

Document public



L'Observatoire de la Côte Aquitaine est cofinancé par l'Union Européenne
L'Europe s'engage en Aquitaine avec le Fonds Européen de Développement Régional



Liberté • Égalité • Fraternité
RÉPUBLIQUE FRANÇAISE

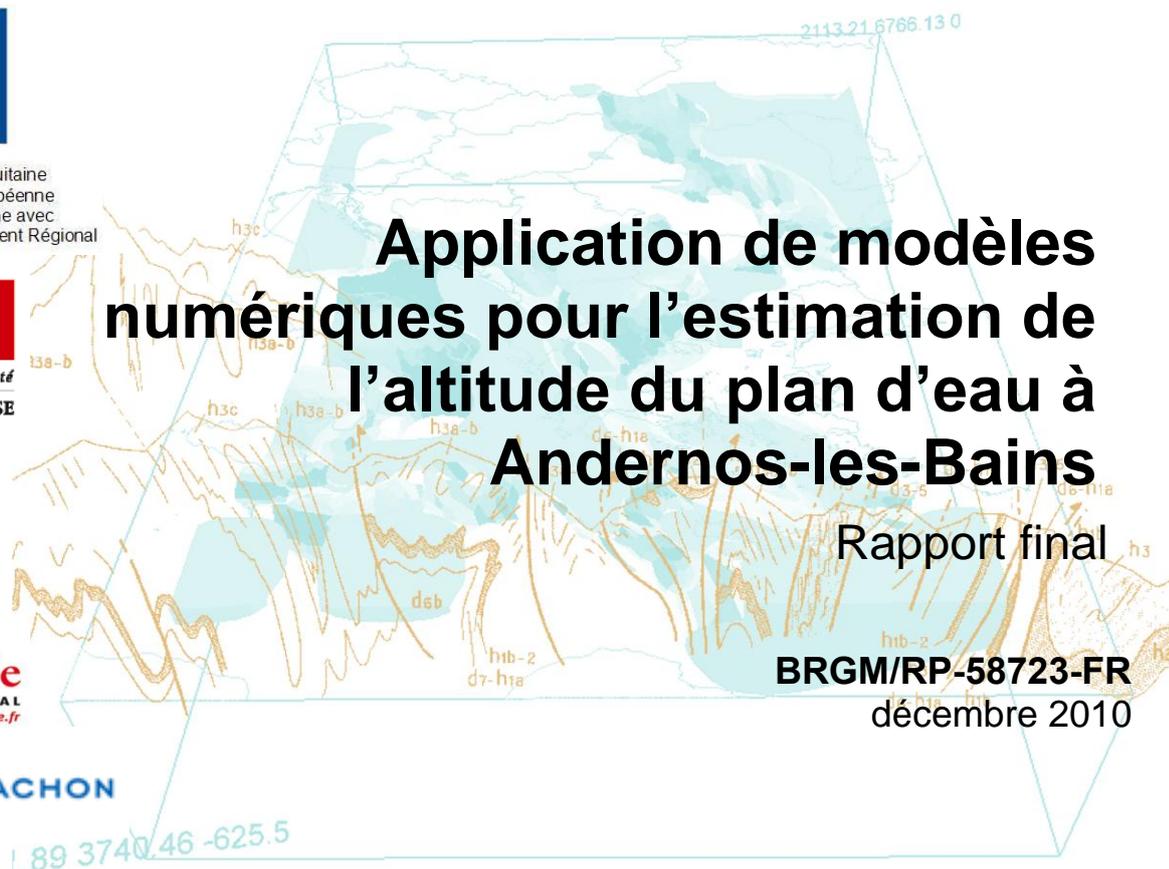
R E G I O N



AQUITAINE



BASSIN D'ARCACHON



Application de modèles numériques pour l'estimation de l'altitude du plan d'eau à Andernos-les-Bains

Rapport final

BRGM/RP-58723-FR
décembre 2010



OBSERVATOIRE
CÔTE AQUITAINE

Réseau d'experts au service du littoral



Géosciences pour une Terre durable

brgm

Document public



L'Observatoire de la Côte Aquitaine est cofinancé par l'Union Européenne
L'Europe s'engage en Aquitaine avec le Fonds Européen de Développement Régional



Liberté • Égalité • Fraternité

RÉPUBLIQUE FRANÇAISE

R E G I O N



AQUITAINE



Application de modèles numériques pour l'estimation de l'altitude du plan d'eau à Andernos-les-Bains

Rapport final

BRGM/RP-58723-FR
décembre 2010

Étude réalisée dans le cadre des projets de Service public du BRGM 2009 LITA02

J. Mugica, E. Delvallée, R. Pedreros

Vérificateur : S. Aubié

Approbateur : C. Mallet

En l'absence de signature, et pour les rapports diffusés en version numérique, l'original signé est disponible aux Archives du BRGM.

Le système de management de la qualité du BRGM est certifié AFAQ ISO 9001:2008.



OBSERVATOIRE
CÔTE AQUITAINE

Réseau d'experts au service du littoral



Géosciences pour une Terre durable

brgm

Mots clés : submersion marine – modélisation numérique – altitude du plan d'eau maximale - clapot – surcote atmosphérique – surcote liée aux vagues

En bibliographie, ce rapport sera cité de la façon suivante :

J. Mugica, E. Delvallée, R. Pedreros (2010) - Application de modèles numériques pour l'estimation de l'altitude du plan d'eau à Andernos-les-Bains. Rapport BRGM/RP-58723-FR. 92 p., 64 fig., 14 tab., 6 ann.

© BRGM, 2010, ce document ne peut être reproduit en totalité ou en partie sans l'autorisation expresse du BRGM.

Remarque générale : *Tous les niveaux d'eau présentés dans ce rapport sont donnés dans le système altimétrique de référence IGN69 sauf exception lorsqu'un autre système est précisé.*

Synthèse

Dans le cadre des missions de l'Observatoire de la Côte Aquitaine telles qu'elles sont définies par le CPER 2007-2013 (Contrat de Projet Etat-Région), le SIBA a chargé le BRGM de réaliser une expertise relative aux risques de submersion marine à Andernos-les-Bains (Gironde). Cette commune a en effet été inondée à plusieurs reprises, notamment lors des derniers événements climatiques Klaus (24/01/2009) et Xynthia (27-28/02/2010).

Cette expertise a été réalisée en 3 phases dont les deux premières ont fait l'objet des rapports **BRGM/RP-57462-FR (Mallet et al., 2009)** et **BRGM/RP-57902-FR (Mugica et al., 2009)**. La troisième phase fait l'objet de ce présent rapport et a pour objectif de fournir des éléments nécessaires au dimensionnement des ouvrages de protection contre la submersion marine à Andernos-les-Bains. Une méthodologie de modélisation a donc été mise en œuvre afin de reproduire les altitudes maximales du plan d'eau ainsi que le clapot et les courants à l'intérieur du Bassin d'Arcachon et en particulier au droit d'Andernos-les-Bains, lors des événements climatiques extrêmes ayant causé des submersions marines. La calibration et la validation de la modélisation numérique dans le Bassin d'Arcachon est détaillée dans le rapport BRGM/RP-58962-FR (Delvallée et al., en cours).

L'utilisation chaînée de deux modèles numériques, l'un simulant les niveaux d'eau et les courants (MARS) et l'autre simulant l'agitation (houle, clapot et surcote liée aux vagues, SWAN) a permis de simuler les altitudes maximales du plan d'eau générées par des événements climatiques extrêmes. Ces modèles ont été validés grâce aux données fournies par le laboratoire EPOC (Université Bordeaux 1, UMR CNRS 5805), que nous remercions pour leur collaboration. Trois scénarii ont été simulés : la tempête Klaus du 24/01/2009, la tempête Xynthia du 27-28/02/2010 et un événement potentiel caractérisé par les conditions météorologiques extrêmes de Klaus et les niveaux de marée extrêmes de Xynthia. **L'intérêt de cette méthodologie de modélisation est de calculer les altitudes maximales du plan d'eau en tenant compte à la fois de la surcote atmosphérique, des niveaux de marée et de la surcote liée aux vagues (setup).** Bien que la surcote liée aux vagues puisse contribuer considérablement à la surcote totale, de nombreuses études n'en tiennent pas compte en raison de la difficulté à la quantifier.

A l'issue des simulations, les altitudes maximales du plan d'eau simulées à Andernos-les-Bains sont de 3.28 m à 5h le 24/01/2009 (Klaus), 3.83 m à 5h le 28/02/2010

(Xynthia) et 4.45 m lors du pic de la tempête d'un scénario extrême imaginé. Par ailleurs, les simulations mettent en évidence :

- l'influence du niveau de marée sur le fetch et donc sur la formation du clapot ;
- la part importante de la surcote liée à la houle dans la surcote totale et donc son rôle considérable sur le processus de submersion marine ;
- une surcote liée à la houle homogène sur l'ensemble du Bassin ;
- l'influence de la morphologie de la lagune sur les altitudes du niveau d'eau ;
- l'importance de la précision des données météorologiques pour modéliser la surcote atmosphérique.

Ces résultats de simulation peuvent être utilisés afin de caractériser l'aléa submersion marine à l'intérieur du Bassin d'Arcachon mais nécessitent une interprétation par un expert. D'autre part, cette modélisation ne prenant pas en compte l'évolution morphologique des passes et des chenaux de la lagune, son actualisation à partir de données bathymétriques plus récentes est à envisager afin de caractériser l'aléa.

Il est important de souligner que ces résultats sont basés sur des événements climatiques exceptionnels passés. Dans le contexte de changement climatique actuel, il semble judicieux d'approfondir l'étude des périodes de retour de tels événements. **L'évolution probable de ces périodes de retour au cours des prochaines décennies ainsi que les différents scénarii de montée du niveau marin sont à considérer afin de gérer de façon durable le risque de submersion marine.**

Sommaire

1. Introduction.....	13
1.1. CONTEXTE DE L'ETUDE	13
1.2. PHENOMENES OBSERVES	15
1.2.1. Hiver 2008-2009	15
1.2.2. Xynthia, 27-28 février 2010	16
1.3. RAPPEL THEORIQUE	19
1.3.1. Définitions	19
1.3.2. Submersion marine	19
2. Methodologie	23
2.1. DESCRIPTION GENERALE.....	23
2.2. MODELISATION DES NIVEAUX D'EAU	24
2.2.1. Description générale du modèle MARS	24
2.2.2. Configuration pour le Bassin d'Arcachon.....	25
2.3. MODELISATION DES VAGUES	27
2.3.1. Description générale du modèle SWAN	27
2.3.2. Configuration pour le Bassin d'Arcachon.....	28
2.4. ALTITUDES IGN DU PLAN D'EAU	28
2.4.1. Définitions	28
2.4.2. Calcul des altitudes IGN du plan d'eau	29
3. Validation	31

3.1. VALIDATION DES FORÇAGES	31
3.1.1. Validation des données météorologiques	31
3.1.2. Validation des données de vagues	32
3.2. IMPLANTATION ET VALIDATION DES MODELES	33
3.2.1. Validation de la marée	34
3.2.2. Validation des courants	37
3.2.3. Validation du clapot	40
3.2.4. Validation de la surcote	41
3.3. INCERTITUDES SUR LES HAUTEURS D'EAUX CALCULEES	48
4. Simulations et analyse des résultats	51
4.1. SIMULATION DE KLAUS (24/01/2009)	51
4.1.1. Météorologie et niveaux de marée	51
4.1.2. Altitude du plan d'eau et circulation à l'intérieur de la lagune	52
4.1.3. Agitation à l'intérieur de la lagune	57
4.2. SIMULATION DE XYNTHIA (27-28/02/2010)	62
4.2.1. Météorologie et niveaux de marée	62
4.2.2. Altitude du plan d'eau et circulation à l'intérieur de la lagune	63
4.2.3. Agitation à l'intérieur de la lagune	69
4.3. SIMULATION D'UN EVENEMENT EXTREME	71
4.3.1. Météorologie et niveaux de marée	71
4.3.2. Altitude du plan d'eau et circulation à l'intérieur de la lagune	73
4.3.3. Agitation à l'intérieur de la lagune	78
4.4. PERIODE DE RETOUR DES EVENEMENTS ETUDIES	80

4.4.1. Statistique sur le niveau d'eau total mesuré	80
4.4.2. Séparation des marées et des surcotes	81
4.5. SYNTHESE GENERALE DES RESULTATS DE SIMULATION	85
5. Conclusions et perspectives	89
6. Bibliographie.....	91

Liste des annexes

Annexe 1 Hypothèses de calcul de MARS et système d'équations de Saint-Venant	93
Annexe 2 Initialisation et paramétrage de MARS	97
Annexe 3 Equation et propriétés de SWAN.....	101
Annexe 4 Initialisation et paramétrage de SWAN.....	105
Annexe 5 Validation des forçages	109
Annexe 6 Tableau récapitulatif	119

Liste des illustrations

Figure 1 : Localisation des zones ayant subi des dégâts sur la commune d'Andernos-les-Bains (Scan25, ©IGN).....	14
Figure 2 : Quartier du Mauret inondé lors de la tempête du 24/01/09, sur la commune d'Andernos-les-Bains	16
Figure 3 : Cartographie des zones du Bassin d'Arcachon soumises à la submersion marine lors de la tempête Xynthia	18
Figure 4 : Schéma illustrant les principaux mécanismes à l'origine de l'élévation du niveau marin dans le cas d'une tempête telle que Xynthia.....	21
Figure 5 : Description de la méthodologie de modélisation basée sur l'utilisation combinée des modèles MARS et SWAN afin de calculer l'altitude maximale du plan d'eau à l'intérieur du Bassin d'Arcachon.....	23
Figure 6 : Exemple de modèles gigognes (IFREMER, Plus et al., 2006).....	25
Figure 7 : Principe de la technique d'emboîtement de modèle pour MARS	25
Figure 8 : Emprise géographique et bathymétrie (en m) des 3 rangs. La résolution est respectivement de 5500, 850 et 235 m (WGS 84)	26
Figure 9 : Position des capteurs servant à la validation des modèles implantés : courantomètres et ADCP déployés dans le cadre du programme PNEC, marégraphe d'Arcachon-Eyrac, sémaphore du Cap-Ferret, bouée Candhis 03302.....	34
Figure 10 : Marée dans la passe-sud du Bassin d'Arcachon en février 2007, mesurée par l'ADCP et simulée par MARS	35

Figure 11 : Marée à Arcachon-Eyrac en février 2007, prédite par le SHOM et simulée par MARS	36
Figure 12 : Courants dans la passe-sud du Bassin d'Arcachon en février 2007, mesurée par l'ADCP et simulée par MARS	38
Figure 13 : Courants simulés par le modèle MARS dans le Bassin d'Arcachon, le 07 février 2007 : à 11h00 (jusant), à 14h (étales, avant la renverse des courants) et à 17h (flot).....	39
Figure 14 : Hauteur significative du clapot au niveau du capteur A08, mesurée par l'Altus et simulée par SWAN.....	40
Figure 15 : Période pic du clapot au niveau du capteur A08, mesurée par l'Altus et simulée par SWAN	41
Figure 16 : Altitude du plan d'eau à l'entrée de la passe Sud en février 2007, mesurée par l'ADCP et simulée par MARS (ref. IGN).....	42
Figure 17 : Altitude du plan d'eau à Arcachon-Eyrac en février 2007, mesurée par le marégraphe du SHOM et simulée par MARS (ref. IGN)	42
Figure 18 : Exemple du setup simulé par le modèle SWAN dans le Bassin d'Arcachon, le 11 février 2007 à 3h00 (en m)	44
Figure 19 : Surcote à l'entrée du bassin en février 2007, mesurée par l'ADCP et simulée par MARS.....	46
Figure 20 : Surcote à Arcachon-Eyrac en février 2007, mesurée par le marégraphe du SHOM et simulée par MARS	47
Figure 21 : Altitude du plan d'eau dans le Bassin d'Arcachon, le 7 février 2007 à 9h00 (ref.IGN).....	48
Figure 22 : Vitesses de vent (en m/s) et niveaux de marée (en mètres) lors de la tempête Klaus (24/01/2009)	51
Figure 23 : Comparaison des niveaux de marée prédits par le SHOM (données SHOMAR) et des niveaux de marée simulés par MARS pour la tempête Klaus (24/01/2009)	52
Figure 24 : Comparaison des niveaux d'eau mesurés par le marégraphe d'Eyrac (SONEL) et des niveaux d'eau simulés par MARS à Eyrac pour la tempête Klaus (24/01/2009)	53
Figure 25 : Niveaux d'eau (niveaux de marée + surcote atmosphérique) simulés par MARS à Andernos pour la tempête Klaus.....	53
Figure 26 : Surcote atmosphérique simulée par MARS + surcote liée à la houle simulée par SWAN et surcote totale mesurée à Eyrac (SONEL)	54
Figure 27 : Surcote liée à la houle (setup) simulée par SWAN pour la tempête Klaus, le 24/01/2009 à 5h (niveau d'eau max).....	55
Figure 28 : Altitude de la surface de la mer (niveaux de marées + surcote atmosphérique + surcote liée au vagues, en mètres) simulés par MARS et SWAN pour la tempête Klaus, le 24/01/2009 à 5h (référence altimétrique IGN)	55
Figure 29 : Vitesse (en m/s) et direction des courants simulés par MARS pour la tempête Klaus, le 24/01/2009 à 2h (flot), à 4h (étales) et à 6h (jusant)	57

Figure 30 : Hauteur et direction des vagues simulées par SWAN pour la tempête Klaus, le 24/01/2009 à 5h (niveaux d'eau max) et à 9h (pic de vent).....	59
Figure 31 : Localisation des points pour lesquels les hauteurs d'eau simulées par SWAN ont été extraites.....	60
Figure 32 : Hauteur significative des vagues (en mètres) simulées par SWAN pour la tempête Klaus aux points : Eyrac, Andernos, Girouasse, Lucasson et Mouchtalette	61
Figure 33 : Périodes des vagues de hauteur significative (en seconde) simulées par SWAN pour la tempête Klaus aux points : Eyrac, Andernos, Girouasse, Lucasson et Mouchtalette.....	61
Figure 34 : Vitesses de vent (en km/h) et niveaux de marée (en mètres) lors de la tempête Xynthia (27-28/02/2010)	62
Figure 35 : Comparaison des niveaux de marée prédits par le SHOM (données SHOMAR) et des niveaux de marée simulés par MARS pour la tempête Xynthia (27-28/02/2010)	63
Figure 36 : Comparaison des variations de l'altitude de la surface de la mer mesurées par le marégraphe d'Eyrac (SONEL) et des variations de l'altitude de la surface de la mer simulées par MARS à Eyrac pour la tempête Xynthia (27-28/02/2010).....	64
Figure 37 : Variations de l'altitude de la surface de la mer (hauteur de marée + surcote atmosphérique) simulée par MARS à Andernos pour la tempête Xynthia (27-28/02/2010)	64
Figure 38 : Surcote atmosphérique simulée par MARS, surcote liée à la houle simulée par SWAN et surcote totale mesurée (SONEL) lors de la tempête Xynthia (27-28/02/2010)	65
Figure 39 : Surcote liée à la houle (setup, en mètres) simulés par SWAN pour la tempête Xynthia le 28/02/2010 à 5h (niveaux d'eau max).....	66
Figure 40 : Altitudes maximales du plan d'eau (niveaux de marée + surcote atmosphérique + surcote liée aux vagues, en mètres) simulées par SWAN pour la tempête Xynthia le 28/02/2010 à 5h (niveaux d'eau max).....	66
Figure 41 : Vitesse (en m/s) et direction des courants simulés par MARS pour la tempête Xynthia, le 28/02/2010 à 3h (flot), à 5h (niveau d'eau max) et à 7h (jusant).....	68
Figure 42 : Hauteur et direction des vagues (houle et clapot en mètres) simulées par SWAN pour la tempête Xynthia le 28/02/2010 à 5h (niveau d'eau max et pic de vent).....	70
Figure 43 : Hauteur des vagues (m) simulées par SWAN pour la tempête Xynthia aux points : Eyrac, Andernos, Girouasse, Mouchtalette et Lucasson	70
Figure 44 : Périodes des pic des vagues (en seconde) simulées par SWAN pour la tempête Xynthia aux points : Eyrac, Andernos, Girouasse, Lucasson et Mouchtalette (Xynthia le 28/02/2010 à 5h : niveaux d'eau max).....	71
Figure 45 : Vitesses du vent (en km/h) et niveaux de marée (en mètres) utilisés pour la simulation de l'événement extrême	72
Figure 46 : Pression atmosphérique (en hPa) utilisée pour la simulation de l'événement extrême	73
Figure 47 : Altitude du plan d'eau (niveaux de marée + surcote atmosphérique, en mètres) simulés par MARS à Eyrac et à Andernos pour la simulation de l'événement extrême	73

Figure 48 : Surcote atmosphérique simulée par MARS et surcote totale obtenue en additionnant la surcote liée à la houle simulée par SWAN, pour l'évènement extrême à Eyrac.....	74
Figure 49 : Surcote liée à la houle (setup, en mètres) simulés par SWAN pour l'évènement extrême le troisième jour à 5h (à l'étales).....	75
Figure 50 : Altitudes du plan d'eau calculées pour l'évènement extrême le troisième jour à l'étales.....	75
Figure 51 : Vitesse (en m/s) et direction des courants simulés par MARS pour le scénario extrême, le troisième jour au flot, à l'étales et au jusant.....	77
Figure 52 : Hauteur et direction des vagues simulées par SWAN dans le Bassin d'Arcachon (rang2) lors du scénario extrême, le troisième jour à 5h (niveau d'eau max et pic de vent)	78
Figure 53 : Hauteur des vagues (m) simulées par SWAN pour un évènement extrême aux points : Eyrac, Andernos, Girouasse, Mouchtalette et Lucasson.....	79
Figure 54 : Périodes des vagues de hauteur significative (en seconde) simulées par SWAN pour le scénario extrême aux points suivants : Eyrac, Andernos, Girouasse, Lucasson et Mouchtalette.....	79
Figure 55 : Période de retour des altitudes du plan d'eau au marégraphe d'Arcachon-Eyrac.....	81
Figure 56 : Période de retour des surcotes au marégraphe d'Arcachon-Eyrac.....	82
Figure 57 : Comparaison entre les vents de la ré-analyse CFSR et les vents mesurés par Météo-France au Cap-Ferret pendant la tempête Klaus de janvier 2009 (intensité et direction).	111
Figure 58 : Comparaison entre les pressions atmosphériques de la ré-analyse CFSR et les pressions mesurées par Météo-France au Cap-Ferret pendant la tempête Klaus de janvier 2009.	112
Figure 59 : Champs de vent (données CFSR issues de la NOAA) le 24/01/09 à 8h (T.U.).....	112
Figure 60 : Comparaison entre les vents du modèle GFS et les vents mesurés par Météo-France au Cap-Ferret pendant la tempête Xynthia de février 2010 (intensité et direction).	113
Figure 61 : Comparaison entre les pressions atmosphériques du modèle GFS et les pressions mesurées par Météo-France au Cap-Ferret pendant la tempête Xynthia de février 2010.	114
Figure 62 : Champs de vent (données GFS issues de la NOAA) le 28/02/10 à 03h (T.U.).....	114
Figure 63 : Comparaison entre les hauteurs significatives de vagues mesurées par la bouée Gascogne et celles issues du modèle WaveWatch3 (point 45°N - 5°W), pour une série temporelle échantillonnée à 3h du 8/12/2003 au 01/10/2006.	115
Figure 64 : Comparaison entre les paramètres de vagues mesurées par la bouée Candhis au Cap-Ferret et les triplets issus du modèle WaveWatch3 (point 44°N - 2,5°W), pendant la tempête Klaus (hauteur significative, période pic et direction pic).	117

Liste des tableaux

Tableau 1 : Références altimétriques maritimes (source SHOM)	29
Tableau 2 : Comparaison entre les données CFSR et MétéoFrance au pic de la tempête Klaus	31
Tableau 3 : Comparaison entre les données GFS et MétéoFrance au pic de la tempête Xynthia	32
Tableau 4 : Marée dans la passe-sud du Bassin en février 2007, comparaison entre les mesures ADCP et les simulations de MARS	36
Tableau 5 : Marée à Arcachon-Eyrac en février 2007, comparaison entre les mesures du SHOM et les simulations de MARS	37
Tableau 6 : Surcote atmosphérique, setup dû aux vagues, surcote totale modélisée et mesurée en février 2007 au niveau de l'ADCP (unités en m).....	45
Tableau 7 : Surcote atmosphérique, setup dû aux vagues, surcote totale modélisée et mesurée en février 2007 à Arcachon-Eyrac (unités en m)	45
Tableau 8 : Hauteur d'eau, marée, surcote atmosphérique à Arcachon-Eyrac et période de retour des événements.	83
Tableau 9 : Emprises géographiques(WGS84) et maillages des 3 rangs du modèle gigogne, MARS	99
Tableau 10 : Durées réelles simulées pour chaque rang et pour chacun des 3 scénarios MARS	99
Tableau 11 : Récapitulatif des propriétés de SWAN	104
Tableau 12 : Emprises géographiques (WGS84) et maillages des 2 rangs de SWAN	107
Tableau 13 : Durées réelles simulées pour chaque rang et pour chacun des 3 scénarios SWAN.....	107
Tableau 14 : Hauteur d'eau modélisée et mesurée, marée et surcote atmosphérique calculées par MARS_2DH et setup calculé par SWAN, à Arcachon-Eyrac	121

Liste des Acronymes

ADCP	: Acoustic Doppler Current Profiler
ALTUS	: Altimètre ultrasons
CANDHIS	: Centre d'Archivage National de Données de Houle In-Situ
CPER	: Contrat de Projet Etat-Région
CFSR	: Climate Forecast System Reanalysis
CETMEF	: Centre d'Etudes Techniques Maritimes Et Fluviales
EPOC	: Environnements et Paléoenvironnements OCéaniques
GEBCO	: General Bathymetric Chart of the Oceans

GFS	: Global Forecast System
GPD	: Generalized Pareto Distribution
MARS	: Model for Application at Regional Scale
NOAA	: National Oceanic and Atmospheric Administration
PNEC	: Programme National Environnement Côtier
POT	: Peaks Over Threshold
PWM	: Probability Weight Moment
WW3	: WaveWatch 3
SHOM	: Service Hydrographique et Océanographique de la Marine
SONEL	: Système d'Observation du Niveau des Eaux Littorales
SWAN	: Simulating WAVes Nearshore

1. Introduction

1.1. CONTEXTE DE L'ETUDE

Afin de constituer un outil d'aide à la décision pour les gestionnaires du littoral aquitain tel que le prévoit le Contrat de Projet Etat-Région (CPER) 2007-2013, l'Observatoire de la Côte Aquitaine regroupe les partenaires suivant : l'Europe (FEDER), l'Etat, la Région Aquitaine, les Départements de la Gironde, des Landes et des Pyrénées Atlantiques, le SIBA, le BRGM et l'ONF.

Dans le cadre des missions de l'Observatoire de la Côte Aquitaine, le SIBA a chargé le BRGM de réaliser une expertise relative aux risques de submersion marine sur la commune d'Andernos-les-Bains (Gironde). L'un des quartiers de cette commune, le quartier du Mauret (Figure 1), a été plusieurs fois inondé ces dernières années, comme suite à des phénomènes de submersion marine engendrés par les événements climatiques exceptionnels. Les plus marquants ont été les tempêtes Klaus (24 janvier 2009) et Xynthia (27 et 28 février 2010). Bien que Xynthia n'atteigne pas l'intensité des tempêtes de décembre 1999 ou de Klaus en termes de vitesses maximales instantanées de vent, la submersion marine qu'elle a engendrée a touché l'ensemble des zones basses du Bassin d'Arcachon, c'est-à-dire l'ensemble du pourtour du Bassin. Une première estimation de l'impact de cette tempête a été établi sur le littoral aquitain à partir des observations réalisées rapidement après l'événement par le réseau d'observateurs de l'Observatoire de la Côte Aquitaine et fait l'objet du rapport **BRGM/RP-58511-FR (Aubié et al., 2010)**.

La présente expertise qui a débuté en juillet 2009, se déroule en 3 phases :

- la première phase a fait l'objet du rapport **BRGM/RP-57462-FR (Mallet et al., 2009)** qui présente l'analyse des tempêtes de l'hiver 2008-2009 (période de retour et caractéristiques du vent, des vagues, de la marées et des surcotes), ainsi qu'un premier avis sur les aménagements du front de mer assorti de recommandations immédiates. Les données sur lesquelles a été basée cette première phase ont été acquises au large du Bassin d'Arcachon. Pour caractériser plus localement les niveaux d'eau et les vagues à proximité d'Andernos-les-Bains une étude plus poussée avait été prévue en troisième phase ;
- la seconde phase a fait l'objet d'une collaboration avec le CETMEF (Centre d'Etudes Techniques Maritimes Et Fluviales) telle que le prévoit l'Observatoire en fonction des besoins et compétences requis pour l'émission d'avis technique. Le rapport **BRGM/RP-57902-FR (Mugica et al., 2009)** accompagne le catalogue du CETMEF présentant des solutions géotechniques maritimes couramment utilisées pour les submersions marines et celles qui seraient les plus adaptées à Andernos-les-Bains (CETMEF, 2009) ;

- la troisième phase fait l'objet de ce présent rapport et complète donc la première phase. Elle a pour objectif de fournir des éléments nécessaires au dimensionnement des ouvrages de protection contre la submersion marine à Andernos-les-Bains. Pour cela, une modélisation numérique des niveaux d'eau à l'intérieur du Bassin d'Arcachon et plus particulièrement au droit d'Andernos-les-Bains, a été réalisée.

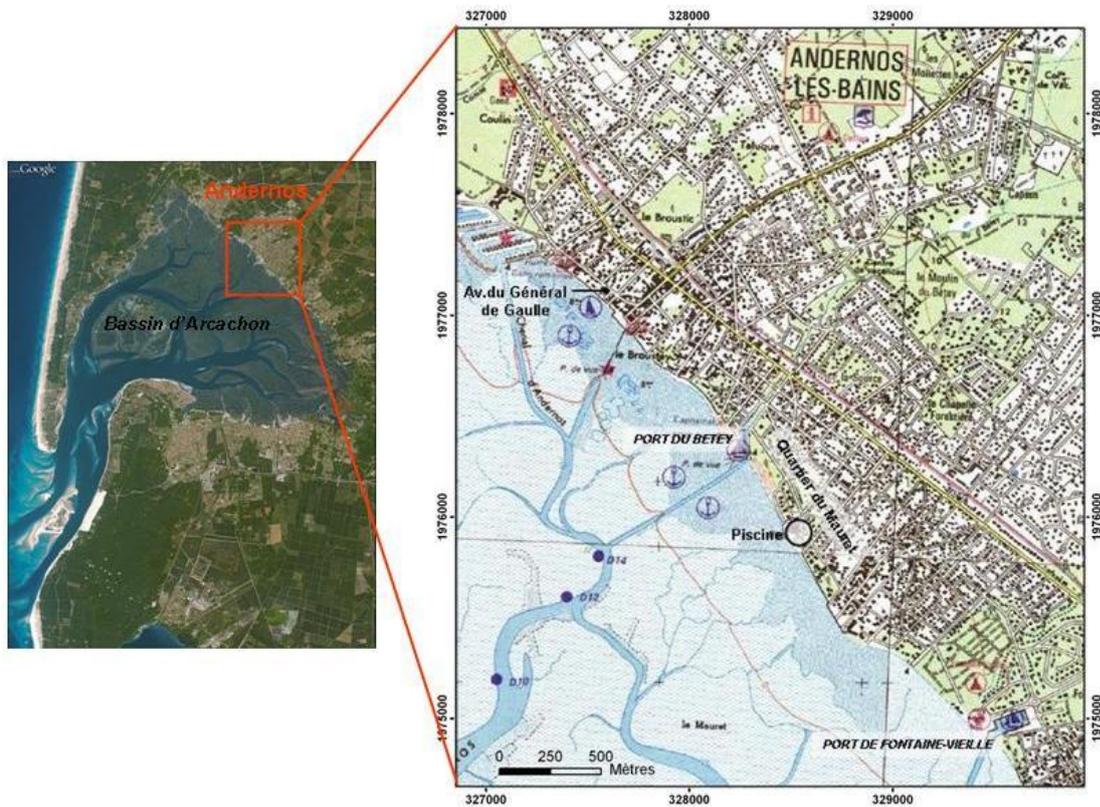


Figure 1 : Localisation des zones ayant subi des dégâts sur la commune d'Andernos-les-Bains (Scan25, ©IGN)

Au cours de cette troisième phase, les modèles numériques MARS (Model for Application at Regional Scale, développé par l'IFREMER) et SWAN (Simulating Waves Nearshore, développé à l'Université de Technologie de Delft au Pays-Bas), déjà fonctionnels sur le Bassin d'Arcachon (SWAN dans Pedreros et *al.*, 2008 et Parisot et *al.*, 2008, MARS dans Plus et *al.*, 2006) ont été utilisés. Ils permettent de simuler conjointement la marée, les vagues (houle et clapot) et la surcote atmosphérique.

Quatre simulations ont été réalisées dans le cadre de cette troisième phase. Les trois premières ont pour but de reproduire des événements passés : les submersions lors des tempêtes Klaus (24/01/2009) et Xynthia (27-28/02/2010), et l'agitation du bassin durant l'hiver 2006-2007, période qui sert à implanter, calibrer et valider la méthodologie de modélisation mise en œuvre. La dernière simulation est un scénario météorologique très défavorable : un événement extrême virtuel (non enregistré à ce jour, mais pouvant se produire) avec les conditions météorologiques de Klaus et les

amplitudes de marée de Xynthia. Ce rapport, présentera en premier lieu la méthodologie de modélisation mise en œuvre. La validation des modèles sera ensuite présentée, avant d'exposer et de discuter les résultats des 3 simulations (Klaus, Xynthia et événement extrême). Le laboratoire EPOC a fourni les mesures nécessaires à la validation des modèles.

La modélisation réalisée pour cette expertise s'inscrit également dans le cadre d'une étude multi-aléas du Bassin d'Arcachon (érosion de la côte, inondation, submersion marine) prévue dans les missions du BRGM pour l'Observatoire de la Côte Aquitaine. De même, le projet BARCASUB a pour objectif d'améliorer la connaissance de l'aléa submersion marine sur les zones endiguées d'Audenge, Certes, Graveyron et Malprat, à partir de la modélisation, de la cartographie (topo-bathy, typologie des digues, etc...) et également d'analyses socio-économiques. Ce contexte a favorisé la collecte de données météorologiques et océanographiques pour le forçage et la validation des simulations réalisées pour cette expertise.

Il est à noter que la modélisation réalisée dans cette présente expertise s'appuie sur les conditions hydrologiques actuelles et que les modifications de ces conditions ainsi que l'évolution morphodynamique du Bassin d'Arcachon liées à l'élévation du niveau marin ne sont pas prises en compte.

1.2. PHENOMENES OBSERVES

1.2.1. Hiver 2008-2009

Les événements climatiques exceptionnels de l'hiver 2008-2009 (tempêtes du 28/11/08, du 24/01/2009 - Klaus - et du 09/02/2009) ont été caractérisés, dans la première phase de l'expertise, en termes de vent, de vagues, de surcote et de niveau d'eau à partir de données mesurées *in situ* et issues de modélisation numérique. Ces résultats sont présentés avec les phénomènes observés, l'état des ouvrages en place et des recommandations de première urgence, dans le rapport **BRGM/RP-57462-FR (Mallet et al., 2009)**.

La tempête Klaus (24/01/2009) peut être qualifiée de décennale pour les conditions extrêmes de vent et de vagues, et pour la surcote enregistrée. Mais les niveaux d'eau n'ont rien d'exceptionnels, d'une période de retour inférieure à l'année, en raison des faibles niveaux de marées. Au cours de cette tempête, un phénomène de submersion marine a cependant été observé à Andernos-les-Bains sur un linéaire côtier d'un peu plus de 1 km et sur une pénétration maximum dans la zone urbaine d'environ 400 m. La Figure 2 présente une cartographie sommaire des zones inondées, réalisée à partir d'une visite de terrain le 29/01/09. Les hauteurs d'eau mesurées au niveau des maisons de 1^{ère} ligne ont par endroit atteint 1 m.

Au maximum de la tempête, le niveau de marée prédit par le SHOM est de 1.75 m, le niveau d'eau maximum enregistré par le marégraphe d'Eyrac est de 2.90 m avec une surcote de 1.15 m. Il est à noter que la surcote maximale enregistrée de 1.67 m ne s'est pas produite lors de la pleine mer, ce qui a limité le niveau d'eau maximum.

Il est également important de noter qu'une inondation continentale a également été observée lors de cette tempête et que les dégâts constatés dans le quartier du Mauret résultent de la conjonction de la submersion marine et de la remontée d'eaux douces qui auraient « saturé » le sol. L'ensemble de ces eaux n'a pas pu s'évacuer rapidement du fait de la topographie en contrebas du quartier inondé, des niveaux d'eau marine élevés et du manque d'évacuation offert par les ouvrages de protection.

Les solutions à apporter pour remédier aux inondations et aux submersions marines n'étant pas les mêmes d'un point de vue des ouvrages géotechniques, l'étude des écoulements d'eau pluviale a été confiée par le SIBA à SOGREAH. La présente expertise ne traite que des aspects liés à la submersion marine.

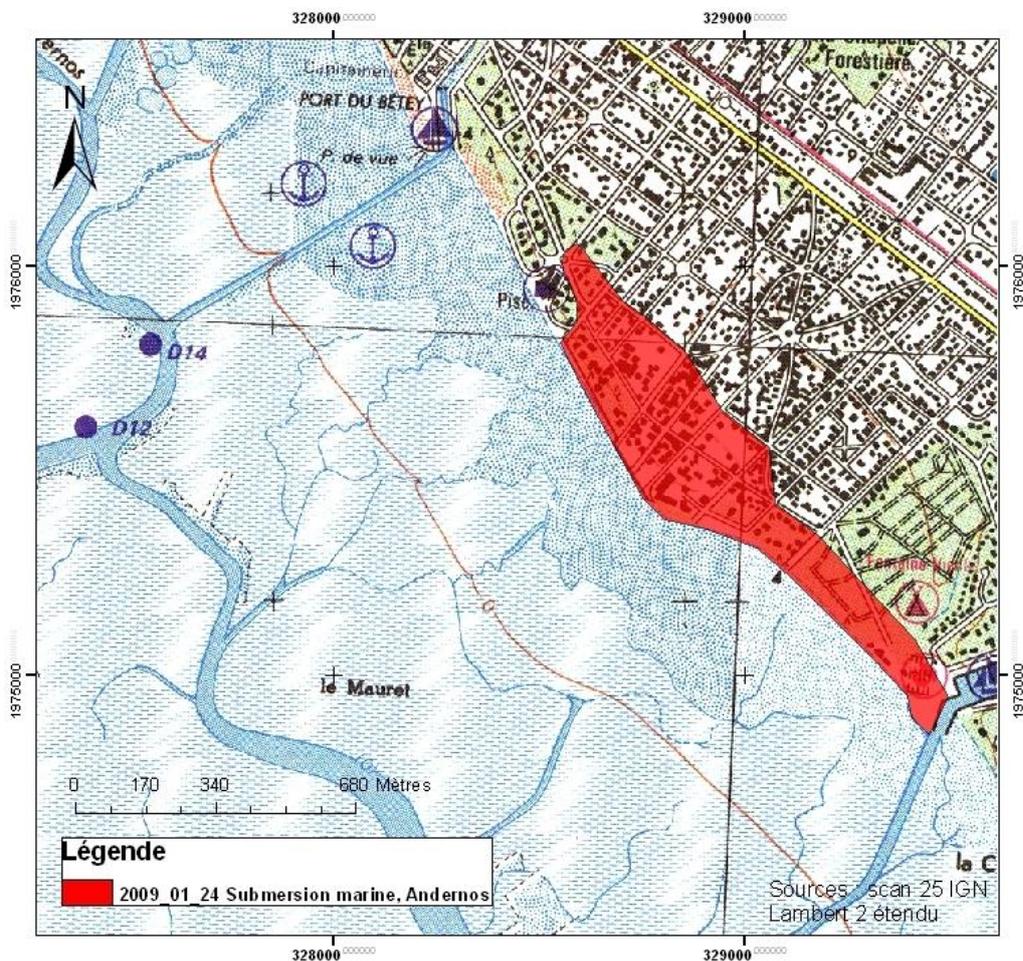


Figure 2 : Quartier du Mauret inondé lors de la tempête du 24/01/09, sur la commune d'Andernos-les-Bains

1.2.2. Xynthia, 27-28 février 2010

A la différence de la tempête Klaus qui avait essentiellement endommagé le quartier du Mauret à Andernos-les-Bains, l'ensemble du pourtour du Bassin d'Arcachon a été

atteint durant Xynthia (Figure 3). La submersion marine concerne l'ensemble des zones basses du Bassin. Les hauteurs d'eau maximales mesurées atteignent 0.90 m sur des distances de plusieurs centaines de mètres à l'intérieur des terres, depuis le trait de côte (zéro marin issu de la donnée histolitt du SHOM).

L'impact de cette tempête a été établi sur le littoral aquitain à partir des observations réalisées rapidement après l'événement par le réseau d'observateurs de l'Observatoire de la Côte Aquitaine. Cette étude fait l'objet du rapport **BRGM/RP-58511-FR (Aubié et al., 2010)**. Sur le Bassin d'Arcachon, les observations ont été réalisées par le BRGM et le SIBA entre le 28 février et le 3 mars 2010.

Si Xynthia n'a pas des conditions météorologiques aussi extrêmes que les tempêtes de décembre 1999 (en termes de vitesses maximales instantanées de vent), elle a pourtant engendré des phénomènes de submersion et d'érosion exceptionnels sur les côtes atlantiques, notamment en Vendée et en Charente-Maritime. Le passage de la tempête a, en effet, coïncidé avec une marée haute de coefficient 102 et des fortes houles comprises entre 6 à 7 m (d'après PREVIMER <http://www.previmer.org>). Au pic de la tempête, le niveau maximum enregistré par le marégraphe d'Eyrac est de 3.48 m avec une surcote de 0,90 m (le niveau de marée prédit par le SHOM était de 2.57 m).

Les principaux impacts constatés sont la submersion marine, une érosion du linéaire et des dommages sur les ouvrages côtiers. Grâce aux traces (laisses de mer, niveaux sur les murs, dépôts de varech sur les grillages, dépôts de vases et de sables, rides de courant) encore visibles quelques jours après l'évènement, les zones ayant subi la submersion marine ont pu être approximativement cartographiées. L'absence de trace sur certains secteurs n'a pas permis de préciser la submersion marine des zones basses.

La Figure 3 représente une cartographie des zones ayant fait l'objet des submersions marines. La cote marine de ces zones est référencée par rapport au zéro hydrographique fourni par le SHOM. Cette cartographie est encore provisoire, les mesures se poursuivant au moment de la rédaction du présent rapport, notamment sur les zones endiguées de Certes, Graveyron et Malprat. Ce travail est effectué par ailleurs dans le cadre du projet BARCASUB. Cette collecte d'informations pourra être à terme complétée par la cartographie des impacts réalisés par d'autres partenaires, la DDTM notamment.

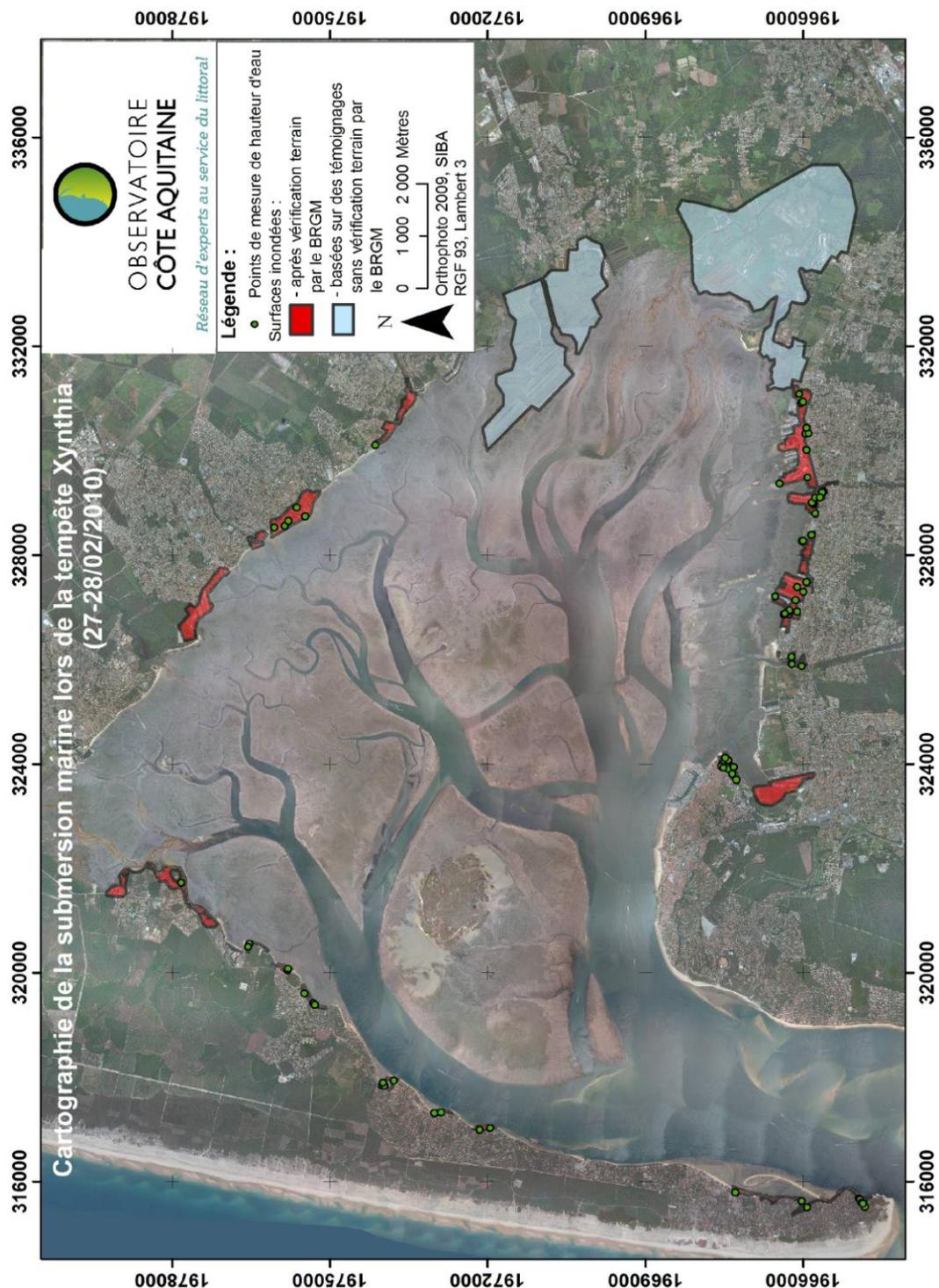


Figure 3 : Cartographie des zones du Bassin d'Arcachon soumises à la submersion marine lors de la tempête Xynthia

1.3. RAPPEL THEORIQUE

1.3.1. Définitions

Dans ce chapitre sont définis les principaux termes utilisés dans le rapport.

L'*état de la mer* est la description de la surface de la mer soumise à l'influence du vent. L'état de mer est souvent composé de « houles » et d'une « mer du vent ». On utilise généralement l'échelle de Douglas, de 0 à 9, relatif à la hauteur significative des vagues, pour caractériser l'agitation de la surface de la mer (d'une mer calme, à énorme).

Le *fetch* est la distance sur un plan d'eau sur laquelle se forment les vagues sous l'action du vent. Cette notion permet de comprendre la hauteur des vagues, du clapot et de la houle à un endroit donné.

La *mer du vent* correspond au système de vagues créé à l'endroit même où souffle le vent. Il s'agit d'un état de mer plutôt désordonné et irrégulier.

La *houle* est un mouvement ondulatoire de la surface de la mer. Il s'agit d'un état de mer constitué par des vagues qui se sont propagées loin de leur zone de génération. Elles sont régulières, d'aspect pratiquement sinusoïdal et sont caractérisées par leur hauteur, leur période (généralement entre 10 s et 25 s) et leur direction. Les houles qui parviennent à l'entrée du Bassin d'Arcachon sont principalement générées par des dépressions dans l'Atlantique Nord au sud de l'Islande et sont donc généralement orientées nord-ouest à ouest.

Le *clapot* représente l'agitation de la surface de la mer par de petites vagues courtes et cambrées.

La *marée* est la montée et la baisse périodique de l'eau dans les océans, du fait de l'attraction de la lune et du soleil. Elle est de type semi-diurne dans le Bassin d'Arcachon et asymétrique, c'est-à-dire qu'il y a 2 pleines mers (durée du flot de 6h20) et 2 basses mers (durée du jusant de 6h) par jour. La différence de hauteur entre une pleine mer et une basse mer, appelée le marnage, varie entre 1 et 5 m dans la lagune du Bassin d'Arcachon. On parle donc de lagune mésotidale. Les variations du marnage passent d'un minimum appelé morte-eau à un maximum appelé vive-eau. Le coefficient de marée théorique de morte-eau exceptionnel est de 20, celui de vive-eau exceptionnel est de 120.

L'*onde de tempête* est l'élévation du niveau marin sur la côte due à l'effet des vents et de la dépression au passage d'une forte tempête.

1.3.2. Submersion marine

Les submersions marines peuvent être définies comme « des inondations épisodiques de la zone côtière par la mer dans des conditions météorologiques (forte dépression et

vent de mer) et marégraphiques sévères [...] » (Garry et al., 1997). Elles sont le plus souvent associées à des surélévations temporaires du niveau de la mer lors de tempêtes ou de cyclones, voire de tsunamis. En dehors des tsunamis, les surcotes marines sont contrôlées par deux principaux processus, indissociables pour un observateur, mais régis par des mécanismes physiques différents :

- **La surcote atmosphérique :** Le passage d'un important système dépressionnaire (cyclone, ouragan, tempête) est caractérisé par des variations du niveau marin selon deux mécanismes :
 - La chute de pression atmosphérique entraîne une surélévation du niveau du plan d'eau. C'est le phénomène de *baromètre inverse* : une diminution d'1 hPa équivaut à une élévation d'1 cm du plan d'eau.
 - Le vent génère des courants dans les masses d'eau superficielles. Ces masses d'eau poussées par les courants vers la côte peuvent s'accumuler et induire une élévation du niveau marin.
- **La surcote associée à la houle (setup) :** à l'approche de la côte, les vagues générées au large déferlent : elles transfèrent leur énergie sur la colonne d'eau, dont une partie provoque une élévation moyenne du plan d'eau (le « *wave setup* » ou surcote liée aux vagues). Cette élévation peut s'élever à plusieurs dizaines de centimètres. Cette force induite par la houle est appelée « tension de radiation ». Son intensité varie en fonction des hauteurs et des directions de vagues, elles mêmes dépendantes des phénomènes de gonflement (*shoaling*), de réfraction, de diffraction et de dissipation qui ont lieu au niveau des côtes.

L'influence relative de la surcote atmosphérique et de la houle sur l'amplitude de la surcote est fortement dépendante de la bathymétrie du domaine considéré. En présence d'un plateau continental large, c'est-à-dire une zone de pente douce et de profondeur limitée, l'action du forçage atmosphérique est prépondérante. Par contre, lorsque les pentes sont fortes et que les côtes sont protégées par des récifs par exemple, c'est en théorie l'action de la houle qui prédomine (Krien et al., 2010, rapport BRGM/RP-58101-FR).

Le niveau moyen de la mer lors d'une tempête ou d'un cyclone est déterminé par l'ensemble de ces contributions, ainsi que par l'influence de la marée astronomique, c'est-à-dire la variation du niveau de la mer due à l'action gravitationnelle de la lune et du soleil. Cependant, le niveau d'eau atteint n'est pas la somme de ces contributions, il existe des interactions entre vagues, onde de tempête et onde de marée ainsi qu'une influence de la morphologie de la côte et des fonds marins. Par simplification, l'altitude maximale du plan d'eau atteinte au cours des tempêtes est souvent calculée en sommant ces contributions.

Pour obtenir le niveau instantané de la mer, il faut tenir compte par ailleurs du **jet-de-rive** (swash), c'est-à-dire le flux et le reflux des vagues sur la plage. On appelle **run-up** la hauteur d'eau maximale atteinte par la mer au dessus de son niveau de référence (ici le zéro IGN). La Figure 4 illustre l'ensemble de ces mécanismes.

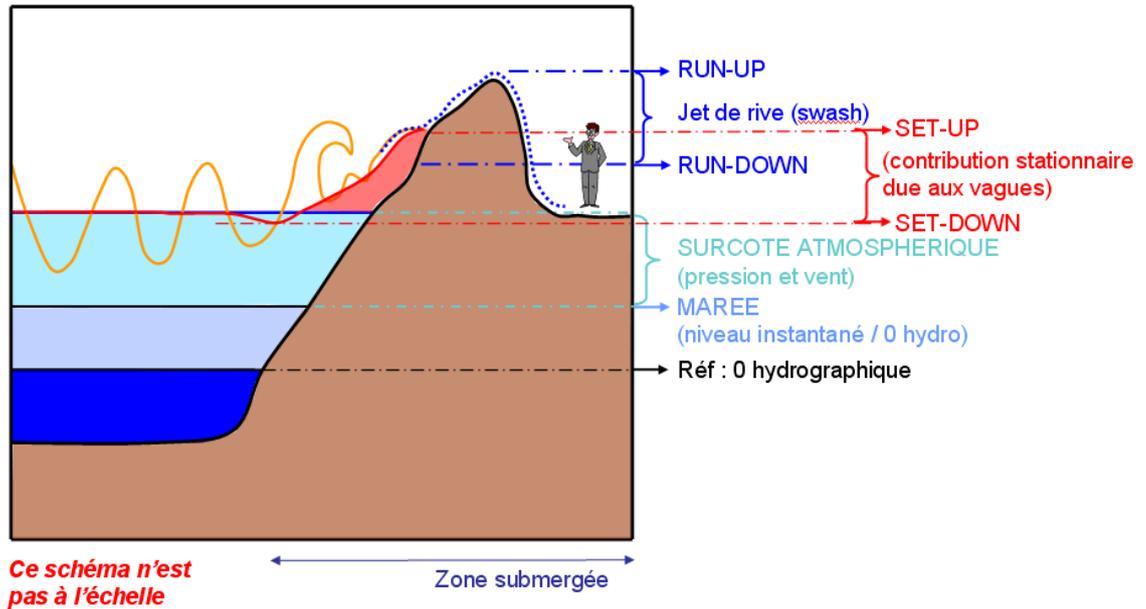


Figure 4 : Schéma illustrant les principaux mécanismes à l'origine de l'élévation du niveau marin dans le cas d'une tempête telle que Xynthia

L'action de la houle contribue par ailleurs à l'érosion du trait de côte, par arrachement de matériel sableux aux plages et aux cordons dunaires par exemple.

2. Methodologie

2.1. DESCRIPTION GENERALE

Afin de déterminer les niveaux d'eau maximums, les processus pris en compte dans cette étude sont les suivants : le niveau de marée astronomique, la surcote atmosphérique ainsi que la surcote liée aux vagues (c'est-à-dire le setup, cf. chapitre 1.3). Bien que le setup puisse fortement contribuer au niveau maximal atteint lors d'un événement d'occurrence centennale, de nombreuses études n'en tiennent pas compte, principalement en raison de la difficulté de le quantifier (BRGM/RP-58101-FR, Krien et al., 2010).

Pour réaliser cette expertise et compléter les mesures à l'intérieur du Bassin, une méthodologie a été mise en place en combinant deux modèles d'hydrodynamique : MARS et SWAN. Le logiciel MARS permet de simuler les courants et les niveaux atteints résultants de la surcote atmosphérique et de la propagation de la marée. Il est forcé par des conditions météorologiques (vent et pression) et des composantes harmoniques de marée. Le logiciel SWAN simule les vagues et la surcote liée aux vagues à l'intérieur du Bassin d'Arcachon. Il est forcé à partir des niveaux d'eau simulés par MARS, des conditions météorologiques et de la houle au large. L'utilisation coordonnée de ces deux modèles permet de calculer les altitudes maximales du plan d'eau dans le Bassin d'Arcachon. La Figure 5 rappelle le chaînage des deux modèles.

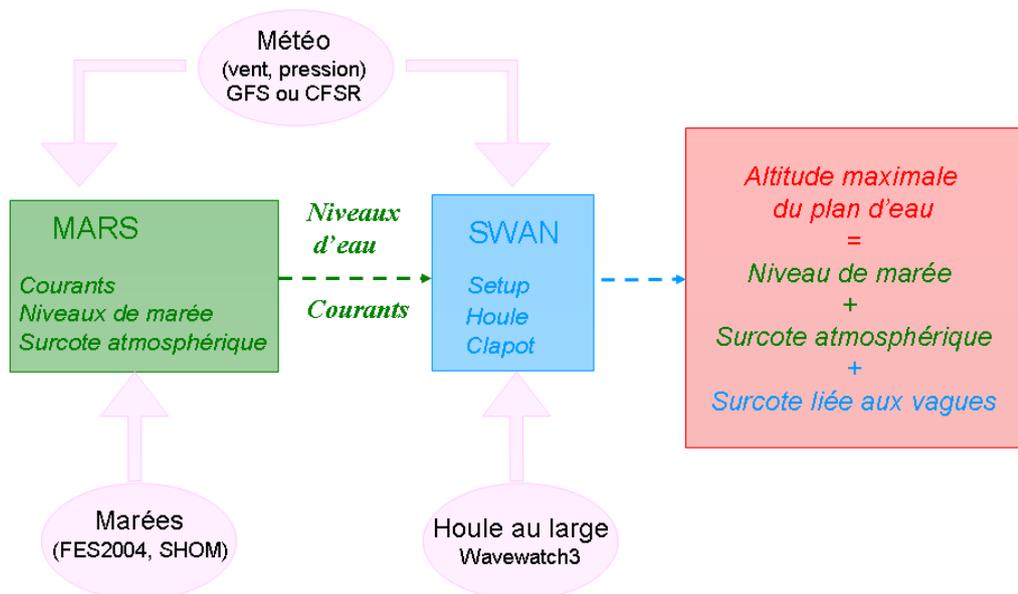


Figure 5 : Description de la méthodologie de modélisation basée sur l'utilisation combinée des modèles MARS et SWAN afin de calculer l'altitude maximale du plan d'eau à l'intérieur du Bassin d'Arcachon

2.2. MODELISATION DES NIVEAUX D'EAU

2.2.1. Description générale du modèle MARS

Le code de calcul MARS (Lazure et Dumas, 2007) développé par l'Ifremer est un outil permettant d'évaluer l'hydrodynamique au niveau régional à partir de composantes de marée et de données de météorologie. Ce code permet en outre de passer de l'échelle régionale (emprise Manche-Gascogne) à l'échelle locale d'étude, avec une résolution spatiale et temporelle adaptée. Les processus représentés par le modèle sont uniquement liés aux ondes longues (marée et surcote atmosphérique), les ondes courtes (houle et clapot) ne sont pas représentées.

Le modèle est utilisé dans sa version 2DH. Il résout les équations de Saint-Venant qui régissent les écoulements à surface libre en deux dimensions sur le plan horizontal, après une intégration verticale des équations de départ (dites de Navier Stokes, annexe 1).

MARS-2DH calcule donc l'intensité et la direction de courants moyennés sur la verticale, ainsi que les hauteurs d'eau. Ces grandeurs sont calculées en fonction :

- de conditions aux limites imposées au bord du domaine de calcul (frontières), c'est-à-dire la hauteur d'eau et les courants.
- de conditions de forçages météorologiques (vent et pression) appliquées en chaque nœud du modèle.

Le modèle est construit pour permettre un emboîtement de modèles gigognes (Figure 6), le modèle de plus grande emprise fournissant les conditions aux limites du modèle d'emprise immédiatement inférieure et ainsi de suite jusqu'au modèle de détail (Figure 7). La technique d'emboîtement permet au modèle de tenir compte des processus à l'échelle d'un bassin océanique comme à l'échelle locale. Un rapport d'échelle doit être respecté, les modèles intermédiaires possèdent une maille 4 fois plus petite que celle du modèle précédent.

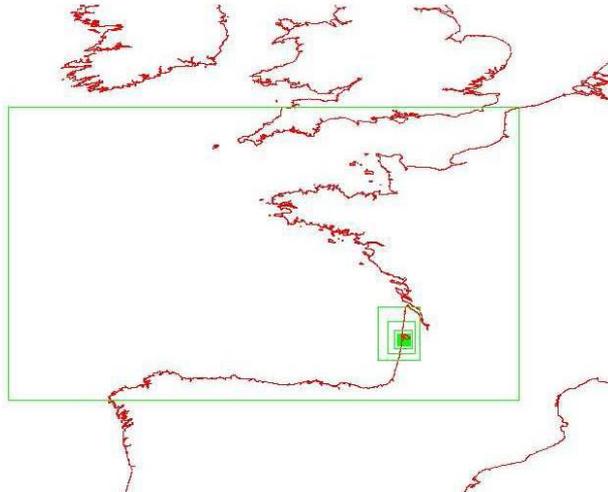


Figure 6 : Exemple de modèles gigognes (IFREMER, Plus et al., 2006)

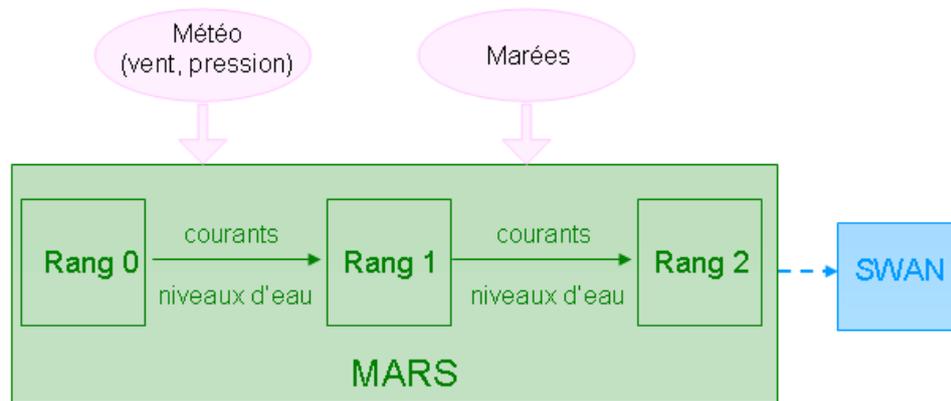


Figure 7 : Principe de la technique d'emboîtement de modèle pour MARS

Le code MARS produit pour chaque zone étudiée une base de données dont les résultats sont stockés sous la forme d'une série temporelle de paramètres en coordonnées géographiques.

2.2.2. Configuration pour le Bassin d'Arcachon

Dans cette étude trois modèles ont été emboîtés. L'emprise spatiale de chacun des modèles (on parle de rangs) est présentée sur la Figure 8 et leur maillage est détaillé dans l'annexe 2.

Cet emboîtement permet d'obtenir un modèle dont la **résolution est de 235 m sur le Bassin d'Arcachon**, tout en tenant compte de la propagation de la marée et des surcotes générées dans le Golfe de Gascogne.

Les bathymétries des rangs 1 et 2 ont été construites à partir de plusieurs sources de données provenant du SHOM, de la base internationale de données GEBCO (<http://www.gebco.net/>), d'images SPOT de 2007 et de levés bathymétriques réalisés par le SIBA en 2002 et 2007.

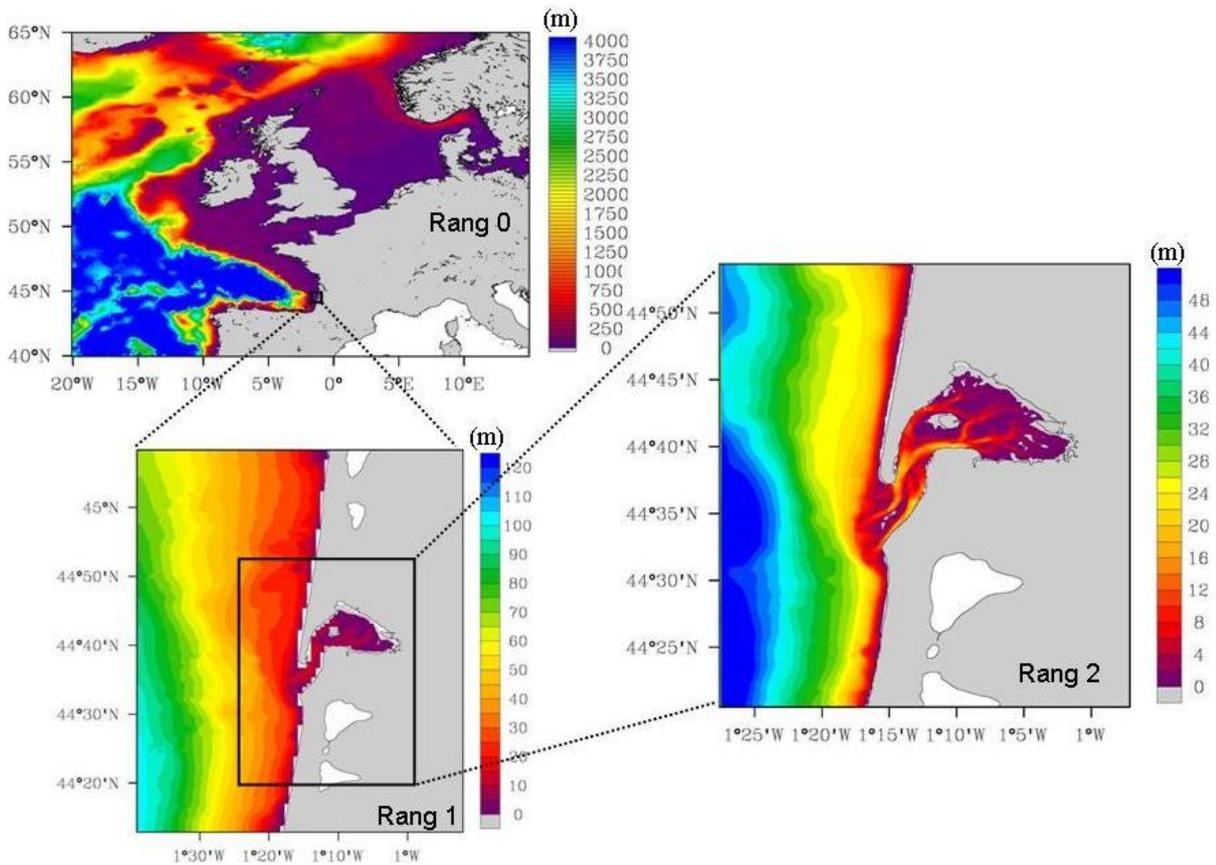


Figure 8 : Emprise géographique et bathymétrie (en m) des 3 rangs. La résolution est respectivement de 5500, 850 et 235 m (WGS 84)

Deux sources de données météorologiques (vent et pression) ont été utilisées en fonction de la date des scénarios simulés :

- CFSR (Climate Forecast System Reanalysis, <http://nomads.ncdc.noaa.gov/data.php?name=access#cfsr>) est une ré-analyse de données climatiques qui comprend un modèle couplé atmosphère – océan – continent – banquise et une assimilation de données satellitaires. Elle fournit des données de vent et de pression, sur une période de 31 ans (1979-2009), toutes les heures et avec une résolution spatiale de 0.5° x 0.5°. Ces données s'arrêtent en 2009 et ont été utilisées pour simuler les événements de l'hiver 2006-2007 ainsi que la tempête Klaus (24/01/2009). Elles n'ont pas pu être utilisées pour Xynthia survenue en février 2010 ;

- GFS (Global Forecast System, <http://www.emc.ncep.noaa.gov/modelinfo/>) est un modèle atmosphérique qui fournit des données de vent (vitesse et direction) et de pression avec une résolution spatiale de $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ et toutes les 3h. Les données qui en sont issues ont été utilisées pour la simulation de l'évènement Xynthia.

Ces données météorologiques servent à forcer les *rangs* successifs des modèles utilisés. Leur usage ne se limite pas à fournir des conditions pour les emprises les plus larges.

Les composantes de marée proviennent du SHOM et de l'atlas FES2004 (Lyard et al., 2006). L'usage de ces deux sources de données a été nécessaire pour simuler à haute-résolution la propagation de la marée à l'intérieur du bassin. La base de données FES2004 est mise à disposition par le LEGOS (<http://www.legos.obs-mip.fr/>). Ces données comprennent 14 composantes harmoniques (K1, K2, M2, M4, Mf, Mm, Msqm, Mtm, N2, 2N2, O1, P1, Q1 et S2) qui permettent de recomposer la marée avec une précision centimétrique en plein océan et décimétrique en zones côtières. Les données CST France du SHOM sont plus précises (115 ondes de marée, du niveau moyen jusqu'aux ondes 6^{ème} diurne), mais elles ne recouvrent que le plateau continental du Golfe de Gascogne. Elles permettent cependant de corriger les hauteurs de marée calculées pour le dernier rang du modèle MARS.

Les autres paramètres ainsi que l'initialisation de MARS pour la configuration du Bassin d'Arcachon sont détaillés en annexe 1.

2.3. MODELISATION DES VAGUES

2.3.1. Description générale du modèle SWAN

Le modèle SWAN (Simulating WAVes Nearshore), développé à l'Université de Technologie de Delft (Pays-Bas), modélise les processus de génération de la houle par le vent, de propagation (réfraction, diffraction, obstacles, etc...), et de dissipation (frottement sur le fond, déferlement, etc. Il permet de calculer la formation et la propagation des vagues au niveau des zones côtières, des lacs et des estuaires, à partir de données de vent, de bathymétrie et de courants (Booij et al., 2004).

Les lois qui décrivent le comportement physique du système dans SWAN ainsi que les propriétés du modèle et les phénomènes qu'il peut modéliser sont résumés dans l'annexe 3.

Les données nécessaires à la mise en place de ce modèle sont la bathymétrie, les conditions météorologiques (vent) ainsi que les conditions de houle au large.

SWAN ne doit pas être utilisé sur des domaines où les variations de hauteur d'eau sont importantes sur une échelle horizontale de quelques longueurs d'onde. C'est pourquoi

les résultats de SWAN ne seront pas précis à proximité immédiate d'obstacles (jetées, brises lames) ou au niveau des ports.

2.3.2. Configuration pour le Bassin d'Arcachon

De même que MARS, SWAN est constitué d'un emboîtement de modèles. Pour cette étude, une construction de deux rangs a été réalisée. L'emprise géographique du rang 1 correspond à celle du rang 1 de MARS (Figure 8). L'emprise géographique du rang 2 ainsi que le maillage de chacun des 2 rangs sont présentés en annexe 4.

Les cartes bathymétriques des 2 rangs ont été construites à partir des mêmes données que celles de MARS : SHOM, GEBCO, images SPOT 2007, levés bathymétriques du SIBA 2002 et 2007.

Pour simuler le clapot dans le Bassin d'Arcachon, le rang 1 de SWAN requiert comme conditions aux limites, les conditions de houle au large. Celles-ci sont fournies par le modèle WaveWatch 3 (NWW3) développé par la NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration, <http://polar.ncep.noaa.gov>). Sa résolution spatiale est de 0.5° en latitude et 0.5° en longitude. Les paramètres utilisés par SWAN sont la hauteur significative (hs), la période pic (Tp) et la direction pic (direction de provenance de la houle, Dp).

Comme pour MARS, chaque rang de SWAN est forcé par des données météorologiques provenant de deux sources dont l'utilisation dépend des périodes de simulation. Les données CFSR sont utilisées pour simuler la période de décembre 2006 à MARS 2007 et Klaus, alors que les données GFS sont utilisées pour la simulation de Xynthia.

Enfin, les autres paramètres ainsi que l'initialisation de SWAN pour la configuration du Bassin d'Arcachon sont détaillés en annexe 4.

2.4. ALTITUDES IGN DU PLAN D'EAU

2.4.1. Définitions

Le *zéro hydrographique* (fourni par le SHOM) est choisi en France comme le niveau des plus basses mers astronomiques. Il s'agit d'un niveau théorique sous lequel le niveau de la mer ne descend que très exceptionnellement.

Le *zéro NGF* (Nivellement Général de la France) est le niveau zéro utilisé sur les cartes de l'IGN. Il correspond au niveau moyen de la mer déterminé au marégraphe de Marseille.

2.4.2. Calcul des altitudes IGN du plan d'eau

Dans cette étude, les altitudes du plan d'eau à Andernos-les-Bains sont exprimées dans le système altimétrique de référence IGN69 (c'est-à-dire en référence au zéro NGF) afin de faciliter l'interprétation et la comparaison avec les mesures et les observations sur le terrain. Ce choix requiert la conversion des niveaux obtenus par les modèles qui sont exprimés par rapport au niveau moyen du plan d'eau du Bassin d'Arcachon, lui-même exprimé par rapport au zéro hydrographique.

La validation des données de niveau moyen a été effectuée en comparant les données d'entrée au Cap-Ferret et à Arcachon-Eyrac aux références altimétriques fournies par le SHOM (Tableau 1).

La conversion des hauteurs d'eau en sortie de MARS dans le système altimétrique de référence (IGN69) s'appuie sur l'hypothèse que la différence entre le zéro hydrographique et le zéro NGF était uniforme sur l'ensemble du Bassin. En effet, cette différence est de 1.981 m au Cap-Ferret et de 1.980 m à Arcachon-Eyrac.

Site	Latitude	Longitude	Niv. moyen/ zéro hydrographique (m)	Zéro hydro. / référence altimétrique (m)	Référence altimétrique
Cap-Ferret	44°37'N	1°13'W	2.37	-1.981	IGN69
Arcachon-Eyrac	44°39'N	1°09'W	2.53	-1.980	IGN69

Tableau 1 : Références altimétriques maritimes (source SHOM)

3. Validation

Ce chapitre se consacre en premier lieu à la validation des données de forçage utilisées. Il s'agit de montrer que les données en entrée des modèles numériques sont réalistes et reproduisent bien les conditions météorologiques ou les conditions d'agitation mesurées par les différents capteurs sur le terrain. Enfin, les modèles implantés seront validés, en reproduisant les événements de l'hiver 2006-2007. Ce chapitre est une synthèse du rapport BRGM/RP-58962-FR (Delvallée et *al.*, en cours).

3.1. VALIDATION DES FORÇAGES

3.1.1. Validation des données météorologiques

Les données météorologiques servant à forcer les modèles numériques (intensité et direction du vent, pression atmosphériques) sont issues de modèles de circulation atmosphérique à l'échelle planétaire (CFSR ou GFS). Pour les périodes simulées, on compare les données fournies par ces modèles aux mesures de Météo-France disponibles (Tableau 2 et Tableau 3).

Pour la simulation de la tempête Klaus (24/01/2009) utilisant les données de forçage CFSR, les mesures du sémaphore Lège – Cap Ferret sont comparées avec les données CFSR aux deux mailles les plus proches : (44.5°N 1°W) et (44.5°N 1.5°W). Les deux points sont situés à l'est et à l'ouest du sémaphore ; les vents étant plus forts au large, une décroissance de l'intensité du vent au passage de la côte est attendue.

La Figure 57 et la Figure 58 (annexe 5) relatives à l'événement Klaus, montrent que le pic de la tempête a eu lieu dans la matinée du 24 janvier, avec une pression atmosphérique minimale chutant à 976.5 hPa et des vents maximums atteignant 36 m/s. Le modèle CFSR reproduit bien ces principales tendances (surtout pour la pression). Les données de forçage en vent sont aussi satisfaisantes, que ce soit en intensité ou en direction. Comme prévu, l'intensité supérieure du vent au large ainsi que sa décroissance au passage de la côte se confirment (Figure 59, annexe 5).

Données	Pression atm. minimale (hPa)	Vitesse du vent maximale (m/s)	Direction instantanée (°/Nord)
CFSR (44.5°N 1°W)	976.8	26.1	284 (O)
CFSR (44.5°N 1.5°W)	976.4	34.7	291 (O)
Sémaphore Lège – Cap Ferret	976.5	36	290 (O)

Tableau 2 : Comparaison entre les données CFSR et MétéoFrance au pic de la tempête Klaus

Pour la tempête Xynthia, les données météorologiques de forçage sont issues du modèle GFS. La maille du modèle GFS le plus proche du Cap-Ferret est situé à la position 44.5°N, 1°W.

La Figure 60 et la Figure 61 (annexe 5) permettent de vérifier la précision des données météorologiques de forçage utilisées pour la modélisation de la tempête Xynthia. Le pic de la tempête a eu lieu dans la nuit du 27 au 28 février (Figure 62, annexe 5), avec une pression atmosphérique minimale chutant à 979 hPa et des vents maximums atteignant 22 m/s. Si le modèle GFS reproduit convenablement l'évolution de la pression atmosphérique, il sous-estime fortement l'intensité du vent. Une sous-estimation de la surcote et du clapot est prévisible pour les simulations utilisant ces données.

Données	Pression atm. minimale (hPa)	Vitesse du vent maximale (m/s)	Direction instantanée (°/Nord)
GFS (44.5°N 1°W)	981	16	274 (O)
Sémaphore Lège – Cap Ferret	979	22	270 (O)

Tableau 3 : Comparaison entre les données GFS et MétéoFrance au pic de la tempête Xynthia

Pour les deux tempêtes, la valeur de la dépression est du même ordre de grandeur. Cependant, ces deux événements ont des caractéristiques différentes, notamment pour ce qui concerne leur durée. Pour la tempête Klaus, la pression au Cap-Ferret est descendue sous les 1000 hPa pendant plus de 3 jours. Le passage de la tempête Xynthia a été plus rapide, et la pression a chuté d'environ 20 hPa en moins de 24h. Les vents étaient aussi plus faibles durant l'événement Xynthia, et la trajectoire de la dépression est passée plus au nord du Bassin d'Arcachon (voir Figure 59 et Figure 62 pour les champs de vent à l'échelle régionale). En outre, pour ce qui concerne uniquement les conditions météorologiques, la tempête Xynthia a été plus brève et moins intense que Klaus.

3.1.2. Validation des données de vagues

Pour estimer les caractéristiques des vagues dans le Bassin d'Arcachon, le modèle numérique SWAN est forcé avec des données de vague au large, dans le domaine océanique. Pour cela, les données de vague issues du modèle WaveWatch3, développé par la NOAA, sont utilisées. Le modèle SWAN a déjà été implanté à plusieurs reprises dans le Golfe de Gascogne, à chaque fois avec ces mêmes données de forçage en vague au large (rapport BRGM/RP-57173-FR, Pedreros et al. 2009).

La Figure 63 (annexe 5) présente la corrélation entre les mesures de la bouée Gascogne (position : 45.201°N - 5°W) et les données WaveWatch3 au point le plus proche (45°N, 5°W). La période s'étend du 08/12/2003 12h00 au 01/10/2006 0h00. La bouée Gascogne est située à proximité de la frontière Ouest de l'emprise de SWAN la plus large, ce qui rend cette comparaison intéressante. Une régression linéaire donne la relation suivante entre les données issues de la bouée et du modèle :

$$H_{s_bouée_Gascogne}=1.0316 H_{s_WW3} \text{ (avec un coefficient de corrélation } r^2=0.98941)$$

Cette relation traduit une légère sous-estimation des hauteurs de vagues par le modèle WW3.

L'intérêt de la Figure 64 (annexe 5) est de montrer la bonne cohérence entre les données WW3 et les mesures in situ. Il s'agit de la bouée 03302 du réseau CANDHIS (Centre d'Archivage National de Données de Houle In Situ, <http://candhis.cetmef.developpement-durable.gouv.fr/>) au large du Cap-Ferret. Cette bouée est située à proximité de la frontière Ouest de la boîte SWAN à haute résolution. La bouée étant en maintenance, les mesures n'existent pas pour la période de la tempête Xynthia. Pour les trois paramètres de vagues (hauteur significative H_s , période pic T_p et direction pic), les données WW3 suivent les tendances enregistrées par la bouée.

Les données WW3 sont réalistes et adaptées au forçage d'un modèle de propagation de vague.

3.2. IMPLANTATION ET VALIDATION DES MODELES

Une campagne de mesure, réalisée dans le cadre du projet PNEC Façade Atlantique, a permis d'acquérir des données de niveaux d'eau, de vagues et de clapot sur l'ensemble du bassin du 01/12/2006 au 28/02/2007 (Figure 9). Ces mesures ont été mises à la disposition du BRGM par le laboratoire EPOC de l'Université Bordeaux 1. Elles ont par ailleurs déjà servi à la validation de modèles hydrodynamiques implantés sur le Bassin (Parisot et *al.* 2008).

La période de l'hiver 2006-2007 a été simulée afin de valider l'implantation des modèles MARS et SWAN pour reproduire les submersions. Les appareils de mesure mis en place pendant cet hiver et utilisés pour la validation de cette simulation sont les suivants :

- A l'entrée du Bassin : courantomètres ADCP dans la passe Sud ;
- A l'intérieur du Bassin : altimètres ALTUS.

Pour la validation des résultats de simulation des événements de 2006/2007 ainsi que des événements Klaus et Xynthia, des données de niveaux d'eau sont aussi utilisés :

- les niveaux d'eau, mesurés par le marégraphe d'Eyrac à Arcachon et fournis par le système SONEL (Système d'Observation du Niveau des Eaux Littorales, <http://www.sonel.org>) ;
- les niveaux de marées à Arcachon-Eyrac prédits par le logiciel SHOMAR du SHOM. Ces données de marée sont considérées comme des données de référence.

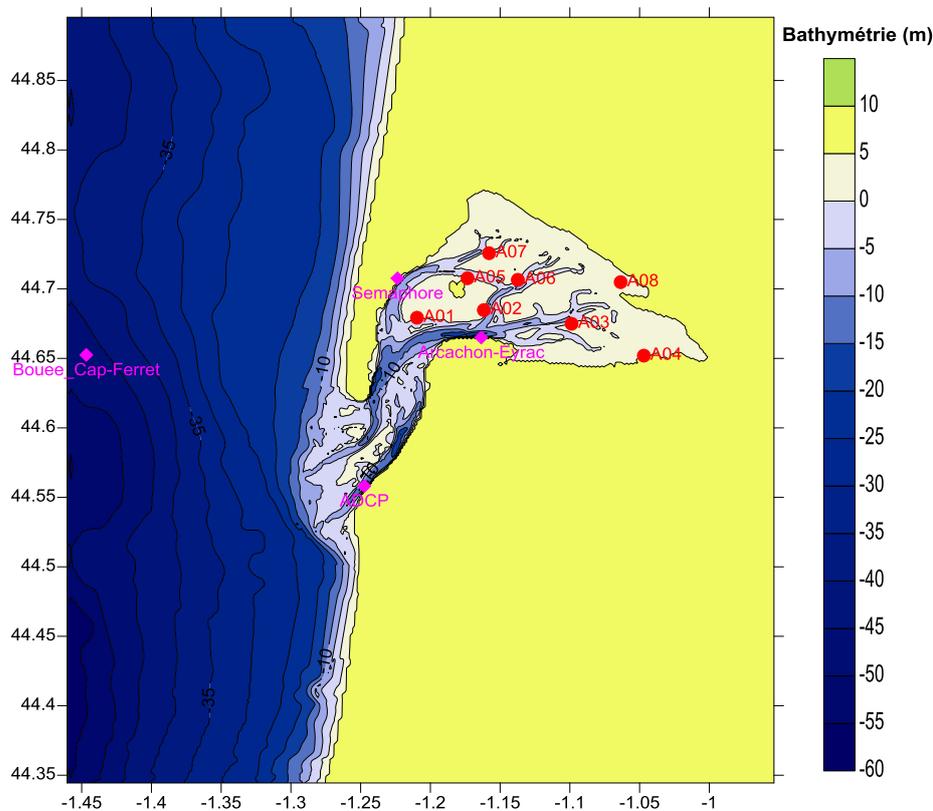


Figure 9 : Position des capteurs servant à la validation des modèles implantés : courantomètres et ADCP déployés dans le cadre du programme PNEC, marégraphe d'Arcachon-Eyrac, sémaphore du Cap-Ferret, bouée Candhis 03302.

3.2.1. Validation de la marée

Pour reproduire au mieux la marée dans le Bassin d'Arcachon, le modèle numérique MARS est configuré pour une utilisation conjointe des constantes harmoniques à couverture mondiale (fes2004) et des constantes harmoniques de marée fournies par le SHOM (composantes harmoniques de CST France, 115 ondes de marée). Son

emprise géographique correspond aux plateaux continentaux de la Manche et du Golfe de Gascogne.

Dans un premier temps, le modèle est utilisé sans donnée météorologique afin d'étudier uniquement la propagation de la marée sans aucun autre forçage. La simulation effectuée couvre le mois de février 2007. Pour la validation du modèle en marée, les deux points de comparaison entre le modèle et la mesure sont situés à l'entrée des passes et à Arcachon-Eyrac (prédiction de la marée récupérée sur le site internet du SHOM).

Le premier point de comparaison pour la validation de la marée se situe à l'entrée de la passe sud, au niveau de l'ADCP. La Figure 10 montre le signal de marée en ce point : la marée est bien reproduite par le modèle et elle se propage de façon réaliste jusqu'à l'entrée de la passe (seuls 10 jours de simulation sont représentés pour plus de visibilité). La différence entre les deux séries temporelles (sortie ponctuelle MARS et mesure ADCP) est minime, même si la capacité du modèle à reproduire le signal de marée est moins bonne en mortes eaux. Le déphasage entre les deux séries temporelles est presque nul (Tableau 4).

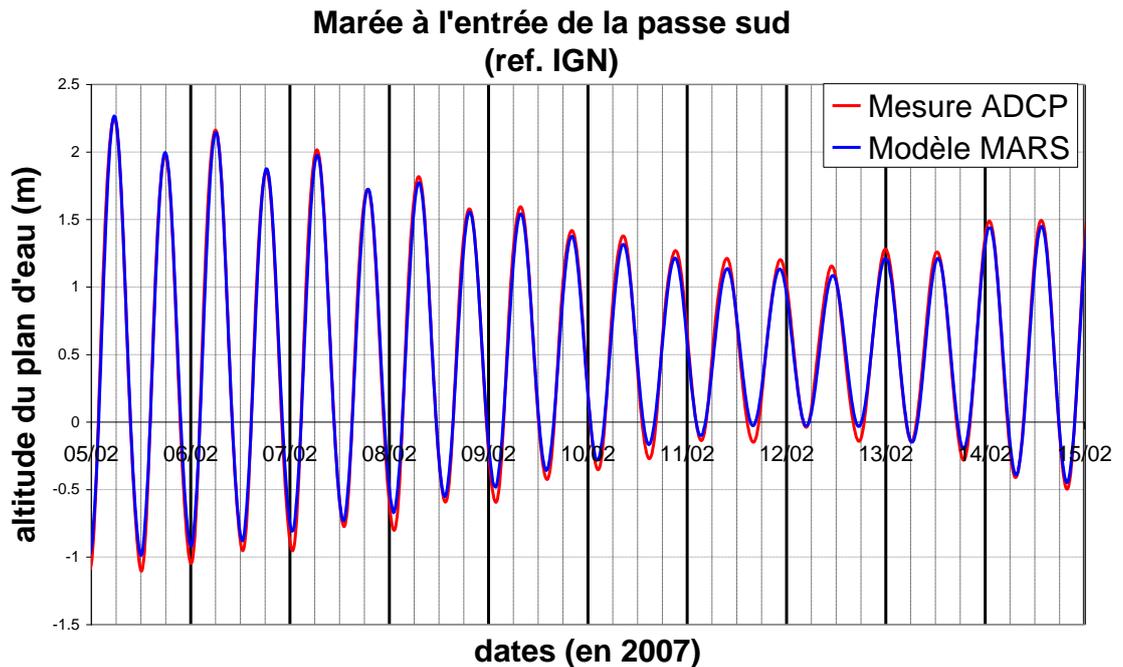


Figure 10 : Marée dans la passe-sud du Bassin d'Arcachon en février 2007, mesurée par l'ADCP et simulée par MARS

marnage moyen MARS (m)	marnage moyen SHOM (m)	Différence moyenne modèle-mesure (m)	Différence max. à pleine mer (m)	Différence max. à basse-mer (m)	Déphasage au flot (min)	Déphasage au jusant (min)
2.59	2.68	-0.090	0.019	0.071	9.61	1.72

Tableau 4 : Marée dans la passe-sud du Bassin en février 2007, comparaison entre les mesures ADCP et les simulations de MARS

La Figure 11 permet de comparer à Arcachon-Eyrac la hauteur de marée simulée par MARS et le niveau prédit par le SHOM. La différence de marnage et le déphasage moyen sont ensuite calculés (Tableau 5). La marée est bien reproduite par le modèle MARS, et le déphasage par rapport au signal réel est faible. Cependant, le modèle surestime systématiquement la hauteur d'eau à marée basse. Le marnage est de l'ordre de 4 m (5 février) en vives-eaux et de 1 m en mortes-eaux (12 février). Par rapport à l'entrée dans les passes, le déphasage augmente et le signal simulé a un retard plus important au jusant.

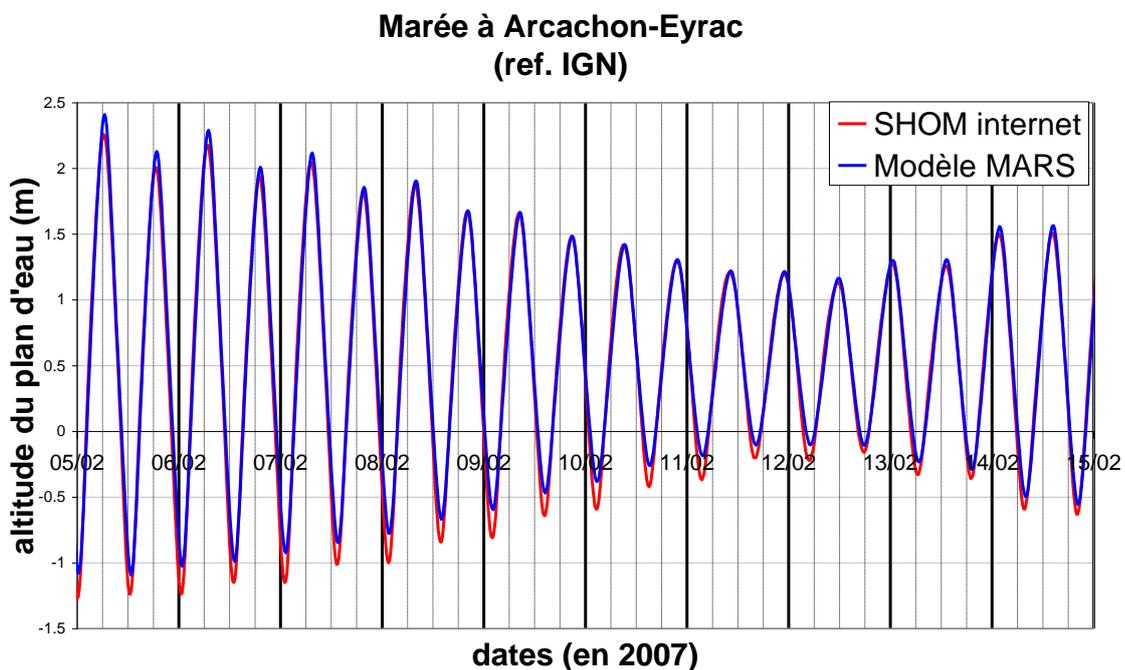


Figure 11 : Marée à Arcachon-Eyrac en février 2007, prédite par le SHOM et simulée par MARS

marnage moyen MARS (m)	marnage moyen SHOM (m)	Différence moyenne modèle-mesure (m)	Différence max. à pleine mer (m)	Différence max. à basse-mer (m)	Déphasage au flot (min)	Déphasage au jusant (min)
2.89	2.82	0.067	0.2249	0.2913	4.14	25.53

Tableau 5 : Marée à Arcachon-Eyrac en février 2007, comparaison entre les mesures du SHOM et les simulations de MARS

Si MARS reproduit bien la marée à l'entrée des passes, il a un peu plus de difficulté à Arcachon. Les différences entre modèle et prédiction à Arcachon, s'expliquent en premier lieu par la géographie particulière du site. Il s'agit d'une lagune semi-fermée qui communique avec l'océan par deux passes étroites. La propagation de l'onde de marée y est très particulière. De plus, plusieurs hypothèses simplificatrices qui jouent un rôle dans la propagation de la marée ont été émises :

- les frottements sur le fond sont homogènes pour l'ensemble du modèle ;
- la résolution spatiale du modèle ne permet pas de reproduire les hauteurs de marée avec plus de précision ;
- la bathymétrie utilisée est identique pour chacune des simulations alors que la position des bancs et la configuration des passes varient fortement sous l'effet des agents dynamiques (houle, marée, tempête).

3.2.2. Validation des courants

L'ADCP implanté dans la passe-sud du bassin permet de valider les courants à l'entrée du bassin (Figure 12). Le modèle reproduit correctement les vitesses des courants de marée, avec des vitesses de l'ordre de 0.5 m/s en mortes-eaux et pouvant atteindre 1.3 m/s en vives-eaux. Le courant de flot est inférieur au courant de jusant, ce qui s'explique par la dissymétrie de la marée dans le bassin. Globalement, les courants sont légèrement sous-estimés par le modèle, surtout en mortes-eaux, mais le modèle surestime les courants de jusant de vives-eaux. A l'étales, les courants diminuent fortement. La comparaison avec le cycle de marée (Figure 10) montre qu'il existe un décalage, d'environ 30 minutes à une heure, entre les étales et les renverses du courant dans les passes.

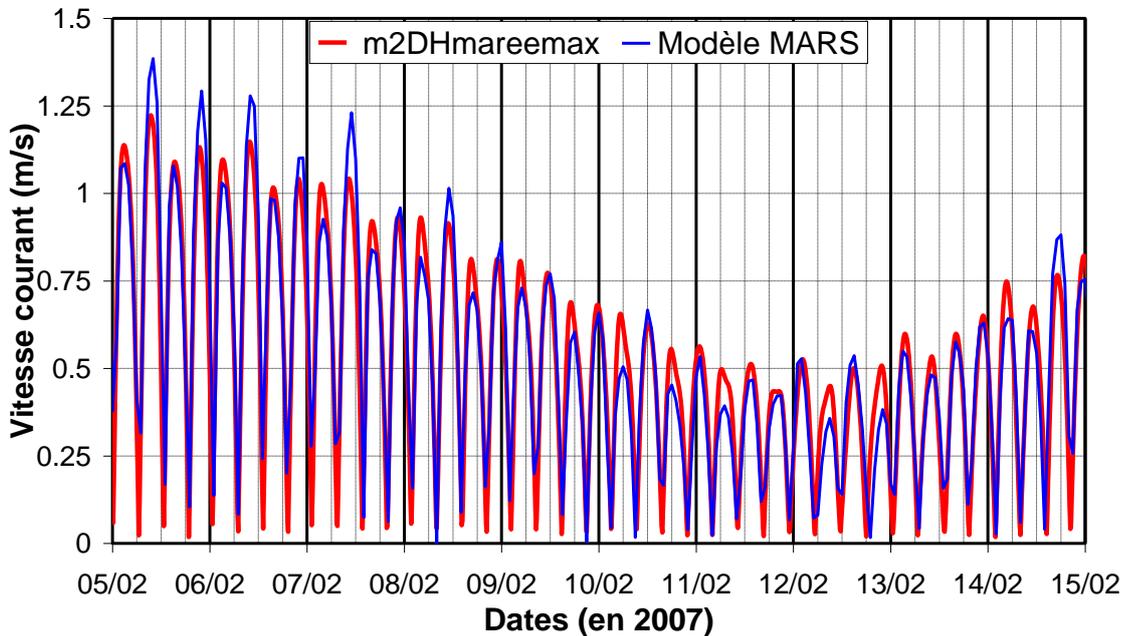


Figure 12 : Courants dans la passe-sud du Bassin d'Arcachon en février 2007, mesurée par l'ADCP et simulée par MARS

Sur la Figure 13 sont représentés les courants simulés par MARS sur tout le bassin le 07 février à trois heures différentes. L'intérêt de cette figure est d'observer la circulation sur l'ensemble de la lagune. Les situations choisies (au jusant, à l'étale et au flot) permettent de bien visualiser la circulation du bassin.

Il est ainsi observable que la circulation dans la lagune se fait le long des principaux chenaux du bassin. Les courants sont intenses dans les passes, ils atteignent 1.5 m/s dans la passe nord au jusant. Les courants sont aussi plus importants dans la passe Nord que dans la passe Sud, que ce soit à marée montante ou descendante.

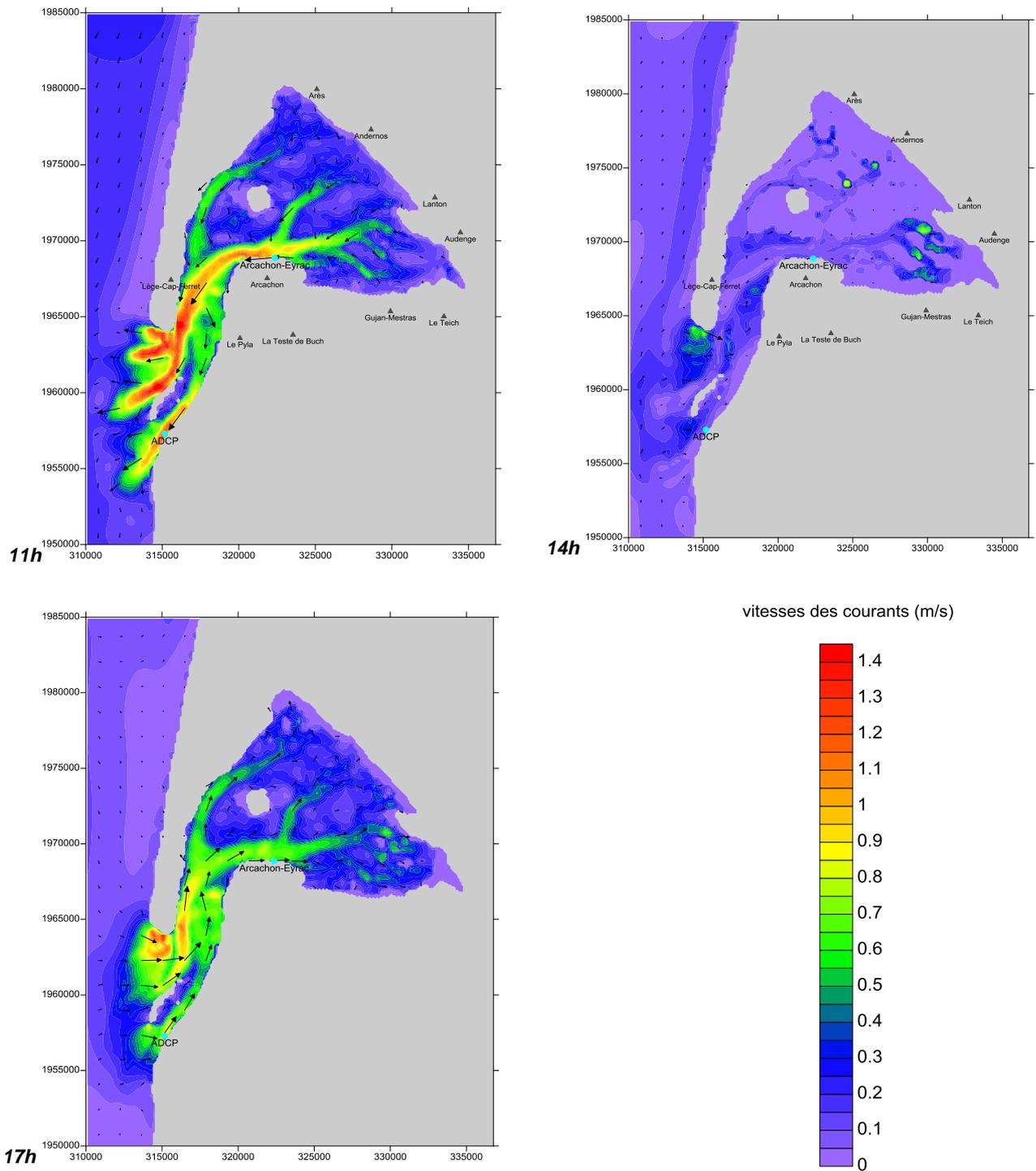


Figure 13 : Courants simulés par le modèle MARS dans le Bassin d'Arcachon, le 07 février 2007 : à 11h00 (jusant), à 14h (étiage, avant la renverse des courants) et à 17h (flot)

3.2.3. Validation du clapot

Pour la validation du clapot, le début du mois de décembre 2006 a plus particulièrement été analysé car cette période était assez venteuse et l'ensemble des Altus ont fonctionné (vent moyen maximum atteignant les 21 m/s le 08 décembre à 6h). Seul le clapot du capteur A08 (le plus proche du site d'étude) est ici représenté (Figure 14 et Figure 15). Le clapot simulé par le modèle SWAN a un bon ordre de grandeur, en hauteur comme en période. Les hauteurs significatives des vagues calculées par le modèle sont légèrement sous-estimées.

La différence observée peut provenir d'une part du traitement des données terrain. L'Altus n'est pas un appareil idéal pour mesurer le clapot ; sa fréquence d'acquisition étant de 2 Hz il n'est pas adapté pour les périodes du clapot. D'autre part, la résolution de la bathymétrie utilisée par le modèle a une maille de l'ordre de 115 m, ce qui est faible pour tenir compte de l'existence des chenaux secondaires de circulation ou pour représenter l'hétérogénéité de la nature du fond. Il peut exister des différences locales entre le modèle numérique de terrain et la bathymétrie réelle, ce qui fait que le calcul sur une maille trop grande n'est pas forcément représentatif d'une mesure ponctuelle.

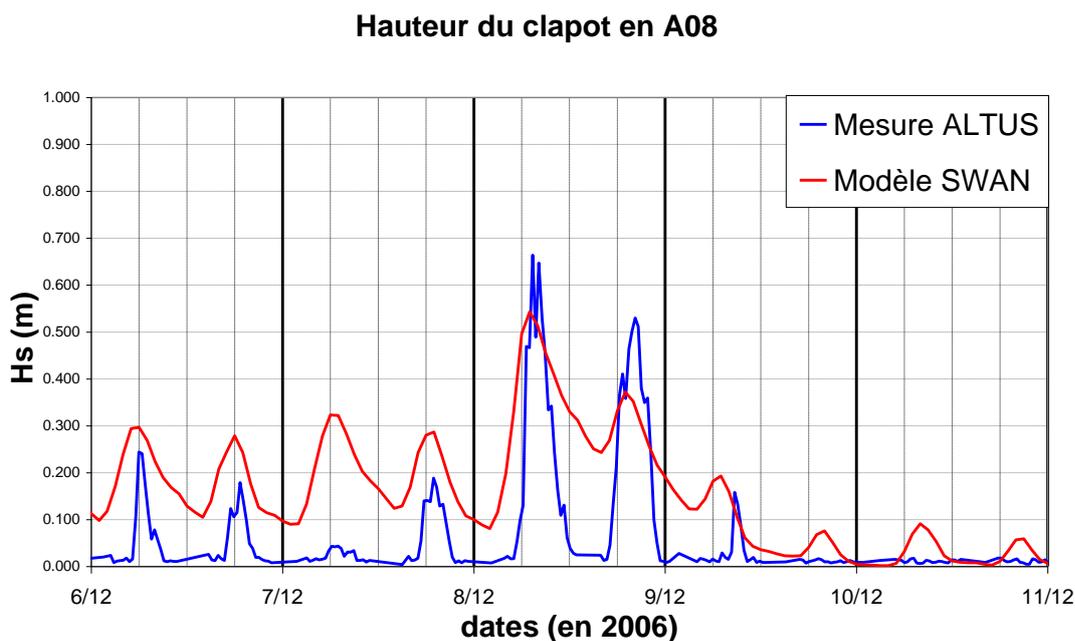


Figure 14 : Hauteur significative du clapot au niveau du capteur A08, mesurée par l'Altus et simulée par SWAN

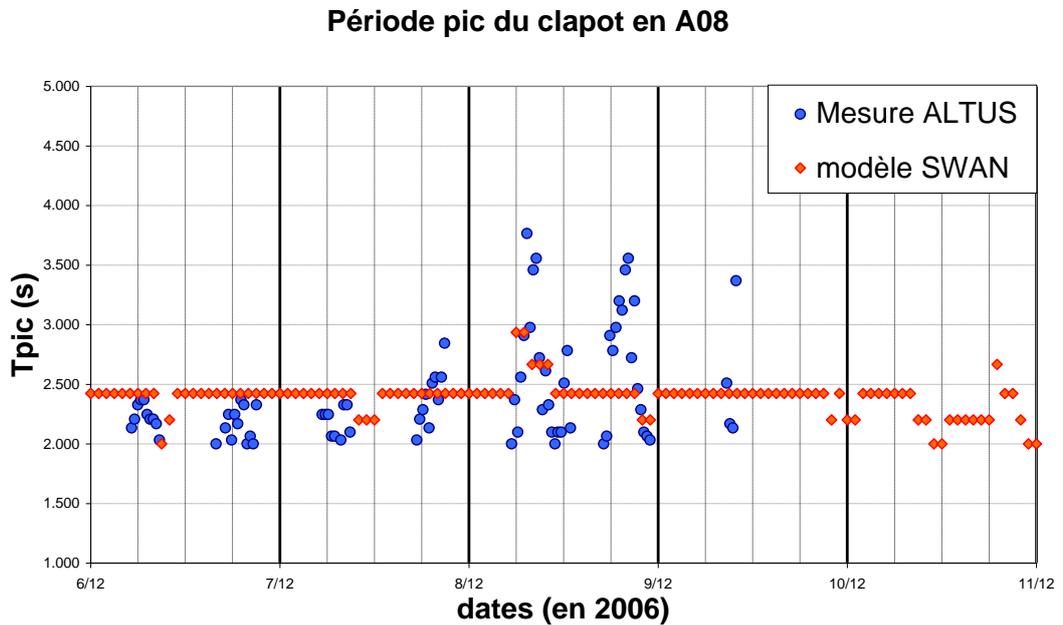


Figure 15 : Période pic du clapot au niveau du capteur A08, mesurée par l'Altus et simulée par SWAN

3.2.4. Validation de la surcote

Le niveau maximal atteint pendant la tempête tient compte de l'action du vent et de la pression (surcote atmosphérique) ainsi que de l'effet des vagues (« wave setup »). La surcote est estimée par le modèle MARS tandis que le setup est calculé par le modèle SWAN. Ces deux contributions, calculées séparément, sont additionnées pour estimer le niveau maximal atteint pendant les tempêtes. Les deux points de validation pour l'altitude du plan d'eau sont le marégraphe Arcachon-Eyrac et l'ADCP (Figure 16 et Figure 17). Les mesures du marégraphe d'Arcachon-Eyrac sont téléchargées sur le site internet du système d'observation SONEL (www.sonel.org/).

Dans un premier temps, les altitudes du plan d'eau présentées sont calculées uniquement par le modèle MARS, c'est-à-dire sans tenir compte de la contribution du setup. Lors des marées de fort coefficient (5 au 7 février), le modèle MARS reproduit bien l'élévation du niveau marin, sous l'influence du vent et de la pression atmosphérique. Le niveau maximal atteint pour cette période est enregistré le 7 février, alors que des vents intenses soufflent sur le bassin. Le modèle donne à Eyrac un niveau maximal de 2.32 m, contre 2.54 m mesuré au marégraphe. A morte eau, le modèle MARS sous-estime l'influence de la météo sur l'élévation du niveau marin, que ce soit à l'entrée ou à l'intérieur du bassin. Pour expliquer ces différences, le setup dû au déferlement des vagues est calculé pour différentes dates.

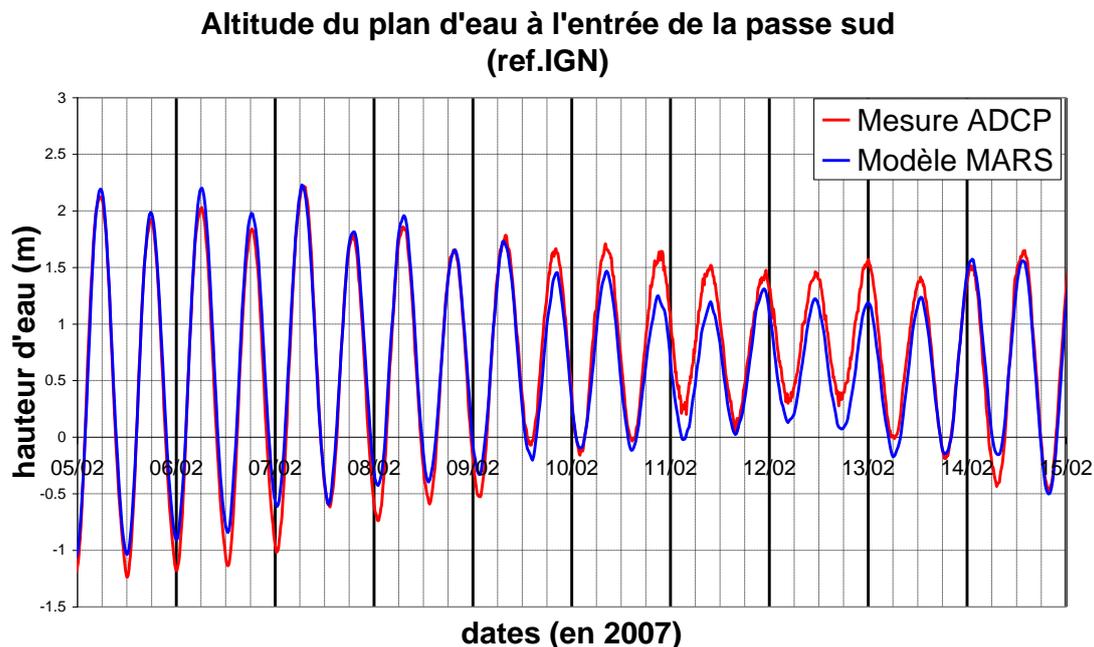


Figure 16 : Altitude du plan d'eau à l'entrée de la passe Sud en février 2007, mesurée par l'ADCP et simulée par MARS (ref. IGN)

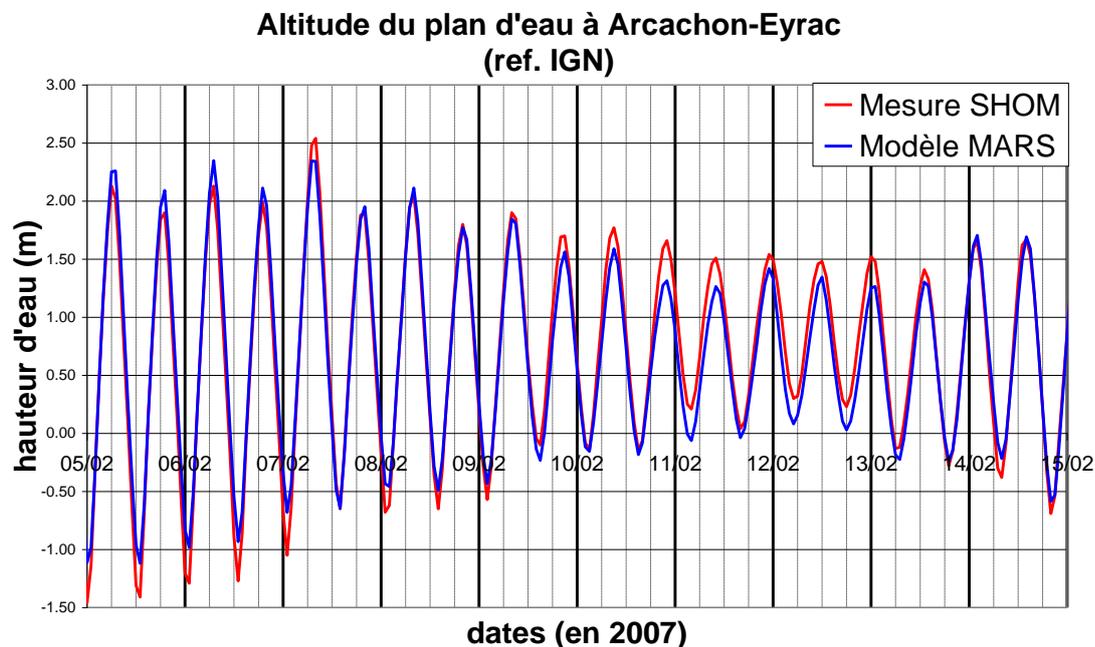


Figure 17 : Altitude du plan d'eau à Arcachon-Eyrac en février 2007, mesurée par le marégraphe du SHOM et simulée par MARS (ref. IGN)

Le calcul du setup par SWAN n'a été effectué que pour quelques dates de la période simulée, avec un paramétrage du modèle SWAN en coordonnées cartésiennes, dans des conditions stationnaires et forcé par les hauteurs d'eau simulées par le modèle MARS. Si le setup n'a pas été estimé de façon systématique, c'est essentiellement dû au chaînage particulier entre les modèles MARS et SWAN qu'impose un tel calcul. Il n'était pas opérationnel en début de projet et il n'a été disponible seulement après que l'ensemble des simulations ait été effectuées.

La Figure 18 montre le calcul du setup le 11 février 2007 à 3h00. Cette date est intéressante car elle correspond à un forçage en houle intense à l'entrée du bassin et à une situation où le calcul par le modèle MARS ne permet d'expliquer l'altitude du plan d'eau mesurée par le marégraphe d'Arcachon-Eyrac. La houle arrivant dans le Bassin d'Arcachon déferle sur le banc d'Arguin et génère un setup de plusieurs dizaines de cm. Le setup se propage ensuite dans tout le bassin et il en résulte une augmentation du niveau d'eau sur toute la lagune. Il s'agit d'un résultat remarquable de cette étude : le déferlement de la houle à l'entrée des passes agit sur l'élévation du niveau de l'ensemble du bassin. Bien que la houle du large ne pénètre pas à l'intérieur du domaine lagunaire, les simulations réalisées dans cette étude montrent que l'effet de la houle du large peut être ressenti jusqu'au fond du bassin. L'estimation du setup ne sera valable qu'à l'intérieur de la lagune. Les processus induisant le déferlement de la houle sont différents à l'entrée des passes et sur le linéaire de la côte aquitaine. La résolution de notre bathymétrie permet en effet de représenter les structures morphologiques responsables du déferlement de la houle à l'entrée du bassin (bancs d'Arguin) mais pas dans la zone intertidale des plages sableuses du littoral (système barres-bâines plus complexe). La zone hachurée sur la Figure 18, qui s'étend le long de la façade maritime, met en évidence la zone où le calcul du setup par SWAN n'est plus valable.

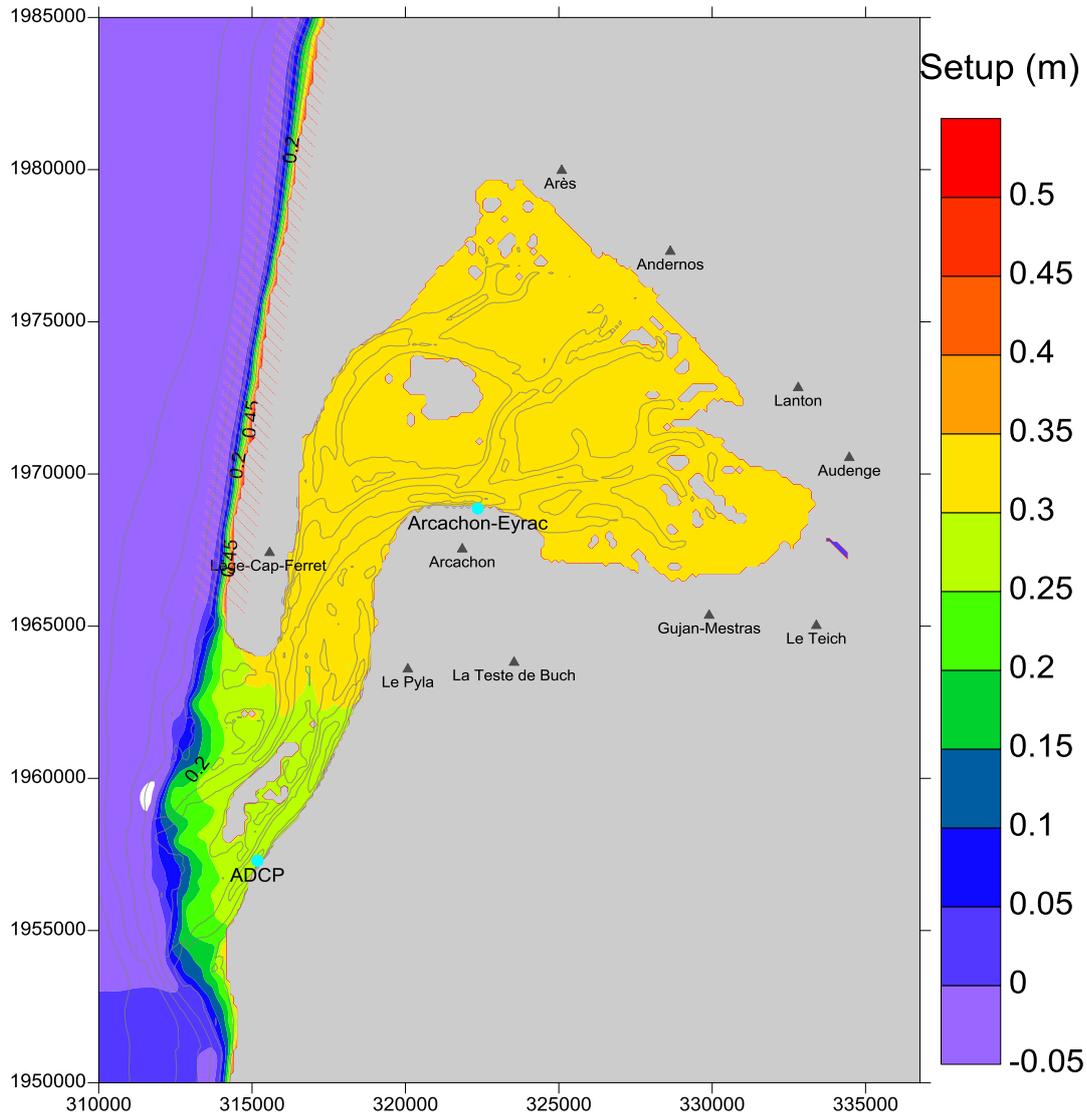


Figure 18 : Exemple du setup simulé par le modèle SWAN dans le Bassin d'Arcachon, le 11 février 2007 à 3h00 (en m)

Le Tableau 6 et le Tableau 7 indiquent pour plusieurs dates la valeur du setup calculé par SWAN et de la surcote totale calculée et mesurée pour les deux sites susnommés. La valeur du setup varie en fonction des conditions de vagues (hauteur et période) mais aussi du niveau de marée. Ces deux tableaux permettent de rendre compte encore de l'importance du setup, qui peut atteindre plusieurs dizaines de centimètres, et contribuer à l'élévation du plan d'eau.

DATE	Setup modèle	Surcote modèle	Surcote totale modèle	Surcote totale mesurée
07/02 09:00	0.15	0.29	0.44	0.361
09/02 09:00	0.09	0.14	0.23	0.216
09/02 15:00	0.21	0.11	0.32	0.396
11/02 03:00	0.29	0.08	0.37	0.4
12/02 06:00	0.23	0.14	0.37	0.345
12/02 18:00	0.24	0.09	0.33	0.519
14/02 09:00	0.02	0.2	0.22	0.02

Tableau 6 : Surcote atmosphérique, setup dû aux vagues, surcote totale modélisée et mesurée en février 2007 au niveau de l'ADCP (unités en m)

DATE	Setup modèle	Surcote modèle	Surcote totale modèle	Surcote totale mesurée
07/02 09:00	0.16	0.308	0.47	0.61
09/02 09:00	0.09	0.171	0.26	0.26
09/02 15:00	0.21	0.16	0.37	0.43
11/02 03:00	0.3	0.115	0.42	0.58
12/02 06:00	0.24	0.18	0.42	0.41
12/02 18:00	0.25	0.12	0.37	0.37
14/02 09:00	0.02	0.24	0.26	0.18

Tableau 7 : Surcote atmosphérique, setup dû aux vagues, surcote totale modélisée et mesurée en février 2007 à Arcachon-Eyrac (unités en m)

La Figure 19 et la Figure 20 présentent les valeurs des surcotes calculées et mesurées en février 2007, au niveau de la passe Sud et à Arcachon-Eyrac. La valeur de la surcote calculée par MARS, sans la contribution du setup, est fortement sous-estimée. Pour les différentes dates où le setup a été calculé, l'estimation de la surcote est bien meilleure et se rapproche des valeurs enregistrées par le SHOM.

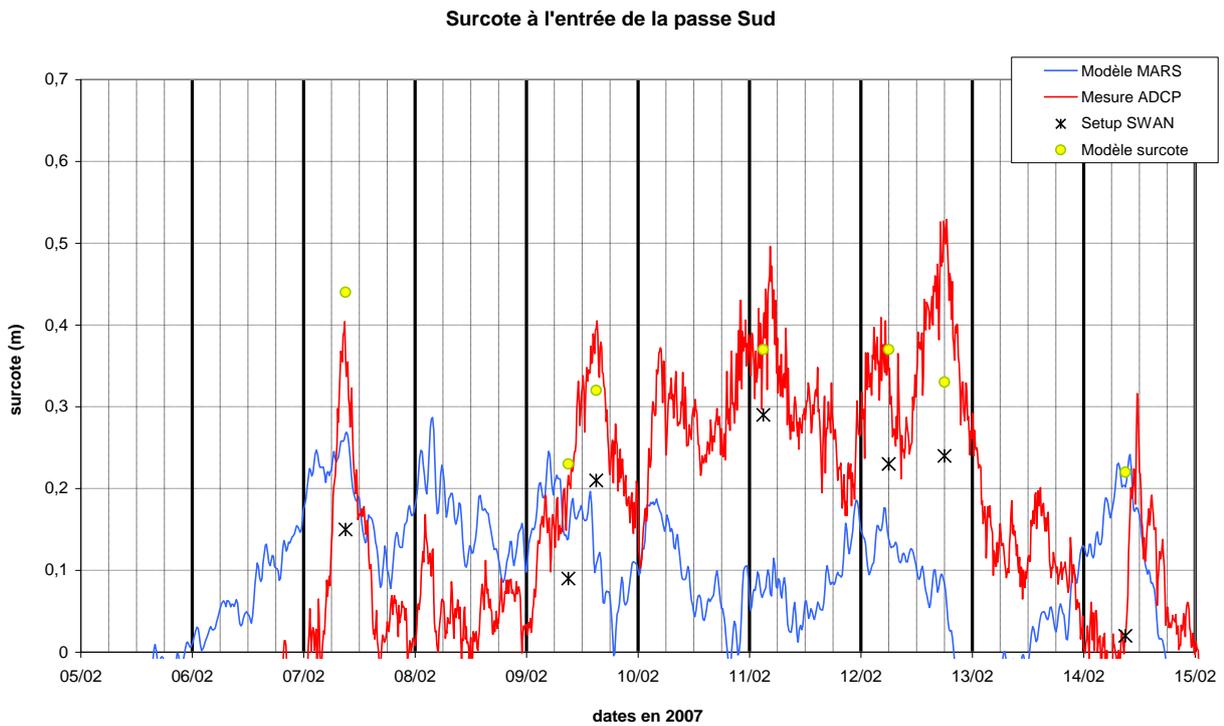


Figure 19 : Surcote à l'entrée du bassin en février 2007, mesurée par l'ADCP et simulée par MARS

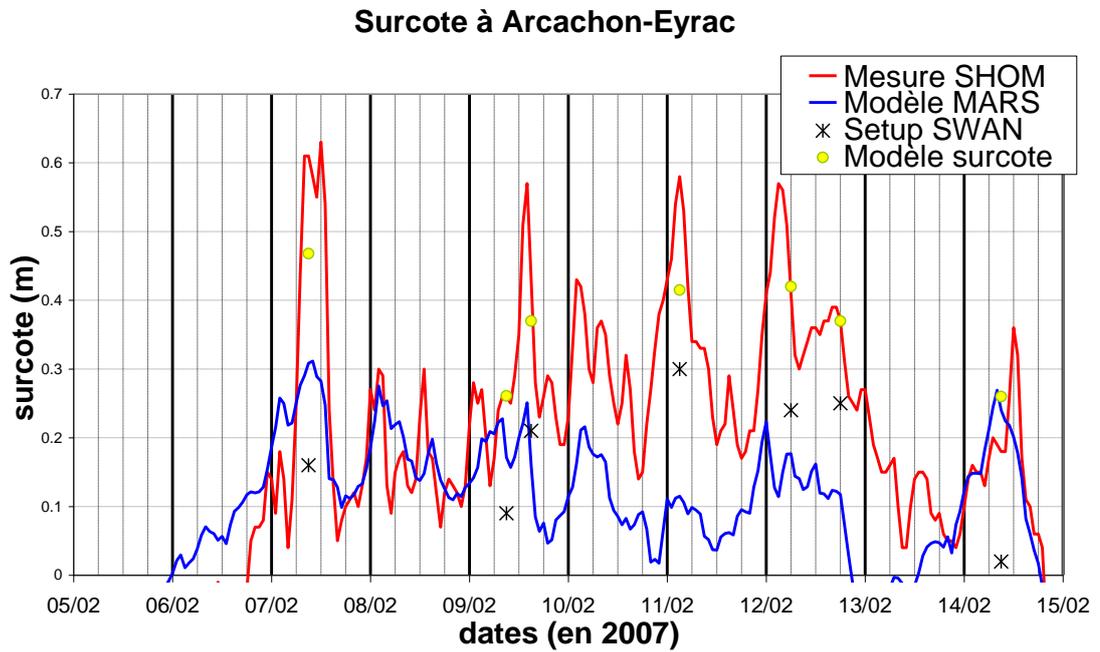


Figure 20 : Surcote à Arcachon-Eyrac en février 2007, mesurée par le marégraphe du SHOM et simulée par MARS

La Figure 21 montre la carte des niveaux atteints le 7 février, en sommant les différentes contributions (sorties MARS, setup SWAN). Elle permet de déterminer le risque de submersion sur toute la cote du bassin, en comparant les hauteurs simulées aux hauteurs des ouvrages de protection (murets de rehaussement). Les niveaux d'eau ne sont pas homogènes sur l'ensemble du bassin, des différences de plusieurs dizaines de centimètres sont visibles entre Eyrac et le Teich. Cette différence entre l'amont et l'aval de la lagune est due à la poussée des masses d'eau par le vent dans l'axe des chenaux. L'orientation des chenaux favorise cette poussée vers l'est et le sud-est de la lagune.

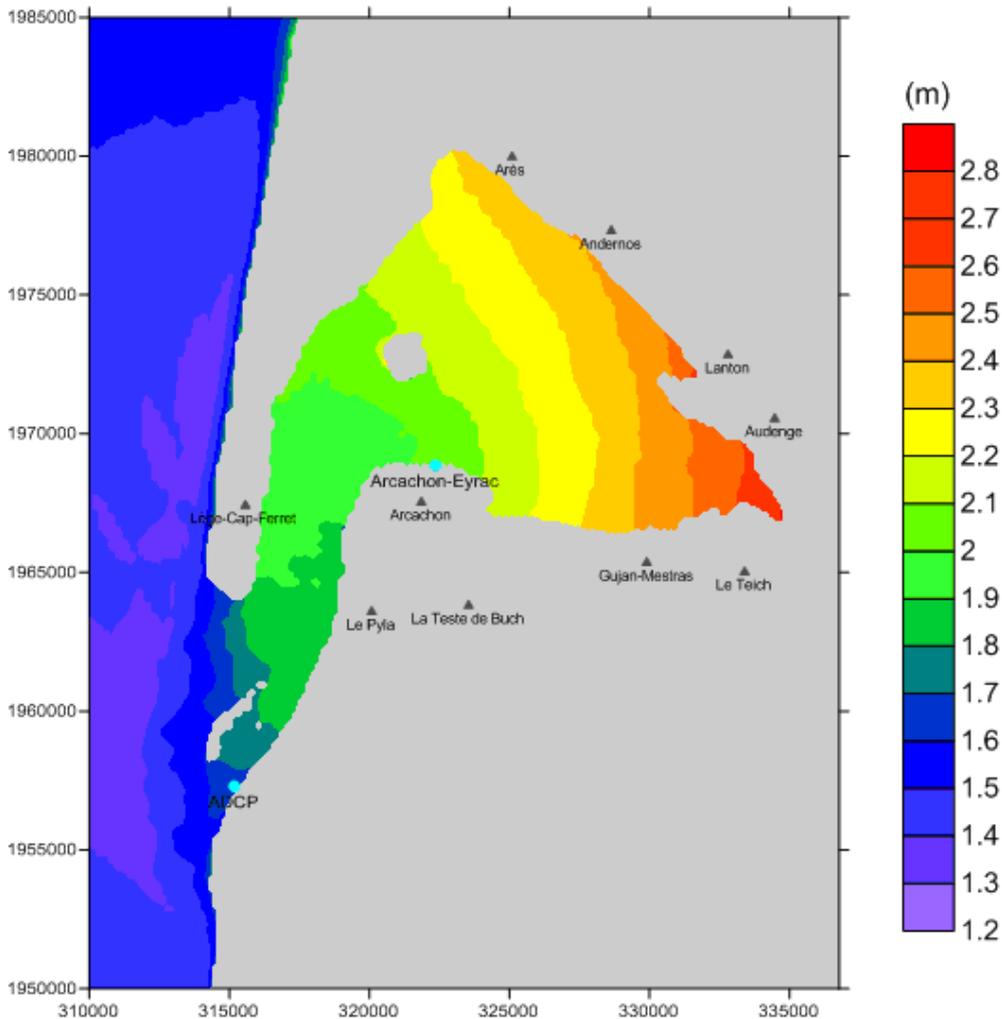


Figure 21 : Altitude du plan d'eau dans le Bassin d'Arcachon, le 7 février 2007 à 9h00 (ref.IGN)

3.3. INCERTITUDES SUR LES HAUTEURS D'EAUX CALCULEES

Les hauteurs du plan d'eau modélisées sont à utiliser avec précaution. L'estimation de leur précision est impérative en particulier pour le dimensionnement d'ouvrage de protection contre la submersion marine. Diverses sources d'incertitudes ont été mises en évidence et sont relatives :

- à la précision et à la qualité des données d'entrée des modèles hydrodynamiques, c'est-à-dire les données météorologiques de vent et de pression utilisées pour les simulations des hauteurs d'eau et des vagues de tempête ;

- à la résolution et à la précision des données bathymétriques qui jouent un rôle primordial dans le calcul ;
- aux limites des modèles utilisés.

Les données météorologiques disponibles sont nombreuses mais très inégales en résolution, qualité ou en couverture temporelle. Les modèles utilisés sont de plus très sensibles aux données de vent. Les données de forçage ont été choisies avec beaucoup de minutie, et pour les différents événements étudiés, les forçages les plus précis (en termes de résolution spatiale et temporelle) ont été sélectionnés.

La qualité et la précision des MNT utilisés sont déterminantes pour estimer l'incertitude du résultat final. Dans cette étude, plusieurs sources de données topographiques ont été utilisées : des données bathymétriques du SHOM et de GEBCO, des images satellites SPOT de 2007, des levés bathymétriques du SIBA de 2002 et de 2007. Les données du SHOM et de GEBCO ont une résolution spatiale de 500 m. L'utilisation combinée des images SPOT et des levés du SIBA permet d'obtenir une bathymétrie avec un pas de 235 m.

Outre les incertitudes liées aux données utilisées, des approximations sont induites par le choix des processus à modéliser, avec par exemple :

- l'utilisation d'un modèle en deux dimensions horizontales (2DH) plutôt qu'un modèle en trois dimensions (3D). Dans cette étude, la pertinence d'utiliser un modèle 2DH est justifiée car la théorie n'a pas montré d'apport significatif d'un modèle 3D pour les simulations en conditions très énergétiques. Lors du passage d'une tempête, les vents intenses agissent sur l'ensemble de la colonne d'eau de sorte qu'il n'y a pas de stratification verticale. L'homogénéisation est principalement due à la forte turbulence dans la colonne d'eau et les courants induits par le vent peuvent être simulés par un modèle 2DH (Jones et Davies, 2006);
- l'influence des cours d'eau n'a pas été prise en compte principalement car les débits des différents cours d'eau ne sont pas systématiquement disponibles. Pourtant, les apports d'eau douce parvenant dans le Bassin par les cours d'eau peuvent avoir une influence sur les phénomènes de submersion marine en s'ajoutant aux masses d'eau d'origine océanique pénétrant dans la lagune ;
- le choix d'une contrainte de frottement exercée par le vent sur la surface océanique. Le coefficient de traînée est important dans la modélisation des surcotes (Nicolle et *al.* 2010, Sheng et *al.* 2010) et plusieurs formulations existent dans la littérature. Les incertitudes concernent surtout la validité des formulations en période de tempête. Un coefficient du type Smith and Banke (1975) a été choisi, il dépend de l'intensité du vent ;

- les contraintes de frottement sur le fond sont considérés homogènes sur l'ensemble du bassin. La résolution de la bathymétrie et l'absence de données sur la nature du fond (carte précise des zones de sable, slikke et schorre,...) imposent ce choix.

L'interprétation des hauteurs d'eau fournies dans le rapport doit tenir compte de l'ensemble de ces incertitudes. Les tests de validation effectués à partir du marégraphe d'Arcachon-Eyrac ont montré qu'en période de tempête, lorsque les données de forçage CFSR sont disponibles, les altitudes du plan d'eau (setup inclus) à Arcachon sont calculées avec une erreur moyenne inférieure à 0.10 m.

4. Simulations et analyse des résultats

4.1. SIMULATION DE KLAUS (24/01/2009)

4.1.1. Météorologie et niveaux de marée

Lors de la tempête Klaus, les vents ont été maximaux le 24 janvier entre 5h et 9h selon les sources de données (CFSR, sémaphore Cap Ferret) et la pleine mer a eu lieu à 4h30 (SHOMAR), (Figure 22).

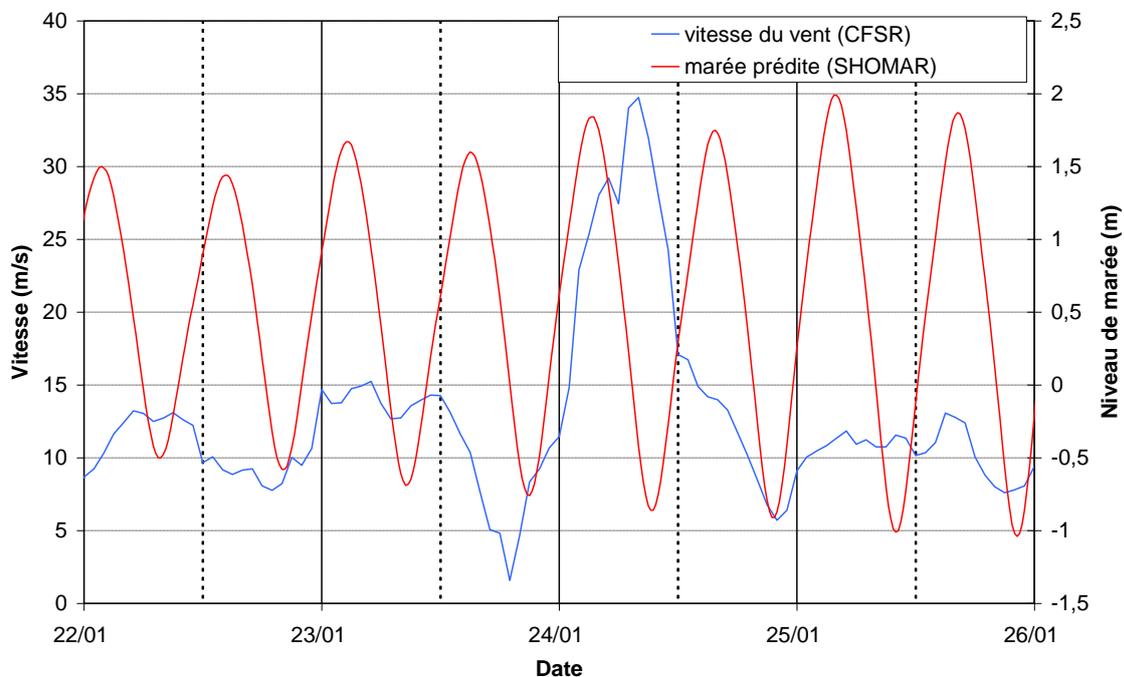


Figure 22 : Vitesses de vent (en m/s) et niveaux de marée (en mètres) lors de la tempête Klaus (24/01/2009)

Une première simulation est effectuée sans les forçages météorologiques dans le logiciel MARS afin de valider la propagation de la marée et sa bonne estimation au marégraphe d'Arcachon-Eyrac lors de la tempête Klaus.

La comparaison des niveaux de marées prédits par le SHOM et des niveaux simulés par MARS (Figure 23) met en évidence une bonne synchronisation et une précision satisfaisante de ± 5 cm pour la pleine mer et ± 10 cm pour la basse mer.

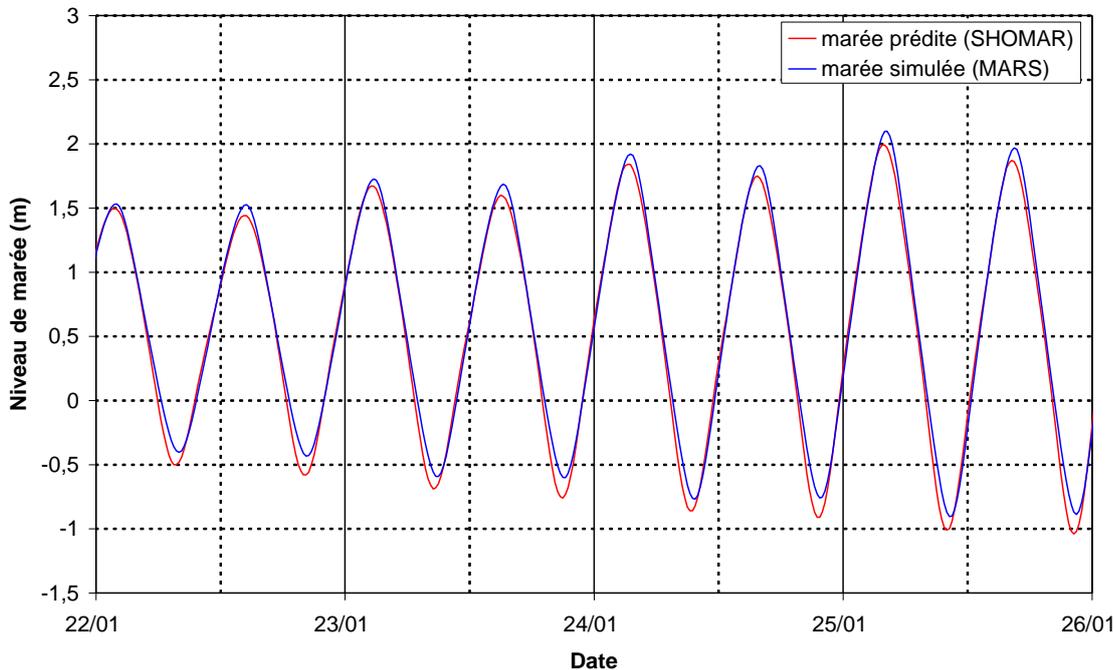


Figure 23 : Comparaison des niveaux de marée prédits par le SHOM (données SHOMAR) et des niveaux de marée simulés par MARS pour la tempête Klaus (24/01/2009)

4.1.2. Altitude du plan d'eau et circulation à l'intérieur de la lagune

Les niveaux d'eau simulés par MARS en tenant compte des forçages météorologiques sont bien en phase avec les niveaux d'eau mesurés au marégraphe d'Eyrac (Figure 24). Ces niveaux sont maximaux le 24/01/2009 à 5h15 au marégraphe d'Eyrac et à 5h pour la simulation MARS.

A Eyrac, le niveau maximal simulé par MARS est de 2,7 m alors que le niveau enregistré est de 2,9 m (Figure 24). Ces résultats sont satisfaisants car, à cette étape de la modélisation seule la surcote atmosphérique est prise en compte et la surcote liée aux vagues n'est pas encore simulée. Cela peut expliquer en partie la différence d'une vingtaine de centimètres observée entre les niveaux simulés et mesurés.

A Andernos, le niveau d'eau maximal simulé par MARS est de 3,08 m, soit 0.38 m de plus qu'à Eyrac (Figure 25).

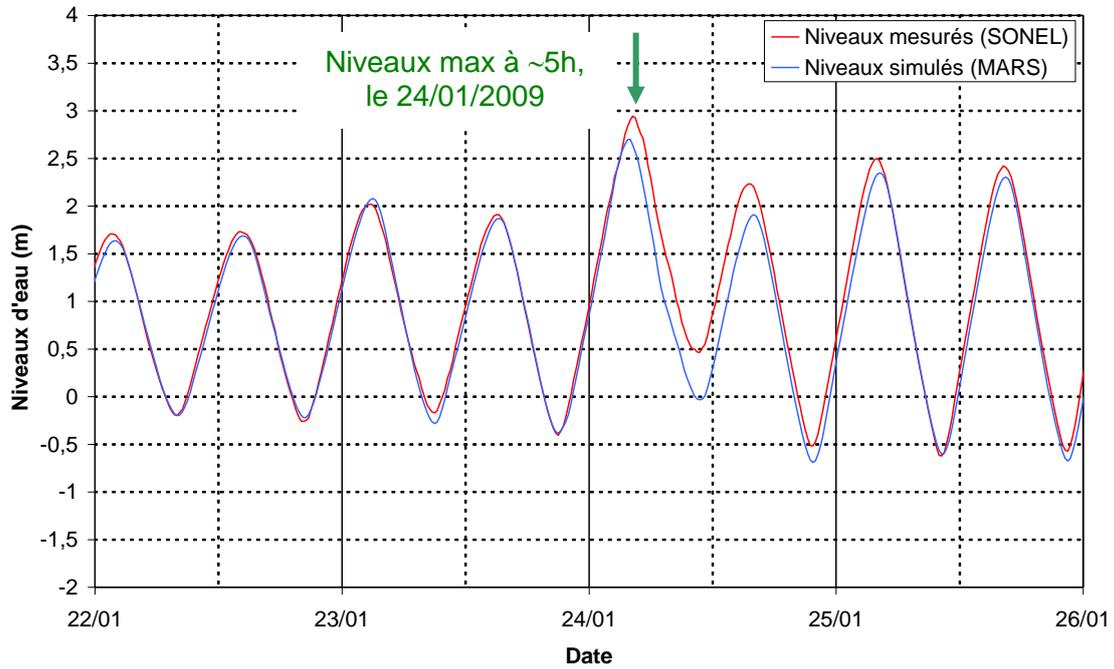


Figure 24 : Comparaison des niveaux d'eau mesurés par le marégraphe d'Eyrac (SONEL) et des niveaux d'eau simulés par MARS à Eyrac pour la tempête Klaus (24/01/2009)

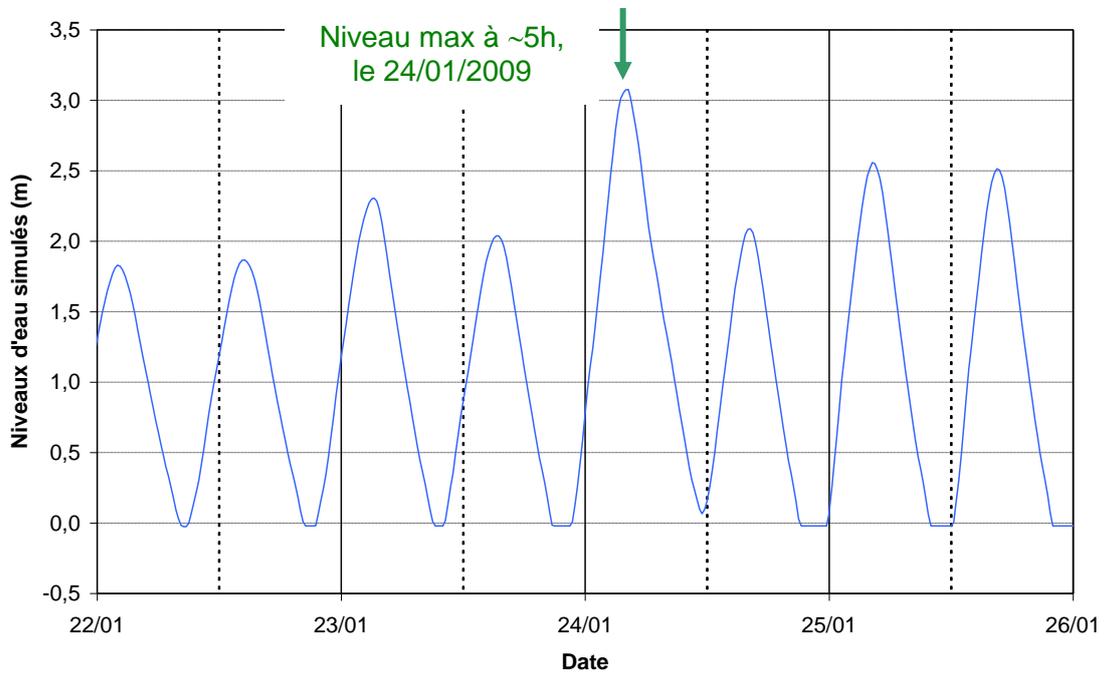


Figure 25 : Niveaux d'eau (niveaux de marée + surcote atmosphérique) simulés par MARS à Andernos pour la tempête Klaus

A Eyrac, la surcote atmosphérique simulée par MARS au moment de la pleine mer est de l'ordre de 0.80 m alors qu'elle est de l'ordre du mètre au moment du pic de la tempête vers 9h30 (Figure 26).

La houle du large déferle au niveau des bancs de sables présents dans les passes du Bassin d'Arcachon et génère une surcote à l'intérieur du domaine lagunaire. Les résultats de simulation de SWAN mettent en évidence l'influence homogène de cette surcote liée à la houle (setup) jusqu'en amont de la lagune. Lors de la pleine mer à 5h, le setup est de l'ordre d'une vingtaine de centimètres (Figure 27).

L'addition du setup fourni **une surcote totale de l'ordre du mètre au moment du niveau d'eau maximal (5h) lors de la tempête Klaus**, telle qu'elle a été mesurée (Figure 26).

Le pic de la tempête étant décalé par rapport à la pleine mer, la surcote totale n'est pas maximale lorsque les niveaux d'eau sont maximaux (à l'étale). En accord avec les mesures (SONEL), la surcote totale simulée est maximale à 9h et atteint 1.6 m (Figure 27).

Le niveau d'eau maximal atteint à Andernos-les-Bains lors de la tempête Klaus est déduit en additionnant le setup simulé par SWAN au niveau d'eau simulé par MARS. Il est de 3.28 m à 5h le 24/01/2009 (Figure 28).

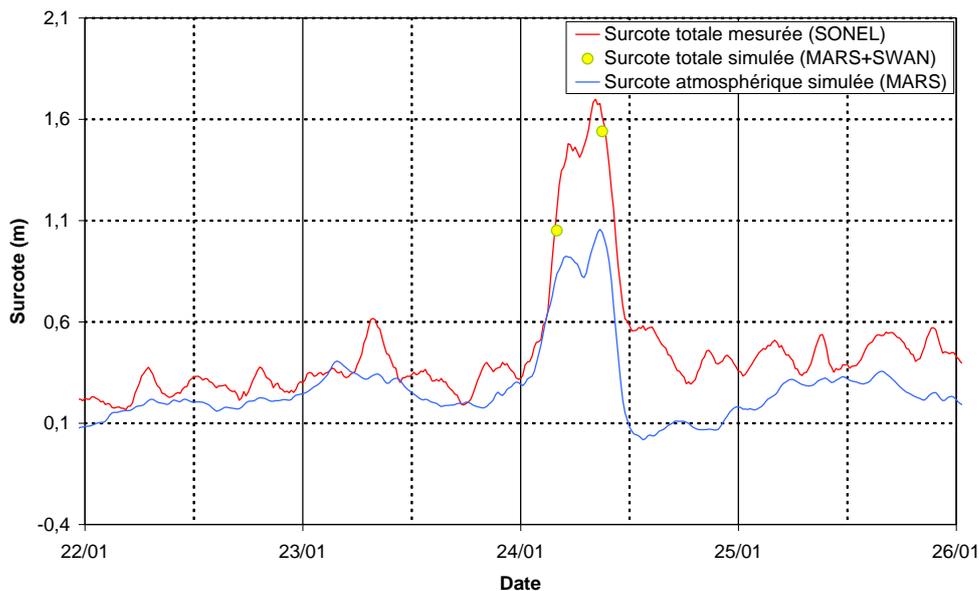


Figure 26 : Surcote atmosphérique simulée par MARS + surcote liée à la houle simulée par SWAN et surcote totale mesurée à Eyrac (SONEL)

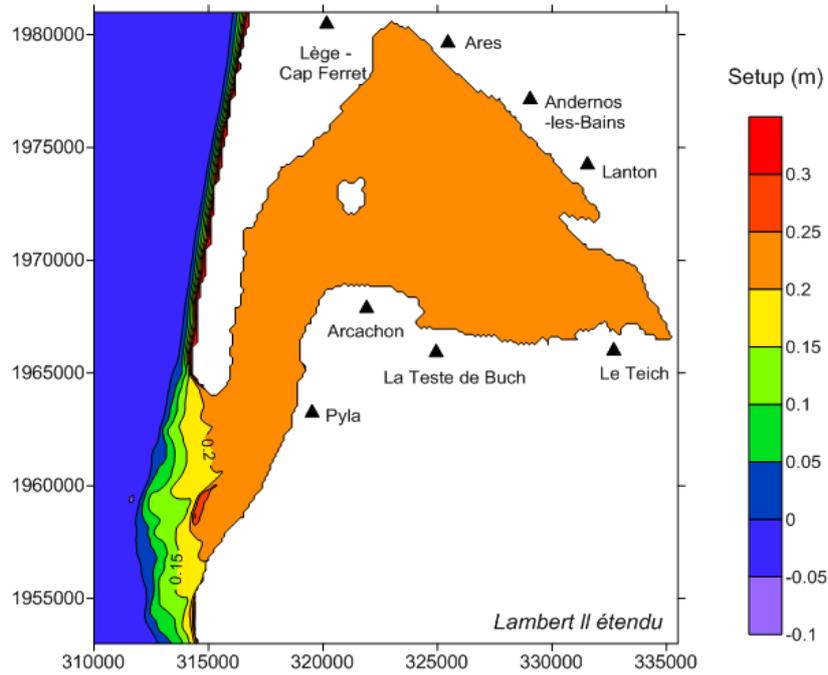


Figure 27 : Surcote liée à la houle (setup) simulée par SWAN pour la tempête Klaus, le 24/01/2009 à 5h (niveau d'eau max)

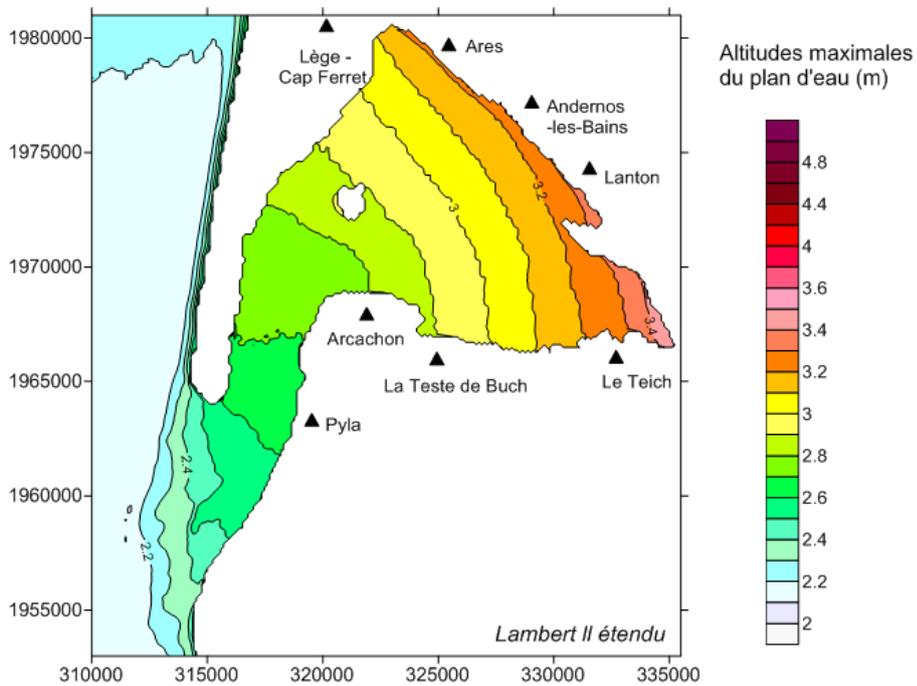


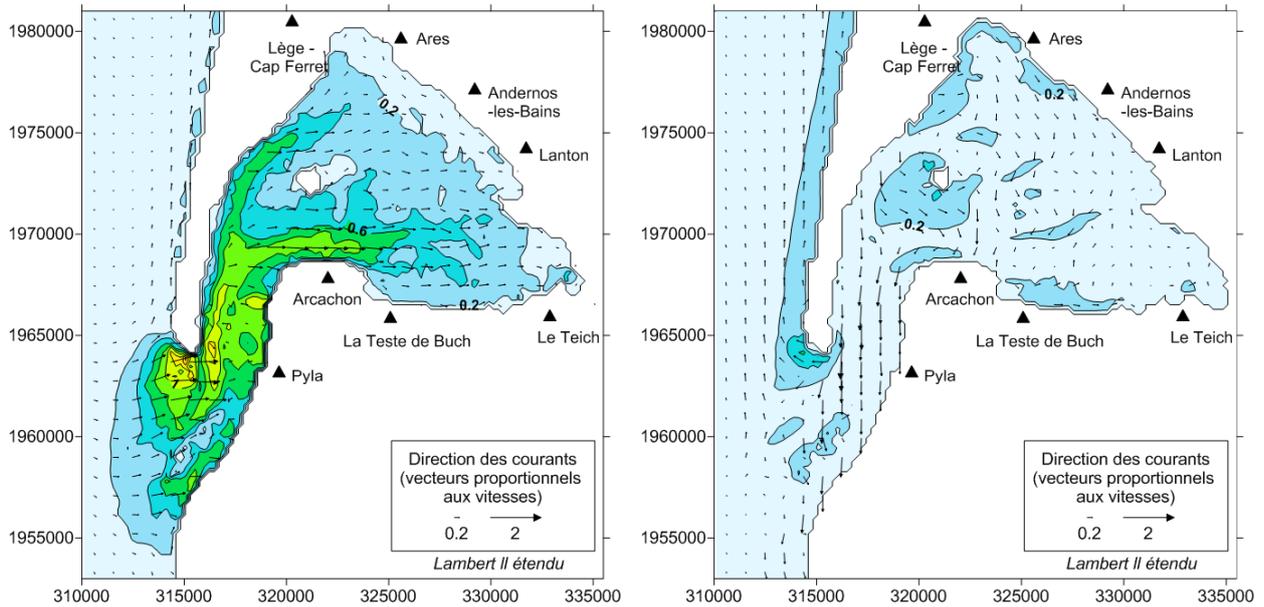
Figure 28 : Altitude de la surface de la mer (niveaux de marées + surcote atmosphérique + surcote liée au vagues, en mètres) simulés par MARS et SWAN pour la tempête Klaus, le 24/01/2009 à 5h (référence altimétrique IGN)

Par ailleurs, la Figure 28 met en évidence l'augmentation progressive des niveaux d'eau vers le sud-est du Bassin. Alors que les niveaux sont de 2.6 m à Pyla-sur-Mer et à la Pointe du Cap-Ferret, ils atteignent 3.28 m à Andernos-les-Bains et 3.4 m au Teich et à Biganos. Cette différence de plusieurs dizaines de centimètres est due à la poussée des masses d'eau par le vent en amont de la lagune. De plus, l'orientation des chenaux favorise cette poussée vers l'est et le sud-est de la lagune.

La Figure 29 présente 3 cartes des courants dans le Bassin d'Arcachon simulés par MARS au moment du flot (2h avant la pleine mer), du jusant (2h après la pleine mer) et du niveau d'eau maximal enregistré (approximativement à l'étale).

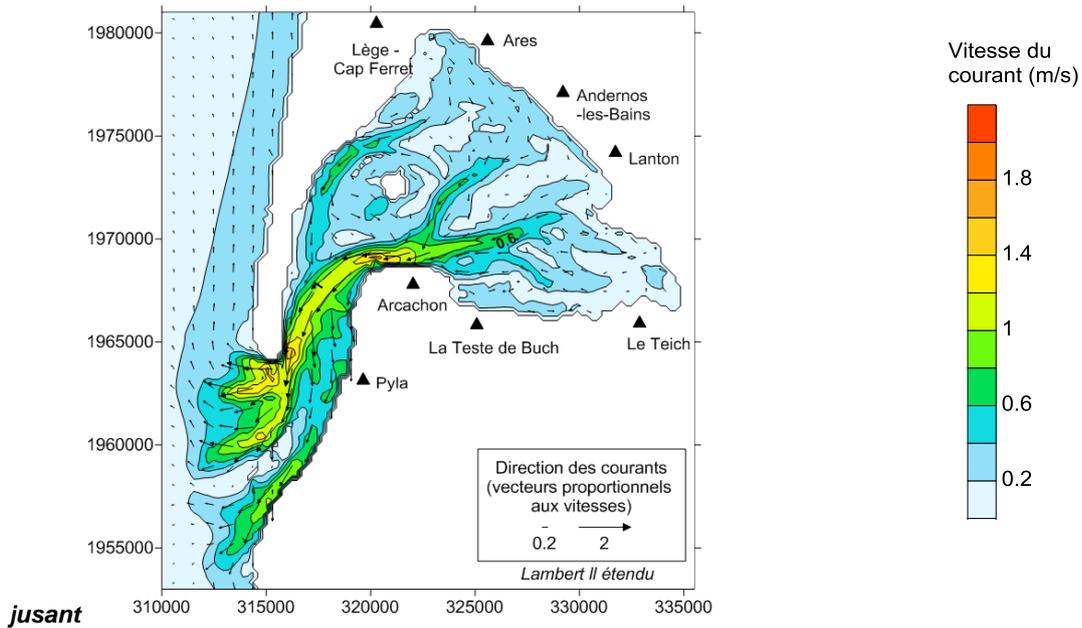
Quel que soit le moment de la marée, les courants ne dépassent pas 0.5 m/s en dehors des chenaux principaux et dans le fond du bassin, en particulier au droit d'Andernos-les-Bains où ils longent la côte dans le sens nord-ouest – sud-est.

Au flot et au jusant, les courants dépassent 0.4 m/s au niveau des passes et dans les chenaux principaux du bassin (chenaux du Piquey, du Teychan, de Mapouchet et de Girouasse). Les vitesses de courant sont plus élevées sur un axe sud-ouest – nord-est, où elles dépassent 1 m/s au jusant. Les valeurs maximales de 1.5 m/s et 1.3 m/s sont respectivement atteintes au niveau de la Pointe du Cap-Ferret et à l'ouest d'Arcachon lors du jusant. Globalement, les courants suivent la direction des chenaux et longent la côte.



Flot

étales



jusant

Figure 29 : Vitesse (en m/s) et direction des courants simulés par MARS pour la tempête Klaus, le 24/01/2009 à 2h (flot), à 4h (étales) et à 6h (jusant)

4.1.3. Agitation à l'intérieur de la lagune

Lors de la tempête Klaus, le pic de vent est enregistré après que le niveau d'eau maximal soit atteint. La Figure 30 présente une carte de l'agitation à l'intérieur du Bassin d'Arcachon au

moment du niveau d'eau maximal à 5h et au moment du pic de vent à 9h, le 24/01/2009. Lors de ces deux situations, le clapot est orienté ouest – est au niveau des passes et du Pyla-sur-Mer. A l'intérieur du domaine lagunaire, il est orienté sud-ouest – nord-est à 5h et ouest-est à 9h au moment du pic de vent. Le clapot est de plus, influencé par l'orientation des chenaux. Il longe ainsi la côte dans les chenaux principaux à Arcachon et sur la partie interne de la péninsule du Cap-Ferret et parvient perpendiculairement à la côte via les chenaux secondaires entre la Teste-de-Buch et le Teich, entre Arès et Lanton et à Pyla-sur-Mer.

A 5h le 24/01/2009, lors du niveau d'eau maximal, le clapot est de l'ordre de 0.50 m à proximité d'Andernos-les-Bains.

A 9h, lors du pic de vent, le clapot est supérieur à 1 m dans les passes, au niveau du Pyla-sur-Mer, ainsi que dans le chenal du Teychan. Il est inférieur à 0.50 m hors des chenaux principaux du Bassin.

Pour analyser plus localement les résultats de SWAN, quatre positions ont été retenues. La Figure 31 présente leurs localisations. Deux points sont situés dans deux des chenaux principaux du Bassin, le chenal de Girouasse (entre 5 et 10 m de profondeur) et le chenal du Teychan (points Eyraç, entre 15 et 20 m de profondeur). Deux autres points se situent dans des chenaux secondaires, le chenal d'Andernos et le chenal de Mouchtalette, qui ont moins de 2.5 m de profondeur et qui sont entourés de vastes platiers.

La Figure 32 présente les hauteurs significatives de clapot lors de la tempête Klaus (24/01/2009) pour ces quatre points. Cette figure met en évidence un décalage dans le temps des maximums de hauteur de clapot en fonction de la profondeur, de la largeur et de la localisation géographique des chenaux. En effet, alors que dans les chenaux du Teychan et de Girouasse les hauteurs de clapot ont été maximales lors du pic de vent entre 8h à 9h, elles ont été maximales à 6h dans les chenaux de Mouchtalette et d'Andernos-les-Bains.

Cette différence est liée au décalage entre le pic de vent et la pleine mer. Dans certaines zones peu profondes du Bassin, le niveau de marée augmente ou réduit les surfaces immergées et donc le fetch, qui est un paramètre important pour la formation du clapot. Le pic de vent s'étant produit 4h après la pleine mer, certaines zones peu profondes du Bassin étaient découvertes. C'est pourquoi, dans les chenaux de Mouchtalette, d'Andernos qui sont moins profonds et moins larges et qui se trouvent à proximité de platiers, les hauteurs de clapot ont été maximales avant le pic de vent et avant que le fetch ne soit trop réduit par la baisse du niveau d'eau. En revanche, dans le chenal du Teychan, 3 fois plus profond, le fetch n'a relativement pas été influencé par le niveau d'eau. C'est pourquoi les hauteurs maximales se sont produites au moment du pic de vent dans ce chenal.

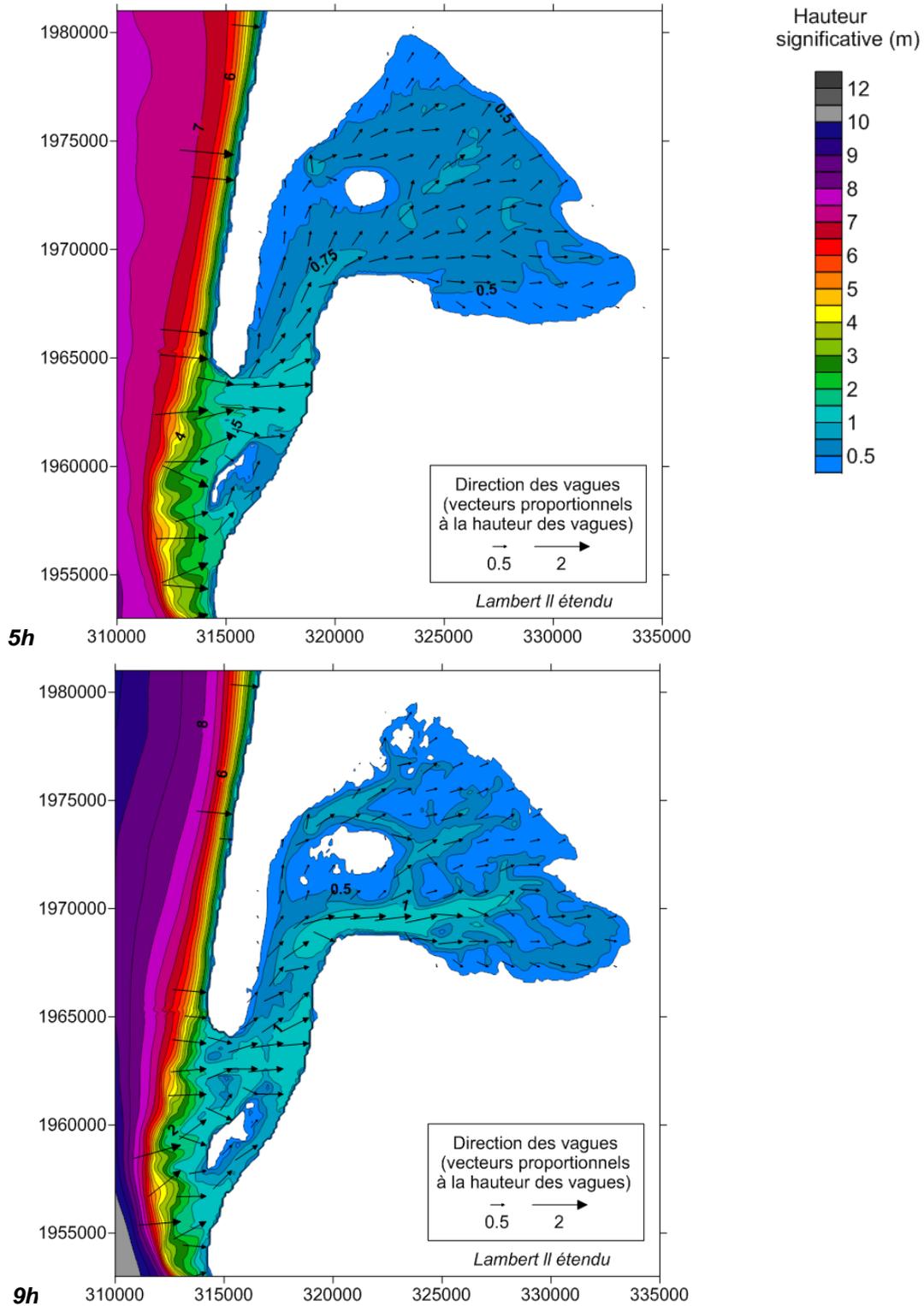


Figure 30 : Hauteur et direction des vagues simulées par SWAN pour la tempête Klaus, le 24/01/2009 à 5h (niveaux d'eau max) et à 9h (pic de vent)

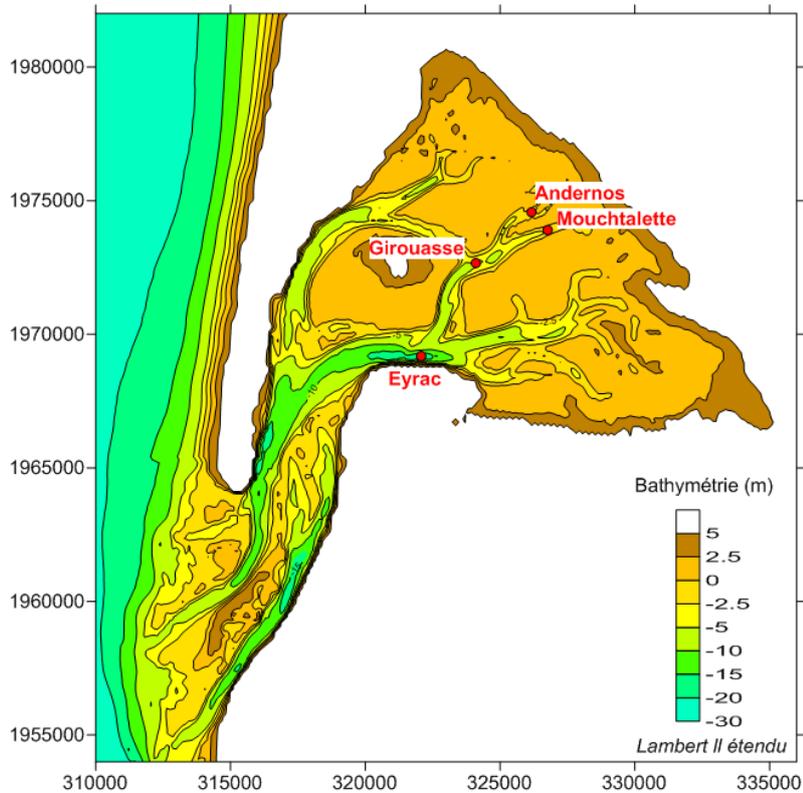


Figure 31 : Localisation des points pour lesquels les hauteurs d'eau simulées par SWAN ont été extraites

D'autre part, les hauteurs maximales de clapot sont de l'ordre de 1.2 m dans le chenal du Teychan, de 0.90 m dans le chenal de Girouasse et de 0.80 m dans les chenaux de Mouchtalette et d'Andernos.

Enfin, les périodes pic du clapot sont de 3.9 s dans le chenal du Teychan et de 2.9 s dans les chenaux de Girouasse, d'Andernos et de Mouchtalette (Figure 33).

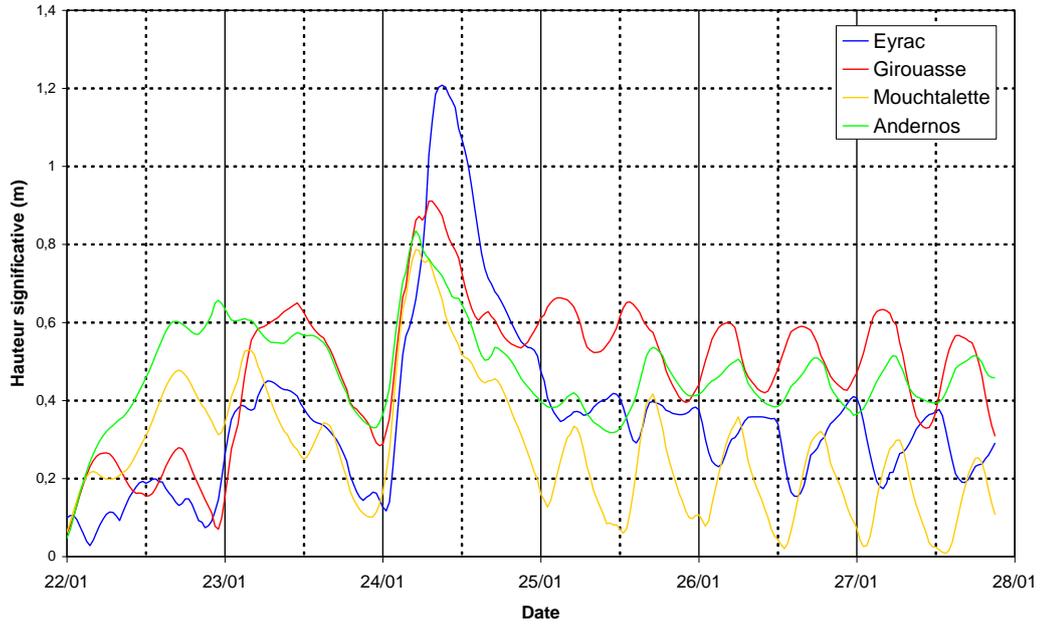


Figure 32 : Hauteur significative des vagues (en mètres) simulées par SWAN pour la tempête Klaus aux points : Eyrac, Andernos, Girouasse, Lucasson et Mouchtalette

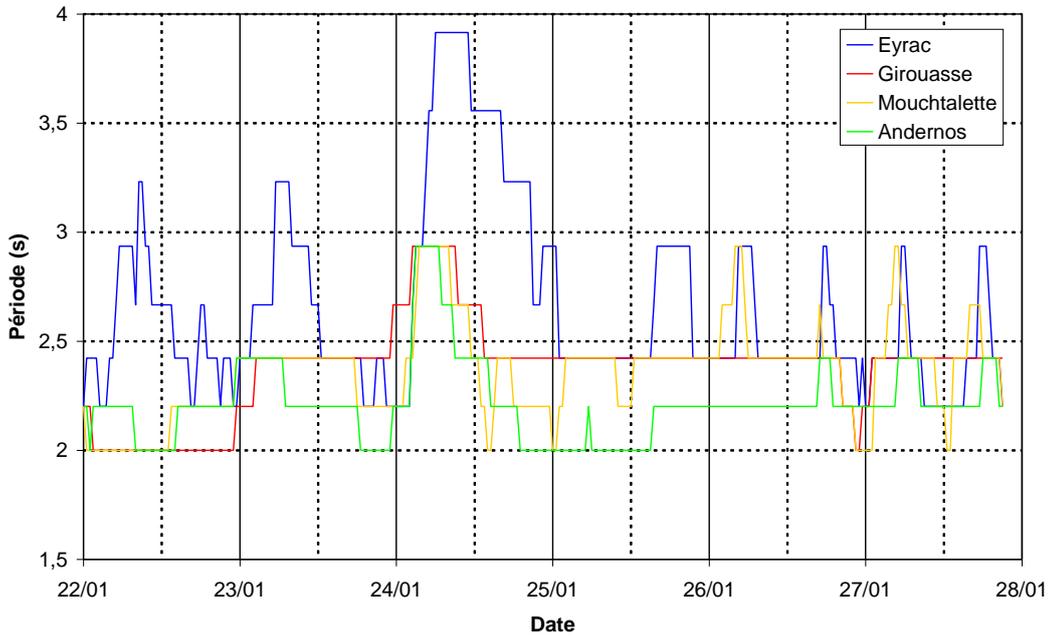


Figure 33 : Périodes des vagues de hauteur significative (en seconde) simulées par SWAN pour la tempête Klaus aux points : Eyrac, Andernos, Girouasse, Lucasson et Mouchtalette

4.2. SIMULATION DE XYNTHIA (27-28/02/2010)

4.2.1. Météorologie et niveaux de marée

Lors de la tempête Xynthia, les vents ont été maximaux entre 2h et 5h le 28/02/2010 et la pleine mer a eu lieu à 5h (Figure 34).

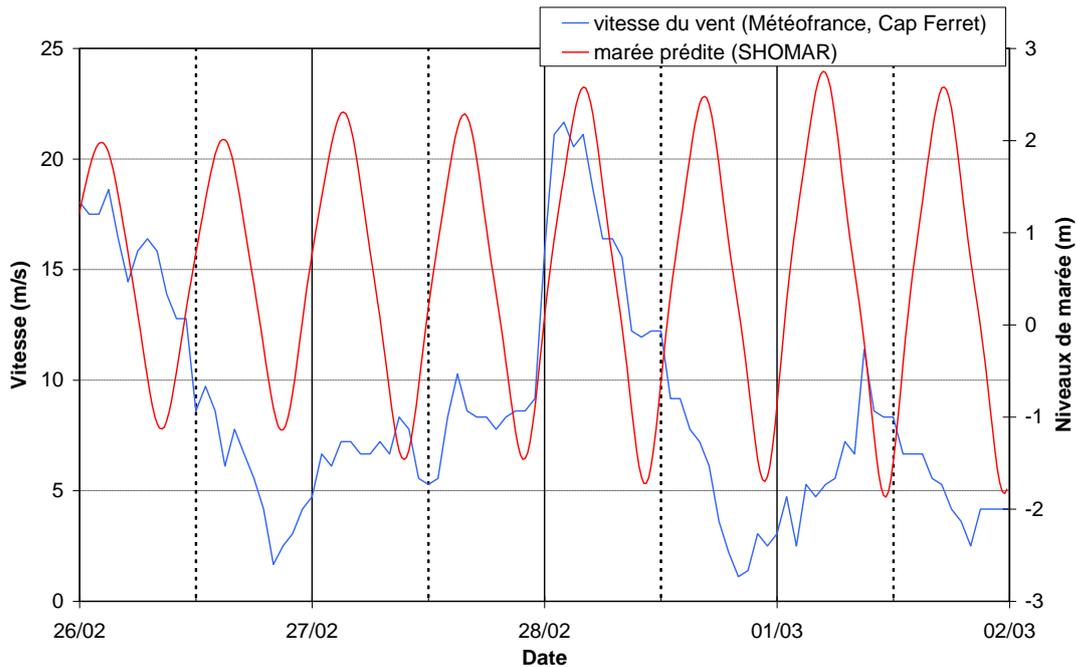


Figure 34 : Vitesses de vent (en km/h) et niveaux de marée (en mètres) lors de la tempête Xynthia (27-28/02/2010)

La comparaison des niveaux de marées prédits par le SHOM et simulés par MARS (Figure 35) met en évidence une bonne synchronisation et une précision satisfaisante de ± 0.10 m pour la pleine mer et ± 0.20 m pour la basse mer.

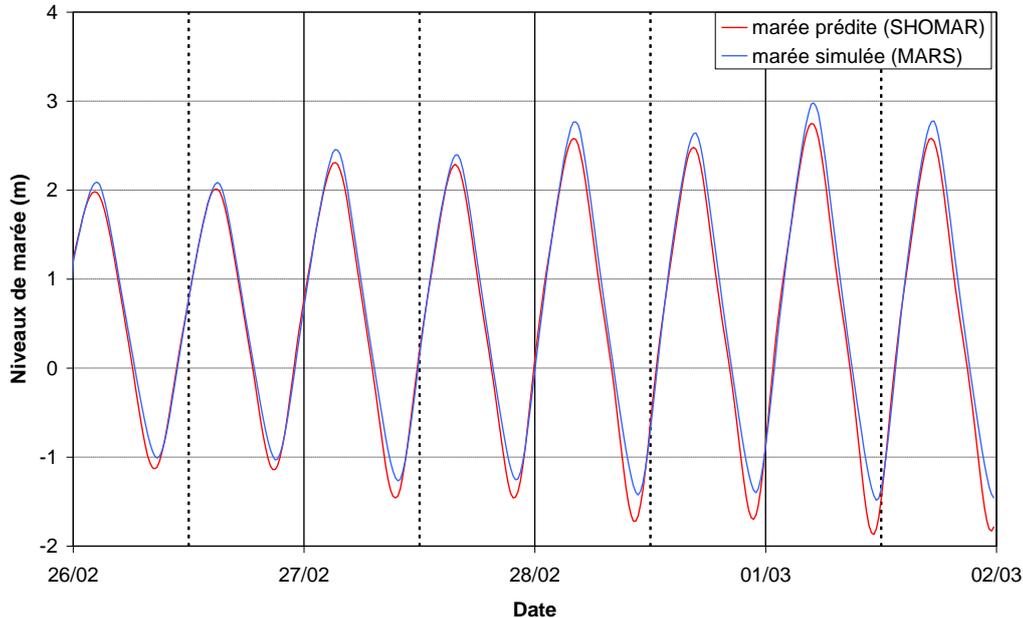


Figure 35 : Comparaison des niveaux de marée prédits par le SHOM (données SHOMAR) et des niveaux de marée simulés par MARS pour la tempête Xynthia (27-28/02/2010)

4.2.2. Altitude du plan d'eau et circulation à l'intérieur de la lagune

Les altitudes du plan d'eau simulées par MARS sont bien en phase avec les altitudes du plan d'eau mesurées au marégraphe d'Eyrac (Figure 36). Ces altitudes sont maximales le 28/02/2010 à 5h au marégraphe d'Eyrac et à 5h15 pour la simulation MARS.

A Eyrac, l'altitude maximale simulée (sans setup) est de 2,9 m alors que l'altitude enregistrée est de 3,48 m (Figure 37). A cette étape de la modélisation, la surcote liée aux vagues (setup) n'est pas encore simulée. Notons également que les vents GFS utilisés pour la simulation de Xynthia génèrent une sous-estimation des altitudes du plan d'eau (cf. chapitre 3.1.1, Validation des données météo). Cela explique une partie de la différence observée entre les altitudes simulées et mesurées, qui atteint une soixantaine de centimètres.

A Andernos-les-Bains, l'altitude maximale du plan d'eau simulée lors de la tempête Xynthia est de 3.23 m, soit 0.33 m de plus qu'à Eyrac (Figure 37). Cette altitude probablement sous-estimée (comme celui d'Eyrac) est supérieure de 0.15 m à celle simulée lors de la tempête Klaus à Andernos-les-Bains. En revanche, la différence entre les altitudes maximales du plan d'eau à Eyrac et à Andernos-les-Bains est du même ordre de grandeur pour les 2 tempêtes (0.38 m lors de Klaus).

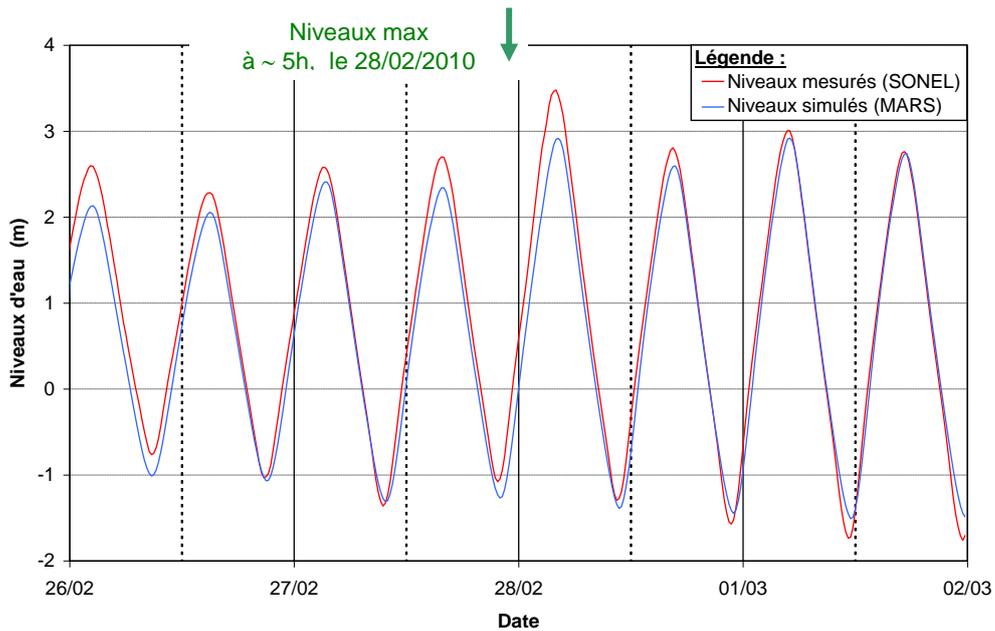


Figure 36 : Comparaison des variations de l'altitude de la surface de la mer mesurées par le marégraphe d'Eyrac (SONEL) et des variations de l'altitude de la surface de la mer simulées par MARS à Eyrac pour la tempête Xynthia (27-28/02/2010)

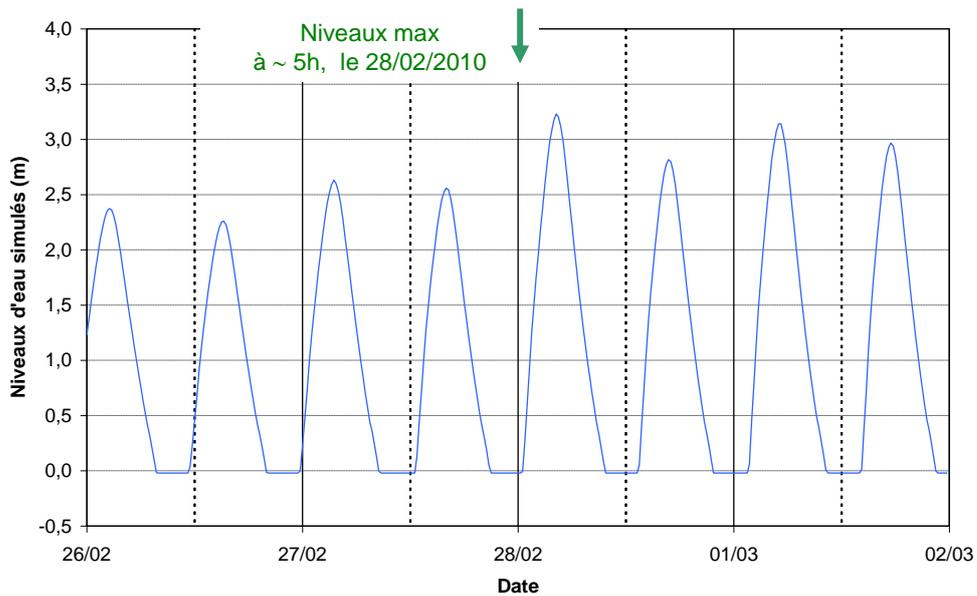


Figure 37 : Variations de l'altitude de la surface de la mer (hauteur de marée + surcote atmosphérique) simulée par MARS à Andernos pour la tempête Xynthia (27-28/02/2010)

Dans le cas de Xynthia, le pic de la tempête a lieu au moment de la pleine mer, la surcote atmosphérique maximale simulée par MARS a donc lieu au moment de la pleine mer. Elle est de l'ordre de 0.15 m (Figure 38).

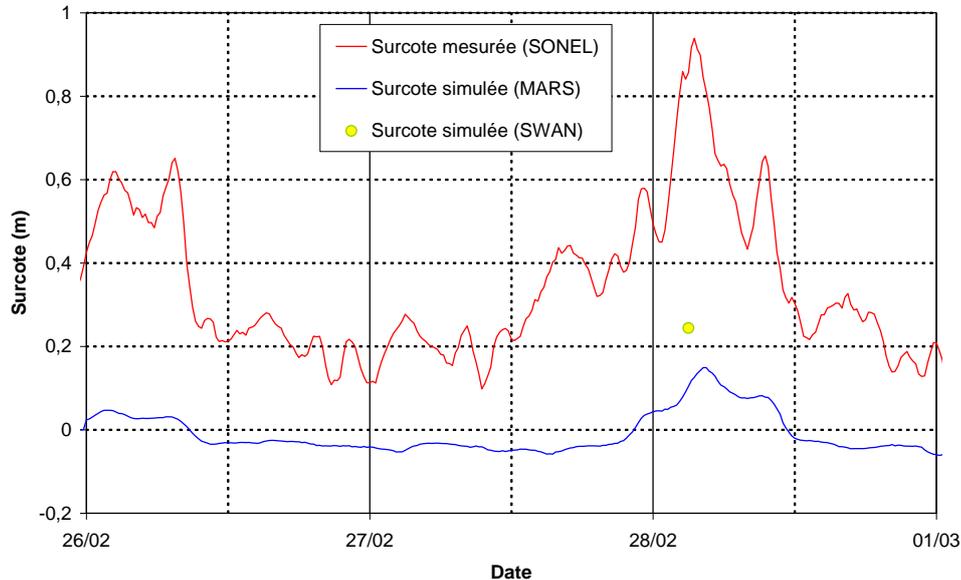


Figure 38 : Surcote atmosphérique simulée par MARS, surcote liée à la houle simulée par SWAN et surcote totale mesurée (SONEL) lors de la tempête Xynthia (27-28/02/2010)

Comme pour Klaus, les résultats de SWAN pour Xynthia mettent en évidence l'influence homogène de la surcote liée à la houle jusqu'en amont de la lagune (Figure 39). Elle est de l'ordre d'une quinzaine de centimètres.

Le clapot génère également une surcote qui peut être estimée inférieure à 0,04 m. Cette hauteur est négligeable par rapport au setup dû à la houle, à la surcote atmosphérique et à la hauteur de marée.

A l'issue des simulations MARS dans lesquelles le setup n'est pas considéré, une différence d'une soixantaine de centimètres a été notée entre les altitudes maximales simulées (2,9 m) et mesurées (3,48 m) à Eyrac. Malgré l'addition du setup ($2,9 + 0,15 = 3,05$ m), **une différence d'une quarantaine de centimètres demeure entre les altitudes simulées et mesurées à Eyrac.**

La surcote atmosphérique simulée par MARS a été évaluée à environ 0,15 m. En additionnant le setup, la surcote totale simulée est de l'ordre de la trentaine de centimètres alors que la surcote totale mesurée est de l'ordre de 0,90 m environ (Figure 38).

Cette sous-estimation d'une quarantaine de centimètres pour les altitudes et d'une soixantaine de centimètres pour la surcote totale est probablement liée au forçage météorologique utilisé. Ces données météo proviennent du modèle atmosphérique GFS dont la résolution temporelle est de 3h (résolution inférieure à celles des données CFSR qui ont servi à simuler l'événement Klaus). Le chapitre 3.1.1 (Validation des données météo) a de plus montré que les données GFS sous-estimaient l'intensité du vent au Cap-Ferret.

L'altitude du plan d'eau simulée à Andernos-les-Bains, déduite en additionnant le setup, est de 3,43 m à 5h le 28/02/2010 soit 0,38 m de plus qu'à Eyrac. Si l'on considère

que cette altitude est sous-estimée d'une quarantaine de centimètres, l'altitude maximale du plan d'eau atteinte à Andernos-les-Bains serait de 3.83 m.

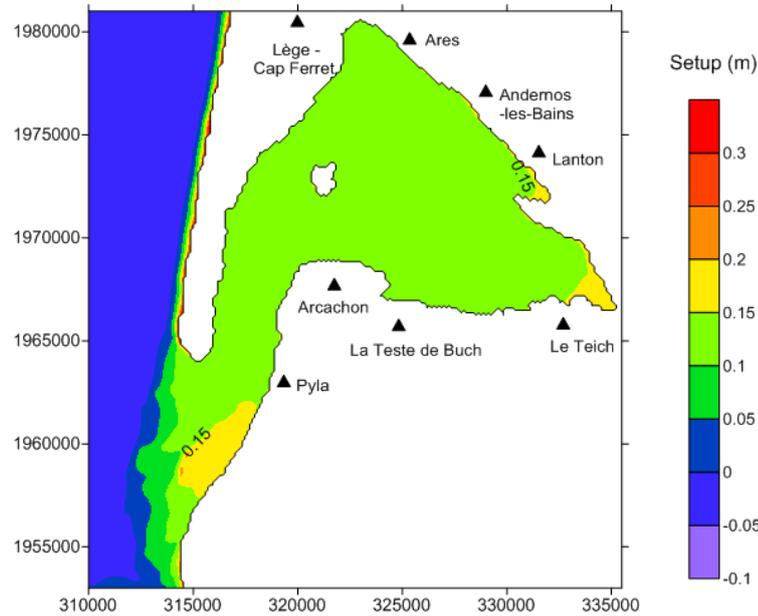


Figure 39 : Surcote liée à la houle (setup, en mètres) simulés par SWAN pour la tempête Xynthia le 28/02/2010 à 5h (niveaux d'eau max)

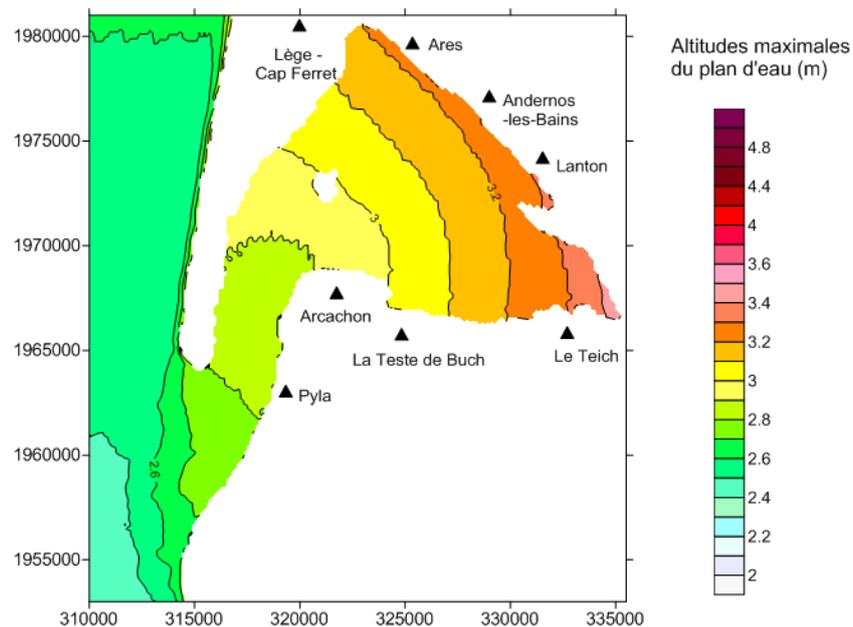


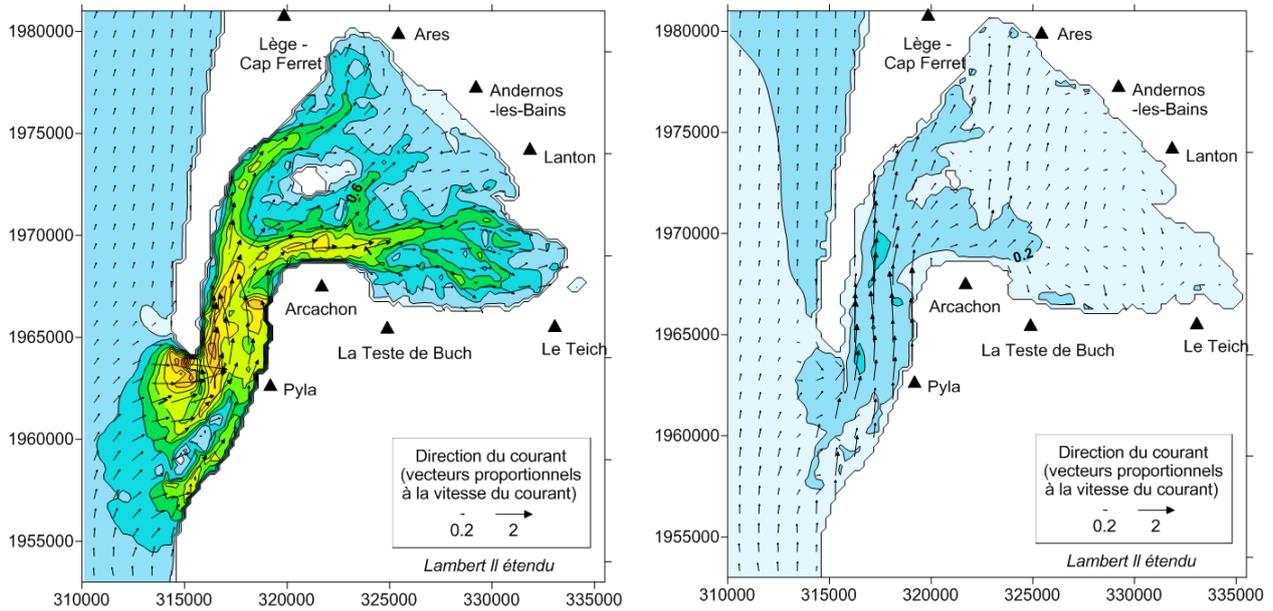
Figure 40 : Altitudes maximales du plan d'eau (niveaux de marée + surcote atmosphérique + surcote liée aux vagues, en mètres) simulées par SWAN pour la tempête Xynthia le 28/02/2010 à 5h (niveaux d'eau max)

La carte des altitudes du plan d'eau à l'intérieur de la lagune lors de Xynthia (Figure 40) permet d'émettre la même remarque que pour Klaus à savoir une différence de plusieurs dizaines de centimètres entre les niveaux d'eau de l'aval et de l'amont de la lagune. Cette différence s'explique également par la poussée des masses d'eau par le vent dans l'axe des chenaux.

La Figure 41 présente 3 cartes des courants dans le Bassin d'Arcachon au moment du flot (2h avant la pleine mer), du jusant (2h après la pleine mer) et de l'altitude du plan d'eau maximale enregistrée (au moment de l'étale).

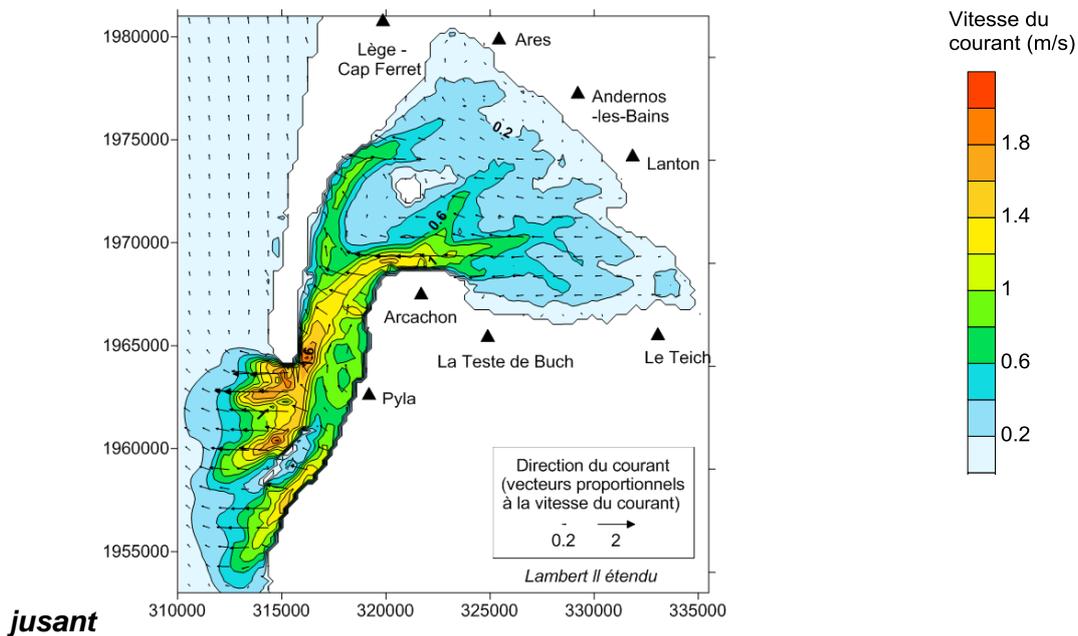
Quel que soit le moment de la marée, les courants ne dépassent pas 0.6 m/s en dehors des chenaux principaux et dans le fond du Bassin et en particulier au droit d'Andernos-les-Bains, ils ne dépassent pas 0.2 m/s.

Comme pour la simulation de Klaus, les courants sont plus élevés au niveau des passes et dans les chenaux principaux du Bassin (chenaux du Piquey, du Teychan, de Mapouchet et de Girouasse). Au flot et au jusant, les vitesses dépassent 1m/s sur un axe sud-ouest – nord-est. Les valeurs maximales de l'ordre de 2 m/s sont atteintes au niveau de la Pointe du Cap-Ferret lors du jusant et du flot. Par rapport à la tempête Klaus, ces courants sont plus importants, du fait d'un coefficient de marée supérieur pour la tempête Xynthia.



flot

étale



jusant

Figure 41 : Vitesse (en m/s) et direction des courants simulés par MARS pour la tempête Xynthia, le 28/02/2010 à 3h (flot), à 5h (niveau d'eau max) et à 7h (jusant)

4.2.3. Agitation à l'intérieur de la lagune

Lors de la tempête Xynthia (27-28/02/2010), les maximums de vent ont été enregistrés entre 2h et 5h, lors du flot et de la pleine mer. La Figure 42 présente une carte des hauteurs et des directions de vagues dans le Bassin d'Arcachon à 5h, lors de la pleine mer et du pic de vent.

Le clapot est maximal (1 m/s) entre la Pointe du Cap-Ferret et Pyla-sur-Mer, ainsi que dans la passe Nord. A l'intérieur du domaine lagunaire, le clapot est maximal à l'ouest d'Arcachon et dans le chenal du Teychan (0.75 m/s). Au droit d'Andernos-les-Bains, le clapot est de l'ordre de quelques dizaines de centimètres (< 0.5 m).

Alors que la houle est globalement orientée ouest – est à l'extérieur du Bassin, le clapot est orienté sud-ouest – nord-est à l'intérieur (Figure 42). Le clapot est de plus, influencé par l'orientation des chenaux. Il longe ainsi la côte dans les chenaux principaux à Arcachon et sur la partie interne de la péninsule du Cap-Ferret et parvient perpendiculairement à la côte via les chenaux secondaires entre la Teste-de-Buch et le Teich, entre Arès et Lanton et à Pyla-sur-Mer.

Le pic de vent s'étant produit au moment de la pleine mer et des niveaux d'eaux maximaux, le fetch était maximal à l'intérieur du Bassin. A la différence de la tempête Klaus, lors de la tempête Xynthia les hauteurs de clapot ont été maximales au même moment (entre 5h30 et 6h le 28/02/2010) dans tous les chenaux observés quelle que soit leur profondeur, leur largeur et leur localisation géographique (Teychan, Girouasse, Andernos et Mouchtalette, cf. Figure 31). De plus les valeurs sont comprises entre 65 et 70 cm (Figure 43).

Les périodes pic du clapot sont de 3.5 s dans le chenal du Teychan et de 2.9 s dans les chenaux de Girouasse, d'Andernos et de Mouchtalette (Figure 44).

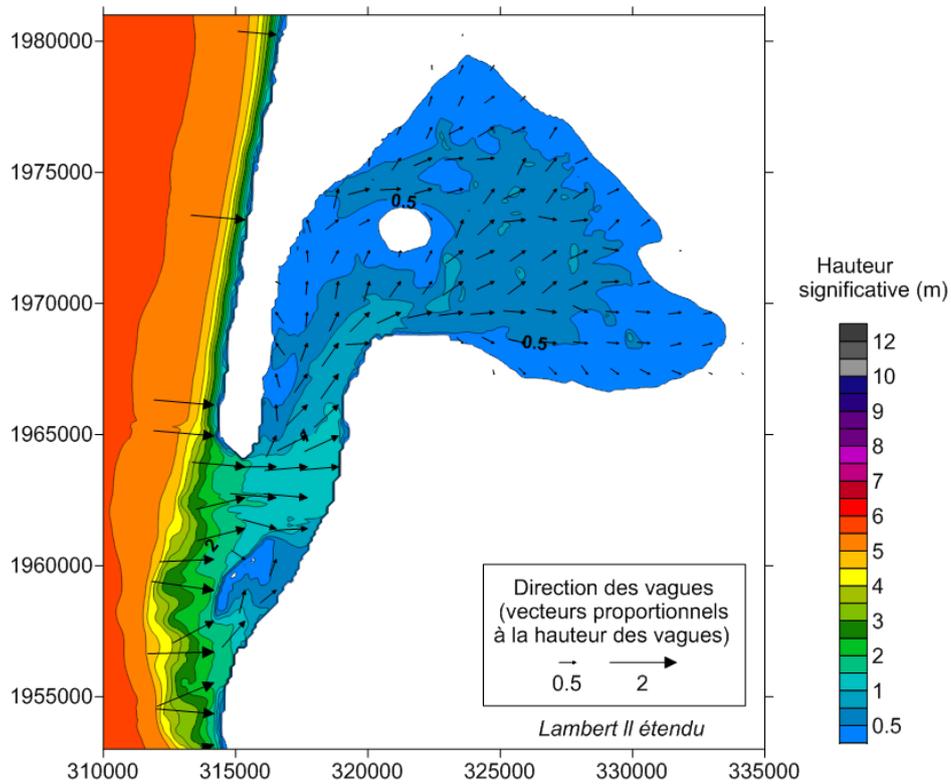


Figure 42 : Hauteur et direction des vagues (houle et clapot en mètres) simulées par SWAN pour la tempête Xynthia le 28/02/2010 à 5h (niveau d'eau max et pic de vent)

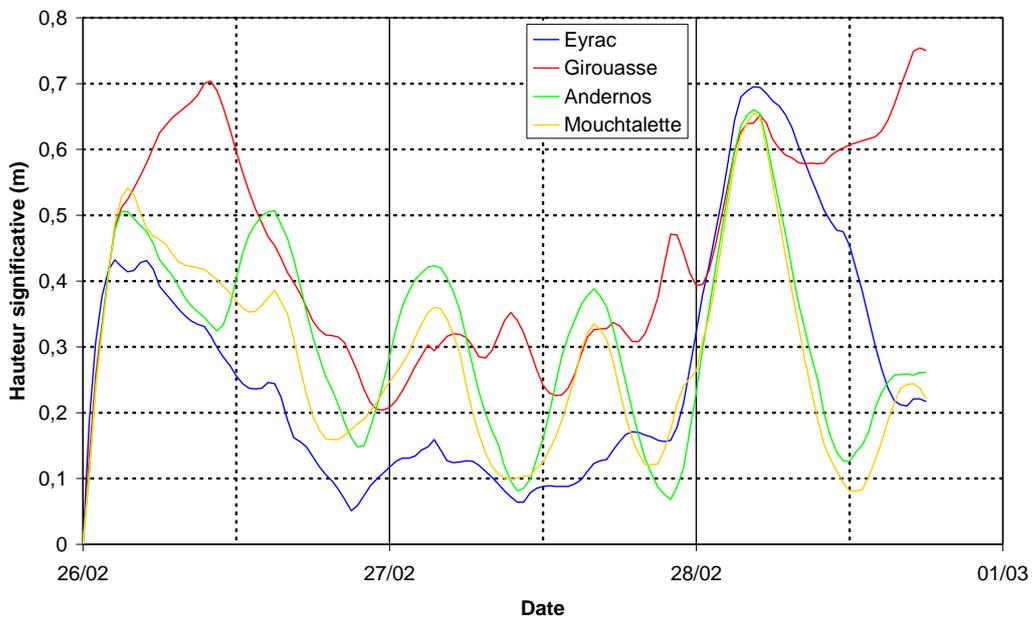


Figure 43 : Hauteur des vagues (m) simulées par SWAN pour la tempête Xynthia aux points : Eyrac, Andernos, Girouasse, Mouchtalette et Lucasson

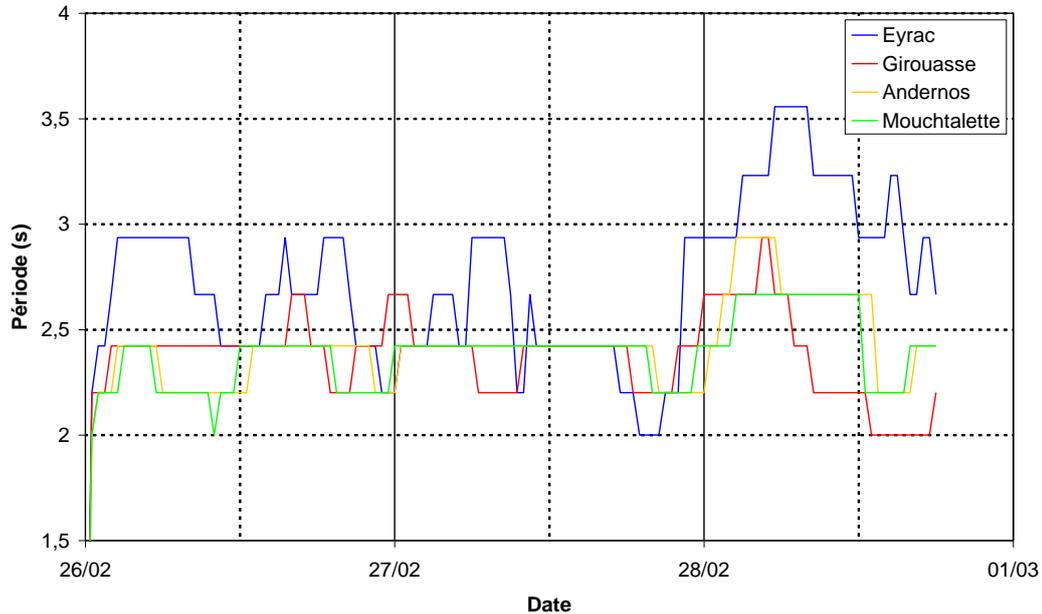


Figure 44 : Périodes des pic des vagues (en seconde) simulées par SWAN pour la tempête Xynthia aux points : Eyrac, Andernos, Girouasse, Lucasson et Mouchtalette (Xynthia le 28/02/2010 à 5h : niveaux d'eau max)

4.3. SIMULATION D'UN EVENEMENT EXTREME

4.3.1. Météorologie et niveaux de marée

Les conditions météorologiques et océanographiques lors de la tempête Klaus (24/01/2009) ont généré une importante surcote de 1,67 m (période de retour de 7,8 ans, rapport BRGM/RP-57462-FR, Mallet et *al.* 2009). Cependant, l'altitude maximale du plan d'eau enregistrée (2,988 m) a été plus faible que celle enregistrée lors des autres tempêtes de l'hiver 2008-2009 dont les surcotes ont été égales ou inférieures à 1 m (périodes de retour inférieures à 2 ans). Cette différence s'explique par le faible niveau de marée dû au faible coefficient (58) en période de morte eau lors du passage de la tempête Klaus. De plus, le pic de vent a été enregistré au jusant, plus de 2h après la pleine mer.

L'altitude maximale du plan d'eau enregistrée (3,48 m) lors de la tempête Xynthia (27-28/02/2010) a été plus importante que celle enregistrée lors de Klaus malgré une surcote plus faible, de 0,90 m. En effet, le passage de Xynthia a coïncidé avec des niveaux importants de marée en période de vive eau. De plus, le pic de vent s'est produit au moment de la pleine mer de coefficient de 102.

Comme le niveau des plus hautes mers astronomiques est de 2,88 m (cote IGN), une somme simpliste (indépendamment des périodes de retour) des niveaux de plus haute mer astronomique et de la surcote observée lors de Klaus à Arcachon-Eyrac donnerait une altitude du plan d'eau de 4,55 m (cote IGN). C'est donc afin d'analyser la conjonction d'une importante

surcote avec une pleine mer de vive eau, qu'a été réalisée la simulation d'un scénario potentiel avec les conditions météorologiques de Klaus et les caractéristiques de la marée de Xynthia (Figure 45 et Figure 46). Les données de forçage météorologiques ont été créées de telle sorte que le pic de la tempête se produise le troisième jour de la simulation.

Les données météorologiques horaires du modèle CFSR et le spectre de marée du SHOM ont été utilisées.

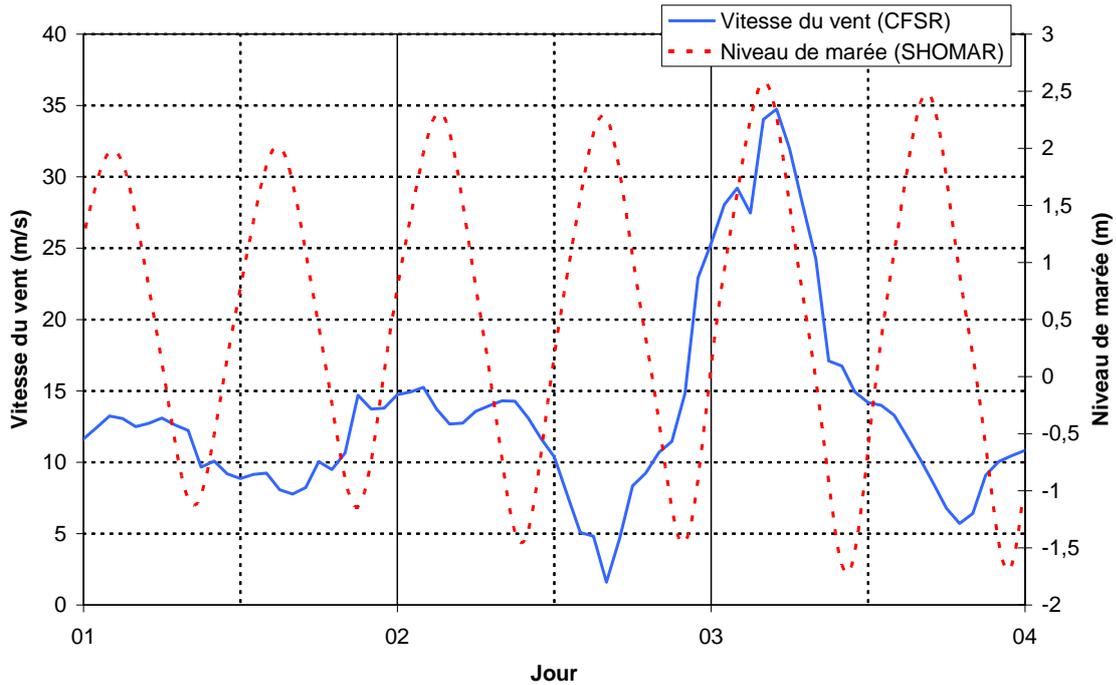


Figure 45 : Vitesses du vent (en km/h) et niveaux de marée (en mètres) utilisés pour la simulation de l'événement extrême

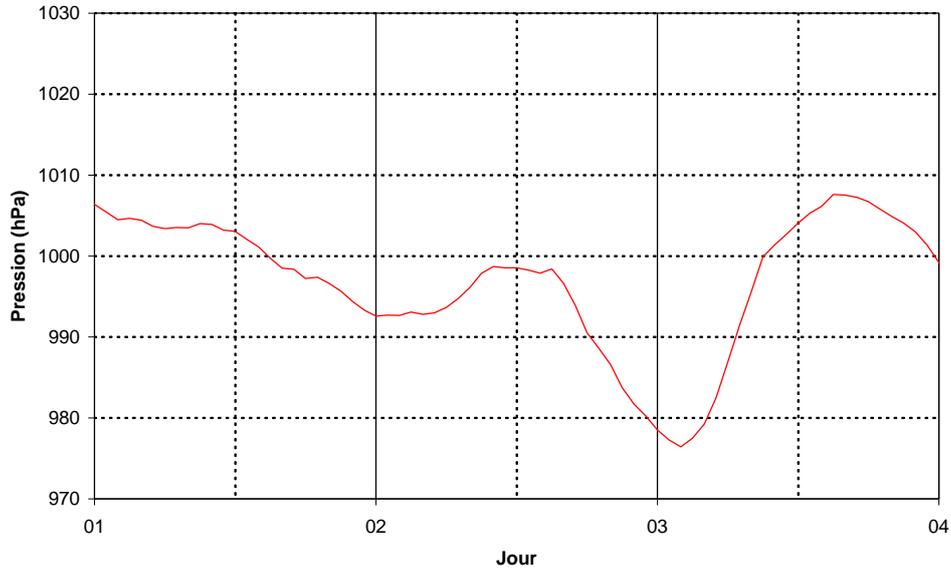


Figure 46 : Pression atmosphérique (en hPa) utilisée pour la simulation de l'événement extrême

4.3.2. Altitude du plan d'eau et circulation à l'intérieur de la lagune

Dans le cas de cet événement extrême, les données de forçage météorologiques ont été créées de telle sorte que le pic de la tempête se produise le troisième jour de la simulation à 5h15. Les altitudes maximales du plan d'eau simulées par MARS sont de 3.7 m à Eyrac et de 4,1 m à Andernos-les-Bains (Figure 47).

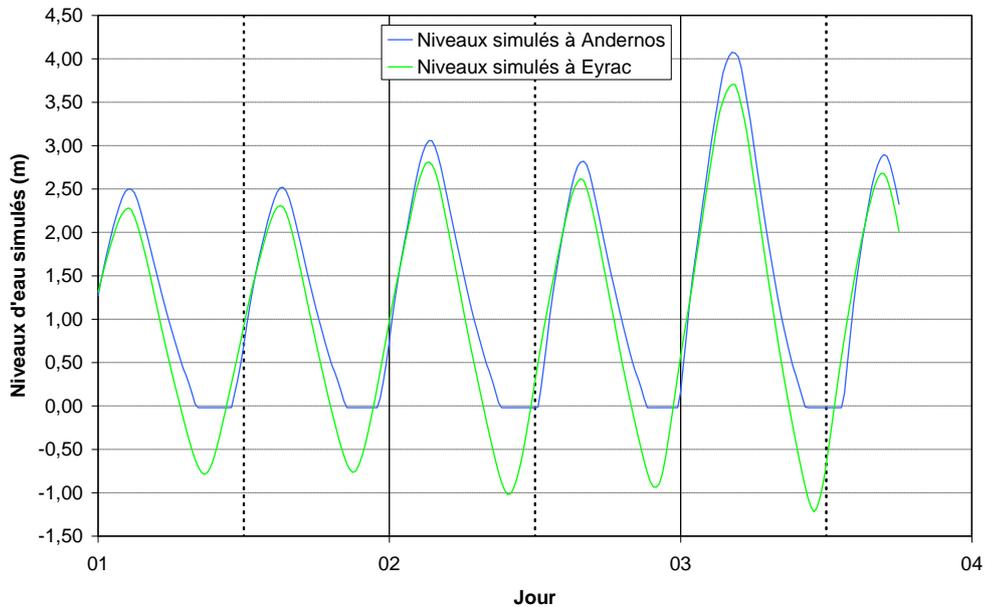


Figure 47 : Altitude du plan d'eau (niveaux de marée + surcote atmosphérique, en mètres) simulés par MARS à Eyrac et à Andernos pour la simulation de l'événement extrême

La surcote atmosphérique simulée par MARS est de l'ordre de 0.90 m et la surcote liée à la houle (setup) est de l'ordre de 0.35 m (Figure 48) à 5h le troisième jour. **La surcote totale simulée par MARS et SWAN pour le scénario imaginé est donc de l'ordre de 1.25 m à Eyrac.**

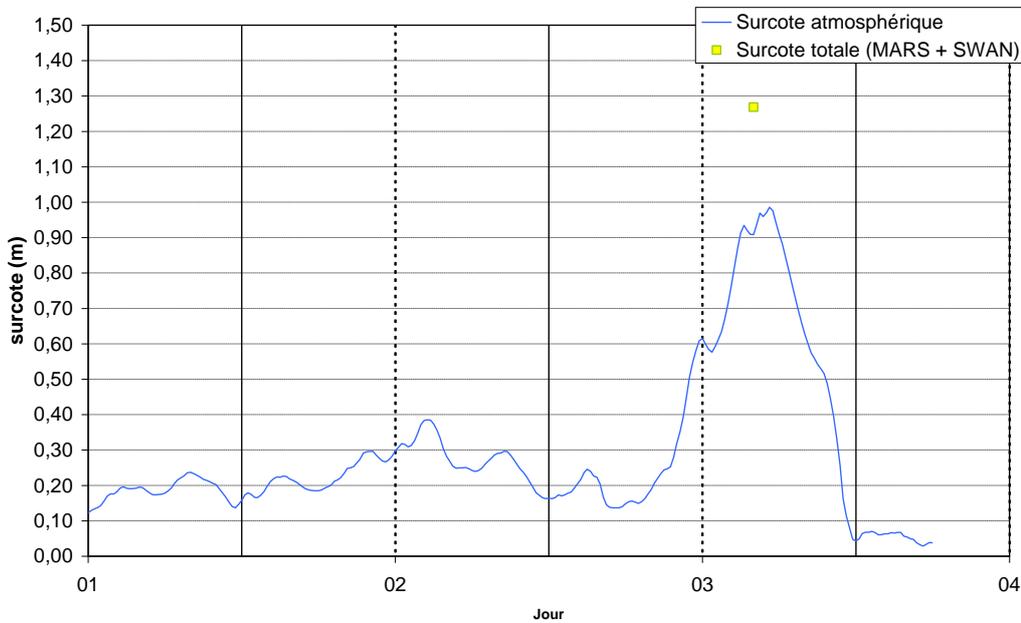


Figure 48 : Surcote atmosphérique simulée par MARS et surcote totale obtenue en additionnant la surcote liée à la houle simulée par SWAN, pour l'évènement extrême à Eyrac

Etant donné que MARS simule les altitudes du plan d'eau en ne tenant uniquement compte de la surcote atmosphérique, les altitudes maximales du plan d'eau à Eyrac et à Andernos sont déduites en additionnant le setup. Pour ce scénario, **les altitudes de la surface de la mer calculées par MARS et SWAN sont donc 4.05 m à Eyrac et 4.45 m à Andernos.**

Comme pour les simulations précédentes (Klaus et Xynthia), les altitudes du plan d'eau sont supérieures en amont de la lagune d'une quarantaine de centimètres par rapport aux altitudes du plan d'eau simulées en aval de la lagune (Figure 50).

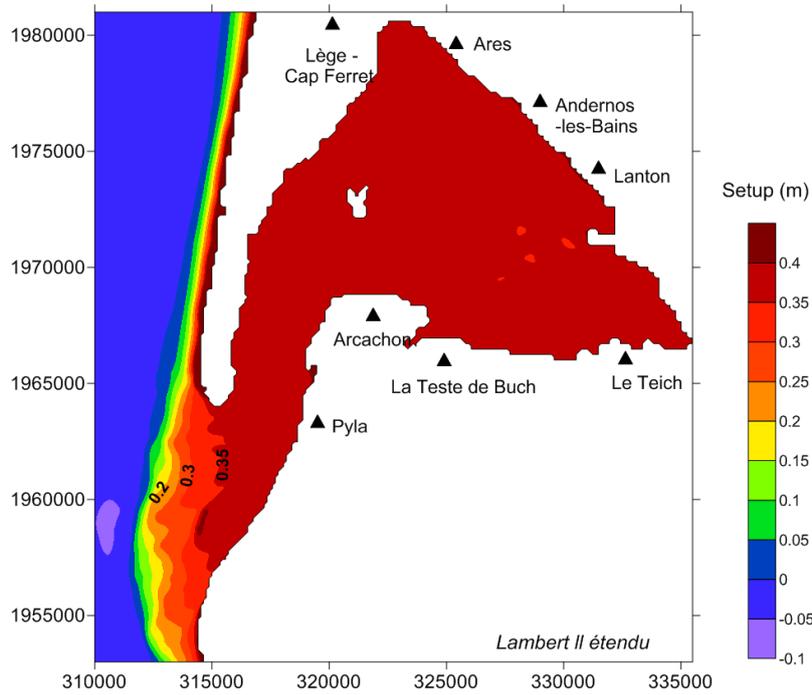


Figure 49 : Surcote liée à la houle (setup, en mètres) simulés par SWAN pour l'événement extrême le troisième jour à 5h (à l'étaie)

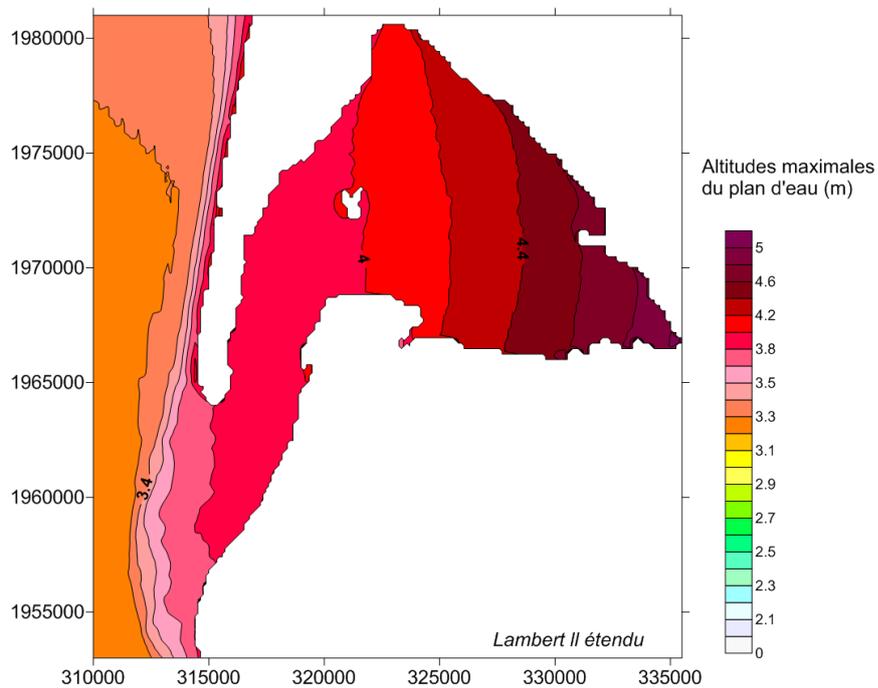
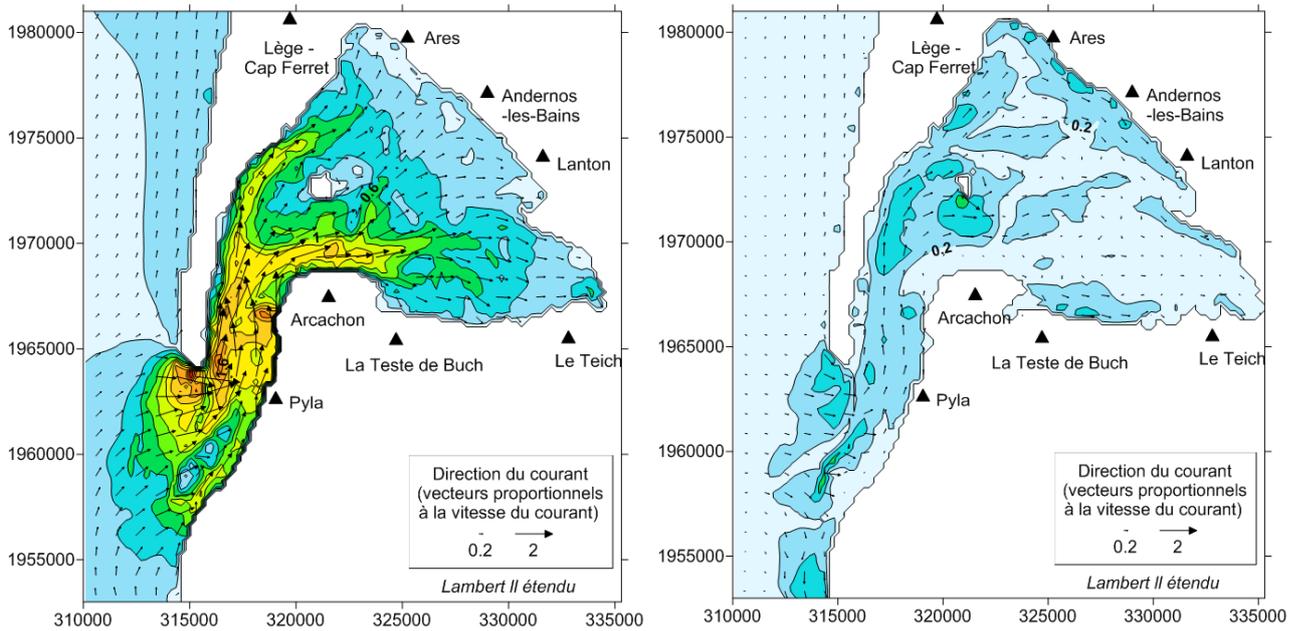


Figure 50 : Altitudes du plan d'eau calculées pour l'événement extrême le troisième jour à l'étaie

La Figure 51 présente 3 cartes des courants dans le Bassin d'Arcachon. Ils sont calculés pour le troisième jour de l'événement simulé, au moment du flot (2h avant la pleine mer), du jusant (2h après la pleine mer) et à l'étape.

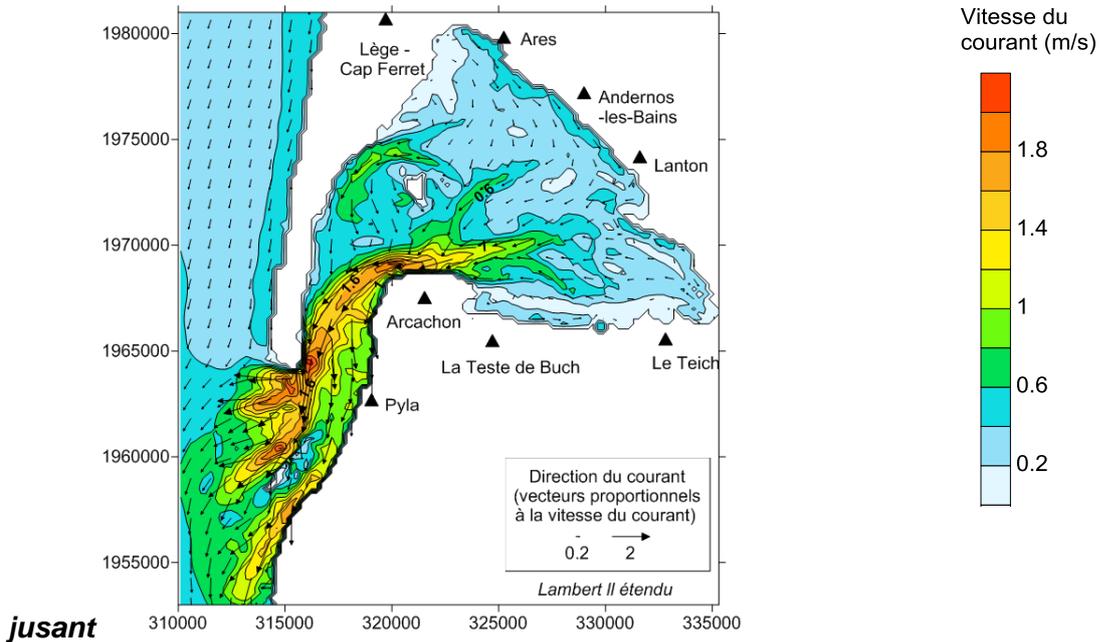
Lors de ces trois situations, les courants ne dépassent pas 0.6 m/s en dehors des chenaux principaux et dans le fond du Bassin, en particulier au droit d'Andernos-les-Bains où ils sont parallèles à la côte et orientés vers le sud.

Comme pour les simulations de Klaus et Xynthia, les courants sont plus élevés au niveau des passes et dans les chenaux principaux du Bassin (chenaux du Piquey, du Teychan, de Mapouchet et de Girouasse). Au flot et au jusant, les vitesses dépassent 1m/s sur un axe sud-ouest – nord-est. Les valeurs maximales atteignent 2 m/s au niveau de la Pointe du Cap-Ferret, ainsi qu'à l'ouest d'Arcachon lors du jusant. Les courants suivent la direction des chenaux et sont donc parallèles à obliques aux côtes.



flot

étiage



jusant

Figure 51 : Vitesse (en m/s) et direction des courants simulés par MARS pour le scénario extrême, le troisième jour au flot, à l'étiage et au jusant

4.3.3. Agitation à l'intérieur de la lagune

La Figure 52 présente une carte de l'agitation à l'intérieur du Bassin d'Arcachon au moment du pic de la tempête, c'est-à-dire à 5h du troisième jour.

Alors que le clapot est dirigé ouest – est au niveau des passes et de Pyla-sur-Mer, il est globalement dirigé sud-ouest – nord-est à l'intérieur du domaine lagunaire. Le clapot est également influencé par l'orientation des chenaux. Il longe ainsi la côte dans les chenaux principaux à Arcachon et sur la partie interne de la péninsule du Cap-Ferret et parvient perpendiculairement à la côte via les chenaux secondaires entre la Teste-de-Buch et le Teich, entre Arès et Lanton et à Pyla-sur-Mer.

Le clapot est de l'ordre de 0.50 m à proximité d'Andernos-les-Bains. Il est supérieur à 1 m dans les passes, au niveau de Pyla-sur-Mer. Ailleurs, il est compris entre 1 m et 0.50 m.

Pour la simulation de cet évènement extrême, le pic de vent a coïncidé avec la pleine mer. Les hauteurs de clapot maximales ont donc été enregistrées le troisième jour entre 5 et 8h. Ils atteignent 0.70 à 0.80 m dans les chenaux d'Andernos et de Mouchtalette et 0.80 à 0.90 m dans les chenaux du Teychan et de Girouasse (Figure 53).

Les périodes pic du clapot sont de 3.9 s dans le chenal du Teychan, de 2.9 s dans le chenal de Girouasse et de 3.2 s dans les chenaux d'Andernos et de Mouchtalette (Figure 54).

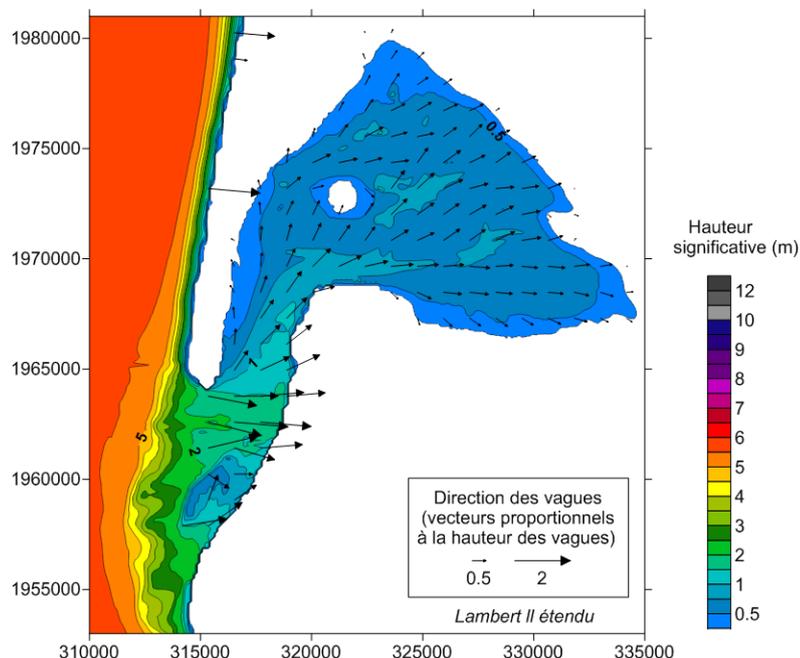


Figure 52 : Hauteur et direction des vagues simulées par SWAN dans le Bassin d'Arcachon (rang2) lors du scénario extrême, le troisième jour à 5h (niveau d'eau max et pic de vent)

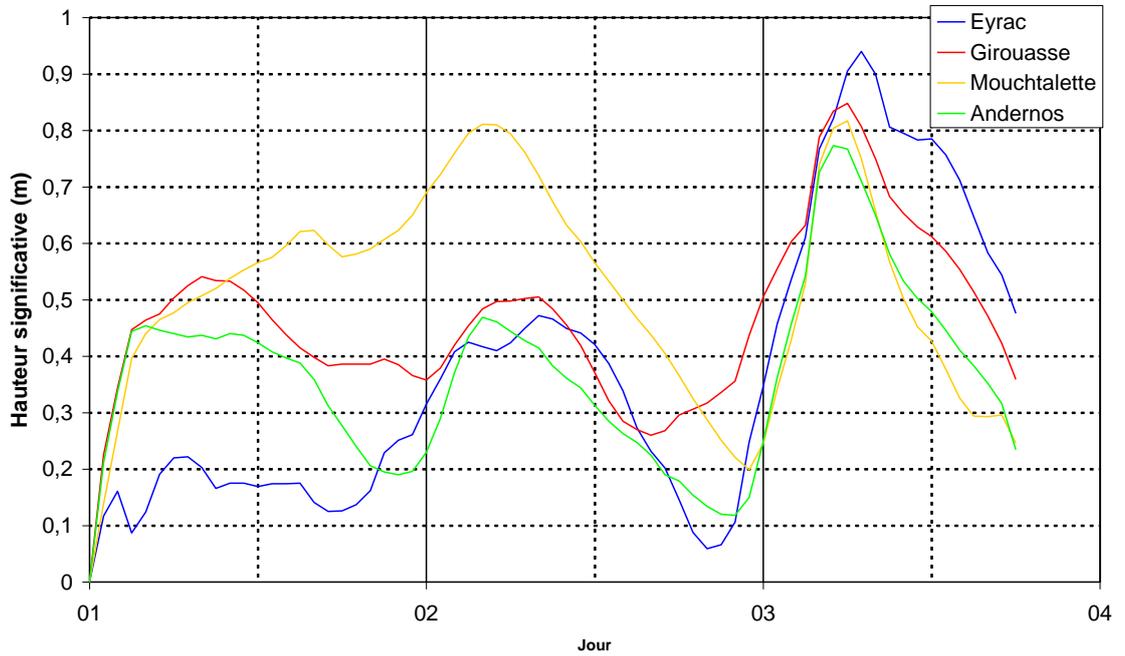


Figure 53 : Hauteur des vagues (m) simulées par SWAN pour un évènement extrême aux points : Eyrac, Andernos, Girouasse, Mouchtalette et Lucasson

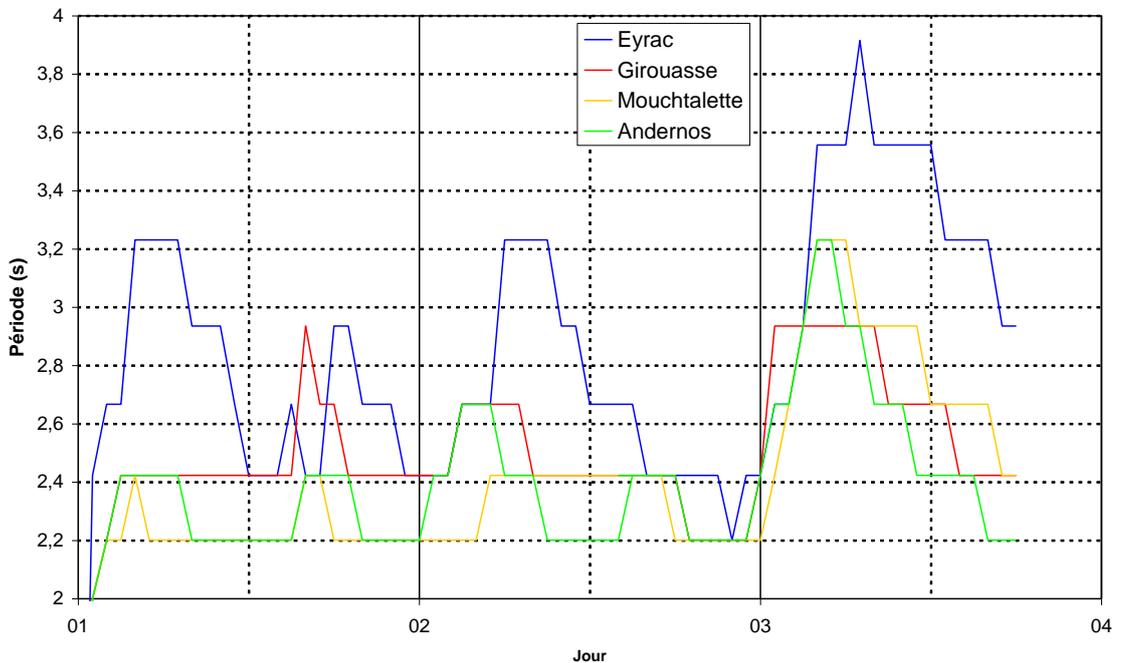


Figure 54 : Périodes des vagues de hauteur significative (en seconde) simulées par SWAN pour le scénario extrême aux points suivants : Eyrac, Andernos, Girouasse, Lucasson et Mouchtalette

4.4. PERIODE DE RETOUR DES EVENEMENTS ETUDIES

4.4.1. Statistique sur le niveau d'eau total mesuré

Ce paragraphe traite de la période de retour des altitudes extrêmes du plan d'eau dans le Bassin d'Arcachon. Un des objectifs est d'estimer la probabilité que des tempêtes comme Klaus et Xynthia touchent à nouveau cette région.

Les données utilisées sont issues des mesures du marégraphe d'Arcachon-Eyrac. Les séries temporelles de hauteurs d'eau sont récupérées sur le site www.sonel.org. Les niveaux de marée sont des prédictions du SHOM (logiciel SHOMAR édition 2010-2011). Les calculs sont effectués sur la période allant du 25/04/2001 au 01/09/2010. Il s'agit de la plus longue période pour laquelle la série temporelle validée est disponible (9 ans et 4 mois). Des données horaires sont utilisées.

La première étape d'une analyse statistique des extrêmes est la constitution d'un échantillon d'événements indépendants et homogènes. Chacun de ces événements est défini par le niveau maximal atteint pendant la tempête. Pour cela, la méthode dite de renouvellement ou POT (Peaks Over Threshold, Mazas et Hamm, 2008) est utilisée. Elle permet à partir des séries temporelles de hauteurs d'eau, de sélectionner les « pics » de tempêtes. Afin de s'assurer de l'indépendance des événements, les pics doivent être distants d'au moins 3 jours.

L'échantillon de variables aléatoires et indépendantes ainsi obtenu est analysé avec une loi de distribution généralisée de Pareto (GPD, Generalized Pareto Distribution), qui permet de calculer le nombre de dépassements d'un seuil au sein de l'échantillon constitué avec la méthode POT. La loi de probabilité est ajustée avec la méthode des moments pondérés (PWM pour Probability Weight Moment). Les intervalles de confiance relatifs à cette loi de distribution sont calculés ce qui permet d'avoir une information sur l'incertitude du calcul de période de retour.

Dans un premier temps, les périodes de retour des altitudes du plan d'eau (marée + surcote) à Arcachon sont étudiées.

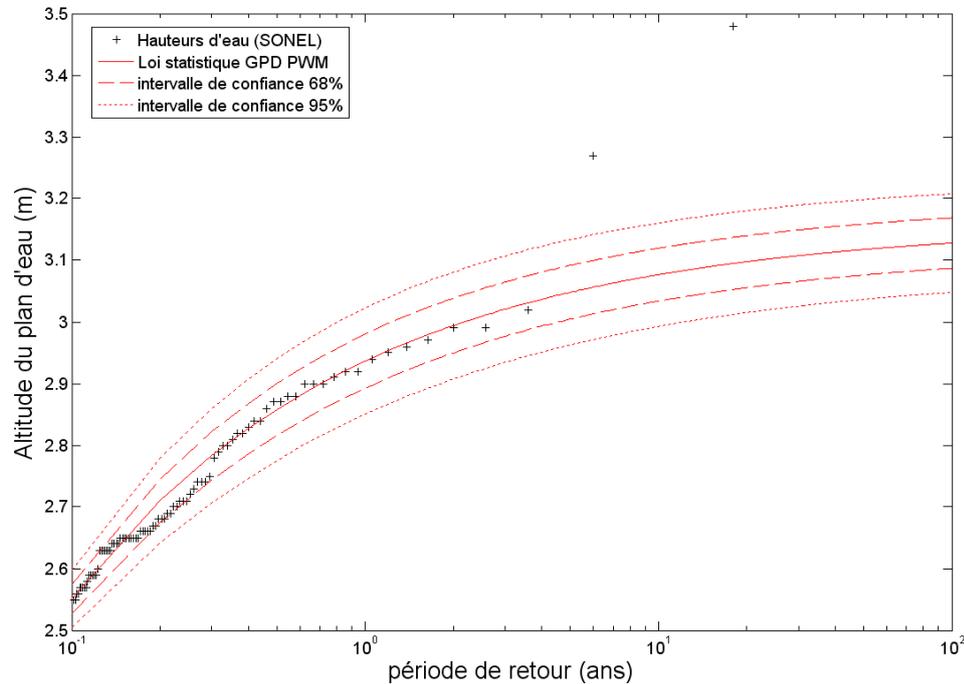


Figure 55 : Période de retour des altitudes du plan d'eau au marégraphe d'Arcachon-Eyrac

La loi statistique calculée s'ajuste bien à l'ensemble des événements. Seuls deux événements ne sont pas décrits par cette loi. Le premier s'est produit le 10/02/2009 avec une altitude de 3.27 m enregistrée au marégraphe (faible surcote mais coefficient de 107). Le second point correspond à la tempête Xynthia, avec une altitude du plan d'eau atteignant 3.48 m à Arcachon. Il s'agit d'événements statistiques extrêmes correspondant à des événements atypiques (« horsains »). La période recouverte par les données (<10 ans) est trop courte pour déterminer avec précision la période de retour de ces événements. Il faut une autre approche pour évaluer la période de retour de ces événements, ou bien disposer de jeu de données plus long.

En hauteur d'eau la période de retour de Klaus est estimée à 0.7 ans. Celle de la tempête Xynthia ne peut pas être définie par cette méthode de renouvellement. La période de retour de cet événement, calculée par cette méthode étant bien supérieure à 100 ans.

4.4.2. Séparation des marées et des surcotes

Comme le raisonnement sur les hauteurs d'eau n'est pas suffisant pour étudier l'occurrence des événements les plus extrêmes, une autre approche a été appliquée. La hauteur d'eau intègre la contribution de la marée et de la surcote. La méthode utilisée ici consiste à effectuer le calcul en analysant les deux contributions séparément et en calculant ensuite la probabilité que les surcotes se produisent conjointement avec

des niveaux de marée élevés. La marée astronomique est un phénomène purement déterministe, qui peut être prédit et calculé avec précision. La courbe de distribution des niveaux liés à la marée est connue et on peut évaluer la probabilité de dépassement d'un niveau donné avec précision. Les surcotes sont des phénomènes non déterministes. La probabilité de dépassement d'un niveau de surcote peut être estimée en ajustant une loi GPD (même procédure que celle utilisée pour les niveaux totaux, voir section 4.4a). Les périodes de retour des surcotes sont illustrées sur la Figure 56. La période de retour de la surcote de l'événement Klaus est évaluée à 40 ans, celle de Xynthia à 1.5 ans.

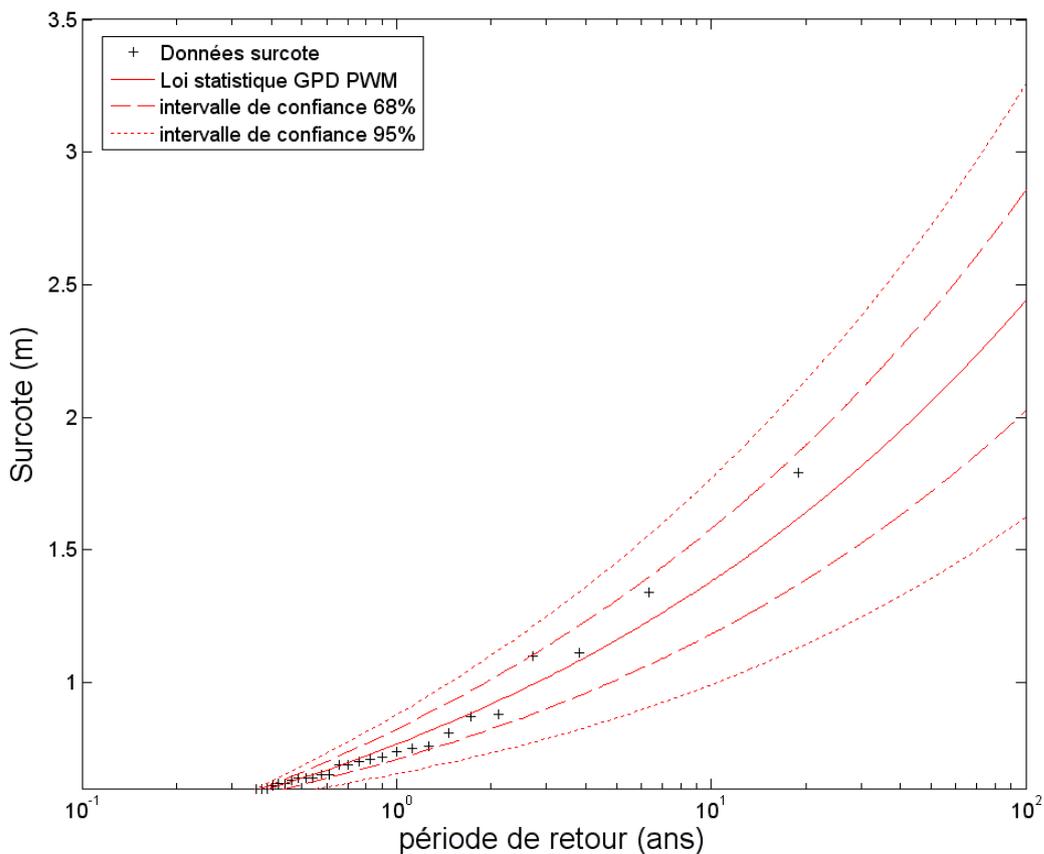


Figure 56 : Période de retour des surcotes au marégraphe d'Arcachon-Eyrac

Pour estimer la période de retour d'un événement extrême pendant lequel la hauteur d'eau dépasse la valeur NM, nous suivons la méthode exposée par Pirazzoli et Tomasin (2007). Cette méthode permet une estimation des périodes de retour pour des courtes séries de mesure. Considérons une hauteur d'eau NM à Arcachon, définie comme la somme d'une surcote S et d'une hauteur de marée AT. Cette hauteur d'eau NM peut être observée pour une de nombreuses combinaisons possibles de surcote S et de marée AT : pour une valeur de surcote $S=NM$ et une hauteur de marée $AT=0$ m,

mais aussi pour une surcote $S=NM-x$ et une hauteur de marée $AT=x$, pour une surcote nulle et une hauteur de marée égale à NM , etc. Finalement, on peut calculer pour chaque valeur de surcote/décote les probabilités d'avoir une hauteur de marée conduisant à dépasser le niveau d'eau NM .

$$P(\text{niveau d'eau} \geq NM) = \sum_{i,j} P(\text{surcote} = S_i) \times P(\text{altitude de la marée} = AT_j), \text{ avec } S_i + AT_j \geq NM$$

La probabilité qu'une tempête au moins aussi forte que Xynthia touche le Bassin d'Arcachon ne se résume donc pas à la probabilité qu'une surcote de 0.90 m se superpose à une altitude de marée d'au moins 2.58 m. Un tel niveau peut-être atteint pour des surcotes plus faibles mais des coefficients de marée élevés. Les périodes de retour calculées par cette méthode sont indiquées dans le Tableau 8.

La période de retour du niveau d'eau atteint pendant la tempête Xynthia est évaluée par cette méthode à 15 ans.

événement	Hauteur d'eau mesurée (m)	Marée SHOM (m)	Surcote (m)	Niveaux de marée supérieurs à l'événement	Période de retour en surcote	Période de retour en niveau d'eau
24/01/2009 04:00 (Klaus)	2.9	1.75	1.15	11.5 %	40 ans	5 mois
28/02/2010 04:00 (Xynthia)	3.48	2.58	0.90	0.2 %	1.5 ans	15 ans
Scénario extrême J3 5:00		2.58	1.25	0.2 %	6 ans	60 ans

Tableau 8 : Hauteur d'eau, marée, surcote atmosphérique à Arcachon-Eyrac et période de retour des événements.

Cette approche présente plusieurs limites. Le calcul des probabilités suppose que les deux phénomènes (propagation de la marée et de la surcote) sont totalement indépendants ce qui reste à vérifier. Compte tenu de la configuration du bassin (faible pente), il est en effet probable que le niveau de marée influe sur la propagation de la surcote. Les modèles numériques mis en place pour ce projet ont aussi montré que les phénomènes ne pouvaient être considérés comme indépendants. En prenant des forçages météorologiques identiques pour des coefficients de marée différents, des valeurs de surcotes différentes sont obtenues (exemple entre les surcotes calculées pour l'épisode Klaus et pour le scénario extrême).

Pour être plus précis il faudrait tenir compte d'une fonction de densité, traduisant la répartition des surcotes en fonction des hauteurs de marée.

Une des autres limites de la méthode vient du fait qu'aucune considération temporelle n'est prise en compte. Pour le calcul des périodes de retour des séries temporelles annuelles sont utilisées alors que les tempêtes les plus intenses qui touchent le littoral aquitain se produisent essentiellement pour les mois d'hiver. Pour aller plus loin dans l'analyse il faudrait travailler sur des données hivernales. En mélangeant des données d'hiver et d'été, des réserves sur l'homogénéité des événements considérés sont mises en évidences.

Les données servant à calculer les périodes de retour ont un échantillonnage horaire. Ce pas de temps permet de décrire assez précisément la dynamique des surcotes pendant la plupart des tempêtes. Cependant Xynthia a été un phénomène très soudain. L'échantillonnage n'a probablement pas été suffisant pour estimer le pic de surcote.

En outre, si la méthode de dissociation des phénomènes (marée/surcote) ne permet pas de donner avec certitude la période de retour des événements extrêmes, elle fournit beaucoup de renseignements sur les probabilités d'avoir des hauteurs d'eau extrêmes sur le bassin. Les niveaux extrêmes atteints pendant la tempête Xynthia sont dus à la conjonction d'événements peu probables. Si les valeurs de marée et de surcotes n'étaient pas particulièrement extraordinaires, les pics de marée et de surcotes se sont produits en même temps, rendant l'événement exceptionnel.

4.5. SYNTHÈSE GÉNÉRALE DES RÉSULTATS DE SIMULATION

Dans cette présente étude, trois simulations ont été réalisées afin de reproduire deux événements de tempête exceptionnels Klaus et Xynthia et afin de créer un événement extrême virtuel. La tempête Klaus (24/01/2009) présente la particularité d'avoir généré des vents violents dont la vitesse moyenne à l'altitude 10 m a atteint 35 m/s, 4h après la pleine mer. A la différence, la tempête Xynthia (27-28/02/2010) a généré des vents moins violents dont les vitesses maximales de l'ordre de 22 m/s se sont produites au moment du flot et de la pleine mer de vive eau (coefficient 102). L'évènement virtuel simulé a donc combiné les caractéristiques extrêmes des tempêtes de 2009 et 2010, à savoir les vents de Klaus et les niveaux de marée de Xynthia.

A l'issue des simulations, les altitudes maximales du plan d'eau simulées à Andernos-les-Bains sont de :

- 3.28 m à 5h le 24/01/2009 (Klaus), soit 40 cm de plus qu'à Eyrac et pour une surcote totale simulée de l'ordre du mètre. A 9h au moment du pic de la tempête, la surcote totale simulée est de 1.6 m. Les résultats de simulation à Eyrac sont en accord avec les mesures (données SONEL) ;
- 3.83 m à 5h le 28/02/2010 (Xynthia), soit 0.38 m de plus qu'à Eyrac et pour une surcote totale simulée de l'ordre de 0.80 m. Ces résultats ont été corrigés afin de tenir compte de la sous-estimation de 0.40 à 0.50 m observée à Eyrac, probablement en raison de la résolution temporelle insuffisante des données météorologiques utilisées (données GFS toutes les 3h) ;
- 4.45 m lors du pic de la tempête d'un événement extrême, soit 0.40 m de plus qu'à Eyrac et pour une surcote totale simulée de l'ordre de 1.2 m.

Les altitudes du plan d'eau pour Arcachon-Eyrac sont rappelées dans le Tableau 14 (en Annexe 6).

Dans son étude de novembre 2009 réalisée à la demande du SIBA, la SOGREAH a fourni l'altimétrie (niveau NGF) de la promenade, des perrés et des murets de rehaussement du quartier du Mauret à Andernos-les-Bains, qui a été victime de submersion marine lors des événements Klaus et de Xynthia (SOGREAH, 2009). Le linéaire concerné a une longueur de 1 170 m. L'altitude de la promenade varie entre 3.3 m et 4 m et celle de l'arase du muret de protection varie entre 4.3 m et 3.94 m.

Lors des événements de Klaus et Xynthia, la simulation montre que les altitudes du plan d'eau (résultants du niveau de marée, de la surcote atmosphérique et de la surcote liée à la houle) ont été inférieurs à l'altitude de l'arase du muret. En revanche, la simulation montre également un clapot de l'ordre de 0.50 m et perpendiculaire à la côte au niveau d'Andernos-les-Bains. Il est important de considérer le runup, c'est-à-dire la hauteur d'eau maximale au-dessus du niveau d'eau (lors de la tempête) lié au flux et au reflux du clapot, appelé le jet-de-rive. Une submersion marine se produisant soit par rupture d'un cordon dunaire ou d'un ouvrage, soit par débordement soit par

franchissement par paquets de mer, il est probable que ce dernier processus soit à l'origine de la submersion à Andernos-les-Bains dans le cas de Klaus et Xynthia.

Dans le cas de l'évènement extrême, l'altitude du plan d'eau maximale atteinte dépasse l'arase du muret actuel. Il y aurait donc une submersion marine par débordement des ouvrages.

Dans les chenaux localisés au droit d'Andernos-les-Bains (chenaux de Mouchtalette et d'Andernos), le clapot atteint 0.80 m lors de Klaus, 0.65 m lors de Xynthia et 1 m lors de l'évènement extrême.

Les courants simulés lors des tempêtes Klaus et Xynthia et lors de l'évènement extrême au droit d'Andernos-les-Bains, sont globalement parallèles à la côte et orientés vers le sud. Ils sont inférieurs à 0.4 m/s lors de Klaus, à 0.2 m/s lors de Xynthia et à 0.6 m/s lors de l'évènement extrême.

Ces résultats de simulations mettent en évidence :

- **l'influence du niveau de marée sur le fetch et donc sur la formation du clapot.** La simulation de la tempête Klaus a permis de constater que dans certaines zones peu profondes (chenal de Mouchtalette et chenal d'Andernos), les hauteurs de clapot avaient été maximales avant le pic de la tempête lorsque le niveau de marée était plus haut. Dans ces mêmes zones, lors de la tempête Xynthia et lors de l'évènement extrême, les hauteurs de clapot sont maximales en même temps que le pic de tempête qui a lieu au moment de la pleine mer ;
- **l'influence de la morphologie de la lagune sur l'altitude du plan d'eau.** Les altitudes maximales à Andernos-les-Bains sont supérieures d'une quarantaine de centimètres à ceux d'Eyrac pour les 3 évènements simulés. Cette différence de plusieurs dizaines de centimètres entre l'amont et l'aval de la lagune est due à la poussée des masses d'eau par le vent dans l'axe des chenaux. L'orientation des chenaux favorise donc cette poussée vers l'est et le sud-est de la lagune ;
- **une surcote liée à la houle homogène sur l'ensemble du Bassin.** Bien que la houle du large ne pénètre pas à l'intérieur du domaine lagunaire, les simulations réalisées dans cette étude montrent que dans des conditions extrêmes, l'effet de la houle du large peut être ressenti jusqu'au fond du Bassin avec une amplitude équivalente à celle de zones situées à proximité de l'embouchure ;
- **la part importante de la surcote liée à la houle dans la surcote totale et donc son rôle considérable sur le processus de submersion marine.** En effet, la surcote liée à la houle est de l'ordre de 0.20 m lors de Klaus, de 0.15 m lors de Xynthia et de 0.35 m lors de l'évènement extrême et la surcote atmosphérique est respectivement de l'ordre de 0.80 m, de 0.60 m et de 0.90 m (sous-estimation corrigée) ;
- **l'importance de la précision des données météorologiques pour modéliser la surcote atmosphérique.** Pour la simulation de Xynthia, les données météorologiques du modèle CFSR (modèle couplé océan – atmosphère – continent

– banque, résolution temporelle d'1h) n'étaient pas encore disponibles et la sous-estimation de la surcote totale et du niveau d'eau à Eyrac est attribuée à l'utilisation des données GFS dont la résolution temporelle est de 3h. La simulation à partir des mesures horaires de Météo France provenant du sémaphore de Lège–Cap-Ferret (44°37'54"N, 1°14'54"W) permettra de tester le comportement du modèle avec un autre jeu de données.

5. Conclusions et perspectives

Cette étude représente la troisième et dernière phase d'une expertise réalisée dans le cadre des missions de l'Observatoire de la Côte Aquitaine, à la demande du SIBA et concernant le risque de submersion marine à Andernos-les-Bains. Après avoir, dans les précédentes phases, caractérisé l'évènement climatique exceptionnel du 24/01/2009 (Klaus) et réalisé un catalogue des différents ouvrages de protection contre la submersion marine existants, cette phase avait pour objectif de fournir les éléments nécessaires au dimensionnement d'ouvrages de protection contre la submersion marine à Andernos-les-Bains.

Pour cela, une modélisation numérique robuste a été mise en œuvre. L'utilisation combinée de deux modèles numériques, l'un simulant les niveaux d'eau et les courants (MARS) et l'autre simulant l'agitation (houle, clapot et surcote liée aux vagues, SWAN) a permis de simuler les niveaux d'eau maximaux générés par des évènements climatiques extrêmes. Trois scénarii ont été simulés : la tempête Klaus du 24/01/2009, la tempête Xynthia du 27-28/02/2010 et un évènement virtuel caractérisé par les conditions météorologiques extrêmes de Klaus et les niveaux de marée extrêmes de Xynthia. **L'intérêt de cette méthodologie de modélisation est de calculer les niveaux d'eau maximaux en tenant compte à la fois de la surcote atmosphérique, des niveaux de marée et de la surcote liée aux vagues (setup).** Bien que le setup puisse contribuer considérablement à la surcote totale, de nombreuses études n'en tiennent pas compte en raison de la difficulté à le quantifier.

Les données utilisées pour cette modélisation ont été acquises soit dans le cadre d'échanges avec les partenaires du BRGM et de l'Observatoire soit par accès gratuit sur des sites web (données bathymétriques, données météorologiques, conditions de houle au large et niveaux de marées). Par ailleurs, la simulation des conditions hydrodynamiques durant l'hiver 2006-2007 pour lequel une large base de données a été constituée dans le cadre du projet PNEC sur l'ensemble du Bassin d'Arcachon, a permis de calibrer et valider les modèles MARS et SWAN.

Les principaux résultats mettent en évidence en période de surcote, **des niveaux d'eaux supérieurs d'une quarantaine de centimètres à Andernos-les-Bains par rapport à Eyrac**, situé plus près de l'embouchure. Cette différence résulte de la poussée des masses d'eau par le vent dans l'axe des chenaux vers l'amont de la lagune. L'effet de la houle au large est également souligné car **une surcote de quelques dizaines de centimètres peut être générée jusqu'à l'amont de la lagune.** Cette surcote liée aux vagues peut donc représenter une part considérable de la surcote totale.

A Andernos-les-Bains, les niveaux d'eau maximaux sont de 3.28 m lors de Klaus et de 3.83 m lors de Xynthia. Ces niveaux étant inférieurs à l'altitude de l'arase du muret, l'effet du clapot d'une cinquantaine de centimètres a été souligné. **Il est probable que les épisodes de submersion marine de ces dernières années (2009 et 2010) se**

soient produits suite à un franchissement par paquets de mer. Dans le cas du scénario pessimiste imaginé, l'altitude maximum du plan d'eau à Andernos-les-Bains serait de 4.45 m ; la submersion marine se produirait alors par débordement.

Les simulations réalisées à partir de données météorologiques différentes (GFS ou CFSR) ont montré l'importance de la précision de ces données pour l'évaluation de la surcote atmosphérique. Afin d'améliorer les résultats de la simulation de l'évènement Xynthia, il est envisagé d'utiliser les mesures horaires du sémaphore Lège–Cap-Ferret en attendant que les données horaires du modèle CFSR soient disponibles.

En revanche, la résolution des données de houle au large (WW3) est suffisante pour calculer la surcote liée à la houle à l'intérieur du Bassin d'Arcachon. Le déferlement de la houle ayant lieu au niveau des passes, l'ordre de grandeur des vagues est suffisant pour calculer le setup dans la lagune.

La modélisation réalisée dans cette étude permet de calculer les niveaux d'eau dans le Bassin d'Arcachon avec une résolution spatiale de 235 m. Des données bathymétriques plus précises permettraient d'affiner les résultats dans des zones d'intérêt.

Ces résultats de simulation peuvent être utilisés afin de caractériser l'aléa submersion marine à l'intérieur du Bassin d'Arcachon mais nécessitent une interprétation par un expert. D'autre part, cette modélisation ne prenant pas en compte l'évolution morphologique des passes et des chenaux de la lagune, son actualisation à partir de données bathymétriques plus récentes est à envisager afin de caractériser l'aléa.

Le couplage des modèles MARS et SWAN, plutôt que l'utilisation combinée de ces deux modèles dans cette étude, est envisagé afin de calculer la surcote totale de manière intégrée. Ce couplage est d'ores et déjà fonctionnel et est sur le point d'être opérationnel pour être utilisé systématiquement dans le cadre d'estimation de submersion marine.

Enfin, il est important de souligner que la modélisation s'appuie sur des conditions hydrologiques et morphodynamiques actuelles et que leur évolution dans le contexte de changement climatique actuel n'est pas prise en compte. **L'évolution des périodes de retour des évènements de tempête ainsi que l'évolution morphodynamique du Bassin d'Arcachon liée à l'élévation du niveau marin au cours des prochaines décennies sont à considérer afin de gérer de façon durable le risque de submersion marine.**

6. Bibliographie

Aubié S., B. Daubet, J. Favennec, C. Mallet, J. Mugica avec la collaboration de : A. Bassibey, E. Chartier, A. Chauchoy, J. Devoti, J.F. Deutsch, B. Duport, J.P. Duval, D. Rambaud, V. Raynaud, D. Robert, D. Rosebery, V. Techoueyre, V. Vidal (2010) – Compte-rendu des observations relatives aux impacts de la tempête Xynthia sur le littoral aquitain. Rapport final BRGM/RP-58511-FR, 40 p., 51 fig.

Booij N., I.J.G. Haagsma, L.H. Holthuijsen, A.T.M.M. Kieftenburg, R.C. Ris, A.J. Van der Westhuysen and M. Zijlema (2004) - *Swan Cycle III version 40.41. User's Manual*, 115 p.

CETMEF (2009) – Techniques de protection contre la submersion marine, Bibliographie générale réalisée dans le cadre de l'étude de la protection d'Andernos (33), 21 p.

Delvallée E., Mugica J., R. Pedreros, (en cours) – Modélisation numérique des niveaux d'eau dans le Bassin d'Arcachon. Rapport , 49p., 26 fig.

Garry G., Grasz E., Toulemont M., Levoy F. (1997) - Plans de prévention des risques littoraux (PPR). Guide méthodologique. Ministère de l'Aménagement du Territoire et de l'Environnement et Ministère de l'Équipement, des Transports et du Logement, *La documentation Française*, 54 p.

Jones J.E., Davis A.M. (2006) – Application of a finite element model (TELEMAC) to computing the wind induced response of the Irish Sea. *Continental Shelf Research* 26, 1519-1541

Krien Y., Garcin M., Pedreros R., Le Cozannet G. (2010) – Méthodes pour l'évaluation à l'échelle nationale de l'emprise maximale de l'aléa submersion marine. Rapport BRGM/RP-58101-Fr, 85 p, 28 fig., 5 tab

Lazure P., Dumas F. (2007), An external–internal mode coupling for a 3D hydrodynamical model for applications at regional scale (MARS), *Advances in Water Resources*, doi:10.1016/j.advwatres.2007.06.010

Lyard F., F. Lefevre, T. Letellier and O. Francis (2006) - Modelling the global ocean tides: modern insights from FES2004, *Ocean. Dynamics*, DOI 10.1007/s10236-006-0086-x.

Mallet C., Idier D., Thiébot J., Le Nindre Y.M., Mugica J., Roche A. (2009) – Submersions marines à Andernos-les-Bains (Gironde) et aménagements de protection. Avis et recommandations. BRGM/RP-57462-FR. Rapport final, 20 ill., 10 tab., 52 p.

Mazas F., Hamm L. (2008) Réconcilier théorie et pratique dans la détermination des houles extrêmes, X^{èmes} Journées Nationales Génie Côtier-Génie Civil, 14-16 octobre 2008, Sophia Antipolis

Mugica J., et C. Mallet (2009) – Ouvrages de protection contre la submersion marine à Andernos-les-Bains (33). Avis et recommandations. Rapport BRGM/RP-57902-FR. 17 p., 3 fig.

Parisot J-P., J. Diet-Davansens, A. Sottolichio, E. Crosland, C. Drillon, R. Verney (2008) – Modélisation des agitations dans le Bassin d'Arcachon. JNGCGC, Sophia-Antipolis, 14-16 octobre, 10 p.

Pedrerros R., S. Lecacheux, A. Sottolichio, E. Romieu, D. Idier, P. Salles, M. Delattre (2008) - Caractérisation des vagues dans les passes du Bassin d'Arcachon. JNGCGC, Sophia-Antipolis, 14-16 octobre, 13 p.

Pedrerros R. avec la collaboration de Lecacheux S. et Idier D. (2009) – Etudes des conditions de vagues sur le littoral de la Côte Basque. Rapport final BRGM/RP-57173-FR, 51 p. 30 illus. 3 Tab.

Pirazzoli P. A. et Tomasin A. (2007) Estimation of return periods for extreme sea levels: a simplified empirical correction of the joint probabilities method with examples from the French Atlantic coast and three ports in the southwest of the UK, Ocean Dynamics, 57:91–107, DOI 10.1007/s10236-006-0096-8

Plus M., D. Maurer, J-Y. Stanisière, F. Dumas (2006) – Caractérisation des composantes hydrodynamiques d'une lagune mésotidale, le Bassin d'Arcachon. Rapport IFREMER RST/LER/06.007, 54 p.

Simon B. (1994) Statistique des niveaux marins extrêmes le long des côtes de France, Rapport d'étude n. 001/94, Service Hydrographique et Océanographique de la Marine (SHOM), Brest, France

SOGREAH (2009) – Rédaction d'un programme fonctionnel pour la protection du quartier du Mauret à Andernos-les-Bains, Assistance à maîtrise d'ouvrage. Rapport 4311459-PFD Ind. A, 21 p.

Annexe 1

Hypothèses de calcul de MARS et système d'équations de Saint-Venant

Les hypothèses du calcul de MARS 2D sont les suivantes :

- La composante horizontale du courant ne varie pas beaucoup depuis la surface jusqu'à proximité du fond. Le modèle dans sa version 2D calcule les courants intégrés sur la verticale ;
- La composante verticale du courant est faible (notamment hypothèse de faible déclivité des fonds et de faibles gradients thermo-halins sur la verticale).

Sous ces hypothèses, les lois qui décrivent le comportement physique du système, à savoir le second principe de Newton et la loi de conservation de la masse se traduisent par le système d'équations dit de Saint-Venant :

$$\begin{aligned} \frac{\partial \bar{u}}{\partial t} + \bar{u} \frac{\partial \bar{u}}{\partial x} + \bar{v} \frac{\partial \bar{u}}{\partial y} - f\bar{v} &= -\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p_{atm}}{\partial x} - g \frac{\partial \zeta}{\partial x} - g \frac{D}{2\rho_0} \frac{\partial \rho}{\partial x} + \frac{\partial \left(v_{cisxx} \frac{\partial \bar{u}}{\partial x} \right)}{\partial x} + \frac{\partial \left(v_{cisyy} \frac{\partial \bar{u}}{\partial y} \right)}{\partial y} \\ &+ \frac{1}{\rho_0 D} (\tau_{xz}(\zeta) - \tau_{xz}(-H_0)) \\ \frac{\partial \bar{v}}{\partial t} + \bar{u} \frac{\partial \bar{v}}{\partial x} + \bar{v} \frac{\partial \bar{v}}{\partial y} + f\bar{u} &= -\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p_{atm}}{\partial y} - g \frac{\partial \zeta}{\partial y} - g \frac{D}{2\rho_0} \frac{\partial \rho}{\partial y} + \frac{\partial \left(v_{cisyy} \frac{\partial \bar{v}}{\partial x} \right)}{\partial x} + \frac{\partial \left(v_{cisxx} \frac{\partial \bar{v}}{\partial y} \right)}{\partial y} \\ &+ \frac{1}{\rho_0 D} (\tau_{yz}(\zeta) - \tau_{yz}(-H_0)) \\ \frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{\partial D\bar{u}}{\partial x} + \frac{\partial D\bar{v}}{\partial y} &= 0 \end{aligned}$$

Avec :

u : composante de la vitesse selon Ox (i.e. dans la direction ouest-est, positif vers l'Est)

v : composante de la vitesse selon Oy (i.e. dans la direction Sud-Nord, positif vers le Nord)

ζ : cote de la surface libre (cote par rapport à un zéro de référence)

f : facteur de Coriolis

k : coefficient de Strikler (frottement sur le fond)

H : hauteur d'eau

P_a : pression atmosphérique

τ_x : contrainte au fond suivant la direction x (ici, suivant les parallèles)

τ_y : contrainte au fond suivant la direction y (ici, suivant les méridiens)

ε : viscosité turbulente

ρ : masse volumique

MARS intègre ces équations différentielles de Saint-Venant de manière totalement automatique, quelle que soit la forme du domaine, qui peut d'ailleurs évoluer dans le temps (zones découvrantes, murs immergés, ...).

La résolution des équations se fait :

- par discrétisation spatiale selon une méthode aux différences finies. Ceci revient à calculer sur un domaine les grandeurs physiques en chaque point d'un maillage régulier en longitude et latitude ;
- par discrétisation temporelle : les variables sont calculées à chaque pas de temps du modèle.

Les hypothèses liées à cette formulation impliquent que le modèle sort de son domaine de validité dès que :

- les ondes de surface sont trop courtes devant la hauteur d'eau (typiquement, la houle, de longueur d'onde de plusieurs dizaines de mètres à centaines de mètres, ne peut pas être résolue par les équations de Saint-Venant) ;
- les pentes sont trop fortes (en théorie, les équations de Saint-Venant ne sont valables que pour des pentes faibles, inférieures à 10%) ;
- la configuration étudiée est estuarienne avec des gradients verticaux de température et (ou) de salinité.

Annexe 2

Initialisation et paramétrage de MARS

Maillage

Le maillage de MARS est régulier, les coordonnées géographiques. Pour la présente étude, MARS est composé d'un emboîtement de 3 rangs dont les emprises géographiques et les maillages sont rappelés dans le Tableau 9. Cette construction permet d'obtenir un modèle dont la résolution est de 235 m sur le Bassin d'Arcachon.

Rangs	Latitude	Longitude	Taille de la maille (latitude*longitude)	Nombre de nœuds (latitude*longitude)
0	65°N - 40°N	15°W – 20°E	0.05° * 0.08°	421 * 501
1	45.14°N - 44.22°N	0.87°W - 1.64°E	0.008° * 0.011°	73 * 121
2	44.9°N - 44.35°N	0.95°W - 1.46°E	0.002° * 0.003°	171 * 261

Tableau 9 : Emprises géographiques(WGS84) et maillages des 3 rangs du modèle gigogne, MARS

Durées réelles de simulation

Pour chacun des rangs, la simulation nécessite un temps d'initialisation. Le Tableau 10 présente les durées réelles de simulation de chaque rang pour les 3 évènements.

Rangs	2007	Klaus	Xynthia
0	01/12/2006 au 01/03/2007	01/01/2009 au 31/01/2009	21/02/2010 au 02/03/2010
1	02/12/2006 au 01/03/2007	02/01/2009 au 31/01/2009	22/02/2010 au 02/03/2010
2	03/12/2006 au 01/03/2007	02/01/2009 au 31/01/2009	22/02/2010 au 02/03/2010

Tableau 10 : Durées réelles simulées pour chaque rang et pour chacun des 3 scénarios MARS

Coefficient de frottement

Le principal paramètre de calibration de MARS est le paramètre de frottement représenté par le coefficient de Strickler. Sa plage de variation est en général telle que $20 < K < 60 \text{ m}^{1/3} \text{ s}^{-1}$. Dans cette étude, un coefficient de frottement de $K = 40 \text{ m}^{1/3} \text{ s}^{-1}$ est utilisé de façon uniforme sur le domaine de calcul.

Annexe 3

Equation et propriétés de SWAN

SWAN est basé sur l'équation spectrale de conservation de l'action de la houle qui est résolue suivant un schéma implicite en différences finies (équation 1). Il peut fonctionner en mode stationnaire ou transitoire. Il est formulé en coordonnées cartésiennes (domaine de faible emprise) ou sphériques (pour les petites et grandes échelles), le maillage pouvant être rectangulaire ou curviligne.

$$(1) \quad \frac{\partial}{\partial t} N + \frac{\partial}{\partial x} (c_x N) + \frac{\partial}{\partial y} (c_y N) + \frac{\partial}{\partial \sigma} (c_\sigma N) + \frac{\partial}{\partial \theta} (c_\theta N) = S/\sigma$$

Avec $S = S_{in} + S_{nl} + S_{wc} + S_{bf} + S_{dib}$

Propriétés des modèles	SWAN
Base des formulations	Conservation de l'action de la houle
Domaine de propagation	360°
Théorie de la houle	Linéaire
Stationnaire ou transitoire	Stationnaire/Transitoire
Caractéristiques maillage	Différences finies, cartésien, sphérique, rectangulaire, curviligne
Densité maillage/longueur d'onde des vagues	Indépendant
Dépendance de la qualité des résultats/densité maillage	Faible
Réfraction	Oui
Diffraction	Oui (depuis déc. 2004)
Réflexion	Oui (ouvrages)
Gonflement	Oui
Déferlement	Battjes et Janssen (1978)
Interaction houle-courant	Oui
Interactions vague-vague	Triplet, quadruplet
Génération de la houle (Vent)	Modèles de Phillips, Miles/champs de vent homogènes ou hétérogènes
Dissipation énergie par frottements au fond	Modèle de Hasselman et al. (1973), Collins (1972), Madsen et al. (1988)
Dissipation énergie par moutonnement	Oui
Calcul de la surcote (set-up)	Oui (profil et zone)
Prise en compte d'obstacles	Modèle de Seelig

Tableau 11 : Récapitulatif des propriétés de SWAN

Annexe 4

Initialisation et paramétrage de SWAN

Maillage

Le tableau suivant présente les emprises géographiques et les maillages des 2 rangs de SWAN pour la configuration du Bassin d'Arcachon.

Rangs	Latitude	Longitude	Taille de la maille (latitude*longitude)	Nombre de nœuds (latitude*longitude)
1	43.17°N - 48°N	0.53°E - 3.5°E	0.012° * 0.017°	413 * 178
2	44.9°N - 44.35°N	0.95°E - 1.46°E	0.001° * 0.0015°	341 * 521

Tableau 12 : Emprises géographiques (WGS84) et maillages des 2 rangs de SWAN

Durées réelles de simulation

Le Tableau 13 présente les durées réelles de simulation de chaque rang pour les 3 évènements.

Rangs	2007	Klaus	Xynthia
1	04/12/2006 au 01/03/2007	20/01/2009 au 27/01/2009	25/02/2010 au 28/02/2010
2			26/02/2010 au 28/02/2010

Tableau 13 : Durées réelles simulées pour chaque rang et pour chacun des 3 scénarios SWAN

Spectre de houle

Afin de modéliser la transformation de la houle lors de sa propagation jusqu'au rivage en termes de hauteur, direction et période SWAN utilise un spectre directionnel d'énergie représentatif de l'état de mer (correspondant en général à la superposition de plusieurs trains d'ondes) qui est modifié par les différents processus côtiers (réfraction, diffraction, dissipation, etc.).

Pour construire le spectre initial, SWAN utilise les valeurs de hauteur (Hs), période (Tp) et direction (Dp) de houle renseignées aux limites du domaine, mais aussi des paramètres définissant la forme et le type de spectre. Les paramètres choisis pour cette étude correspondent au spectre de type « JONSWAP », qui correspond à la formulation mathématique la plus connue du spectre de vague.

Il est également nécessaire de préciser l'étalement directionnel qui tient compte de la variation des directions des trains d'ondes composant le spectre par rapport à la direction moyenne. Par exemple, pour une mer bien formée (semblable à la propagation d'une onde monochromatique), l'étalement directionnel atteint seulement

quelques degrés alors que pour une mer désordonnée, il peut atteindre 30 à 50°. Pour décrire ce spectre, nous l'avons décomposé en 30 fréquences allant de 0.04 à 0.05 hz (2 à 25 secondes) et en 36 secteurs de 10° chacun.

Autres paramètres

Pour cette étude, le frottement au fond a été pris en compte. Il a été choisi d'activer ce processus dans SWAN avec la formulation de Madsen car c'est la plus communément utilisée.

Enfin, le calcul est effectué en mode instationnaire.

Annexe 5

Validation des forçages

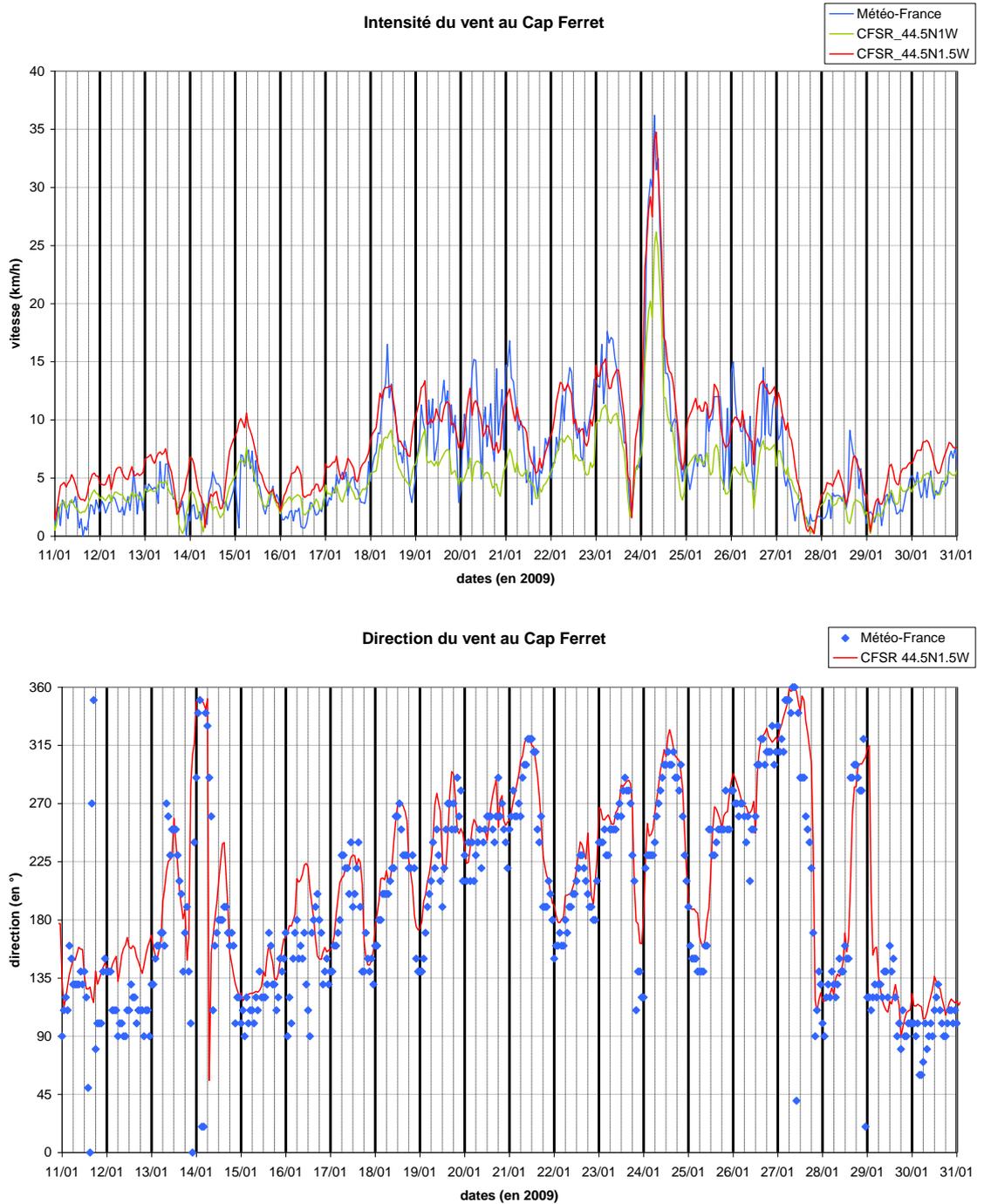


Figure 57 : Comparaison entre les vents de la ré-analyse CFSR et les vents mesurés par Météo-France au Cap-Ferret pendant la tempête Klaus de janvier 2009 (intensité et direction).

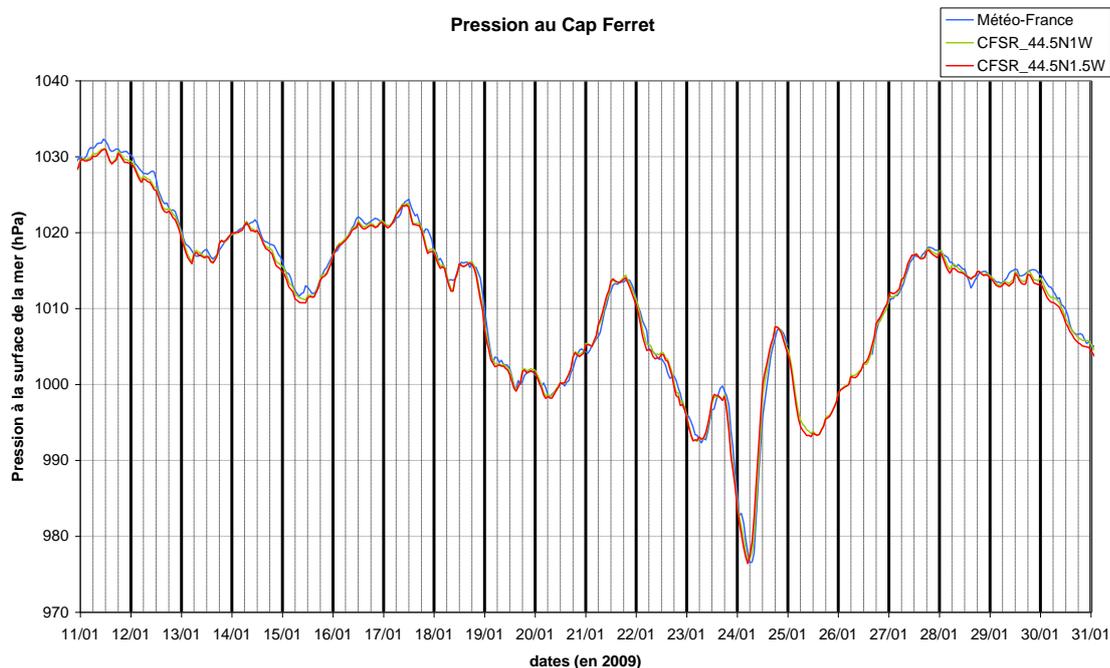


Figure 58 : Comparaison entre les pressions atmosphériques de la ré-analyse CFSR et les pressions mesurées par Météo-France au Cap-Ferret pendant la tempête Klaus de janvier 2009.

Tempete Klaus

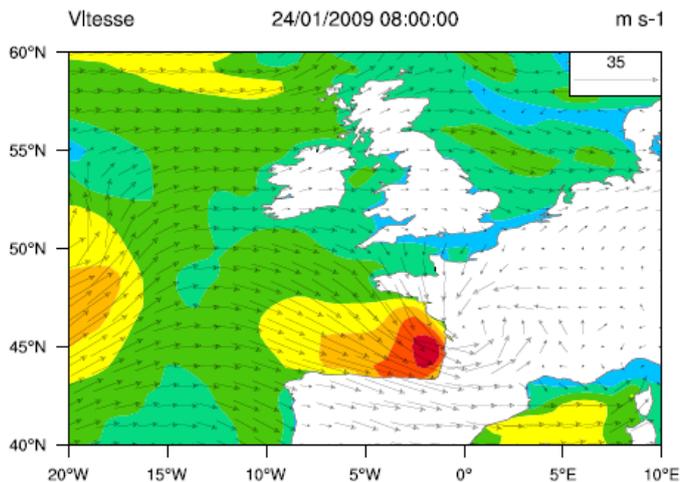


Figure 59 : Champs de vent (données CFSR issues de la NOAA) le 24/01/09 à 8h (T.U.)

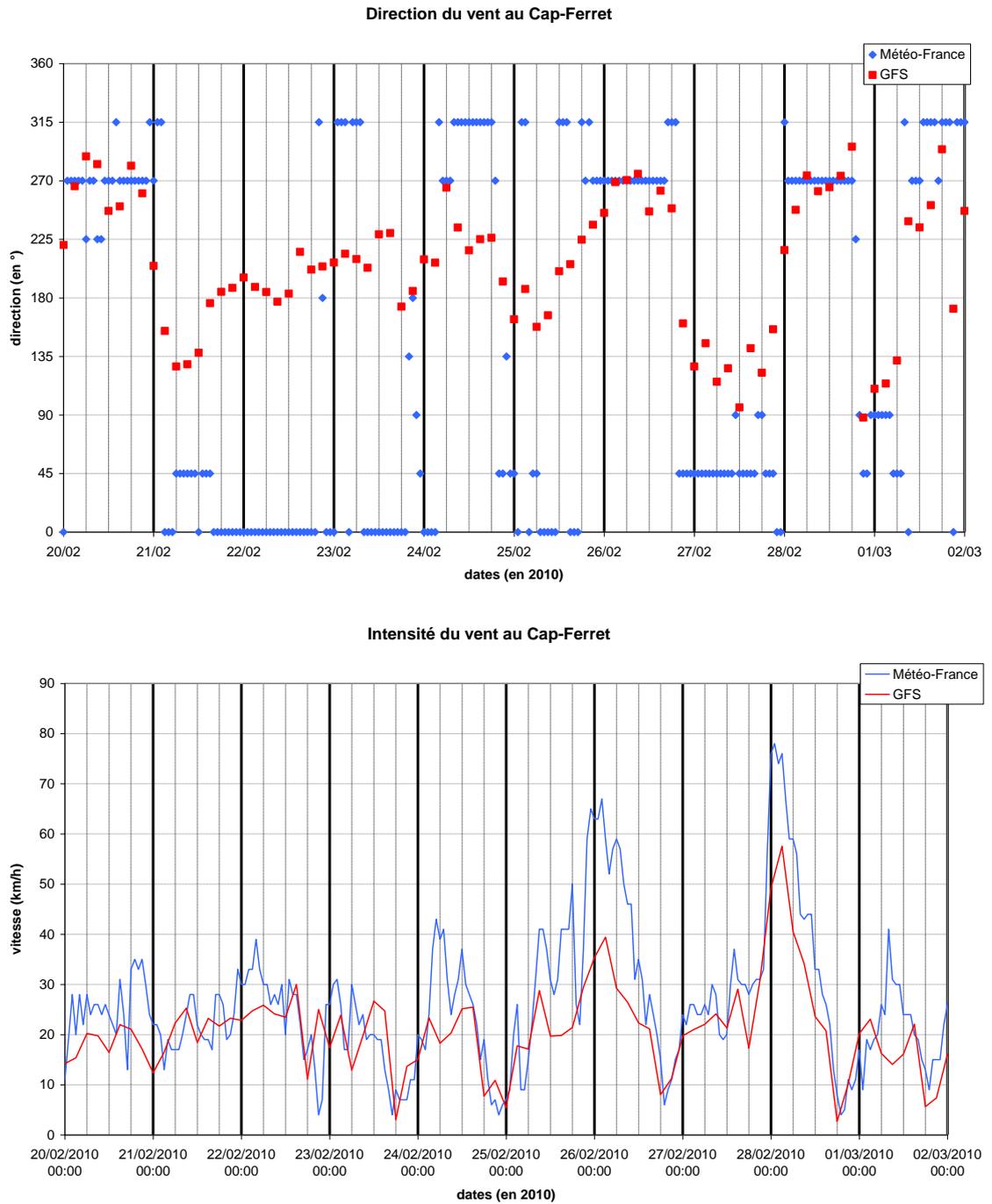


Figure 60 : Comparaison entre les vents du modèle GFS et les vents mesurés par Météo-France au Cap-Ferret pendant la tempête Xynthia de février 2010 (intensité et direction).

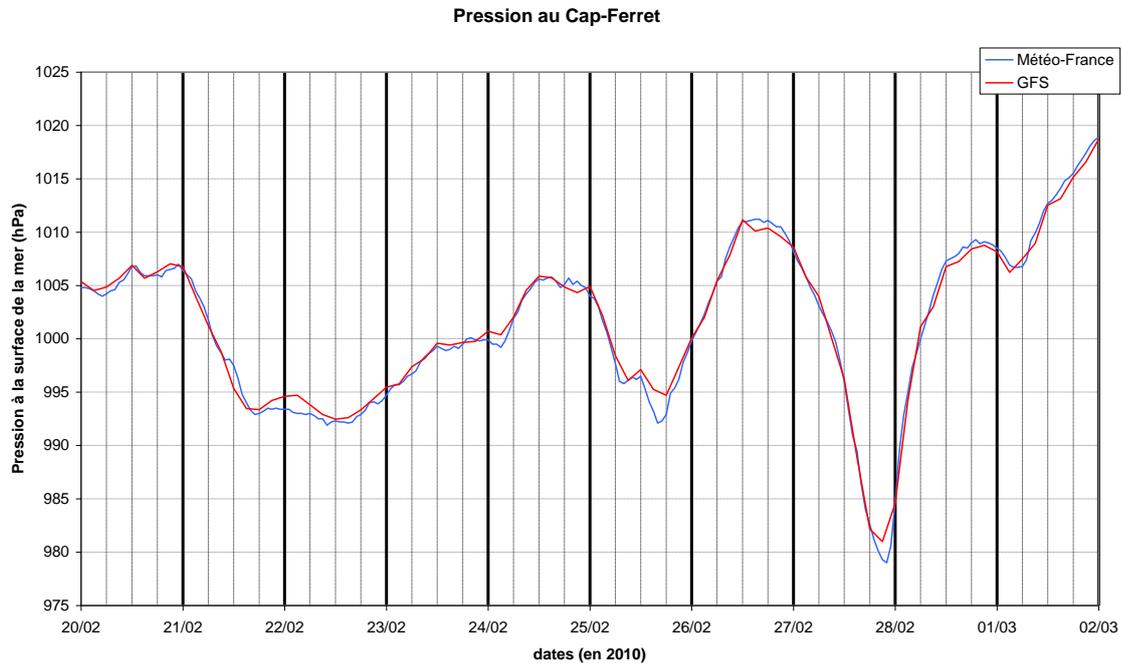


Figure 61 : Comparaison entre les pressions atmosphériques du modèle GFS et les pressions mesurées par Météo-France au Cap-Ferret pendant la tempête Xynthia de février 2010.

Tempete Xynthia

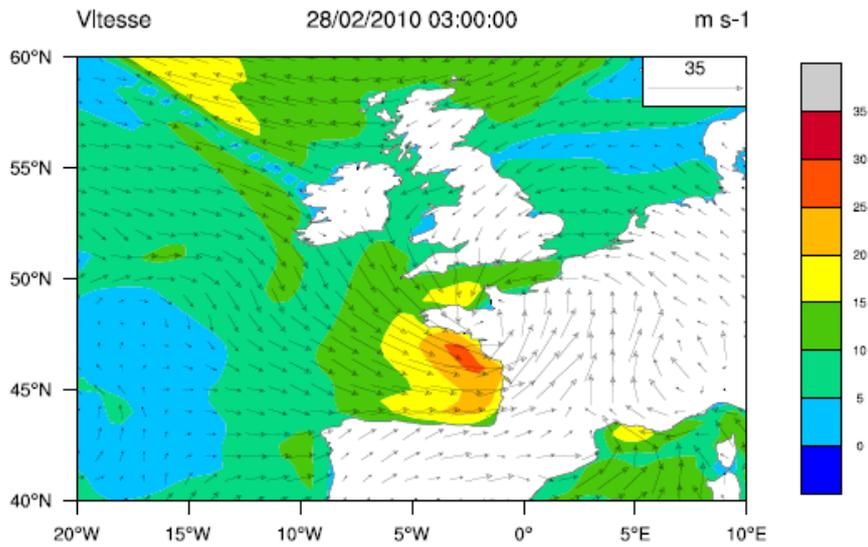


Figure 62 : Champs de vent (données GFS issues de la NOAA) le 28/02/10 à 03h (T.U.)

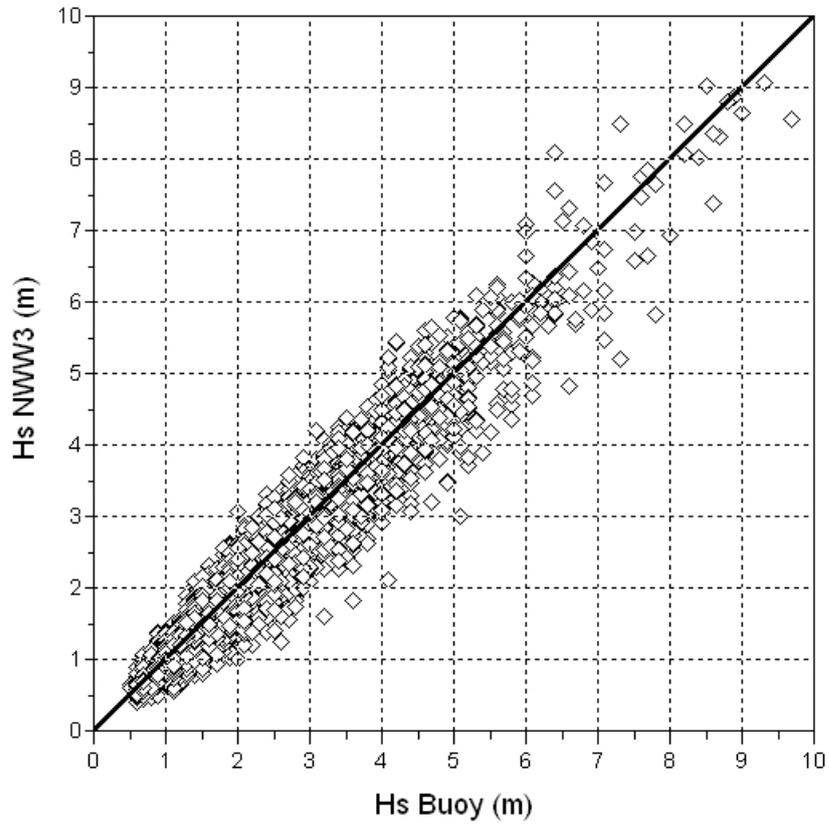
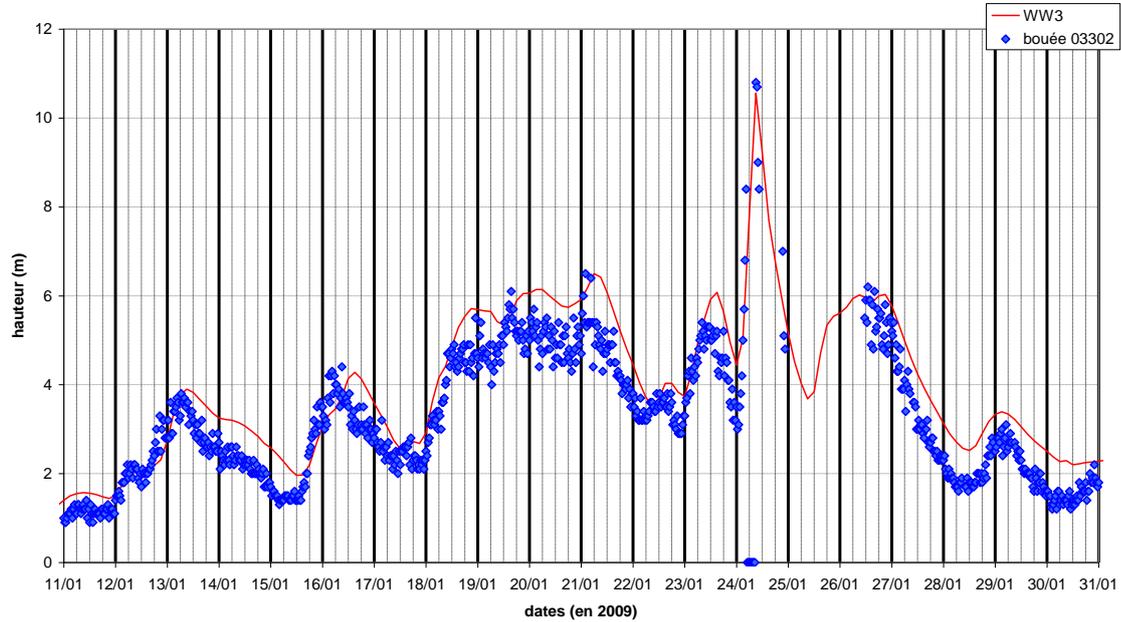
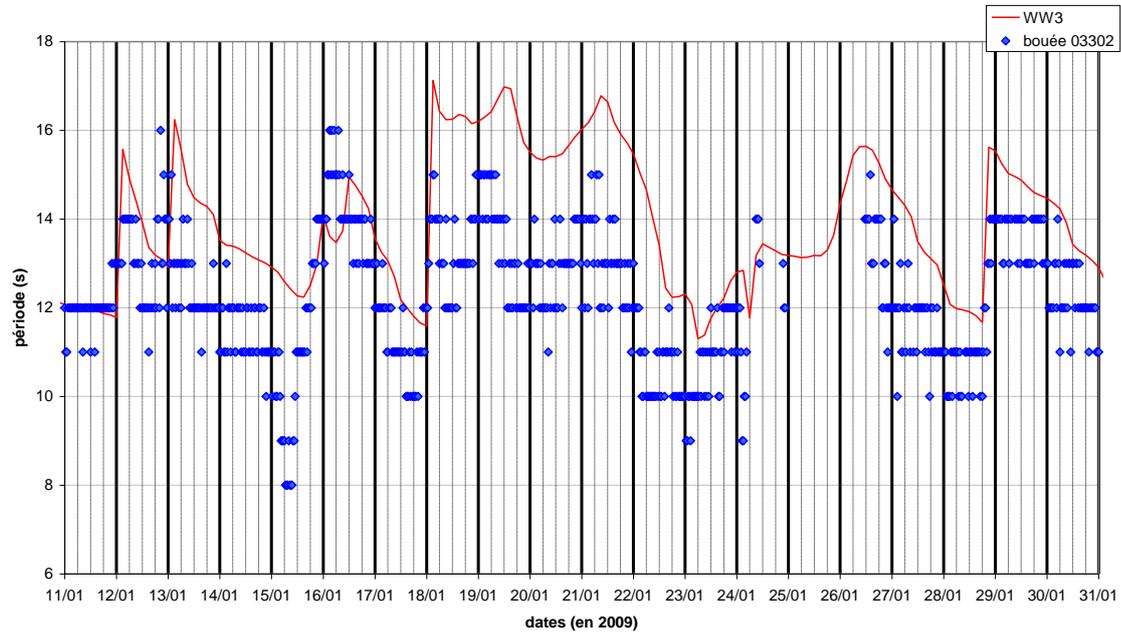


Figure 63 : Comparaison entre les hauteurs significatives de vagues mesurées par la bouée Gascogne et celles issues du modèle WaveWatch3 (point 45°N - 5°W), pour une série temporelle échantillonnée à 3h du 8/12/2003 au 01/10/2006.

Hauteur significative de la houle à la bouée Cap-Ferret



Période de la houle à la bouée Cap-Ferret



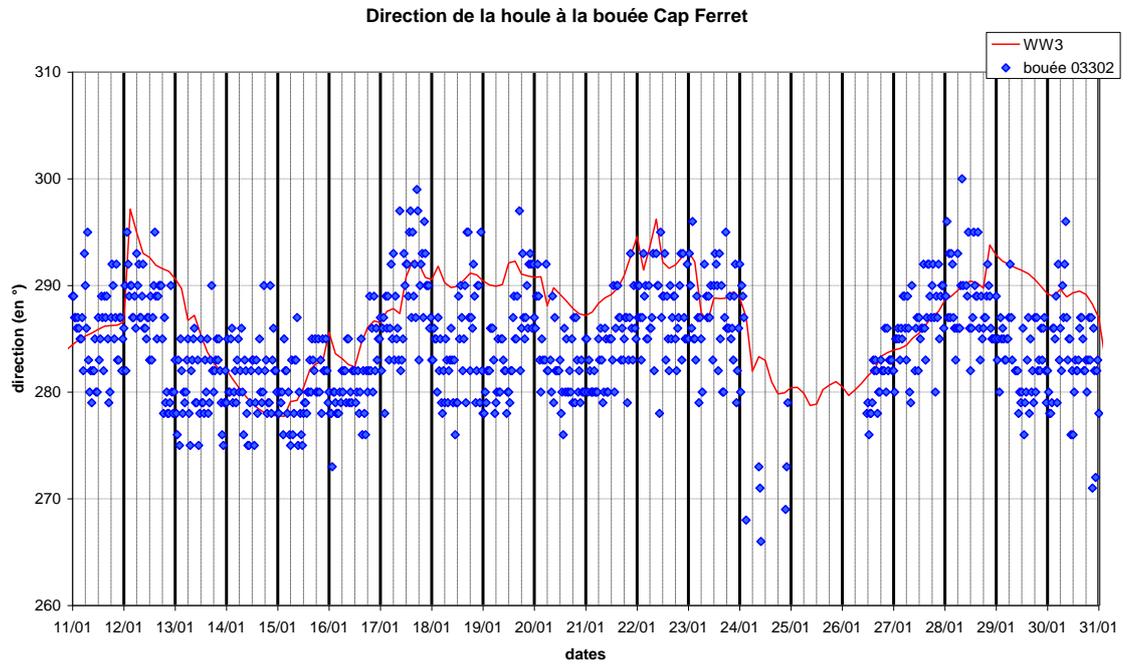


Figure 64 : Comparaison entre les paramètres de vagues mesurées par la bouée Candhis au Cap-Ferret et les triplets issus du modèle WaveWatch3 (point 44°N - 2,5°W), pendant la tempête Klaus (hauteur significative, période pic et direction pic).

Annexe 6

Tableau récapitulatif

événement	Hauteur d'eau mesurée (m)	Hauteur d'eau simulée (m)	Marée MARS (m)	Surcote MARS (m)	Setup SWAN (m)
24/01/2009 05:00 (Klaus)	2.9	2.9	1.9	0.8	0.2
28/02/2010 05:00 (Xynthia)	3.48	3.05	2.75	0.15	0.15
Scénario extrême J3 5:00		4.05	2.8	0.9	0.35

Tableau 14 : Hauteur d'eau modélisée et mesurée, marée et surcote atmosphérique calculées par MARS_2DH et setup calculé par SWAN, à Arcachon-Eyrac



Géosciences pour une Terre durable

brgm

Centre scientifique et technique
3, avenue Claude-Guillemin
BP 36009
45060 – Orléans Cedex 2 – France
Tél. : 02 38 64 34 34

Service Géologique Régional Aquitaine
Parc Technologique Europarc
24, Avenue Léonard de Vinci
33600 – Pessac - France
Tél. : 05 57 26 52 70