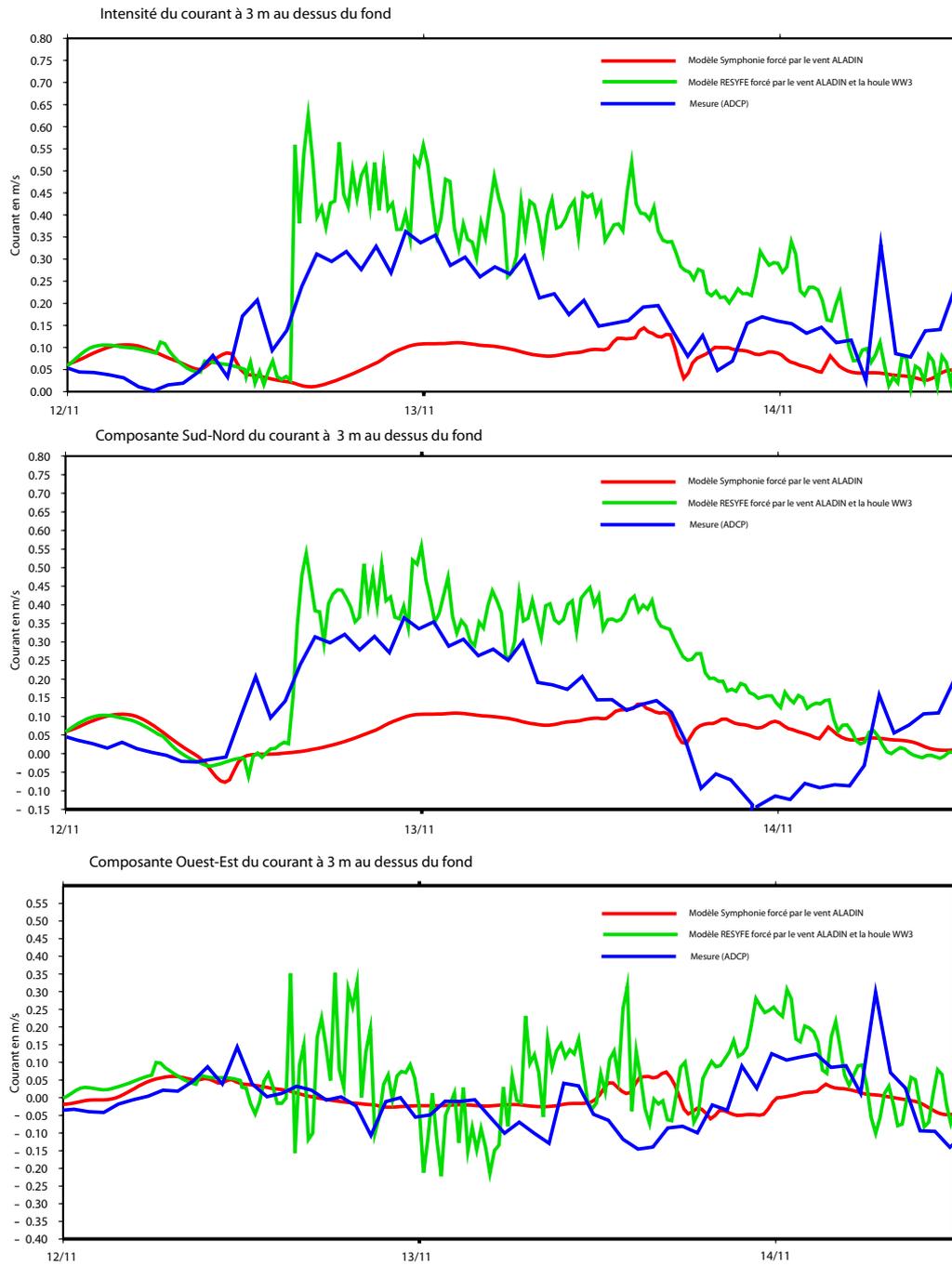


FIG. 6.22 – Vitesses au point Sola, à 3 m au dessus du fond, obtenues sur la période du 12 novembre au 14 novembre par mesure (en bleu) et par modélisation (en rouge : modèle SYMPHONIE avec le vent issu du modèle ALADIN, en vert : module de courant du modèle RESYFE avec le vent issu du modèle ALADIN et la houle issue de SWAN).

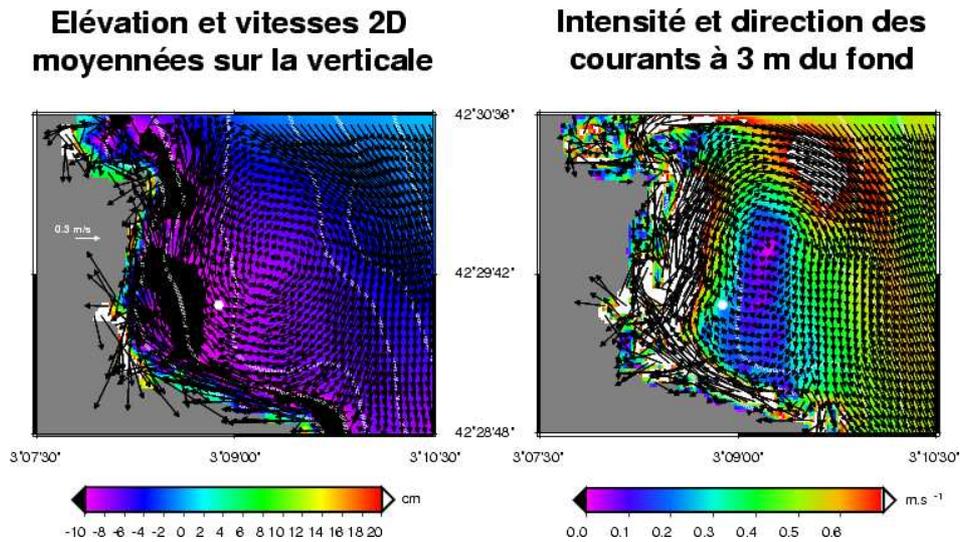


FIG. 6.23 – Circulation sur un domaine restreint au sud de la baie de Banyuls à la date du 12-11-99 à 18 h. Sorties graphiques du modèle RESYFE forcé par SWAN. A gauche : représentation de l'élévation de la surface libre (dégradé de couleurs) et des vitesses 2D moyennées sur la verticale (flèches). A droite : représentation des vitesses à 3 m au dessus du fond (dégradé de couleurs plus flèches).

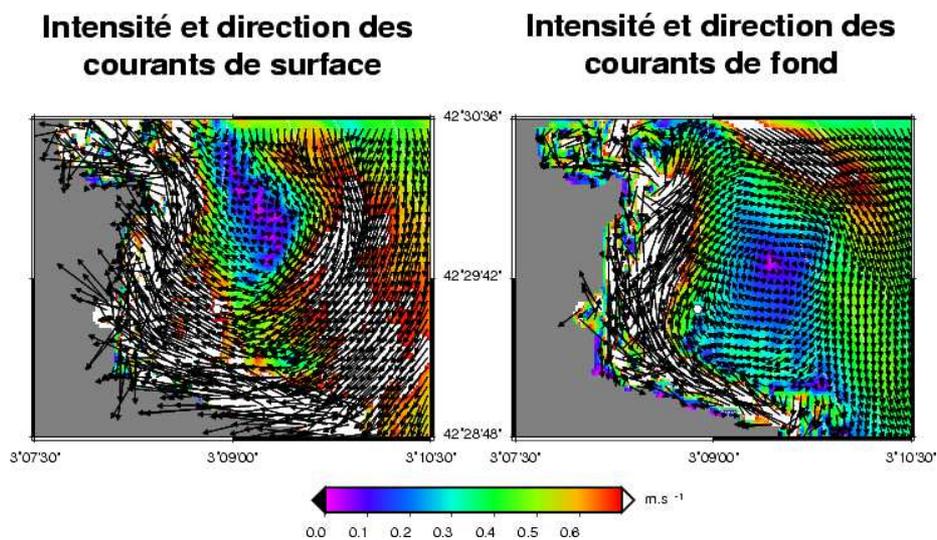


FIG. 6.24 – Circulation sur un domaine restreint au sud de la baie de Banyuls à la date du 12-11-99 à 18 h. Sorties graphiques du modèle RESYFE forcé par SWAN. A gauche : représentation des courants de surface (dégradé de couleurs plus flèches). A droite : représentation des courants de fond (dégradé de couleurs plus flèches).

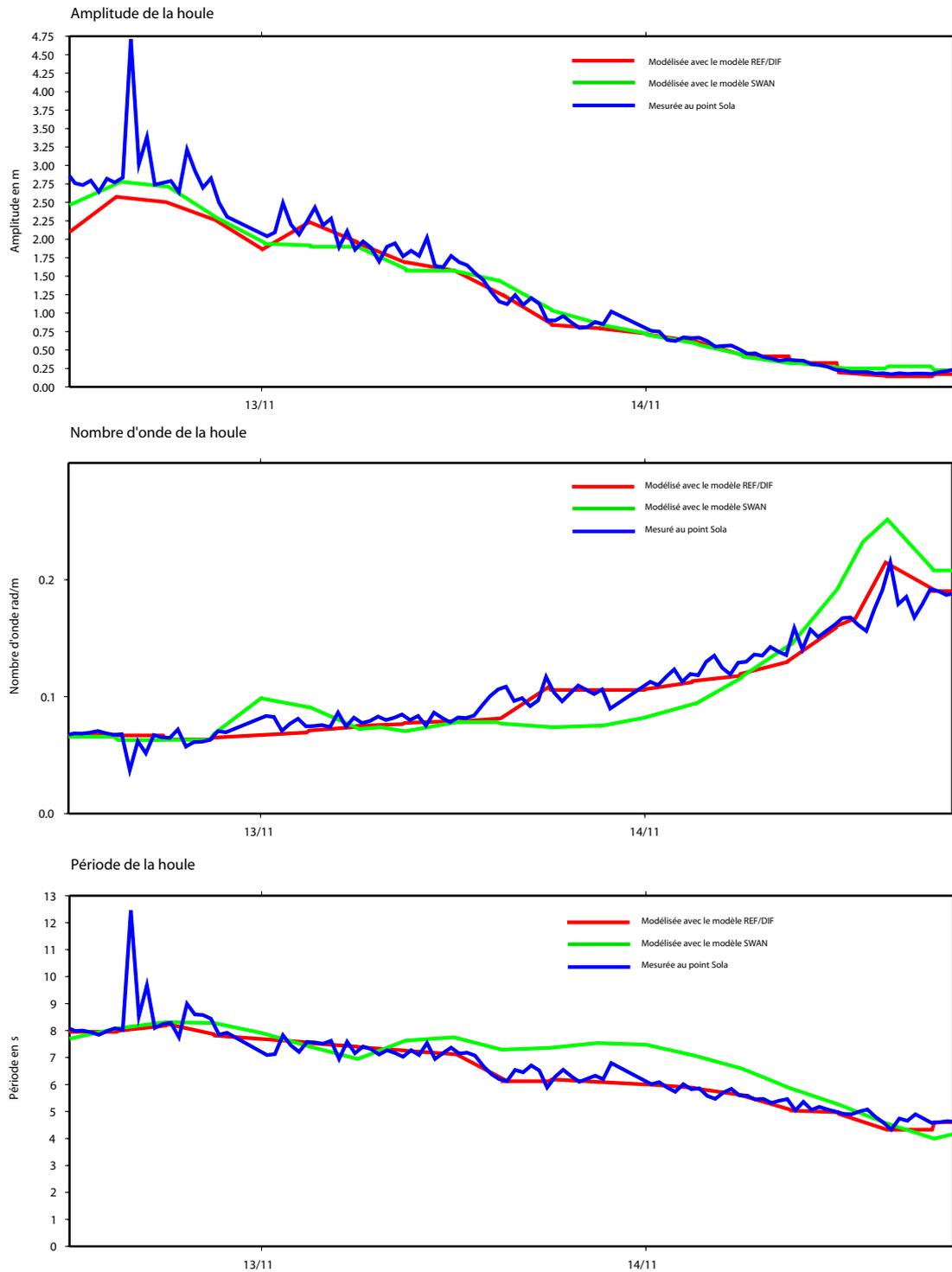


FIG. 6.25 – Comparaison, au point Sola pendant la période du 12 novembre au 14 novembre 1999, des paramètres de houle (amplitude, nombre d’onde et période) obtenus, par la mesure (en bleu), par le modèle REFDIF (en rouge) et par le modèle SWAN (en vert).

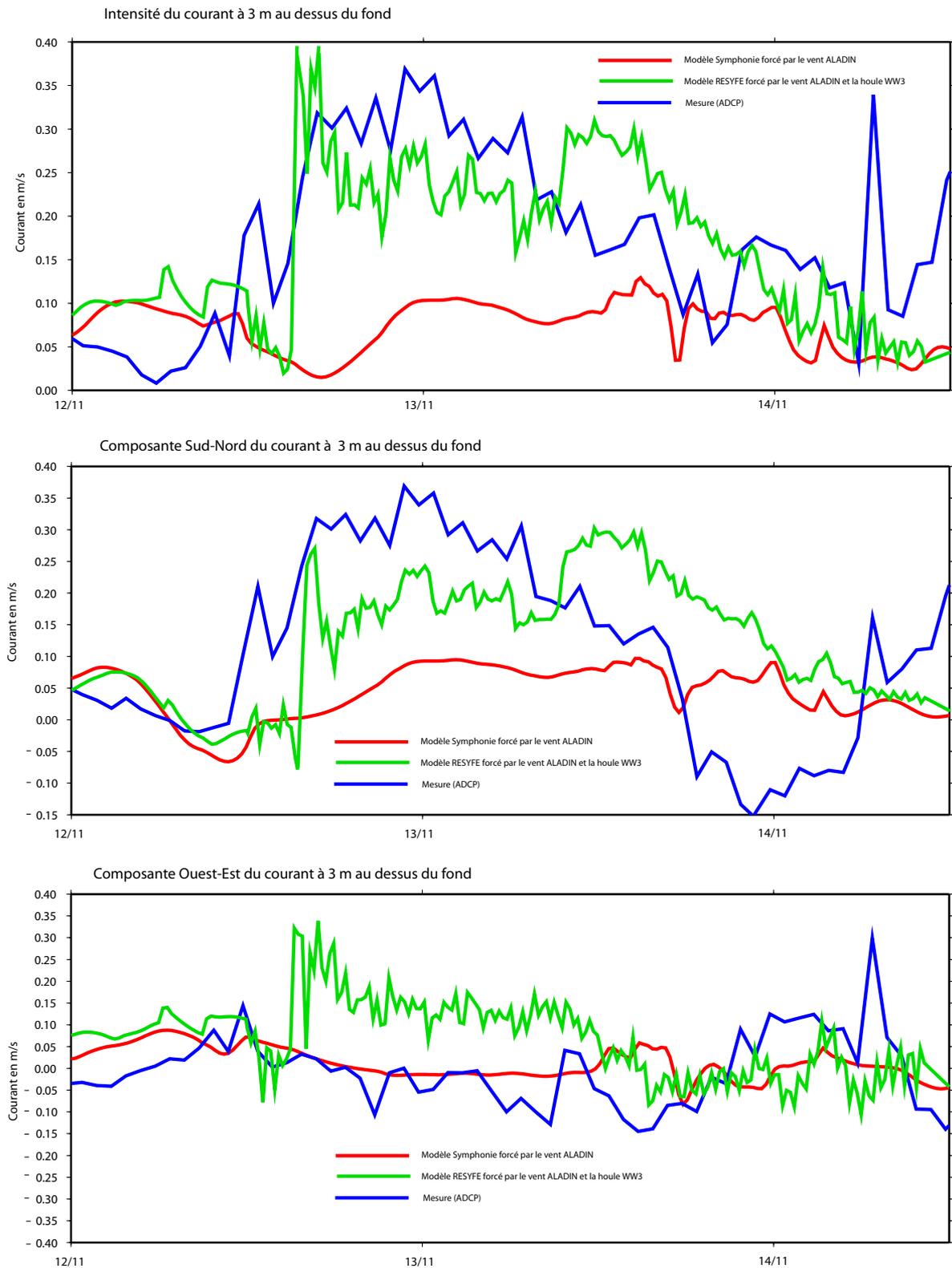


FIG. 6.26 – Vitesses au point Sola, à 3 m au dessus du fond, obtenues sur la période du 12 novembre au 14 novembre par mesure ADCP (en bleu) et par modélisation (en rouge : modèle SYMPHONIE avec le vent issu du modèle ALADIN, en vert : module de courant du modèle RESYFE avec le vent issu du modèle ALADIN et la houle issue de REFDIF).

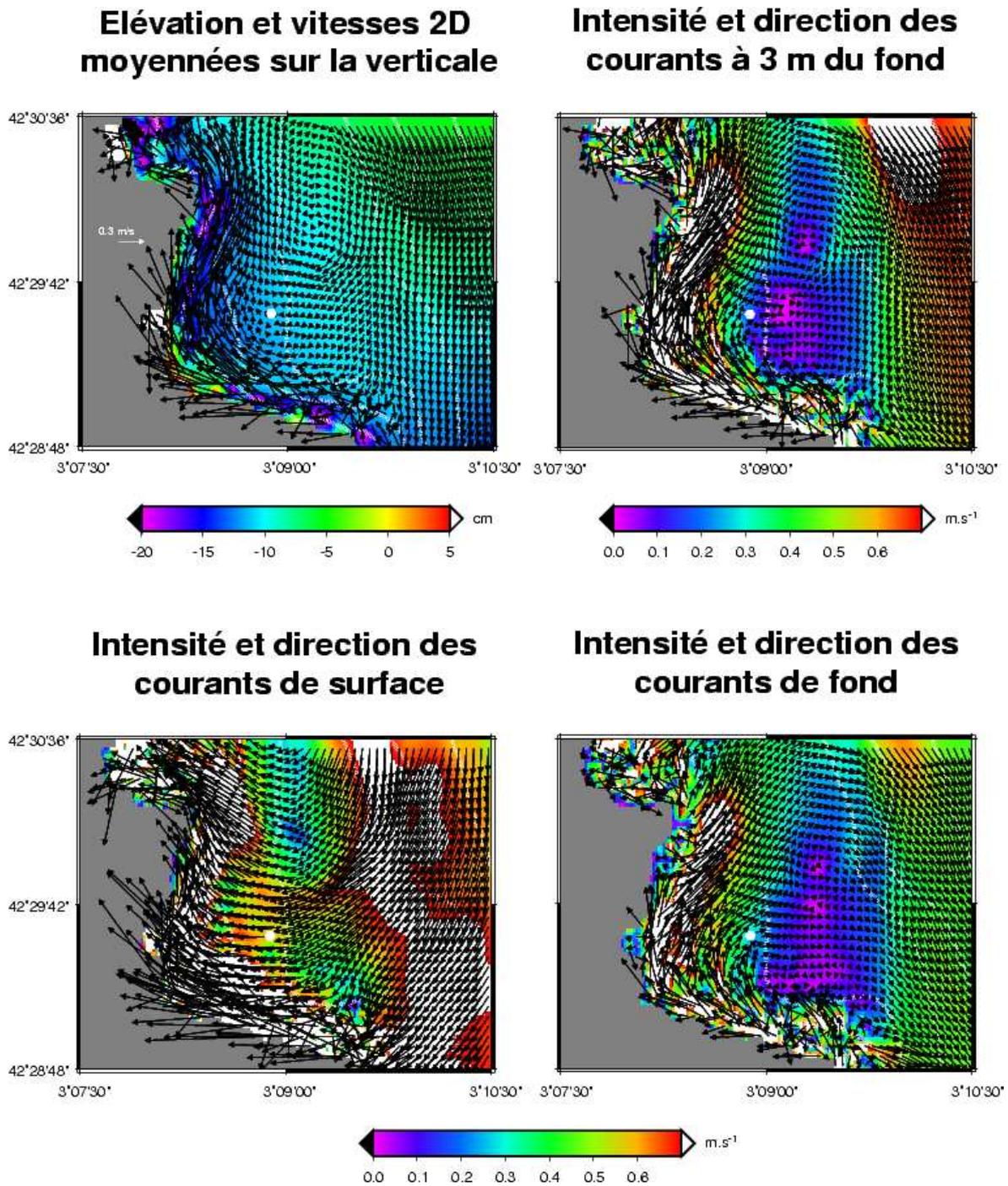


FIG. 6.27 – Circulation sur un domaine restreint au sud de la baie de Banyuls à la date du 12-11-99 à 18 h. Sorties graphiques du modèle RESYFE forcé par REF/DIF. En haut : à gauche, représentation de l'élévation de la surface libre (dégradé de couleurs) et des vitesses 2D moyennées sur la verticale (flèches) et à droite : représentation des vitesses à 3 m au dessus du fond (dégradé de couleurs plus flèches). En bas : à gauche, représentation des vitesses de surface (dégradé de couleurs plus flèches) et à droite : représentation des vitesses de fond (dégradé de couleurs plus flèches).

Chapitre 7

Outil de publication des données

L'objectif de ce chapitre est de présenter l'état de développement de l'outil web de stockage et de valorisation de l'ensemble des données mesurées et modélisées. Cet outil est implanté sur le serveur du département T3E CNRS / Université Montpellier II qui offre déjà les caractéristiques techniques pour ce type de projet. On rappelle que les possibilités de cet outil doivent être les suivantes :

- le téléchargement des données mesurées et des données modélisées sous la forme de cartes habillées et prêtes à l'utilisation ;
- le téléchargement des données mesurées et des données modélisées brutes, dans plusieurs formats (ASCII, XML avec DTD spécifique, NetCDF et Ophica), ou d'autres proposés par le SMNLR ;
- la visualisation directe de données sous forme de cartes générées en fonction de requêtes sur la base de données postées par l'utilisateur avec des formulaires web adaptés ;
- le téléchargement de documents annexes permettant à tout utilisateur d'exploiter au mieux l'atlas hydrodynamique.

L'outil que nous avons conçu pour répondre à ces attentes a été baptisé CRT (pour "Coastal Rendering Tools"). Cette solution technique est totalement basée sur du logiciel libre, et donc parfaitement portable sur d'autres sites pour répondre à des attentes similaires.

7.1 Qu'est-ce que CRT ?

7.1.1 Principe de fonctionnement de CRT

La figure 7.1 présente le principe de fonctionnement de l'outil CRT. CRT permet de récupérer en fonction de critères de recherche des données statiques (cartes, documents PDF, fichiers de données brutes) sur le serveur par le biais de formulaires XML/PHP. Dans le même temps, CRT permet de générer des données à partir de la base de données, et de créer des sorties graphiques et textuelles inédites, correspondant à une attente précise. Il est important de comprendre que CRT repose donc sur la conception et l'implémentation d'une base de données. L'état d'avancement concernant cette base de données est présenté plus loin. Par ailleurs, CRT est en pratique un ensemble de scripts PHP, Bash et codes C, permettant d'interagir avec la base de données, et formater/transformer les données extraites de cette base. Les scripts PHP assurent la communication avec la base (formulaires, upload et download de données,...) et l'ensemble des tâches de présentation des résultats sous forme de pages XML. Les scripts Bash sont créés à la volée par des scripts PHP réagissant aux demandes de l'utilisateur via un formulaire et permettent de réaliser des tâches complexes sur les données de la base en appelant des outils comme ImageMagick et Generic Mapping Tools (création de cartes,

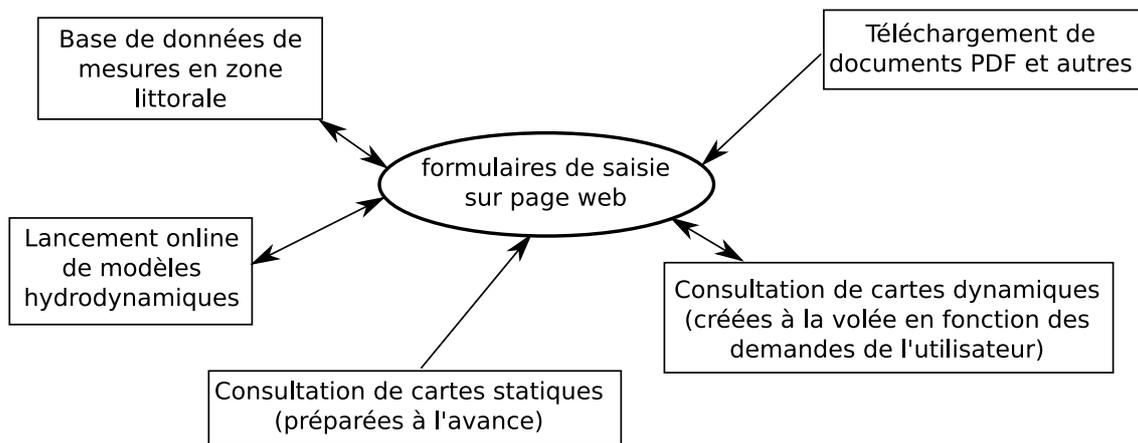


FIG. 7.1 – Principe de fonctionnement de l’outil CRT. CRT est avant tout basé sur l’utilisation de formulaires XML/PHP permettant de dialoguer avec les différents types de données stockées sur le serveur. Les flèches à sens unique indiquent que, pour les données concernées, le formulaire ne sert qu’à choisir et extraire des données existantes et statiques (figées) sur le serveur. Les flèches à double sens indiquent que le formulaire sert dans ce cas à définir les caractéristiques des données voulues, caractéristiques qui sont utilisées par CRT pour générer à la volée ces données et les renvoyer à l’utilisateur. Dans ce second cas, les données n’existent pas sur le serveur sous la forme présentée à l’utilisateur. Elles sont stockées dans une base et sont extraites et reformatées à volonté.

traitement de séries temporelles,...). Les codes C sont issus pour l’essentiel de la librairie LibSTOOCH (www.gladys-littoral.org) et réalisent des tâches élémentaires orientées traitement hydrodynamique sur les données de la base. Ces codes sont utilisés et associés dans les script Bash aux commandes Generic Mapping Tools et Image Magick.

7.1.2 CRT : aspects matériels et logiciels

Le laboratoire GEOSCIENCES-M a investi (notamment pour le projet NAUSICAA) dans l’achat de deux serveurs dédiés à la publication de données on-line. Ce sont des serveurs rack DELL de type 2680. Leur installation a largement amélioré les vitesses d’accès aux pages web. Les deux serveurs ont la même tâche, l’un étant externe, l’autre interne. En d’autres termes, un des deux serveurs est exposé devant le pare-feu du laboratoire GEOSCIENCES-M, alors que le second est protégé à l’arrière. Ce mécanisme proposé par l’équipe d’ingénierie informatique de notre département permet de protéger les données, par un système de bascule régulière des informations d’un serveur à l’autre.

D’un point de vue strictement technique, les logiciels suivants ont été installés et configurés sur les serveurs :

- installation et configuration d’un serveur http Apache 2
- installation et configuration des environnements PHP avec GD et Perl
- installation et configuration de la suite logicielle Generic Mapping Tools
- installation et configuration de la suite logicielle ImageMagick
- installation et configuration d’un serveur de base de données MySQL (v5)
- installation d’un système de réplication des données issues de la mesure littorale ;
- installation d’un système d’écriture et de lancement de scripts permettant la réalisation de modélisations hydrodynamiques sur le serveur distant, et récupération des résultats de ces modélisations.

Toutes ces installations étaient des pré-requis pour le bon fonctionnement de CRT, l’outil de publica-

tion des données du projet NAUSICAA.

7.2 Etat d'avancement des bases de données CRT

L'outil CRT utilise de nombreuses données stockées dans une base de données en vue d'un reformatage sous la forme de cartes, courbes ou autres documents utilisables par le gestionnaire du littoral. La conception de la base de données est donc une étape fondamentale de la réalisation de CRT. On résume ici rapidement l'état d'avancement de la conception de cette base de données par son diagramme E/R.

7.3 Formulaire test pour l'outil CRT

L'outil CRT est pour l'instant accessible via le site du Groupe Languedoc-Roussillon d'Etude de l'Hydrodynamique et la Dynamique Sédimentaire littorale (GLADYS), accueilli sur le serveur web sus mentionné. Pour accéder à l'outil : www.gladys-littoral.org/, puis suivre les liens outils et CRT.

La figure 7.2 montre une copie d'écran d'un formulaire test pour le système CPT. Ce formulaire permet de définir quelques caractéristiques pour une carte que l'on souhaite générer à la volée. Cette carte n'existe pas sur le serveur. Seules les données (X, Y, Z, ou n'importe quelle autre information) sont stockées dans une base, mais pas la représentation graphique qui va être calculée.

The screenshot shows a web browser window displaying the 'Coastal Rendering Tools (CRT) Formulaire de test' page. The browser's address bar shows 'http://www.gladys-littoral.org/'. The page has a blue header with the GLADYS logo and navigation links: Accueil, Equipements, Activités, Outils, Données, Aspects scientifiques. The main content area is titled 'Coastal Rendering Tools (CRT) Formulaire de test' and includes a brief instruction: 'Pour obtenir un fond de carte, vous devez tout simplement remplir le formulaire suivant et choisir de visualiser le script CRT ou calculer la carte.' Below this is a section for 'Définition des caractéristiques de la carte' with several input fields and checkboxes. The 'Identifiant' field contains 'bouc hett' and the 'Mot de passe' field is masked with asterisks. The 'Style de page' dropdown is set to 'Standard'. The 'Génération de la carte' section includes buttons for 'Générer la carte', 'Paramètre par défaut', and 'Visualiser le script GMT'. The 'Taille de la carte (cm)' is set to 18, and the 'Résolution de la carte au téléchargement (dpi)' is set to 300. The 'Coordonnées de la zone à représenter' section has input fields for 'Limite Ouest' (0), 'Limite Est' (360), 'Limite Sud' (-70), and 'Limite Nord' (70). The 'Type de projection' dropdown is set to 'Standard'. The 'Format de page' dropdown is set to 'Standard'. The 'Options d'affichage' section has three unchecked checkboxes: 'Cadre à couleurs alternées', 'Avec fond topographique', and 'Disposition en portrait'. The page footer contains the word 'Terminé'.

FIG. 7.2 – Le formulaire test actuel de CRT.

La figure 7.3 montre une copie d'écran après que l'utilisateur a éventuellement modifié les paramètres de calcul de la carte, et appuyé sur le bouton "voir le script". Ce formulaire test permet alors

de visualiser le script Bash qui est généré par le script PHP. On reconnaît dans ce script Bash des commandes Generic Mapping Tools et Image Magick dans ce cas là.

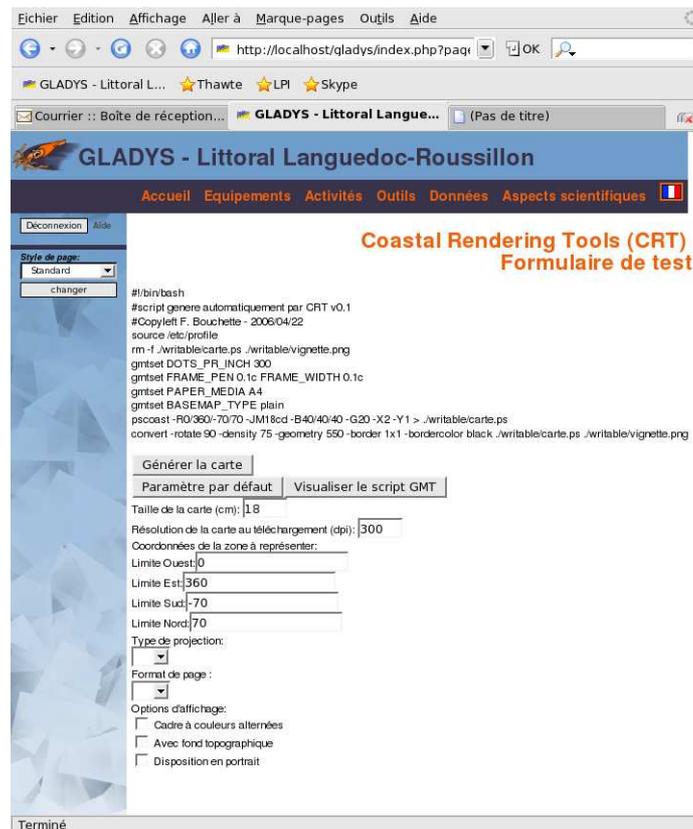


FIG. 7.3 – La visualisation du script sur le formulaire test de CRT.

La figure 7.4 montre une copie d'écran après que l'utilisateur a cliqué sur le bouton "générer la carte". Après un temps de calcul de 1 à 3 secondes selon la requête, on obtient une carte noir et blanc des contours de la zone demandée. En pratique, le script précédent a été lancé sur le serveur, et une page XML a été générée à la volée pour afficher une vignette montrant le résultat, et un lien vers un fichier contenant une version haute définition de la carte demandée.

Ce formulaire-test montre que les problèmes les plus techniques sont résolus. La phase B du projet NAUSICAA sera consacré au débogage de cet outil, à l'élaboration de la base et sa publication via des cartes / formulaires comme celui présenté (avec toutefois une charte graphique complète).

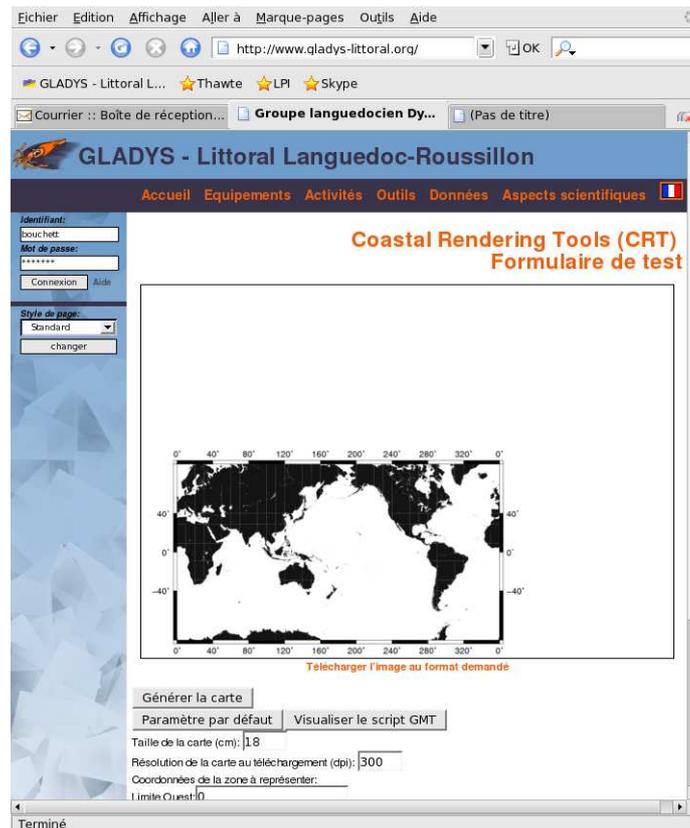


FIG. 7.4 – Le résultat de la requête via le formulaire : une vignette représentant une carte créée à la volée. Le lien en haut de la page permet de télécharger une image haute définition de la carte qui a été également générée à la volée. Dans la phase B, ce principe de formulaire interactif sera développé, et mise en oeuvre sur les données de l'Atlas Hydrodynamique.

Deuxième partie

Contribution de UNIBO-DISTART

by UNIBO-DISTART staff

Chapitre 8

Coastal State Indicators (CSI) : a review

Voir fichier PDF RAPPORT PHASE A - PARTIE II externe joint avec ce dossier.

Troisième partie

Contribution de FRI-NAGREF

par Georgios Sylaios, FRI-NAGREF

Chapitre 9

Présentation de l'état d'avancement du projet

Voir fichier PDF RAPPORT PHASE A - PARTIE II externe joint avec ce dossier.

Quatrième partie

Contribution de ARPA-SIM

Chapitre 10

Préparation de la mise en place de la station de mesure ARPA-SIM

Voir fichier PDF RAPPORT PHASE A - PARTIE II externe joint avec ce dossier.

Cinquième partie

Contribution de La Sapienza

Chapitre 11

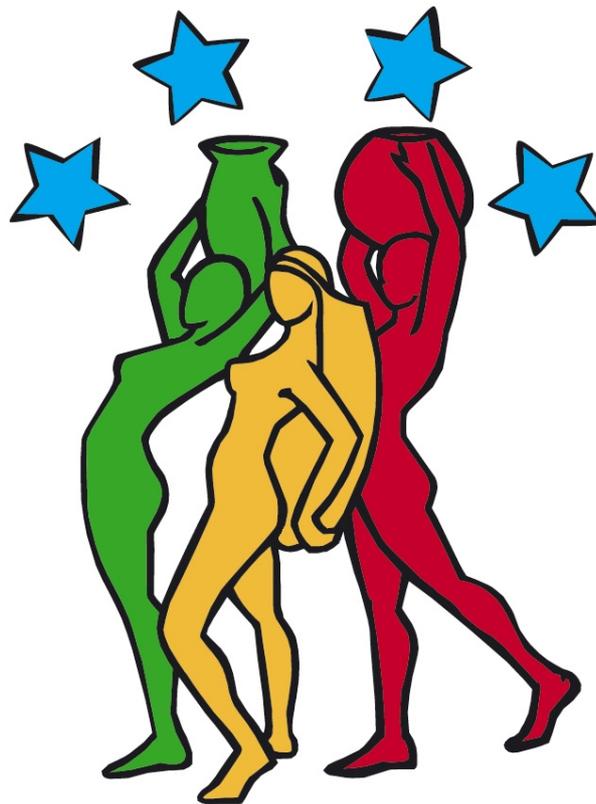
Dynamique des Herbiers de *Posidonia Oceanica* sur la zone étudiée

Voir fichier PDF RAPPORT PHASE A - PARTIE II externe joint avec ce dossier.

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**

**RAPPORT DE PHASE A
VERSION LONGUE
PARTIE II**



This document is part of the NAUSICAA PHASE A long report

CONTRIBUTION PARTNER II

UNIBO-DISTART

Introduction

The most certain method to assess the functionality of coastal defences and thus shoreline and bed evolution in prototype cases is the analysis of a sequence of bathymetries and shoreline surveys coupled with an accurate monitoring of wave climate and sediment characteristics. These kind of observations cause economical and technical difficulties, so that complementary methods to examine with higher frequency and at limited costs the interactions among structures and emerged/submerged beach are often used, like numerical modelling and, more recently, video-monitoring. Numerical simulations, moreover, are very useful at design stage to predict structure effects on hydrodynamics and morphodynamics and consequent desing optimisations.

Morphodynamic modelling

Coastal area morphodynamic models are applied to predict the short-term (hours to days) and medium-term (weeks to months) bathymetric changes associated with such coastal features as groynes, breakwaters and entrance channels.

First, two-dimensional, depth-averaged (2DH) schemes have been developed for the past twenty or so years, see Fleming and Hunt (1976), Latteux (1980), Coeffe and Pechon (1982), Yamaguchi and Nishioka (1984), Watanabe (1985), Young et al. (1988), O'Connor and Nicholson (1989), Andersen et al. (1991), Wang et al. (1992), de Vriend et al. (1993), Tanguy and Zhang (1994), Sato et al. (1995), Leont'yev (1999). Nicholson et al. (1997) present a comparison of the performances of different 2DH numerical models applied to a schematic configuration.

Later on, quasi-three-dimensional (Q3D) and three-dimensional (3D) schemes have been implemented, see de Vriend and Stive (1987), Briand and Kamphuis (1993), Roelvink et al. (1994) and more recently Zyserman and Johnson (2002) and Lesser et al. (2004).

A review of these schemes is reported by de Vriend (1996).

Some works can be found in the literature on the application of 2DH or Q3D models to study coastal defence schemes (Martinelli et al., 2006; Zyserman et al., 2005) and prototype cases, among the others: Damgaard et al. (2002) and Ranasinghe et al. (2004) examine rip currents and bar evolution at Palm Beach and compare numerical results to data derived from video images; Cayocca (2001) performs a long-term simulation of the tidal Arcachon inlet; Lesser et al. (2004) analyze the evolution of the sea bed and adjacent coast at IJmuiden by means of the commercial Delft 3D code developed by WL-Delft Hydraulics.

Detailed simulations of field cases are quite heavy both for field data collection and computational time; due to these reasons, more or less all the quoted works come to simplified assumptions on the climate or in the bathymetry used for simulations (Zyserman et al., 2005). Only a very recent paper (Elias et al., 2006) analyses Texel tidal inlet dynamics by running a three month simulation on a surveyed bathymetry with the morphodynamic Delft 3D code adopting measured waves, winds, tide and water levels.

Coastal video monitoring

Coastal video systems were developed in the early 1980's by the Oregon State University with the aim of using time exposure images for the study of swash processes and patterns of wave breaking to reveal characteristics of submerged sand bars (Holman and Guza, 1984; Holman, 1986; Holman et al., 1993; Aarninkhof and Holman, 1999; Holman et al., 2003). Video monitoring have been then applied to analyse shoreline evolution and more recently to map the intertidal beach (Aarninkhof et al., 2003a) and for recreational purposes in particular within the CoastView project (www.thecoastviewproject.org).

The Argus Programme (www.argus.nl) and related research has led to the development of numerous algorithms for the quantitative extraction of geophysical signals from image data including morphology (Aarninkhof and Ruessink, 2001; Aarninkhof, 2003; Aarninkhof et al., 2003, 2005; Stockdon and Holman, 2000; Davidson et al., 1997, Lippmann and Holman, 1989, 1990, 1993), flows (Chickadel et al., 2003) and wave parameters (Holman and Chickadel, 2004). The basis for all this work is the accurate camera-lens calibration and rectification of oblique images

to rectified plan view images, permitting quantitative measurements relative to a 'real world' coordinate system (Holland et al., 1997). Specific developments include the implementation of the transition from analogue to digital video cameras with the added benefit of 60% improvement in resolution. These technological advances have facilitated the development of new video derived indicators which would not have been previously possible, (e.g. the bathing intensity CSI). Other technological developments include the ability to take simultaneous images from multiple cameras and systems that are powered by wind and solar power for deployment in remote locations.

Routine image collection typically involves the capture of snap-shot, time exposure (usually 10 minute duration) and variance images (highlighting areas of rapidly changing pixel intensity) every hour from multiple cameras. In addition to this the time-domain may be utilised by rapidly sampling (>1 Hz) carefully selected pixels with the specific goal of estimating wave parameters or surface currents for example. As the reliability, accuracy and versatility of coastal video systems has evolved and been tested and reviewed (Aarninkhof et al., 2000, 2005; Alexander and Holman, 2004; Chickadel and Holman, 2003; Stockdon and Holman, 2000; Holland and Holman, 1993a,b; Holland and Holman, 1999, 2001; Holman et al., 1991; Lippmann and Holman, 1989, 1991; Plant and Holman, 1997) the management potential of these systems to assist coastal management processes on sedimentary coasts has been recognised.

Coastal State Indicators

In order to synthesise the many information one can get on coastal dynamics from the different monitoring techniques, Coastal State Indicators (CSIs) have been developed (Davidson, 2002). CSIs are defined as "a reduced set of parameters that can simply, adequately and quantitatively describe the dynamic-state of a coastal system". The indicators should provide three main functions: simplification, quantification and communication. Dale and Beyeler (2001) identify as one of the major challenges to determine which of the numerous measures characterise the entire system, yet are simple enough to be efficiently monitored and modelled.

First CSIs should simplify the task of coastal management for which it is necessary to know when a valuable component of the coast is at risk and to plan coastal zone maintenance. Then they must be an encounter point between the scientist who observes and evaluates them and the manager who uses the information.

An identification of CSIs that is both precise, as the scientist requires, and rapidly obtainable, as the manager needs, is not easy and in practical situation an effort to let them communicate has to be done (Van Koningsveld and Mulder, 2004; Van Koningsveld et al., 2005). CSIs are considered to be crucial, due to the important role they play in the decision-making cycle (see e.g. Gutiérrez-Espeleta, 1998).

The starting point is a recognition that management issues arise from distinct management contexts. Within the CoastView project, four management contexts were identified:

1. coastal protection;
2. recreation;
3. eco-system protection;
4. navigation.

The information needed by managers in these areas are not necessarily different. For example, beach width is relevant for coastal protection as well as for recreation. However the management questions to be answered and the priority given to any particular source of information will tend to be different in each of these contexts.

From each context a series of key issues arises, a not exhaustive list of which can be found in Table 1 (Davidson, 2002). Note that each site is likely to prioritise the issues differently, however the list does include many of the issues that are generic in the sense that they are likely to be of importance across a range of different sites and conditions.

Once the key issues are identified, the search for appropriate CSIs is constrained by the need to find those which:

5. will help the coastal manager address a particular associated question, and
6. will be in a form which the manager will recognise as directly related to the question and be able to use.

The clearest example is the characterisation of beach consistency to address the questions C1 and C2 in Table 1. Some managers adopt as indicator a measure of beach volume (for example in Dutch coasts down to a sub-tidal depth of -4m). This indicator depends upon a range of directly measurable CSIs such as beach width, beach height, beach slope, subtidal water depth

and dune location.

Beach consistency is relevant also to question R3; in this case, the proper CSI is beach width to which the spatial density of persons enjoying the beach is directly related.

Management Context	Key Issues
Coastal Protection	C1: Are coastal defences (including the natural beach) adequate for the range of conditions expected? C2: What is the probability of defences being breached? C3: What infrastructure is at risk from flooding? C4: What is the optimum replenishment scheme for my beach? C5: Is dredging adversely impacting my beach, and can I suggest better alternative procedures? C6: Can I predict beach behaviour if I know something about the offshore bars? C7: How can I optimise coastal defence in the long term?
Recreation	R1: Are beach users safe? R2: How do I identify/predict risks to bathers? R3: When do I need to worry about a decreasing width of my beach? R4: Can I anticipate the occurrence of algal blooms or seaweed 'attacks', and can I do anything to alleviate the problem? R5: What is the current usage of the beach? Where do people go (duration/location)?
Navigation	N1: Where is the navigation channel? N2: How is it likely to evolve? N3: What is the configuration of dangerous banks? N4: How can dredging be optimised (where, how much, how often, where should spoil go)?
Ecosystem Protection	E1: Is the state of dune vegetation a cause for concern? E2: How can the effects of pollutants be mitigated effectively? E3: How can problems for ecosystems be anticipated and avoided or minimised?

Table 1. From Davidson (2002).

References

- Aarninkhof, S. G. J. and Ruessink, B. G., 2001. Video observations of wave breaking and the implications for wave decay modelling. Proc. Coastal dynamics '01, New York ASCE, 979-988.
- Aarninkhof, S. G. J., 2003. Nearshore bathymetry derived from video imagery. Phd Thesis, delft university of technology, The Netherlands, 165 p.
- Aarninkhof, S. G. J., Turner, I. L., Thomas, T. D. T., Dronkers, Caljouw, M. and L. Nipius, 2003a. A video-based technique for mapping intertidal beach bathymetry Coastal Engineering, 49 (4), 275-289.
- Aarninkhof, S. G. J., Ruessink, B. G., Roelvink, J. A. and De Kruif, A. C., 2003b. Quantification of surfzone bathymetry from video observations of wave breaking. Proc. Coastal sediments Conf., Florida, USA.
- Aarninkhof, S. G. J., Ruessink, B. G., Roelvink, J. A., 2005. Nearshore subtidal bathymetry from time-exposure video images. J. Geophys. Res., 110, C06011, doi:10.1029/2004JC002791.
- Alexander, P. S. and R. A. Holman, 2004. Quantitative analysis of nearshore morphological variability based on video imaging, Marine Geology, 208 (1), 101-111.
- Andersen, O. H., Hedegaard, I. B., Ronberg, J. K. and Deigaard, R., 1991. Model for morphological changes in the coastal zone, Proc. Int. Symp. on the Transport of Suspended Sediment and Its Mathematical Modelling, Florence, 327-338.
- Briand, M. H. G. and Kamphuis, J. W., 1993. Sediment transport in the surf zone: a quasi 3-D numerical model, Coastal Engineering, 20, 135-156.
- Cayocca, F. 2001. Long-term morphological modeling of a tidal inlet: the Arcachon Basin, France, Coastal Engineering, 42, 115-142
- Chickadel, C. C., Holman, R. A. and M. F. Freilich, 2003. An optical technique for the measurement of longshore currents, J. Geophys. Res., 108 (c11).
- Coeffe, Y. and Pechon, P., 1982. Modelling of sea-bed evolution under waves action, Proc. 18th Int. Conf. on Coastal Engineering, Cape Town, 1, 1149-1160.
- Dale, V. H. and Beyeler, S. C. 2001. Challenges in the development and use of ecological indicators, Ecological Indicators, 1, 3-10.
- Damgaard, J., Dodd, N., Hall, L. and Chesher, T., 2002. Morphodynamic modelling of rip channel growth, Coastal Engineering, 45, 199-221.
- 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. and Stive, M. J. F., 1987. Quasi-3D modelling of nearshore currents, *Coastal Engineering*, 11, 565-601.

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.

de Vriend, H. J., Zyserman, J., Nicholson, J., Roelvink, J. A., Péchon P. and Southgate, H. N., 1993. Medium-term 2DH coastal area modelling, *Coastal Engineering*, 21 (1-3), 193-224.

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 Engineering*, 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 Engineering*, Honolulu, ASCE, I, 1184- 1202.

Gutiérrez-Espeleta, E. (1998). Designing Environmental Indicators for Decision Makers. Invited Paper. *Proc. Joint Conf. of the Int. Assoc. of Survey Statistician and the Int. Assoc. for Official Statistician*. National Institute of Statistics, Geography and Informatics. Aguascalientes, México.

Holland, K. T, Holman, R. A., 1993a. The statistical distribution of swash maxima on natural beaches, *J. Geophys. Res.*, 98 (c6), 10,271-10,278.

Holland, K. T, Holman, R. A., 1993b. A stereometric technique for mapping foreshore topography, *EOS trans., AGU*.

Holland, K. T, Holman, R. A., Lippmann, T. C., Stanley J. and Plant N., 1997. Practical use of video imagery in nearshore oceanographic field studies. *Journal of Oceanic engineering*, 22(1), 81-92.

Holland, K. T, Holman, R. A., 1999. Wavenumber-frequency structure of infragravity swash motions, *J. Geophys. Res.*, 104 (c6), 13479-13488.

Holland, K. T, Puleo, J.A. and T.N. Kooney, 2001. Quantification of swash flows using video-based particle image velocimetry, *Coastal Engineering*, 44, 65-77.

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.

Holman, R.A., Lippmann, T.C., O'Neill, P.V. and K. Hathaway, 1991. Video estimation of subaerial beach profiles, *Marine Geology*, 97, 225-231.

Holman, R.A. and C.C. Chickadel, 2004. Optical remote sensing estimates of the incident wave angle field during NCEX, *Proc. 29th Int. Conf. on Coastal Engineering*.

Latteux, B., 1980. Harbour design including sedimentological problems using mainly numerical technics, *Proc. 16th Int. Conf. on Coastal Engineering*, Sydney, 2213-2219.

Leont'yev, I. O. 1999. Modelling of morphological changes due to coastal structures, *Coastal Engineering*, 38, 143-166.

Lesser, G. R., Roelvink, J. A., van Kester, J. A. T. M. and Stelling, G. S., 2004. Development and validation of a three-dimensional morphological model, *Coastal Engineering*, 51 (8-9), 883- 915.

Lippmann, T.C. and Holman R.A., 1989. Quantification of sand bar morphology: a video technique based on wave dissipation. *J. Geophys. Res.*, 94 (c1), 995-1011.

Lippmann, T.C. and Holman R.A., 1990. The spatial and temporal variability of sand bar morphology. *J. Geophys. Res.*, 95(c7), 575-590.

Lippmann, T.C. and Holman R.A., 1991. Phase speed and angle of breaking waves measured with video techniques, *Proc. Coastal Sediments*, '91, 542-556, ASCE, New York.

Lippmann, T.C. and Holman R.A., 1993. Episodic, non-stationary behaviour of a double bar system at duck, North Carolina, USA, 1986-1991. *J. Coastal Res.*, special issue no.15, 49-75.

Martinelli, L., Zanuttigh, B. and A. Lamberti, 2006. Hydrodynamic and morphodynamic response of isolated and multiple low crested structures: experiments and simulations, *Coastal Engineering*, 53 (4), 363-379.

Nicholson, J., Broker, I., Roelvink, J. A., Price, D., Tanguy, J. M. and Moreno, L., 1997. Intercomparison of coastal area morphodynamic models, *Coastal Engineering*, 31, 97- 123.

O'Connor, B.A. and Nicholson, J., 1989. Modelling changes in coastal morphology. In: S.S.Y. Wang (Editor), *Sediment Transport Modeling*. ASCE, 160- 165.

Plant, N.G., and R.A. Holman, 1997. Intertidal beach profile estimation using video images, *Marine Geology*, 140, 1-24.

Ranasinghe R., Symonds, R., Black K. and Holman, R., 2004. Morphodynamics of intermediate beaches: a video imaging and numerical modelling study, *Coastal Engineering*, 51 (7), 629-655.

Roelvink, J. A., Walstra, D. J. R. and Chen, Z., 1994. Morphological modelling of Keta Lagoon case,

- Proc. 24th Int. Conf. on Coastal Engineering, Kobe, ASCE, 3223-3236.
- Sato, K., Shuto, N., and Tanaka, H., 1995. Numerical simulation of the sand spit flushing at a river mouth. In: Chinese Hydraulic Engineering Society and International Research and Training Center on Erosion and Sedimentation (Editors), *Adv. in Hydro-Science and Eng.*, Vol. II, Part B, Tsinghua University Press, Beijing, 1399-1406.
- Stockdon, H.F. and R.A. Holman, 2000. Estimation of wave phase speed and nearshore bathymetry from video imagery. *J. Geophys. Res.*, 105 (c9), 015-033.
- Tanguy, J. M. and Zhang, B., 1994. Morphological modeling of the evolution of a trench connecting a lagoon to the sea at Keta - Ghana, *Proc. Int. Symp. on Waves - Physical and Numerical Modelling*, Vancouver.
- 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., Davidsen 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.
- Wang, H., Miao, G. and Lin, L.H., 1992. A time-dependent nearshore morphological response model, *Proc. 23rd Int. Conf. on Coastal Engineering*, Venice, ASCE, 2513-2527.
- Watanabe, A., 1985. Three-dimensional predictive model of beach evolution around a structure, *Proc. Water Wave Research Conf.*, Hannover, 121- 141.
- Yamaguchi, M. and Nishioka, Y., 1984. Numerical simulation on the change of bottom topography by the presence of coastal structures, *Proc. 19th Int. Conf. on Coastal Engineering*, Houston, ASCE, 1732-1748.
- Young, D. L., Lin, M. C., Jan, C. D. and Jeng, J. L., 1988. A study on beach deformation around Cho-Shui River Mouth, *Proc. IAHR Symposium on Mathematical Modelling of Sediment Transport in the Coastal Zone*, Copenhagen, 58-67.
- Zyserman, J. A. and Johnson H. K., 2002. Modelling morphological processes in the vicinity of shore-parallel breakwaters, *Coastal Engineering*, 45 (3-4), 261-284.
- Zyserman, J., Johnson, H. K., Zanuttigh, B. and Martinelli, L., 2005. Analysis of far-field erosion induced by low-crested rubble-mound structures, *Coastal Engineering*, 52 (10-11), 977-994.

CONTRIBUTION PARTNER III FRI-NAGREF

Redacteur:
Dr.Sylaios Georgios,Océanographe
Chercheur ETHIAGE-INALE
NEA PERAMOS, JUIN 2006

Importation

Le programme BEACHMed-e européen qui est financé par l'initiative Interreg III C communautaire / Zone Sud s'occupe de l'étude, enregistrement et confrontation du problème de l'érosion de ligne côtière des régions qui participent au programme.

Dans ce cadre sub-mesure 2.2. est mentionné à l'effet ondulatoire du régime et des conditions hydrodynamiques côtières aux travaux d'érosion de ligne côtière. La mesure vise à l'enregistrement et décalque incident ondulatoire de l'au énergie par longueur ligne côtière, travail responsable vers la côte du transport transversal de sédiments, à la recherche du rôle des courants côtiers longitudinal au transport et au dépôt de ces sédiments, ainsi qu'à l'étude de la protection anticorrosive que le cas échéant ils offrent sous-marins prairies de la *Poseidonia oceanica*.

La concrétisation du sub-mesure 2.2 a été attribuée par la région de Macédoine et Thrace – orientale à l'institut d'enquête de pêche du ETHIAGE pendant la concrétisation de ce travail, le IN.AL.E on attend :

a) pour il collectionne et pour il élabore des données historiques et météorologiques provenus de centres existants et des réseaux ondulatoires d'enregistrement de l'Égée du nord,

b) pour il place à des places choisies de déploiement à distance proche ligne côtière un enregistreur de houle et de courant à effet Doppler - directif autographique (ADCP), pour l'enregistrement sur place et le décalque ondulatoire et des caractéristiques hydrodynamiques à combinaison avec les conditions météorologiques prédominantes,

c) pour il applique une série complète calibration et certifiés ondulatoires d'effigies mathématiques avec pour but l'extension horaire et territoriale des données de champ par longueur entière ligne côtière de la région RE.M.TH., et

d) pour imprime les données combinées de champ et les résultats des simulations mathématiques à et complété un ondulatoire complet Atlanta de ligne côtière de la région RE.M.TH., un outil important pour la planification et l'aménagement de travaux de protection anticorrosive.

Responsable scientifique de la concrétisation du sub-mesure 2.2 de la part du IN.AL.E sera le Dr Georgios Sylaios océanographe, chercheur ETHIAGE-INALE chargé de mission. Le travail se concrétisera en coopération avec le laboratoire côtière hydraulique de la partie d'ingénieurs politiques de l'université de Thessalonique Aristotélicienne (professeur responsable M. Panayotis Prinos).

Flottements et érosion

L'érosion des zones côtières peut détruire des résidences et infrastructures, en menaçant la sécurité de la population et la croissance d'activités économiques, comme du tourisme, tandis que parallèlement il constitue risque sérieux pour les écosystèmes naturels. De grandes parties de la zone côtière européenne sont menacées aujourd'hui par l'érosion et les inondations, tandis que simultanément leur importance économique augmente en raison de la concentration permanente de la population à la zone côtière. Pour la confrontation du problème sont exigées de nouvelles formes viables de gestion des côtes, alors que dites les solutions mécaniques "dures", comme fabrication de systèmes de protection maritime et de brise-lames et certaines techniques "douces" de protection, comme le transport de sable d'autres régions pour le renforcement des systèmes sable dunes, peuvent avoir des résultats contraires.

La limite entre la terre ferme et la mer constitue une zone exceptionnellement complexe et dynamique, à laquelle le mouvement de la mer influe avec le mouvement de la matière terrestre. La mer développe à l'intérieur des quantités énormes d'énergie, que il applique à ligne côtière en provoquant des phénomènes corrosifs. Cette action est transportée principalement par l'atmosphère, pendant la durée de tempêtes de pluie ou d'intensité plus basse de vents, qui

provoquent des vagues de diverses caractéristiques, l'effet dont transportent les sédiments transversaux ou selon la longueur des côtes. Sont développées ainsi des régions qui sont caractérisées par la perte intense de sédiments en raison d'érosion, ainsi qu'autres où le dépôt de sédiments est important.

Pays	Son pourcentage (%) de ligne cotiere qui a subi érosion	Pays	Son pourcentage (%) de ligne cotiere qui a subi érosion
Belgique	25,5	Italie	22,8
Chypre	37,8	Lettonie	32,8
Danemark	13,2	Lituanie	24,3
Estonie	2,0	Pays-Bas	10,5
Finlande	0,04	Pologne	55,0
France	24,9	Portugal	28,5
Allemagne	12,8	Espagne	11,5
Grèce	28,6	Suède	2,4
Irlande	19,9	Royaume-Uni	17,3

Tableau 1. Niveau d'érosion côtière aux Etats de l'Union européenne.

Pour l'estimation incident ondulatoire de l'énergie tant à la zone de rupture des vagues de ligne côtière qu' au-delà de la zone de rupture, il faudra que nous ayons des informations relatives ondulatoires aux caractéristiques, comme le montant de vague et la période. Ces tailles, déterminent l'intensité des vitesses et des accélérations ainsi que les orbites de mouvement des corpuscules d'eau pendant la durée chaque ondulatoire de période. Inférieur à mouvement par période ondulatoire, connue en tant que transport de masse d'eau, est modifié substantiellement à la colonne d'eau. Son prix aux régions beaucoup près du fond, constitue le critère de base de déplacement des sédiments.

Résulte donc l'importance de compréhension des mécanismes de production de vagues, afin que soit possible la prévision de leurs caractéristiques sur base des conditions météorologiques prédominantes. Les vagues générales sont développées aux eaux profondes sous l'effet du vent, et sont disséminées se mis en marche vers de diverses adresses jusqu'à leur rupture à diverses lignes côtières. Selon leur mouvement, cette importante de l'énergie leur on partie perd, en diminuant leur montant alors qu'ils modifient leur adresse selon leur passage de la zone de profondeur intermédiaire du plateau continental. A la fin, ces vagues se rapprochent de la zone de rupture où aussi ils cassent en provoquant des interactions complexes aux structures naturelles côtières ou les fabrications artificielles.

De ci-dessus il s'ensuit que pour l'étude de la sédimentologie des travaux à une n'importe quelle partie de ligne côtière est exigée la connaissance très bonne ondulatoire des caractéristiques, ainsi que leur répartition au cours de l'année sur base prédominants chaque de fois vents. Ce le décalque, connu en tant que **régime ondulatoire ou climat** (climat de houle), devrait constituer de ce à livrer programme de base. Le Atlas ondulatoire constituera un outil important pour les scientifiques et les ingénieurs qui s'occupent de la zone côtière, alors qu'il contribuera substantiellement à la planification de fabrications artificielles côtières, ainsi qu'à l'étude de transport de sédiments côtiers. Cependant, en raison du temps limité de concrétisation du programme mais aussi des incertitudes qui résultent méthodologiquement pour la détermination exacte de quelqu'un ondulatoire de paramètres, erreurs calculatrices importantes est possible qu'ils soient introduits même avec l'emploi d'effigies mathématiques complexes. Pour cette raison, le Atlas ondulatoire devra imprimer davantage les caractéristiques qualitatives

ondulatoires et moins les quantitatifs.

Vagues et façon caractéristique de ondulatoire

Le terme vague habituellement est lié à l'image de changement de la surface libre de la mer ou d'un lac, à une symétrie correspondante et à une régularité, laquelle est mise en marche par sa région naissance vers la côte, où habituellement il casse et reflète. Ainsi chaque flottement peut être considéré comme enchaînement de battements distincts qui sont distingués par le passage de la surface libre de l'eau d'une place de maximal correspondant à une place de minimum correspondant (sommet et ventre de la vague, respectivement).

Les vagues sont créées par forces lesquelles perturbent la colonne de l'eau à la mer ouverte. La source de ces forces peut varier de l'attraction lourde soleil lune, les sous-marins des séismes jusqu'aux mouvements des navires et des nageurs. Cependant la majorité écrasante des flottements maritimes est forcée par le vent. Plus concrètement, la vague forcée par le vent est la perturbation qui arrive à la surface libre de l'eau, c'est-à-dire à la surface séparatrice entre deux liquides, la liquide (la mer) et au gaz (air atmosphérique). Les corpuscules de la masse d'eau exécutent selon le passage de la vague substantiellement un mouvement alternatif fermé, donc sont déplacés vers devant avec la exaltation de la vague, mais retournent en arrière à leur place initiale avec le plongement immédiatement prochain. Les vagues dans un tel cas sont caractérisées comme alternativement donc aussi n'existe pas transport de masse.

Existent cependant aussi des cas auxquels liquide il ne revient pas exactement à son place initiale, mais avec chaque passage de vague il avance contre que selon l'adresse de sa transmission. Ce mouvement conduit substantiellement au transport de masse, c'est pourquoi les vagues sont caractérisés en tant que "presque alternatifs". Existe, enfin et le cas marginal auquel les corpuscules de l'eau avancent tout à fait avec la vague, sans que reviennent nullement vers les en arrière et naturels sous ces conditions a lieu transport réel de masse : la vague, est caractérisée alors en tant que "vague de déplacement".

Les vagues à la surface de la mer sont dues à des forces qui agissent soit entière à la masse d'eau (forces massives) soit aux deux limites qui elle renferment donc la surface libre de l'eau et le fond solide. Ainsi p. ex. lorsque souffle vent sur la mer, est prochain selon le mouvement des gaz de masses pour ils exercent transversales et des forces à la surface lesquelles créent finalement les vagues forcées par le vent - à cause de la cause qui il les provoque.

Les perturbations à l'autre limite de la mer, donc au fond (comme p. ex. affaissements, explosions de volcan, secousses sismiques) causent des vagues à la surface, lesquels a été établi qu'ils portent le nom japonais tsunamis. Enfin nous avons aussi des vagues qui sont provoquées par forces qui agissent entière à la masse d'eau : telles ils sont Newton forces des planètes, principalement son soleil et de la lune, lesquelles est naturel qu'ils exercent à la masse maritime à condition que celle-ci prend 71% de la surface de notre planète. Les vagues qui sont créées par ces ses forces sont les marées.

Le phénomène de la genèse et de la diffusion des vagues probablement pour il passe des quatre phases suivantes : 1) de la première phase de la coordination à laquelle agit sur la surface de l'eau turbulent l'écoulement de l'air, 2) de la deuxième phase de stresses laquelle est provoquée par montant du changement de la vitesse moyenne du vent, 3) de la troisième phase, lorsque flottement ils vivent pour ils influencent la circulation des gaz de masses près de surface et deviennent des causes de tension de cisaillement de tendances, et enfin 4) de la quatrième phase à laquelle commence la casse des vagues produits, en raison de prix élevés de leur courbure.

La taille des vagues forcées par le vent origine détermine par trois facteurs de base: a) la vitesse de vent, b) la durée de souffle du vent et c) la longueur de fetch du flottement, c'est-à-dire la distance dont le vent souffle au-dessus de l'eau pour crée des vagues. Aussi longtemps que plus rapidement souffle un vent, aussi longtemps que plus grand est sa durée de souffle et aussi longtemps que plus grand est le fetch, tellement plus grands sont les vagues qui sont créés.

Cependant les vagues peuvent atteindre jusqu'à un montant maximal, ce qui s'il est dépassé survient rupture. De cette manière l'énergie ondulatoire qui provient de t atmosphère est canalisée finalement vers la zone côtière.

Le phénomène de la rupture des vagues il est du soit au dépassement de la limite de courbure

$\delta = \frac{H}{L}$ permise, (rupture à la mer ouverte), soit à l'effet du manque de profondeur qui de plus

conduit le flottement à situation d'instabilité hydrodynamique (son sommet avec plus grande vitesse que ventre). La rupture a lieu habituellement des profondeurs qui est 1,3 fois plus grands que le montant de la vague et le résultat optique final du phénomène est les eaux écumées.

Au tableau 2 sont mentionnés les catégories de vagues, l'ampleur des périodes et des longueurs de vague à laquelle correspondent ces vagues et la cause génératrice de chaque catégorie.

Type de vague	Période (T)	Longueur de vague (l)	Génératrice cause
Petit-ondulation (Ripples)	0-0.02 sec	Partiellement cm.	Vent de la petite durée et de l'intensité
vagues de vent flottements	0.2-9 sec	Jusqu'à 130 ms	Vent de la grande durée et de l'intensité
Cache flottement (swell)	9-15 sec	Centaines mesures	Tempête d'origine lointaine
Tsunamis	0.5 hrs	Milliers kilomètres	Submarines séismes
Marées (tides)	12.5-25 hrs	Milliers kilomètres	Gravite effet de planètes

Tableau 2 . Catégories de vagues superficielles

Pour que se rétablisse compréhensible le mouvement et les caractéristiques de base des vagues, nous considérerons des vagues harmonieuses qui peuvent que décrivent de mathématiques simples. Un exemple de telles vagues ils sont sinus les vagues lesquels sont décrites par sinus une relation simple et facilement peuvent être comptées et être analysées, alors que tous les de base de façon caractéristique restent régulièrement.

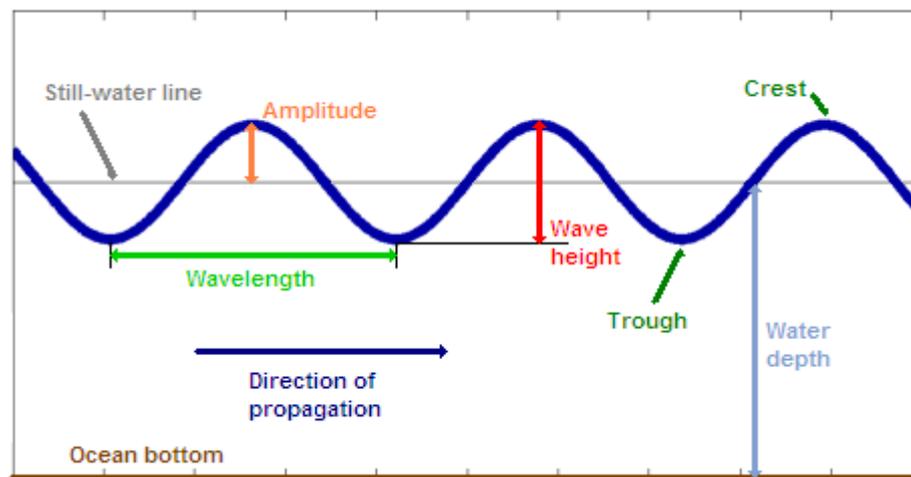


Figure 1. Anatomie d'une vague.

Où principal caractéristique ondulatoire il est :

- Surface de calme (still-water line),
- Sommet (crest) : Le point plus élevé de la vague au-dessus de la surface de calme,
- Ventre (trough) : Le point plus bas sous la surface de calme,
- Montant de vague (wave height) : La distance verticale entre sommet et de point minimal de fléchissement,
- Longueur de vague, L (wavelength) : La distance horizontale entre deux sommets successifs ou deux points minimaux de fléchissement,
- Période de vague, T (wave period) : Le temps qui est exigé pour qu'il passe une vague entière de un point concret,

- Fréquence de vague, F (wave frequency) : Le nombre des vagues qui passe par un point concret à l'unité du temps $f = \frac{1}{T}$,
- Largeur de vague, a (amplitude) : Demi- du montant de la vague ou la distance soit du sommet, soit du point minimal de fléchissement par la surface de calme $a = \frac{H}{2}$,
- Profondeur (depth) : La distance fond de la surface de calme, et
- L'adresse de la diffusion de la vague (Direction of propagation).

Des tailles de base rajoutées qui sont utilisées le plus largement sont le nombre de vague k, pour lequel est en vigueur la relation $k = \frac{2\pi}{L}$, la fréquence angulaire $\omega = \frac{2\pi}{T}$, mesurée à rad/sec et enfin la courbure de la vague $\delta = \frac{H}{L}$.

Le mouvement et la conduite sinus d'une vague simple peut entièrement être décrites lorsque sont connue la longueur de la vague (L), le montant (H), sa période (T) et la profondeur (D). Par exemple, aux eaux profondes, lorsque la profondeur est plus grande que de la demi- la longueur de la vague, alors sa vitesse dépend de la taille de la vague. Aux eaux bas-fond, d'autre, la vitesse de la vague est déterminée par la profondeur.

De façon similaire, le montant de la vague est limité par la profondeur et la longueur de la vague simultanément. Pour une profondeur donnée et une période de vague, existe un montant marginal maximal qui s'il est dépassé la vague devient instable et survient la rupture. Aux eaux profondes cette limite maximale est appelée montant de rupture de la vague (wave breaking height) et est une relation de la longueur de vague, tandis qu'aux eaux bas-fond il est une relation de la longueur de vague et de la profondeur.

Pour la meilleure compréhension du phénomène de création de flottements soufflent de vents sont introduites certaines significations de base.

Fetch de vague est la distance maritime à laquelle sont produites des vagues en raison de l'action du vent selon la longueur d'une adresse concrète. Pendant l'emploi des diverses méthodes de prévision de vagues, fetch de vague est déterminé par cette région dans laquelle la vitesse des vagues ne dévie pas plus de 2,5 m/s de la vitesse moyenne et l'adresse du vent plus de 30°. La longueur de Fetch est l'étendue de la région de fetch selon l'adresse du vent moyen (forme 2).

Dans le cas de la mer ouverte la longueur de fetch est illimitée. N'arrive pas cependant lui-même et pour le cas où ceci est limité par péninsules et îles, fait qui introduit la signification de la longueur active de fetch.

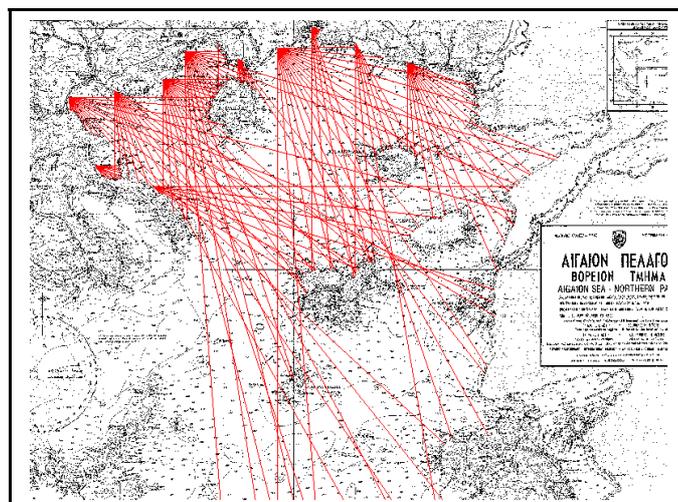


Figure 2 : Calcul de longueur de Fetch

Pour le calcul de la longueur active de fetch nous considérons que le vent transporte énergie aux vagues qui sont propagées vers toutes les adresses à secteur d'angle 45° de manière bilatérale de l'adresse du vent et que la somme de l'énergie dépend du cosinus de l'angle α entre l'adresse de transmission des vagues et l'adresse du vent, comme celui-ci est exprimé avec la relation :

$$F_{eff} = \frac{\sum_i x_i \cos \alpha_i}{\sum_i \cos \alpha_i}$$

Montant important de vagues (H_s). Comme on le sait de l'expérience naturelle, la surface de la mer apparaît tout à fait disparate en raison de la grande multitude de contenus de vagues de montant différent, longueur, adresse etc. Afin que se trouve une manière pour que soit décrite la complexité ondulatoire de la surface il est introduit comme paramètre le montant important de vague H_s , comme suit : si nous classons les vagues sur base de leur montant selon l'échelle décroissante (c'est-à-dire de vers les montants plus bas plus élevés), alors la moyenne des montants le 1/3 des plus grandes vagues est fixée en tant que montant important de vague H_s . Est symbolisée de plus, en tant que la $H_{1/3}$ et la $H_{3/3}$.

De manière semblable nous pouvons déterminer la moyenne du montant de pourcentage de 5% des vagues plus élevées, ce qui aussi est symbolisé en tant que les H_5 ou de pourcentage de 1% en tant que le H_1 et ainsi de suite le paramètre H_s n'a pas signification naturelle, a cependant est trouvé que son prix est habituellement semblable au prix moyen de montant de vagues comme il est apprécié par oeil nu par observateur expérimenté.

Période importante de vagues (T_s) la moyenne des périodes le 1/3 des vagues plus élevées.

analyse spectrale de flottements des spectres énergétiques sont fixés en tant que relations analytiques qui décrivent la répartition de l'énergie, d'e (f), en ce qui concerne les diverses fréquences qui sont contenues à un flottement composé. À la mécanique maritime devient emploi le plus large de la répartition ondulatoire de l'énergie en ce qui concerne la fréquence via appelé ondulatoire le spectre, c'est-à-dire le diagramme de changement spectrale de la densité S en ce qui concerne la fréquence f ($= 1/T$) (forme 3).

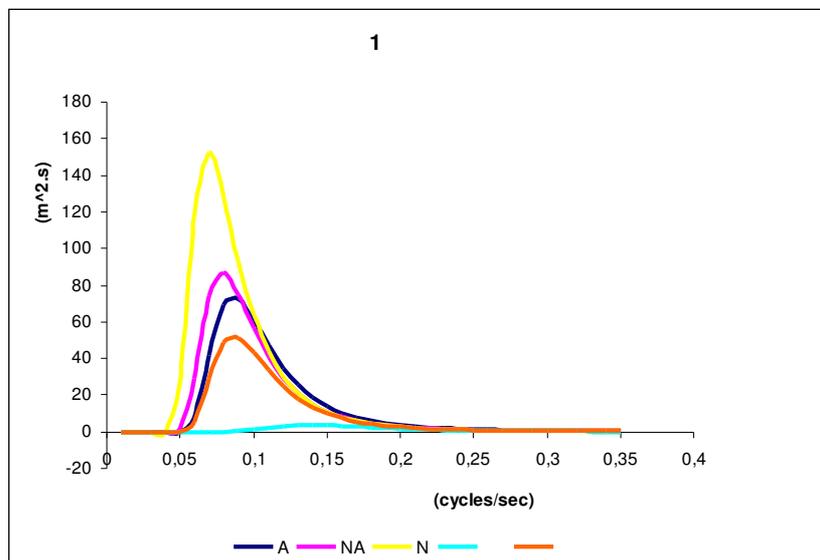


Figure 3 : Analyse spectre ondulatoire par adresse vent

L'aire de la région renfermée du spectre attribue la somme totale d'énergie moyenne de la série de la vague. Le spectre de vagues a grande importance pratique étant donné que de la forme nous pouvons exporter immédiatement des conclusions concernant les contenus vagues de champ. Ainsi p. ex. pour le spectre de la forme 2, peut être critiqué sa concentration sa énergie S à la fréquence $f_n = 0.9$ cercle/sec., donc résulte qu'il est transporté principalement par sinus une vague unique (largeur a_n , fréquence f_n). À cette vague-série seulement ce terme est important, la contribution tous les d'autres est négligeable et par conséquent il peut qu'ils déduisent.

Période de réintroduction. La fréquence avec laquelle apparaissent de divers phénomènes météorologiques (p. ex. vent, pluie etc.) est décrite habituellement en tant qu'avec la période dite de réintroduction. Ainsi, la proposition qu'à une région maritime le montant important de vague H_s des 7 ms. Il a une période de réintroduction 100 années, il signifiait i qu'entre deux apparitions de montant important à la région qui il est égal ou dépasse les 7 m il est apprécié qu'intervient en moyenne un délai de 100 années. Il faudra qu'il soit souligné qu'il est prouvé que la période horaire intervenante entre les deux apparitions (d'événements) ils sont approximativement aussi non exactement 100 ans. L'expression mathématique de la période de réintroduction est :

$$T_r = \frac{t}{1 - P(H_s)}$$

Dont T_r est la période de réintroduction à des années, T le laps de temps qui se relie à chacun phénomène extrême, à des années, $P(H_s)$ la probabilité additive de dépassement du prix considéré et H_s le prix extrême de vitesse de vent (ou de montant important de vague de vent).

Théories de ondulation – prévision de flottements

De diverses théories occasionnellement ont été développées dans le but qu'ils décrivent via des effigies mathématiques la forme et le mode de la diffusion (c'est-à-dire l'évolution à l'espace et le temps) des vagues maritimes qui sont observées à la nature. Les théories mathématiques déterminent concrètes ondulations des formes et ils sont considérés réussies lorsque ces formes sont plus près vers celles lesquelles en effet apparaissent à la surface de la mer.

La première théorie a été formulée en 1845 du Airy et est connue en tant que linéaire ondulation théorie (linear wave theory). Cette théorie est fondée sur l'acceptation que l'ampleur de la vague est tant de petit par rapport à la profondeur, que la surface libre pour il puisse être décrit à première approche comme sinus relation. Bien qu'il soit simple, est considéré jusqu'à outil aujourd'hui de base à l'étude de fabrications maritimes et de travaux portuaires. La théorie linéaire a succédé la théorie du Stokes, lequel premier a considéré que la vague déjà a acquis montant important par rapport à la profondeur et à la longueur et par conséquent est exigée pour sa description complète l'ajout aussi d'autres conditions d'ordre supérieur.

Ensuite multitude de théories ils ont lié la croissance de vagues forcées par le vent à l'activité (Dean et Dalrymple, 1984 ; Dingemans, 1997; Horikawa, 1978; Ippen, 1966; Kinsman, 1965; Sarpkaya et Isaacson, 1981). Conformément à celles-ci, se de grandes profondeurs aux mers ouvertes, alors que souffle e vent au-dessus d'une surface sereine d'eau, les corpuscules de l'air poussent avec fougue l'eau maritime. Cette interaction entre air et d'eau conduit à la création de petits initialement flottements (ripples) qui se propagent à la surface de la mer et grandissent continuellement grâce à l'augmentation de la durée de souffle du vent, en atteignant souvent le montant d'assez de mesures.

Autres approches théoriques comprennent la théorie de la houle rotationnelle, qui a été développée par Gerstner (1809), laquelle cependant rarement est utilisée aujourd'hui, la Théorie de la houle Cnoidale qui est décrit par leur Korteweg et Vries (1895), Svensen (1974), Isobe (1985), au sujet du changement ondulatoires des caractéristiques en raison de l'effet du fond, ainsi que de la théorie de vague solitaire (Solitary Wave Theory) qui a été développé de leur Boussinesq (1872) et McCowan (1894) et décrit la conduite de vagues près de la rupture. Mehaute (1976) a montre continuité trois de ces théories, alors que cnoidal théorie devient la Stokes théorie aux eaux profondes et solitary théorie aux bas-fond. En outre, la description de vagues sous sinus des non formes a été formulée par le Dean (1965) via la Stream Function Wave Theorie.

La procédure prévision des flottements à une région maritime s'appuie soit isolément soit sur combinaison sur les informations qui résultent:

- ✓ de données disponibles et météorologiques à la région d'intérêt (méthode SMB – Jonswap).
- ✓ d'observations visibles qui sont devenues ou deviennent occasionnellement par oeil nu du pont de bateaux qui traversent la région.
- ✓ de mesures sur place (in situ).
- ✓ de l'emploi d'effigies numériques complexes de prévision de flottements qui constituent aussi la méthode la plus équitable de calcul. Ces effigies, cependant, exigent pression calculatrice habituellement grande et multitude d'éléments météorologiques.

Modèles de prévision de vagues

Modèles de première génération (méthode de vague importante)

Les Sverdrup et le Munk ont existé pionniers à la croissance de la prévision technique du flottement laquelle est fondée sur l'idée du montant important de vague. La méthode a substantiellement été modifiée par le Bretschneider, lequel a développé une relation demi empirique de prévision des flottements en utilisant des représentations graphiques. Cette méthode est nommée SMB et est appropriée principalement à des prévisions locales. Ensuite le Peng (1991) proposait un modèle comme le calcul du montant de vague et de la période à un point de la grille. Substantiellement, ce modèle attribue la croissance, la transmission et l'affaiblissement ondulatoire de l'énergie, à des relations demi empiriques de prévision des flottements à chaque point de la grille, et ensuite grâce à achèvement horaire fondé calcule le montant et la période de la prochaine vague. Les travaux numériques comprennent quatre pas : a) le calcul du prix initial de montant de vague, v) la croissance et l'affaiblissement de la vague, g) la diffusion de la vague, et d) l'attribution du montant de vague à chaque point de la grille.

Modèles de deuxième génération (modèles de ondulatoire spectral)

Les techniques numériques ondulatoires des modèles de deuxième génération sont fondées sur la structure que proposaient les Golding (1983) et Chao (1993). Conformément au Hasselmann (1962) l'évolution du spectre peut être utilisée aux équations de balance d'énergie pour que soit décrite la situation de la mer. Si sont prises en compte les changements de la profondeur des eaux maritimes, la vitesse totale et l'adresse de la diffusion ils seront modifiés avec le passage du temps pendant la durée de la croissance du spectre ondulatoire de l'énergie.

L'équation correspondante peut écrire comme suit :

$$\frac{\partial E}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot (\vec{C}_g E) + \frac{\partial}{\partial \theta} [(\vec{C}_g \cdot \nabla \theta) E] = S_{in} + S_{ds} + S_{nl}$$

Où S_{in} ondulation énergie qui est créée par le vent, S_{ds} ondulatoire énergie qui est créée par la rupture et l'effet de la topographie du fond de la mer et S_{nl} la redistribution ondulatoire de l'énergie qui est provoquée entre ondulatoire les spectres, en raison des vagues non linéaires et ondulatoire des interactions.

Modèles de troisième génération

Le modèle WAM est un modèle de troisième génération qui calcule l'évolution deux-dimension du spectre ondulatoire de l'énergie avec une méthode analytique claire, sans aucun a priori affaire concernant sa forme. Il résout l'équation de transport à des eaux de grande et petite profondeur, en comprenant le travail réfraction s des vagues en raison de profondeur et la présence de courants (de profondeur stable et de champ de courants seulement). L'équation de transport est exprimée à des termes du spectre de densité ondulatoire d'énergie

$$N(h, s, c) = E(h, s, c)/s$$

où n est la densité ondulatoire d'action, d'e il est la densité ondulatoire d'énergie, de $h = (h, y)$ il

est le vecteur de place, la c la direction de la vague et $\omega = k U$ la fréquence correspondante. L'emploi du modèle WAM peut devenir pour n'importe quelle grille (local ou plus grand) avec des données topographiques prédéterminées. Intégration de grille est possible, tandis que sont permises des interruptions et commence de nouveau des simulations. Le modèle exporte beaucoup spectral ondulatoire paramètres, comme le montant important de vague, ondulatoire la direction moyenne et la fréquence, les champs de tendance du vent selon le facteur induction spectral de la tendance et le facteur de drag à chaque point nodal de la grille pour des instants horaires choisis, ainsi que deux dimension le spectre du flottement de façon choisie à des points corrigés et à des instants horaires.

Observations générales

En général, les modèles de première génération n'ont pas un facteur clair pour les transports non linéaires d'énergie via l'interaction des vagues. Les transports non linéaires d'énergie s'expriment via l'énergie du vent et de la réfraction. À leur tour, les modèles de deuxième génération utilisent les sources non linéaires avec des méthodes paramétriques, en appliquant par exemple un spectre de référence pour la redistribution de l'énergie (après la croissance et l'affaiblissement de la vague) aux fréquences. En opposition avec ci-dessus, de troisième

génération des modèles calculent les transports non linéaires d'énergie à part, même s'est indispensable que deviennent tant des approches analytiques que numériques pour l'achèvement des calculs.

Bien qu'à des lignes générales les modèles de prévision de flottement de première et deuxième génération présentent logiquement des résultats aux la plupart des conditions de vent, leur étude comparative a localisé certaines faiblesses, en particulier à des conditions extrêmes de vents et de flottements, où aussi la fiabilité des prévisions est aussi plus importante. Les différences entre les modèles étaient enregistrées principalement pendant leur application à de mêmes champs de vent d'ouragan. Les modèles calculaient montant important maximal de vague de 8 jusqu'à 25 m en ce qui concerne aux modèles de troisième génération, leur différence de base de ceux de la deuxième génération est que l'équation ondulatoire de l'énergie est résolu sans restrictions à la forme du spectre, fait qui est obtenu avec le calcul exact du facteur non linéaire.

Mesures sur place de flottements

Avec pour but la compréhension de l'environnement marin côtier, probable le paramètre le plus important qui est exigé est le climat ondulatoire, c'est-à-dire les vagues qui ont été enregistrées dans une place, à long terme (pendant la durée de nombreuses années) et à court terme (pendant la durée de tempêtes de pluie). L'enregistrement des vagues à une place présuppose le déploiement de l'enregistreur de vagues, avec pour but la mesure tant du montant de vague que de son adresse de la diffusion. Une autre technique est le déploiement d'une sonde de pression et deux rectangles placés rhumatographe, avec pour but la détermination calculatrice de l'adresse de la diffusion de la vague. Autre méthode est l'emploi de photographies aériennes ou d'images par satellite sur la détermination ondulatoire de l'adresse.

Cependant, aussi pour la mesure du montant de vague de nombreux problèmes ont été enregistrés, comme les enregistrements de grande longueur de vague de structures de sondes de pression près du fond, la déformation et la filtration du signal des vagues de fréquence élevée et de petite longueur de vague, de etc. l'emploi la photogrametrie est en mesure de déterminer ondulatoire le régime à court terme, mais le coût des enregistrements à long terme par des intervalles réguliers il est prohibitif. Lui-même est en vigueur aussi pour l'imagerie aérienne emploi de sondes radar, tandis que le décalque par satellite montre satisfaisante et lorsque l'analyse est élevée pour la détermination de montant et d'adresses de vagues, peut être utilisée à la prévision de flottements.

Pendant la concrétisation du sub-mesure 2.2 du IN.ALE. Devrait avoir lieu la revalorisation auditif curent - recorder ADCP à directif ondulatoire recorder (Wave Array) et le déploiement au fond de la mer en profondeur 15-20 de mesures (forme 4). Les caractéristiques du Teledyne RDI Workhorse ADCP qui dispose du INALE est:

Presse: Workhorse Sentinel ADCP, Self-contained 300 KHz
Ampleur de mesure : 126 ms
Taille de resolution verticale territoriale : 8 ms

Le ADCP (Acoustic Doppler Current Profiler) il a la possibilité de mesure des courants horizontaux et verticaux sur l'entière colonne de l'eau grâce à l'emploi du phénomène Doppler pendant la réflexion du signal auditif sur n'importe qui passivement petits réflecteurs se mis en marche (corpuscules solides planés, bulles, le plancton). Avec leur revalorisation avec la sonde Wave Array le ADCP aura la possibilité de mesure du fond de la mer même short de vagues qui se mettent en marche à la surface de la mer au-dessus de sa place. Les paramètres ondulatoires qui seront déterminés seront: a) le montant important de vague, de H_s , b) le montant maximal de vague, de H_{max} , c) le montant moyen de vague, de \bar{H}_{mean} , d) période de la vague maximale, de T_p , e) la période moyenne, \bar{T}_{mean} , et f) l'adresse de la vague maximale, D_p .

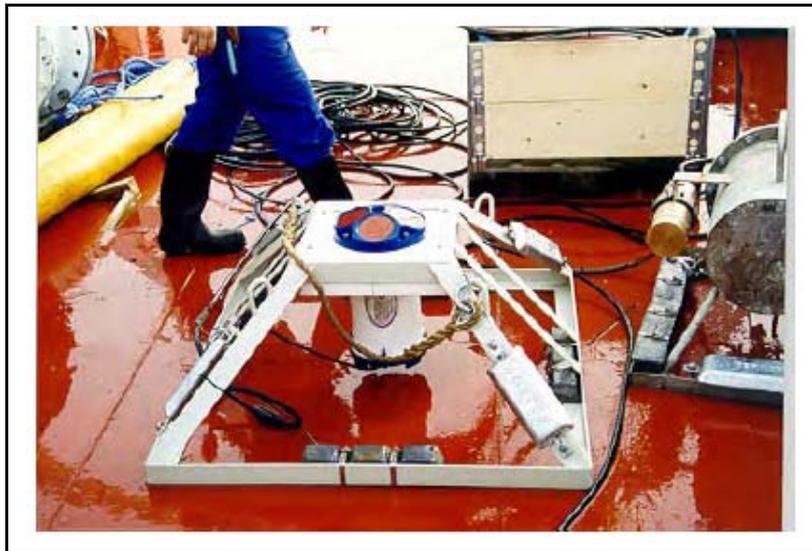


Figure 4. Le ADCP et la pyramide – base de déploiement.

Les calculs du spectre ondulatoire deviennent le plus rapidement grâce à l'emploi du vecteur corpuscule de la vitesse, de la place de la surface de la mer et de la pression hydrostatique. La détermination de la vitesse de la diffusion de la vague, les traitements donnés et leur présentation devient à temps réelle (des formes 5 et 6).

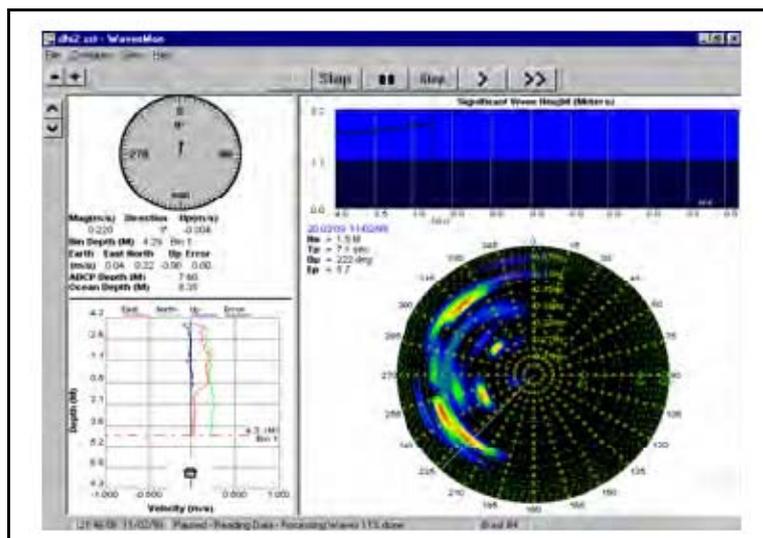


Figure 5. Présentation directifs ondulatoires données et de profil moyen de vitesse.

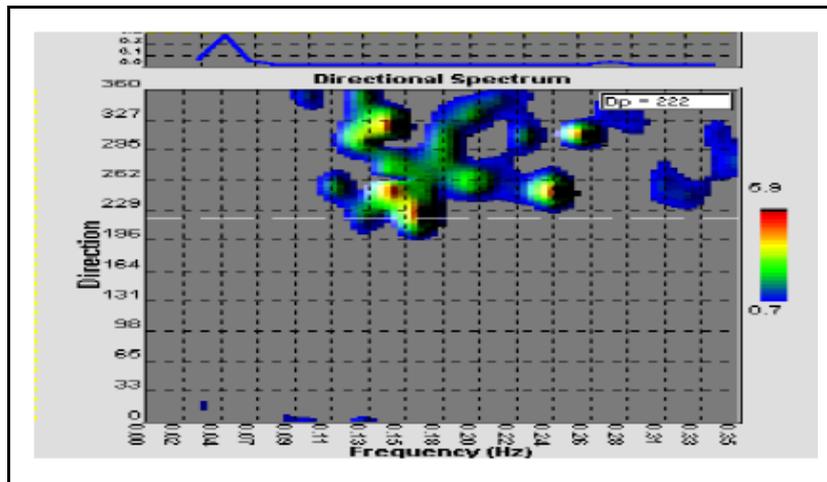


Figure 6. Répartition ondulatoire d'énergie en tant que relation de la fréquence et de l'adresse.

Systèmes existants d'étude ondulatoire de climat

Un système intégré de l'océanographie opérationnelle est constitué habituellement par trois parties a) le système de collecte données b) leur système de traitement et de production de prévisions et c) le système de mise à disposition des produits finaux.

Système POSEIDON

Le POSEIDON est le réseau le plus intégré à fonctionnement de prévision de situation de mer à la Méditerranée fait que il donne premier au pays, en ce qui concerne la technologie maritime et son application. Trois ses parties fondamentalement fonctionnelles paraissent au forme 7, où se présente la structure du système POSEIDON. Le système est fondé sur réseau navigables de mesure de centres qui collectionne météorologiques et océanographiques des données de divers points de l'Égée. Les données sont transmises avec par satellite communication au centre opérationnel où devient leur analyse, et leur valorisation pour la production de prévisions. Tant les données que les prévisions sont changés en informations condensées et produits finaux simplifiés qui sont disponibles aux utilisateurs finaux à travers l'Internet ou en utilisant autres moyens.

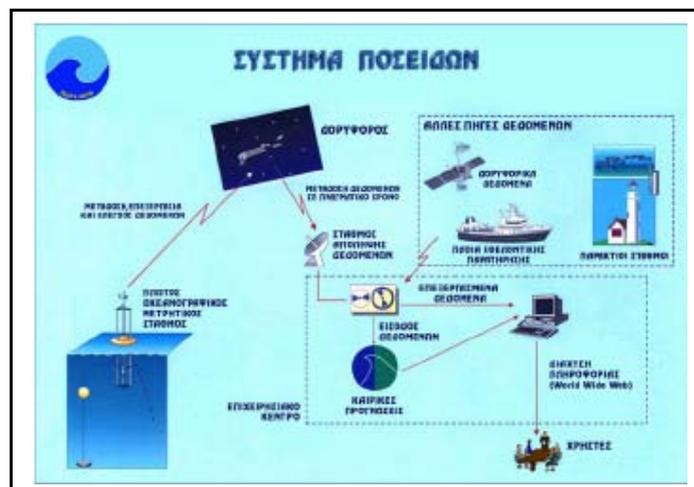


Figure 7. Diagramme schématique du système POSEIDON

Concrètement, le système POSEIDON a installé à l'Égée réseau de mesure de centres de type SeaWatch (forme 2.5). Ces centres ont été développés par la société Oceanor S.A. norvégienne dans le cadre de programme de recherche Eureka/de Euromar et sont prévus pour spectre large d'applications de sécurité de la navigation jusqu'à avis opportun pour algae blooms (Hansen and Stel 1997). Semblables navigables de mesures des centres ont également s'installe à la Norvège, à l'Espagne la Thaïlande et récemment au Pérou.

Chaque centre SeaWatch a montent de 8 approximativement mesures et poids d'une tonne (forme 8). Il est pourvu de sondes météorologiques (température, pression atmosphérique, vitesse et adresse de vent), sonde de mesure de paramètres ondulatoires (Seatex MRU – Motion Reference Unit), auditif curent - recorder en profondeur de 3 mesures en outre à sondes de température et de salinité (Sensortec UCM-C60, Aanderaa 2990 conductivity cell, Kistler pressure sonde et CS4-C1/10 sonde de temperature), sondes de chlorophylle-a (Chelsea Mini Track Mark II fluorimeter) et d'oxygène dissous (Royce Instruments Model 94) également aux 3 mesures, ainsi que sondes de température et de salinité à des profondeurs 10, 20, 30, 40 et 45 m, intégrés dans CT string (Seamos CTD string, conductivity cell Aanderaa 2994, sonde de temperature Fenwall GB 32JM19). Son énergie est assurée par ruches solaires et piles rechargeables. La collecte des données devient chaque 3 heures et suit leur envoi avec le système Inmarsat-C par satellite et avec téléphonie GSM mobile. Le système par satellite a couverture mondiale et la grande fiabilité. Le avantage de la téléphonie mobile est la possibilité de transport complet set de données mais le système fonctionne seulement où existe couverture correspondante. Le réseau est à fonctionnement des débuts de 1999 et chaque 3-4 à mois est réalisé son entretien par le W/K Égée. Approximativement 8-10 des centres sont habituellement domiciliés aussi à fonctionnement complet, tandis que 1-3 des centres sont à procédure d'entretien. Les données des mesures centres sont disponibles de l'Internet à la page www.poseidon.ncmr.gr.

Université d'Athènes – partie de physique

Le groupe de l'océanographie de la partie de physique de l'université d'Athènes fait un effort remarquable d'enregistrement et de prévision des flottements sur échelle mondiale, avec analyse plus détaillée aux mers individuelles de la Méditerranée et de la mer noire.

Les prévisions concernent les montants importants et l'adresse des vagues pour laps de temps jusque à de 120 heures. Les résultats des calculs sont disponibles à des cartes ondulatoires de climat à sa page Web du groupe de recherche de l'océanographie (www.oc.phys.uoa.gr). À la forme 9 est représentée une telle carte qui est mentionnée à la prévision des flottements à la région de l'Égée du nord pour la 25/07/2006.

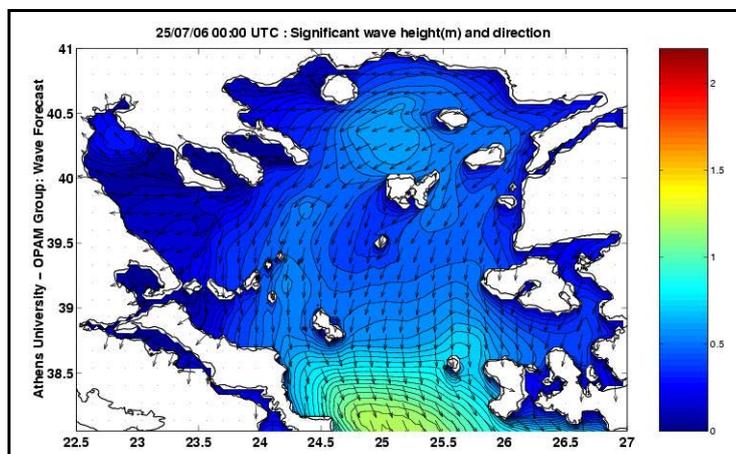


Figure 9. Carte de montants égaux de vagues d'Égée du nord

Les modèles WAM, SWAN et WAVEWATCH –III, qui sont utilisés pour les prévisions s'intègrent tous à la catégorie de la troisième génération.

À titre indicatif sont mentionnées aussi certaines en outre relations qui disposent librement à l'Internet des prévisions ondulatoires de climat à de diverses régions par le monde.

<http://www.golfklimaat.nl>

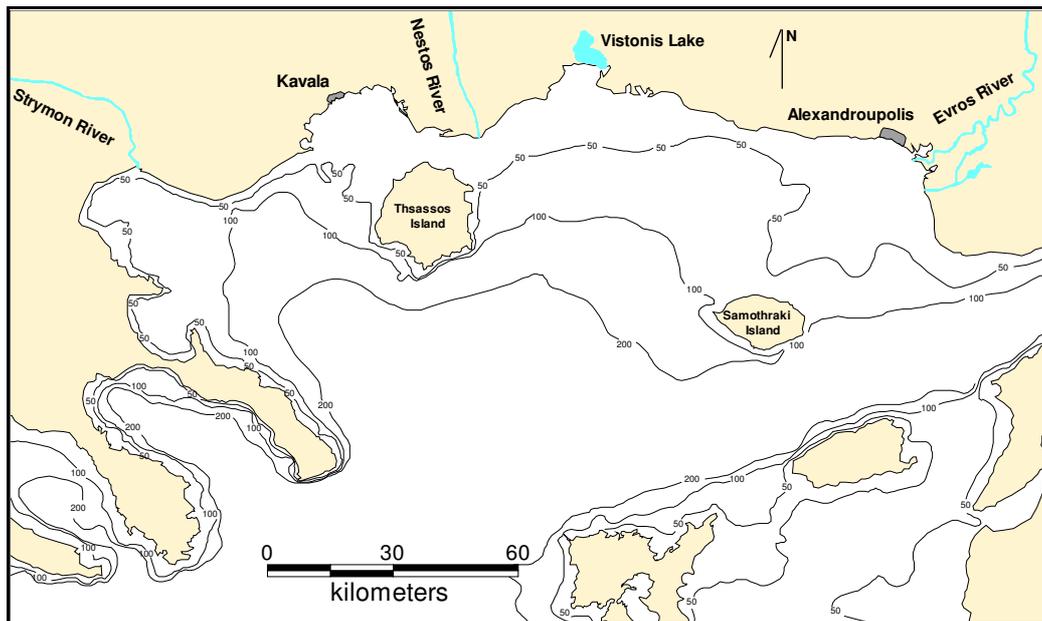
<http://polar.ncep.noaa.gov>

<http://facs.scripps.edu/surf/gblpac.html>

Description de zone côtière de région Macédoine Thrace.

La région laquelle conformément tous existants données il est développé et est intensifié le phénomène de l'érosion côtière des côtes il est trouvé à la partie occidentale des estuaires de la

rivière de Nestos, où une série de lagunes côtières et bandes de sable ils sont développés. La région d'intérêt constitue partie du plateau continental du Thracikou hautes mers (Perissoratis et al., 1984) (forme 10).



Forme 10 . La zone côtière de la région AMC.

Sous étude ligne cotiere il constitue la limite du nord le de Thassos étroit (Thassos passage), un canal étroit de communication entre le golfe de Cavalla et l'Égée ouvert hautes mers. Le étroit a orientation E-W, il a largeur 7.300 m et profondeur maximale de 27 m.s de l'étude des isobathes au Thracian Sea haute mer résulte que par longueur des côtes du nord et du sud-ouest du N. de Thassos le fond présente des inclinations importantes, plus élevées les 6°, entre isobathes les 10 m et 90 m après et jusqu'à l'isobathe des 110 m, le fond se présente plat, caractérisé d'inclination presque nulle. Enfin, sous isobathes 110 – 120 m et jusqu'à l'isobathe des 190 m les inclinations du fond augmentent encore une fois substantiellement (forme 11).

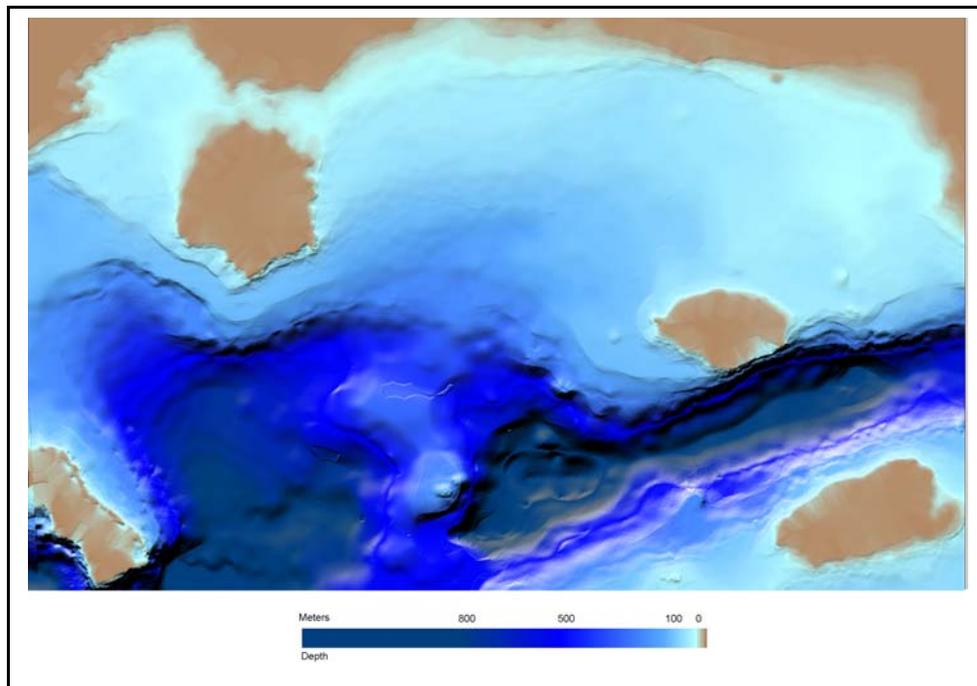


Figure 11. Bathymétrie de mer de Thrace.

De dernières données montrent que selon le dernier retrait de la mer, le golfe de Cavalla il était traverse de la rivière Nestos et ses affluents. Tous les secteurs de la rivière qui formaient le delta s'unissaient à un canal qui canalisait les eaux de la rivière vers les du sud-ouest. Selon la l'état de la mer qui a suivi, grâce à la retraite progressive ligne côtière ont déposé initialement les matières portées à grain grossier qui étaient transportées par les rivières et les torrents (galets, gravillons, sables). Avec la prédominance des conditions régulières de sédimentation maritime ils ont commencé que déposer grains fins des sédiments (limons, argiles, grains fins sables) lesquels ont été répartis à la base sur base de l'action des courants côtiers. Ainsi, ont été couverts les canaux et les cours d'eau des rivières. Simultanément, la rivière Nestos a eu alluvions à ses anciens cours d'eau et se déplaçait plus à l'est. La région d'étude est caractérisée par type mélangé de marée, avec suprématie du lune de type M_2 demi quotidien (c'est-à-dire de marée de la composante que provoque l'attraction gravite de la lune et provoque changement de marée de niveau avec deux les maximaux et deux très peu pendant la durée de 24 heures). L'ampleur de marée maximale est 0,96 m l'ampleur de marée moyenne est 0,18 m. Et l'ampleur minimale est 0,01 m (Sylaos et al., 2005).

Des mesures curent- recorder pendant la période du printemps (c'est-à-dire la période de la prestation maximale de rivières) ont montré que la couche superficielle de salinité basse du golfe de Cavalla se met en marche soit orientaux parallèles vers la côte du nord du golfe à des vitesses qui arrivent les 25 cm/sec soit vers du sud-est parallèles à la côte occidentale et du sud-ouest à de plus petites vitesses (5-18 cm/sec). La couche près du fond marin se met à direction presque contraire vers le superficiel en marche, me mettait en marche soit vers nord, soit à l'est et au nord à la région du nord-est platoà des vitesses entre 15 et 36 cm/sec. La circulation au golfe de Cavalla est principalement forcée par les vents, de forme cyclonale anticyclonale (Kardaras, 1984) et les vitesses des courants près du fond marin sont petite de l'ordre 5-10 cm/sec (Hydrographique Service, 1983).

References

- Dean, R.G., 1965. Stream function representation of nonlinear ocean waves. *Journal of Geophysical Research* 70 (18), 122-134.
- Dean, R.G., Dalrymple, R.A., 1984. *Water Wave Mechanics for Engineers and Scientists*. Englewood Cliffs, Prentice-Hall, Inc..
- Dingemans, M.W., 1997. *Water Wave Propagation over uneven bottoms, part 1 & 2, linear (nonlinear) wave propagation*. World Scientific, Singapore.
- Kinsman, B., 1965. *Wind Waves, their generation and propagation on the ocean surface*. Prentice Hall.
- Horikawa, K., 1978. *Coastal Engineering*, University of Tokyo Press.
- Hydrographic Service, 1983. Results of Oceanographic Investigations at Kavala Gulf, Technical Report 1/83, Vol. 4, 283 p.
- Ippen, A.T., 1966. *Estuary and Coastline Hydrodynamics*. McGraw-Hill, New York.
- Kinsman, B., 1965. *Wind Waves*. Prentice Hall, Englewood Cliffs, 676 p.
- Sarpkaya, T., Isaacson, M., 1981. *Mechanics of Wave Forces on Offshore Structures*. New rk, van Nostrand Reinhold Co.
- Gerstner, F.J.v., *Theorie der Wellen*, Ann. der Physik, **32**, pp. 412-440, 1809.
- Korteweg, D. J., de Vries, F., 1895. On the Change of Form of Long Waves Advancing in a Rectangular Canal, and on a New Type of Long Stationary Waves. *Philos. Mag.* **39**, 422-443.
- Isobe, M., 1985. Calculation and Application of First-Order Cnoidal Wave Theory. *Coastal Engineering* **9**, 309-325.
- Boussinesq, J., 1872. Theorie des ondes et des remous qui se propagent le long d'un canal rectangulaire horizontal. *J. Math. Pure Appl.* 17, 55-108.
- Kardaras, T., 1984. Contribution of Nestos river to the circulation of Kavala Bay in North Aegean Sea, 30th CIESM Conf.
- McCowan, J., 1894. On the highest wave of permanent type. *Phil. Mag.* **5**, 351-357.
- Le Mehaute, B., 1976. *An Introduction to Hydrodynamics and Water Waves*. Springer-Verlag, New York.
- Golding, B., 1983. A wave prediction system for real time sea stae forecasting. *Quaternary Journal of Royal Meteorological Society* 109, 393-416.
- Chao, Y.Y., 1993. Implementation and evaluation of the Gulf of Alaska Regional Wave Model. NMC OPC Office Note, 35pp.
- Hasselmann, K., 1962. On the non-linear energy transfer in a gravity-wave sectrum, Part 1.

General Theory. *Journal of Fluid Mechanics* 12, 481-500.

Hansen, S.E. and Stel, J.H., 1997. SEAWATCH. Performance and future. In: *Operational Oceanography. The challenges for European Co-operation*, (Stel, J.H., Ed.), Elsevier Oceanography Series, 62, Elsevier Science B.V.

Perissoratis, K., Aggelopoulos, I., Mataragkas, 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.

Contribution du Partenaire IV ARPA-SIM

Author: Marco Deserti

Introduction and background

The area under study, located in the western side of the Northern Adriatic sea, is the Adriatic coast of the Emilia Romagna region Italy. This coastal area, flat and sandy, extend from the Po river delta north to the south border of the Emilia –Romagna region, and has a total shore length of about 130 km. A large part of this coastal area suffer, such as most of the Adriatic shore, strong coastal erosion, as shown in **figure 1**, were the erosion areas are marked.

Because the Emilia Romagna coastal zone is a very important area from the economic and social point of view, and it is very sensitive to the several factors such as the human activities and climate changes, affecting its equilibrium, the Emilia Romagna government approved (delibera consiliare n.645 del 20 gennaio 2005) the guidelines for the integrated management of the coastal zone (ICZM or GIZC in Italian). The guidelines indicates the main field of activity (ambito di intervento e temi), and the type of actions that should be realized from the various institutions and stakeholders. Moreover the guidelines provide some indications about the administrative tools and type of project that should provide the resources to realize the actions. The INTERREG project BEACHMED-E is one of that tools.

The guidelines suggested to realize actions specifically devoted to develop an integrated tool to analyze and forecast the sea state and the currents and its impact on the coast and to maintain and enhance monitoring activities.

For the above described reasons, and because there is a lack of wave and oceanographic data on this area, the Emilia Romagna Regional government entrust ARPA with a task to install and manage an oceanographic station. To realize these goals, during the NAUISICAA sub project ARPA-SIM will install a new oceanographic station along the Emilia Romagna coast.

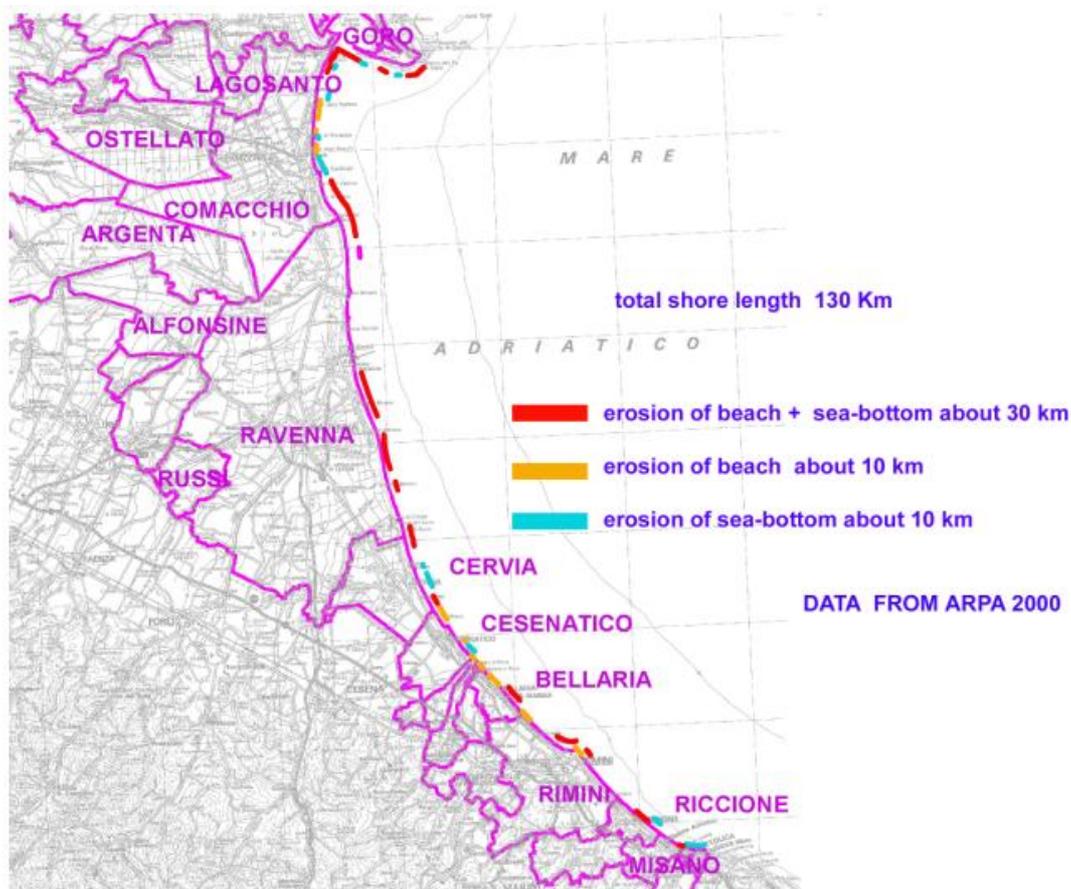


Figure 1: Coastal erosion in Emilia – Romagna.

Activities realized during the PHASE A (April-July 2006)

ARPA-SIM collected all the information needed to define the optimal location of the oceanographic station along the Emilia Romagna coast and to define the technical specifications for the instruments to be installed on the station.

The technical specifications to purchase the oceanographic station has been defined and the call for tenders prepared.

The call for tenders will be published on the ARPA Web site (www.arpa.emr.it) next October 25.

The call for tenders will be officially published on the Emilia Romagna Region Official Bulletin (BURER) and on the official bulletin of the Italian republic (Gazzetta Ufficiale della Repubblica Italiana) within November, 2 2006.

The station will be purchased and installed at the end of phase B (February 2007).

The study to define the optimal location of the station has been completed.

The oceanographic station

The **general features and goals** of the oceanographic station were defined during the preparatory phase of the NAUSICAA sub project as follow:

7. The station will be part of the Emilia Romagna meteo-hydrological network and will provide data to the Beachmed-e project. The data will be stored in the SIM data base and made available to the users by the internet interface (Dexter).
8. The data from the new oceanographic station will be used to verify the wave and oceanographic numerical models, running by ARPA-SIM and will be used as input data for the future versions of the operational wave and oceanographic models.
9. The data will be used by partner DISTART UniBO, to calculate the impact of waves on the coastal area of the Emilia Romagna region.

The **technical specifications** (annex to call for tenders) request that:

- ✓ the station is equipped at least by a directional wave buoy and water temperature sensor;
- ✓ the station is equipped with a data logger and a GPS receiver,
- ✓ the station is equipped with a HF transmitter and a GSM or satellite connection.
- ✓ additional equipment and sensors can be proposed by the supplier.
- ✓ To collect the data from the oceanographic station a data receiver will be located on the coast.
- ✓ The ground receiver station is equipped with an HF receiver, telephone and with a computer connected to ARPA's LAN.
- ✓ The compliance with standard communication protocols (i.e. ftp, http) is requested in order to transfer and store the data collected by the station to the ARPA-SIM data base.
- ✓ The SW installed on the receiver station must permit:
 - to configure and modify the set up of the data logger,
 - to acquire, store and display the basic data
 - to process the basic data

The supplier is requested to install and test the station.

The call for tenders request also to provide the following **services**:

- A training course for the ARPA personnel which will maintain and manage the station
- The ordinary and extraordinary maintenance of the station during a one year period

The recovery in case of damaging or loss of the of the station is an optional service that can be offered and quoted by the suppliers.

Some examples of typical oceanographic station equipped with wave buoy is shown in **figure 2**.



Figure 2: examples of a typical oceanographic station equipped with wave buoy

The location of the oceanographic station

To ensure the safety of the equipment the selected location is in an area where sailing, fishing and anchorage are forbidden. The deep of the water is around 10 meters on a sandy bottom. Two locations, in front of the Cesenatico harbour, are under evaluation, respectively at a distance of 2 and 5 miles from the shore. The locations are shown in **figure 3**. Both locations considered are close to a mussel farm. In the “2 miles” location a current meter is actually installed.

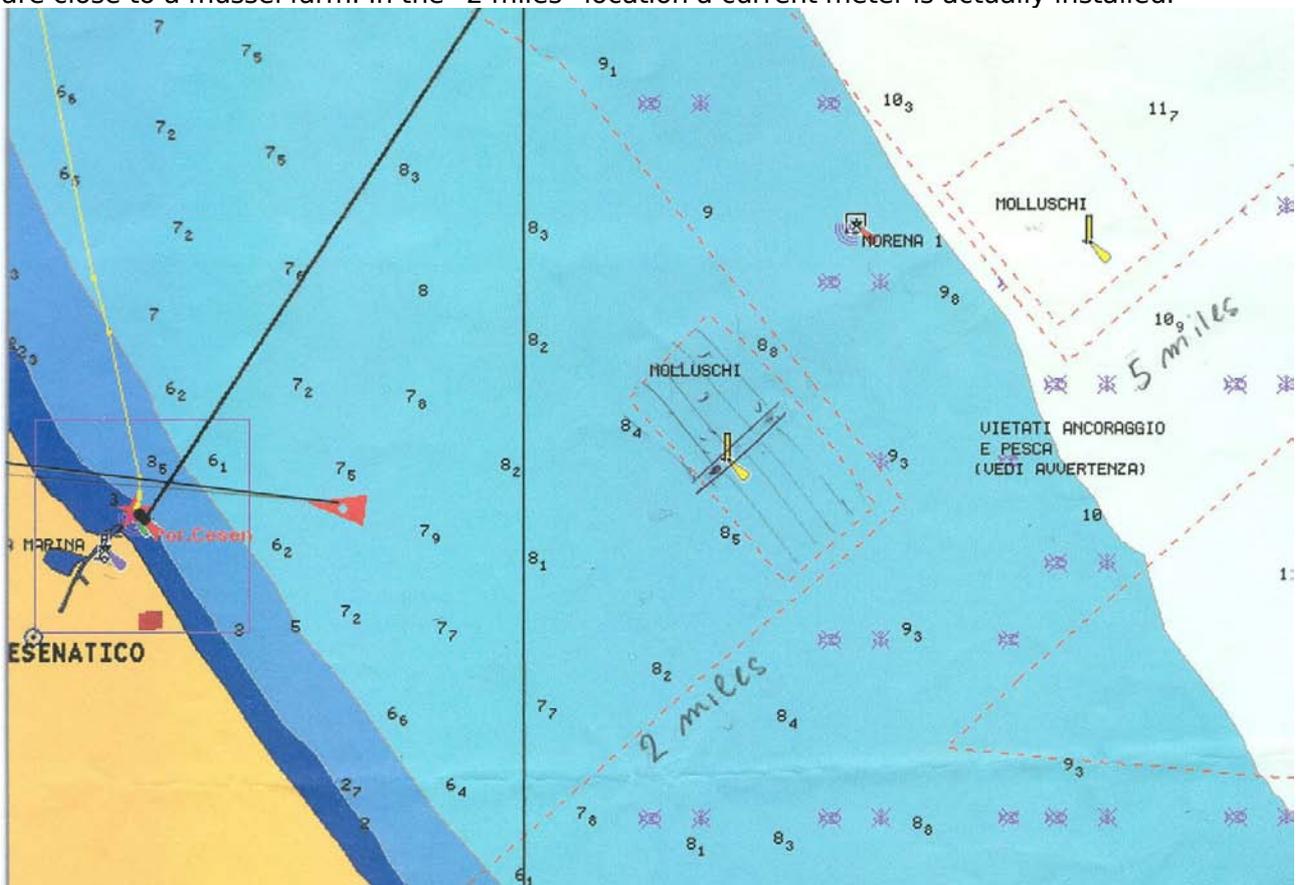


Figure 3: locations considered to install the oceanographic station. (yellow bars in the figure)

The new station will be integrated with the national network of wave buoys called RON (Rete Ondametrica Nazionale), managed by the Italian National Agency for the Environment and Territory (APAT). The new near-shore station will be located between the off shore stations of Ancona (south) and Punta della Maestra (north). See **Figure 4**.



Figure 4: The Italian national wave network RON-APAT

The new station will be part of the Emilia Romagna meteorological observational network called RIRER. This network shown in **figure 5**, is formed by about 400 stations, including ground based meteorological stations, hydrological rain gauges and level measurements stations located on the Po and other rivers of the Emilia Romagna, two meteorological radars and an upper air meteorological station

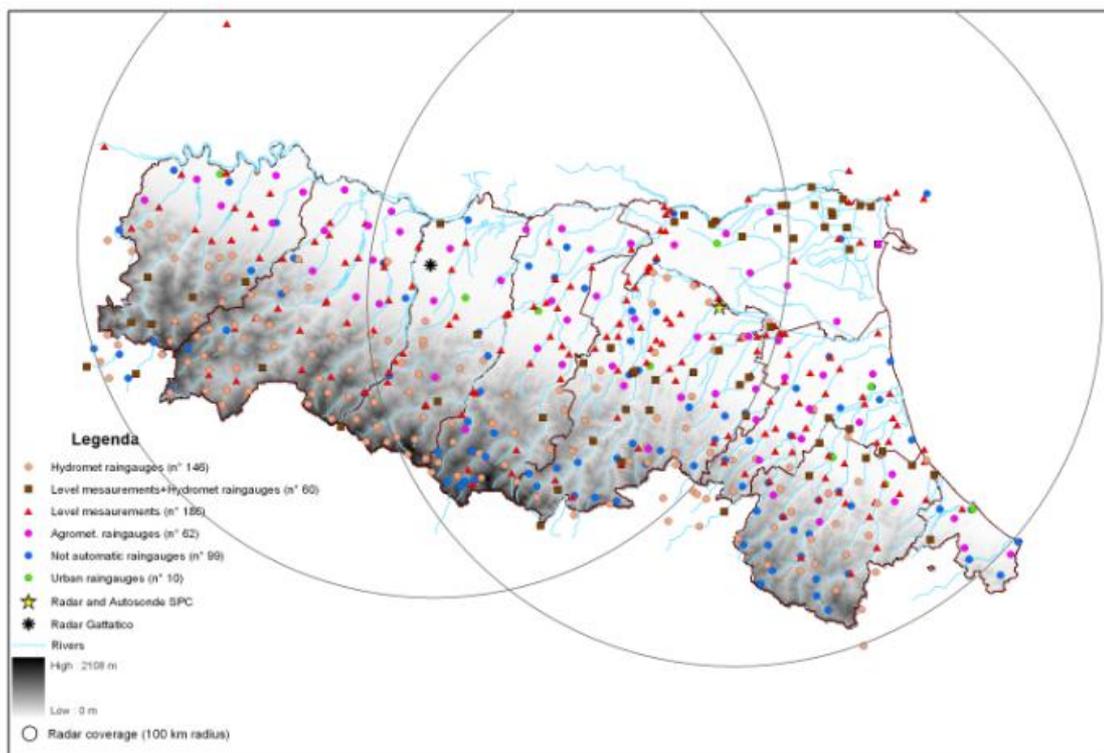


Figure 5: the Emilia Romagna meteorological observational network (the circumferences indicate the area covered by the meteorological radars)

The **location of the buoy respect to the computational grid** was considered, in order to assess the future suitability of the wave station to verify the wave models. A general overview of the wave modelling system actually operational and under development by ARPA-SIM is given in Valentini et al. (the paper is enclosed). The model set up of the two different versions of the SWAN model is summarized below, while the location of the buoy respect to the computational grid is represented in **figure 6**.

SWAN Emilia Romagna wave model: set up specifications of the actual operational version

1. geographic domain: 12°-13° (longitude East), 43.8°-45° (latitude North);
2. 10 m wind forcing from LAMI;
3. computational grid (regular): 1/60 of degree, about 1.7 Km;
4. two forecasts each day: 00 and 12 UTC;
5. forecast range: +48 hours with hourly outputs;
6. outputs variables: significant wave height, mean direction, mean and peak period;

SWAN MEDITARE (Emilia Romagna nesting) wave model: set up specifications of the next operational version, actually under development:

- geographic domain: 12°-13° (longitude East), 43.8°-45° (latitude North);
- 10 m wind forcing by LAMI;
- computational grid (regular): 1/120 of degree, about 800 m;
- one forecast each day: 00 UTC. Each run starts with a warm-up step of 24 analyses (hourly wind analyses by LAMI) initialised using a wave field produced at the end of the warm-up stage of the previous one ("hotstart"), if available, otherwise initialized by a stationary run over the whole domain.

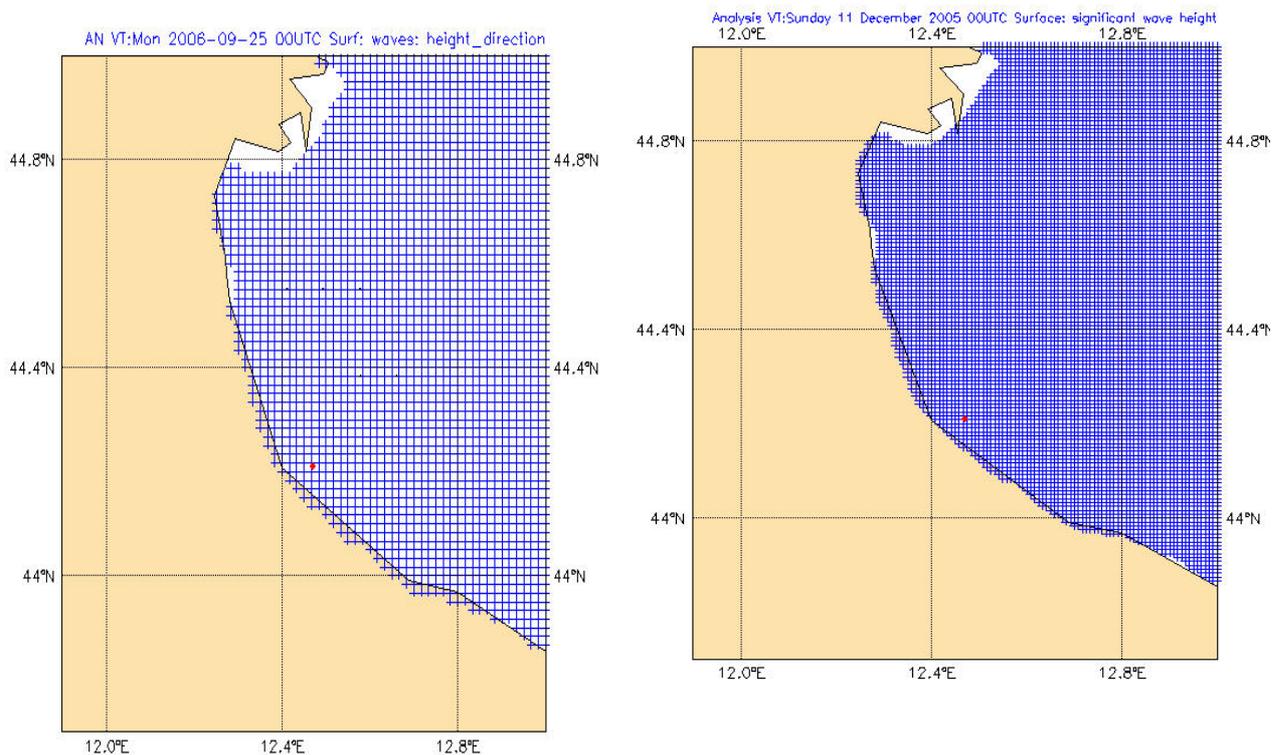


figure 6: location of the buoy (red spot) respect to the computational grid of the SWAN Emilia Romagna wave model, 1/60 of degree horizontal resolution (left) and respect to the inner computational grid of the SWAN MEDITARE multiscale wave model, 1/120 of degree horizontal resolution (right).

The expected wave regime at the buoy location:

The significant wave height at the location of the buoy is represented in **figure 7**. The wave height has been calculated by the SWAN wave model, 1/60 of degree of horizontal resolution, considering the grid point closer to the buoy location (44.217N 12.467E) for the period February 2, 2005 – October 8, 2006. The figure show that in that location the wave height can range between up to 3.5 m, during sea storms, to less than 0.5 m, during calm wind conditions.

The waves during a typical sea storm (August 4, 2005) in the northern Adriatic are shown in **figure 8**. The figure show the wave height measured by the existing buoy of Ancona, the nearest measurement point for the Emilia Romagna coast. The measured wave height is compared with the wave height calculated by the SWAN model at the same point and at the location of the new Cesenatico buoy. The comparison show that the actual version of the SWAN model is slightly overestimating the peak wave (see Valentini et al. for more details on the model evaluation) and that the calculated wave height at the Cesenatico buoy location is significantly different from the Ancona location (about 1 m less during this storm).

This example show that the wave height measured by the Ancona Buoy is not representative of the waves along the Emilia Romagna coastal area, therefore the new station will add new and useful information to verify and improve the modelling system and to study the wave dynamic along the Emilia Romagna coastal zone.

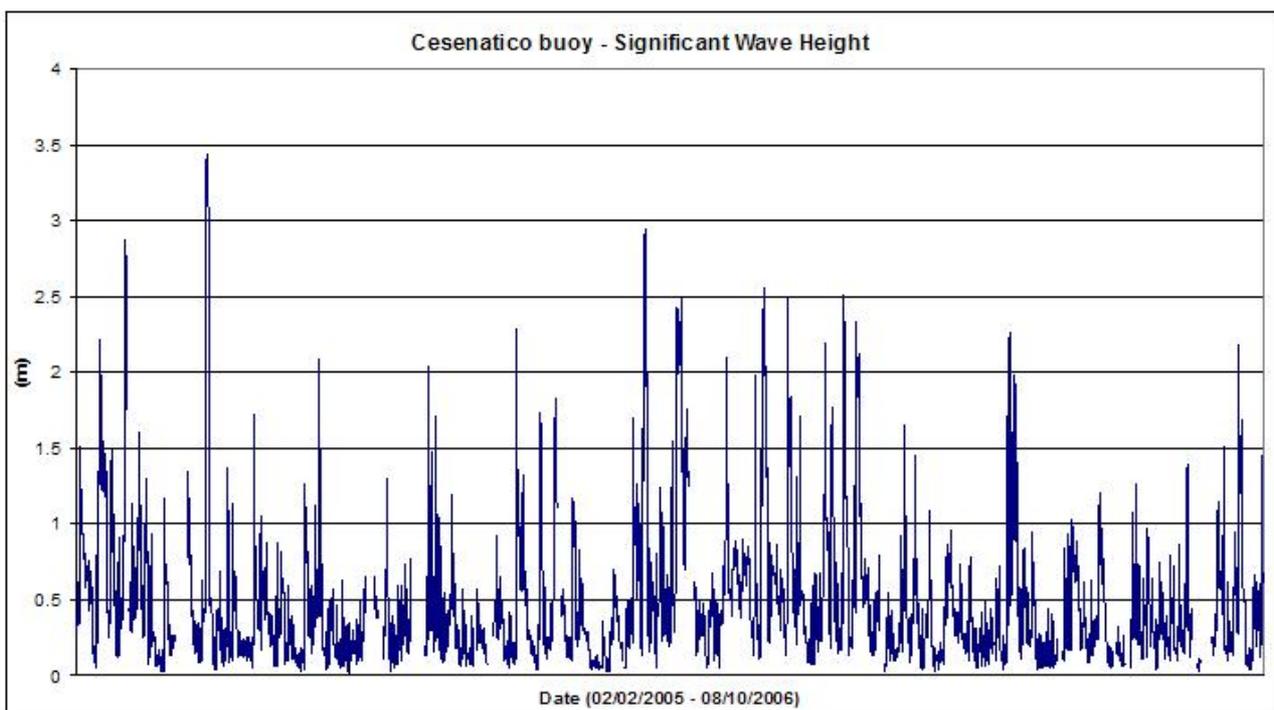


Figure 7: significant wave height at the location of the Cesenatico wave buoy, calculated by the SWAN wave model for the 02/02/2005 – 08/10/2006 period.

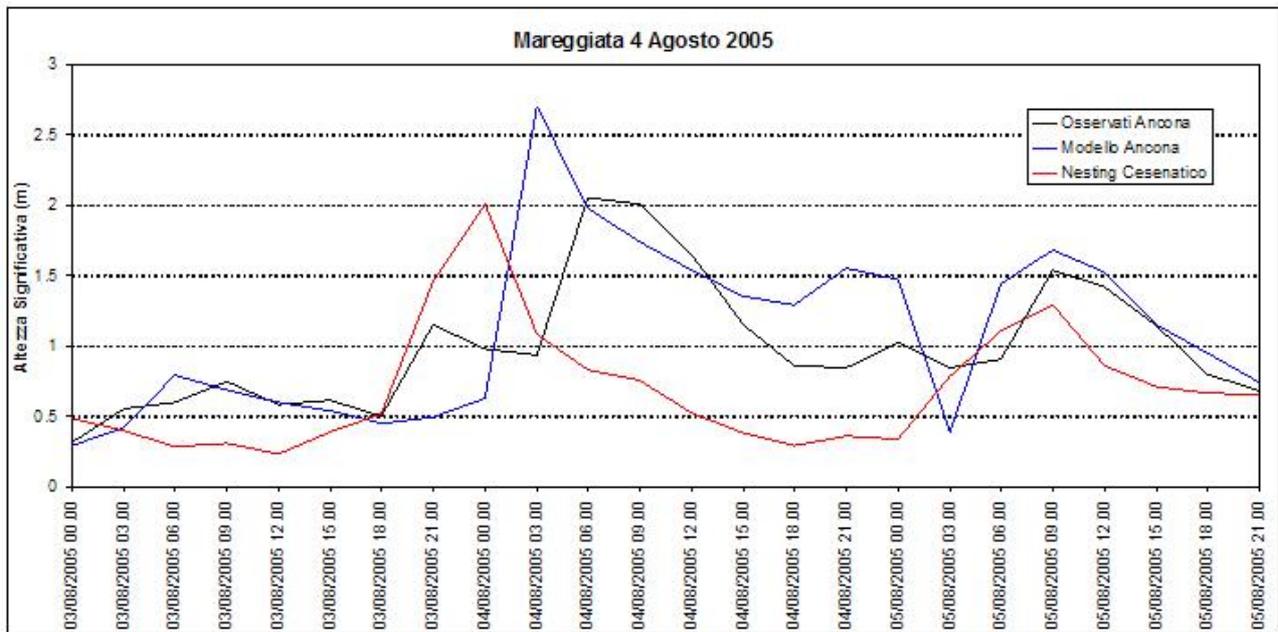


Figure 8: significant wave height during the August 4, 2005 sea storm, measured by the Ancona buoy (black line) and simulated by the SWAN model at the same location (blue line) and at the Cesenatico buoy location (red line).

CONTRIBUTION PARTNER V

LA SAPIENZA

Introduction

L'étude envisagée dans NAUSICAA a pour objectif l'évaluation des interactions entre la houle, les courants, le trait de côte et les herbiers de *Posidonia oceanica*. Dans cette optique, le rôle des sédiments superficiels marins sur l'atténuation des houles, et la réduction consécutive de l'érosion littorale des plages sableuses sera mis en évidence. Dans le même temps, le travail s'intéressera aux effets de l'érosion littorale et des courants marins sur les herbiers de *Posidonia oceanica* au droit de plages en érosion. 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.

L'université La Sapienza s'impliquera dans le projet au travers de l'analyse de séries de données hydrodynamiques mesurées in-situ ou établies en laboratoire (modélisation des vagues avec un modèle spectral dit de troisième génération; modélisation de la circulation avec un modèle 3D, modélisation couplée houle / courant), ainsi qu'au travers de l'analyse de terrain de données biologiques sur des herbiers de *Posidonia oceanica* (cartographie, surveillance, échantillonnage...).

In the phase A of the study the following works have been carried out:

- analyse historique de la distribution des herbiers de *Posidonia oceanica* le long de la côte étudiée: synthèse des cartes précédemment relevées, uniformisation et geo-référencement de l'état actuel;
- sélection d'un site de référence où l'érosion littorale est négligeable (Ponza) et où les caractéristiques météo-hydrodynamiques sont semblables au site en érosion (Terracina) en partant de la carte au 1:10000 des herbiers définie entre le promontoire Circeo et Terracina (2005, région Lazio), la partie haute de l'herbier sera étudiée en détail par imagerie sous-marine, avec des ROV (Remoted Operated Vehicle) qui circuleront selon des trajets perpendiculaires à la côte entre 5m et 15m de bathymétrie, de telle sorte que la limite côté plage des herbiers sera parfaitement calée. Ces analyses permettront de définir une typologie et une forme de cette limite, 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;

Matériel et méthodes

La zone étudiée

Terracina (41°16.670N / 013°14.470E) :

La partie Sud du littoral du Latium, pris entre le promontoire de Circeo et Terracina (Latina) est généralement considéré comme représentatif d'une situation de régression des herbiers de *Posidonia oceanica* le long de la côte du Latium et a déjà été largement surveillé dans le passé. Depuis les années 60, on a regroupé d'importantes quantités de données portant sur la distribution et l'abondance de ces herbiers.

Ponza (40°54.330N / 012°57.795E) :

Le littoral de Terracina sera étudié en parallèle avec le littoral de l'île Ponza (située au large du littoral du Latium) qui constitue un site de référence où les processus de régression des herbiers n'ont pas été observés pour le moment.

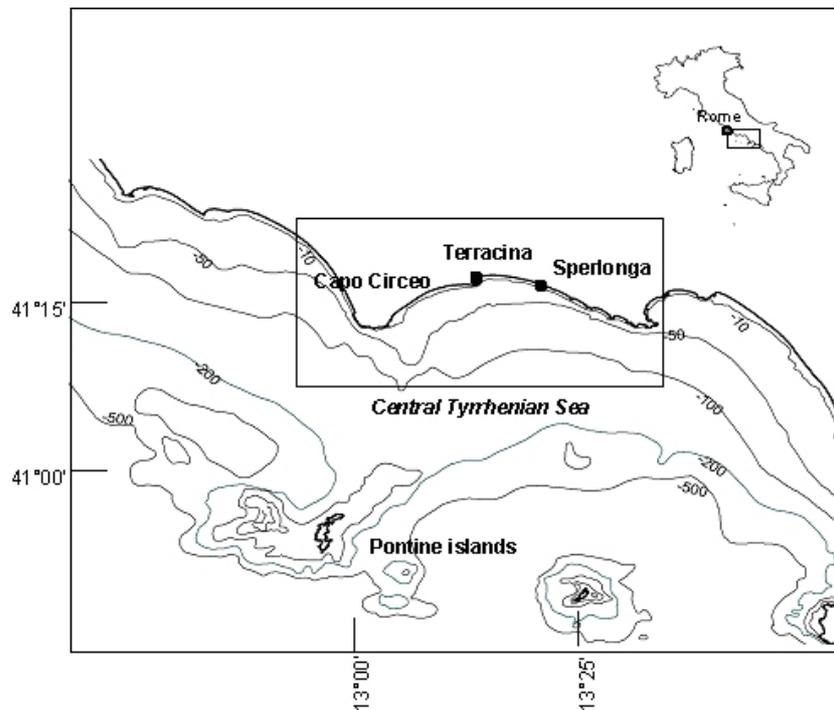


Fig. 1 – The study area

The methodologies

The first step has been the acquisition and geo-referenzation of the coast line and bathymetric data. The resulted map constitutes the “basic” map for the following elaborations. Subsequently, the *Posidonia oceanica* meadow distribution map has been overlapped on the basic map.

The current distribution of *Posidonia oceanica* in the study area was compared with the three available historical maps covering the last fifty years: Fusco, 1961 (1959 survey), Ardizzone & Migliuolo, 1982 (1980 survey), Diviacco *et al.*, 2001 (1990 survey). The first one is a map from the Italian Merchant Navy made by means of discrete data from ecosounder and dredge observations. The original scale of the map is 1:100.000. The second map has been made starting from the first map, and carried out with an accurate scuba diving survey. The third map has been carried out in the within of a survey on the *Posidonia oceanica* meadows along the latium coasts. The survey was carried out by Side Scan Sonar, Remote Operate Vehicle, scuba diving and DGPS positioning; the original scale of the map is 1:10.000. The current distribution come from a survey carried out from Regione Lazio and University of Rome during the 2005.

ArcGIS 9.0 and ArcView 3.2 (ESRI) software were used to homogenize and to overlay the different maps.

The first results

The present day coverage of *Posidonia* beds has changed radically compared to the other reference periods. In fact, an estimate of 2899 ha of *Posidonia* and 1800 ha of dead matte was calculated for the 2005 survey. Three different conditions can be described. The first sub-area (the western one) is that of the *Posidonia* beds lying off Cape Circeo which was the least modified one over the years, probably because it is located offshore with respect to the others and therefore it is less influenced by continental inputs, but also because of the presence of hard bottoms, that prevent damage due to illegal coastal trawling. The second (the central one) is the area between Cape Circeo and Terracina which displays the most consistent regression. This coast has suffered from important urban change that influenced both water quality and sediment type. The last (the eastern one), from Terracina to Sperlonga, showed a medium regressive status, mainly characterized by the decreasing of the lower limit of the *Posidonia*.

For these three sub-areas, the trend in the reduction of *Posidonia* coverage and the modification of the lower limit were estimated and different conditions were found. In 1959, the lower limit of the *Posidonia* bed was ca 35 m in the entire study area (Fusco, 1961), but it had markedly changed twenty years later (Ardizzone & Migliuolo, 1982) with a mean value of ca 22-24 m in the most regressed central area and 25 m east of Terracina. In the 1990 survey, the lower limit showed different conditions: almost the same depth (ca 30-35 m) off Cape Circeo, 20-22 m in the central part of the area, and 24-25 m east of Terracina (Diviacco *et al.*, 2001). In the 2005 survey, the Circeo area is once again the one least modified, while in the central area the lower limit decreased more and more, reaching a depth of 18-20 m. In the eastern area the present limit is 23-25 m.

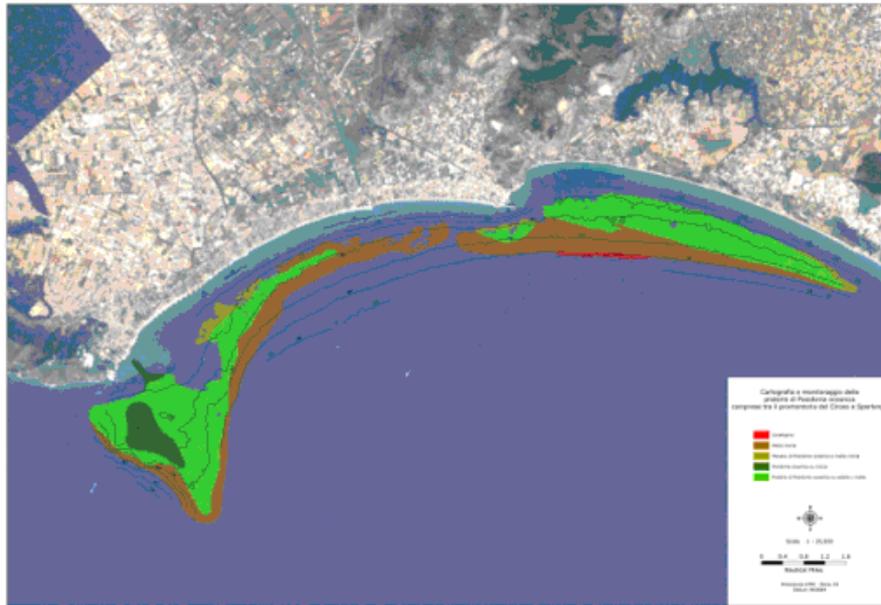


Fig. 2 – The area of study and the actual *Posidonia oceanica* meadow distribution and status (dark green: meadow on rock, light green meadow on sand or mat; brown: dead mat)

The upper limit changed less than the lower, going from the 14 m of 1959 to the 17-18 m in the present study without any great diversification in the different parts of the area. The only important exception is that of the area off the harbour of Circeo. This important coastal construction realized in the 1960s markedly modified the *Posidonia* bed, creating a big hole in its distribution.

From the first estimate of *Posidonia* coverage of 7290 ha in 1959, the total area in 1980 had become 5054 ha, and 3581 ha in 1990 down to the present value of 2899 ha. At the same time, no important increase of the dead mat has been observed.

The very heterogeneous status of the *Posidonia* meadows observed in the 30-km study area stresses the need for large-scale studies to understand the complex level of modification, which is particularly important in cases of regression. The rapid regression observed here can be summarized in a lowering of the bottom coverage by ca 60% since 1959, of which 19% has occurred since the last survey dating back to 1990. The total loss of *Posidonia* beds amounted to 4391 ha in a matter of around fifty years.

The validation of old maps is a main test for their usefulness (Leriche *et al.*, 2004). The 1990 and the present maps can be considered fully reliable, in our case the latter being implemented by SSS full coverage sonograms, validated by video camera and located by DGPS. The other old maps deriving from the interpolation of discrete data, are important reliable for the upper and lower limits of tidily distributed *Posidonia*. Bathymetric tuning is presumably a good method of control for sea bottoms with a regular coverage, such as the present signs (dead mat). In this condition the amount of *Posidonia* coverage in hectares, in the case of the older maps, is not so far from the current data.

This current critical condition is not the result of catastrophic pollution but is certainly due to the

anthropogenic modifications very common in almost every Mediterranean coastal zone (Boudouresque *et al.*, 2006). Rapid growth of the human settlements, building of new harbours and breakwaters, input of nutrient coming from the intensive agriculture of the area, and the illegal trawl fishing still being carried on (Ardizzone *et al.*, 2000), are without any doubt joint causes of the observed regressions.

Evidence of the connection between coastal modification and regression of *Posidonia* can be found also when comparing the described *Posidonia* to the status of the *Posidonia* meadows in the Pontine Islands, just off the study area. None of the above mentioned impact factors is present in those islands and the *Posidonia* coverage of the sea bottom is stable, and certainly has been so in the last 15 years (Ardizzone 1991, unpublished observations 2005), and without any sign of modification such as the presence of dead matte.

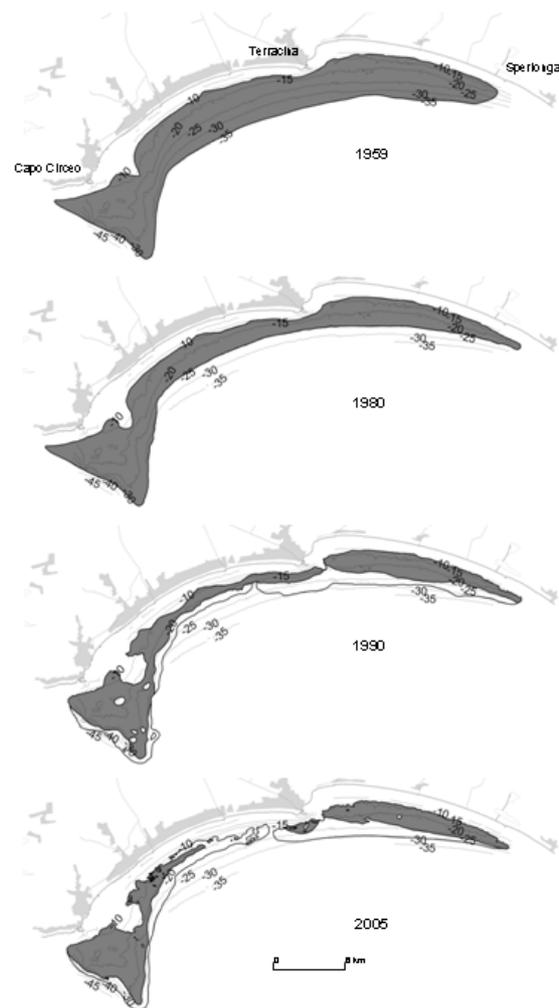


Fig. 3 – The *Posidonia* meadows in the historical maps (1959: from Fusco 1961; 1980: from Ardizzone e Migliuolo 1982; 1990: from Diviacco *et al.* 2001), and in the 2005 survey.

About 130 scientific and technical refereces about *Posidonia oceanica* meadows, regression, hydrodinamic, sea circulation, meteorology, models and erosion have been collectd.

For the next phase of the study (marine meteo-climate and numerical modelling techniques) a partner has been chosen. It's the "Istituto di Scienze Marine – Marine Science Institute" of the National Research Council of Venice.

References (Posidonia oceanica meadows, regression, Latium coasts)

- Ardizzone G.D., Migliuolo A. (1982). Modificazioni di una prateria di *Posidonia oceanica* (L.) Delile del Medio Tirreno sottoposta ad attività di pesca a strascico. *Naturalista Siciliano*, S. IV, **VI** (Suppl.3), 509-15.
- Ardizzone G.D., Pelusi P. (1984). Yield and damage evaluation of bottom trawling on *Posidonia* meadows. *International Workshop on Posidonia oceanica beds*. Boudouresque C.F., Jeudy de Grissac A. Oliver J. eds. *GIS Posidonie Publ.*, **1**, 63-72.
- Ardizzone G.D. (1991). Cartografia bentonica con sistemi video controllati a distanza. *Oebalia*, suppl., **XVII**, 421-452.
- Ardizzone 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.
- Badalamenti F., Di Carlo G., D'Anna G., Pristina M., Toccaceli M. (2006). Effects of dredging activities on population dynamics of *Posidonia oceanica* (L.) Delile in the Mediterranean sea: the case study of Capo Feto (SW Sicily, Italy). *Hydrobiologia*, **555**, 253-261.
- Ballesta L., Pasqualini V., Pergent G., Pergent-Martini C. (2000). Distribution and dynamics of *Posidonia oceanica* beds along the Albères coastline. *Académie de Sciences / Editions scientifiques et médicales, Life Sciences*, **323**, 407-414.
- Balestri E., Cinelli F., Lardicci C. (2003). Spatial variation in *Posidonia oceanica* structural, morphological and dynamic features in a northwestern Mediterranean coastal area: a multi-scale analysis. *Marine Ecology Progress Series*, **250**, 51-60.
- Balestri E., Benedetti Cecchi L., Lardicci C. (2004). Variability in patterns of growth and morphology of *Posidonia oceanica* exposed to urban and industrial wastes: contrasts with two reference locations. *Journal of Experimental Biology and Ecology*, **308**, 1-21.
- Bianchi C.N., Ardizzone G.D., Belluscio A., Colantoni P., Diviacco G., Morri C., Tunesi L. (2003). La cartografia del benthos. In: *Manuale di metodologie di campionamento e studio del benthos marino mediterraneo*. Gambi M.C., Dappiano M (eds.). *Biologia Marina Mediterranea*, **10** (suppl.), 367-394.
- Borum J., Duarte C.M., Krause-Jensen D., Greve T.M. (2004). European seagrasses: an introduction to monitoring and management. *EU Project Monitoring and Managing of European Seagrasses (M&MS)*. EVK3-CT-2000-00044: 95 pp.
- Bourcier M. (1989). Régression des herbiers a *Posidonia oceanica* (L.) Delile a l'Est de Marseille, sous l'action conjuguée des activités humaines et des modifications climatiques. In: Boudouresque C.F., Meinesz A., Fresi E., Gravez V. (Eds.), *International Workshop on Posidonia oceanica beds 2*. GIS Posidonie Publ., France, 287-292.
- Boudouresque C.F. (2004). Marine biodiversity in the Mediterranean: status of species, populations and communities. *Scientific Report of Port-Cros national Park*, **20**, 97-146.
- 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.
- Cinelli F., Pardi G., Papi I., Benedetti Cecchi L. (1995). Mappatura delle praterie di *Posidonia oceanica* (L.) Delile intorno alle isole minori dell'Arcipelago Toscano. *Atti Società Toscana Scienze Naturali*, **102**, 93-110.
- Colantoni P., Gallignani P., Fresi E., Cinelli F. (1982). Patterns of *Posidonia oceanica* (L.) Delile beds around the island of Ischia (Gulf of Naples) and adjacent waters. *Marine Ecology Pubblicazione Stazione Zoologica di Napoli I*, **3** (1), 53-74.
- De Falco G., Murru E., Baroli M., Piergallini G., Cangemi G. (2000). Photo aerial image processing and sediment analysis as indicators of environmental impact on *Posidonia oceanica* in the Mediterranean. *Biologia Marina Mediterranea*, **7** (2), 349-352.
- Delgado O., Grau A., Pou S., Riera F., Massuti C., Zabala M., Ballesteros E. (1997). Seagrass regression caused by fish cultures in Fornells Bay (Menorca, Western Mediterranean). *Oceanologica Acta*, **20**, 557-563.
- Delgado O., Ruiz J.M., Pérez M., Romero J., Ballesteros E. (1999). Effects of fish farming on seagrass (*Posidonia oceanica*) in a Mediterranean bay: seagrass decline after organic loading cessation. *Oceanologica Acta*, **22** (1), 109-117.
- 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.
- Duarte C.M. (2002). The future of seagrass meadows. *Environmental Conservation*, **29**, 192-206.

- Falconetti C., Meinesz A. (1989). Charting the seaward limit of *Posidonia oceanica* meadows and of circalittoral biocoenoses along the coast of Monaco. *Oceanologica Acta*, **12** (4), 443-447.
- Francour P., Ganteaume A., Poulain M. (1999). Effects of boat anchoring in *Posidonia oceanica* seagrass beds in the Port-Cros national Park (north-western Mediterranean Sea). *Aquatic Conservation: Marine and Freshwater Ecosystems*, **9**, 391-400.
- Fusco N. (1961). Carta da Pesca n. 3. Da Capo Circeo a Capo Miseno. Ministero Marina Mercantile. Direzione Generale Pesca Marittima.
- Garcia-Charton J.A., Bayle J.T., Sánchez-Lizaso J.L., Chiesa P., Llauradó C., Pérez C., Djian H. (1993). Respuesta de la pradera de *Posidonia oceanica* y su ictiofauna asociada al anclaje de embarcaciones en el parque Nacional de Port Cros, Francia. *Publication Especial del Instituto Espanol de Oceanografia*, **11**, 423-430.
- Guidetti P., Fabiano M. (2000). The use of lepidochronology to assess the impact of terrigenous discharges on the primary leaf production of the Mediterranean seagrass *Posidonia oceanica*. *Marine Pollution Bulletin*, **40**, 449-453.
- 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.
- Leriche A., Pasqualini V., Boudouresque C.F., Bernard G., Bonhomme P., Clabaut P., Denis J. (2006). Spatial, temporal and structural variations of a *Posidonia oceanica* seagrass meadow facing human activities. *Aquatic Botany*, **84**, 287-293.
- Marbà N., Duarte C.N., Cebrian J., Enriquez S., Gallegos E., Olesen B., Sand-Jensen K. (1996). Growth and population dynamics of *Posidonia oceanica* on the Spanish Mediterranean coast: elucidating seagrass decline. *Marine Ecology Progress Series*, **137**, 203-213.
- Marbà N., Duarte C.M. (1997). Interannual changes in seagrass (*Posidonia oceanica*) growth and environmental changes in the Mediterranean littoral zone. *Limnology and Oceanography*, **42**, 800-810.
- Meinesz A., Lefèvre J.R., Astier J.M. (1991). Impact of coastal development on the infralittoral zone along the southern Mediterranean shore of continental France. *Marine Pollution Bulletin*, **23**, 343-347.
- Meinesz A., et al. (2001). The introduced green alga *Caulerpa taxifolia* continues to spread in the Mediterranean. *Biological Invasion*, **3**, 201-210
- Montefalcone M., Albertelli G., Bianchi C.N., Mariani M., Morri C. (2006). A new synthetic index and a protocol for monitorign the status of *Posidonia oceanica* meadows: a case study at Sanremo (Ligurian Sea, NW Mediterranean). *Aquatic Conservation: Marine & Freshwater Ecosystems*, **16**, 29-42.
- Pasqualini V., Pergent Martini C., Clabaut P., Pergent G (1998). Mapping of *Posidonia oceanica* using aerial photographs and side scan sonar: application off the Island of Corsica (France). *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, **47**, 359-367.
- Pasqualini V., Pergent-Martini C., Pergent G. (1999). Environmental impact identification along the Corsican coast (Mediterranean Sea) using image processing. *Aquatic Botany*, **65**, 311-320.
- Piazzi L., Acunto S., Cinelli F. (2000). Mapping of *Posidonia oceanica* beds around Elba Island (western Mediterranean) with integration of direct and indirect methods. *Oceanologica Acta*, **23** (3), 339-346.
- Pérès J.M., Picard J. (1972). Causes de la raréfaction et de la disparition des herbiers de *Posidonia oceanica* sur les cotes francaises de la Méditerranée. *Aquatic Botany*, **1**, 133-139.
- Pergent-Martini C., Pergent G (1995). Impact of a sewage treatment plant on the *Posidonia oceanica* meadow: assessment criteria. Proceedings of the Second International Conference on the Mediterranean Coastal Environment MEDCOAST '95, 1389-1399.
- Pergent-Martini C., Pergent G. (1996). Spatio-temporal dynamics of *Posidonia oceanica* beds near a sewage outfall (Mediterranean – France). In: Kuo J., Phillips R.C., Walker D.I., Kirkman H. (eds.) *Seagrass Biology: Proceedings of an international workshop*. Faculty of Sciences, University of Western Australia: 229-306.
- Piazzi L., Acunto S., Cinelli F. (2000). Mapping of *Posidonia oceanica* beds around Elba island (western Mediterranean with integration of direct and in direct methods. *Oceanologica Acta*, **23**(3), 339-346.
- Ruiz J.M., Péres M., Romero J. (2001). Effect of fish farm loadings on seagrass (*Posidonia oceanica*) distribution, growth and photosynthesis. *Marine Pollution Bulletin*, **42** (9), 749-760.
- Ruiz J.M., Romero J. (2003). Effects of disturbances caused by coastal constructions on spatial structure, growth dynamics and photosynthesis of the seagrass *Posidonia oceanica*. *Marine Pollution Bulletin*, **46**, 1523-1533.

Sanchez -Lizaso J.L., Guillén J.E., Ramos A. (1990). The regression of *Posidonia oceanica* meadows in El Campello (Spain). *Rapports et Procés-Verbaux des Réunions de la Commission internationale pour l'Exploration scientifique de la Méditerranée*, **32**, 7.

Sanchez-Jerez B., Ramon-Esplà A.A. (1996). Detection of environmental impacts by bottom trawling on *Posidonia oceanica* (L.) Delile meadows: sensitivity of fish and macrobenthic communities. *Journal of Aquatic Ecosystem Health*, **5**, 239-253.

Short F., Wyllie-Echeveria S. (1996). Natural and human induced disturbance of seagrasses. *Environmental Conservation*, **23** (1), 17-27