

Document Public

Observatoire de la Côte Aquitaine

Modélisation hydrodynamique de la Côte Basque. Partie 1 : marées, courants de marée et surcotes

Rapport final

BRGM/RP-53705-FR mai 2005

6-h1a h1b

.89 3740,46 -625.5











Observatoire de la Côte Aquitaine

Modélisation hydrodynamique de la Côte Basque. Partie 1 : marées, courants de marée et surcotes

Rapport final

BRGM/RP-53705-FR

mai 2005

Étude réalisée dans le cadre des opérations de Service public du BRGM 03LITA05

D. Idier, R. Pedreros

Vérificateur:

Date: 13 avril 2005

Original signé par C. MALLET

Approbateur:

Date: 04 mai 2005

Original signé par J. DUBREUILH

Le système de management de la qualité du BRGM est certifié AFAQ ISO 9001:2000.









Mots clés : marée, courants, Côte Basque, Observatoire de la Côte Aquitaine, modèle, hydrodynamique, 2D, surcotes, <i>MARS</i> .
En bibliographie, ce rapport sera cité de la façon suivante : Idier, D., et Pedreros, R. (2005) – Modélisation hydrodynamique de la Côte Basque. Partie 1 : marées, courants de marée et surcotes - BRGM/RP-53705-FR, 38 fig., 4 tab., 75 p.
Surcoles - BitGM//tt -55705-Fitt, 50 fig., 4 tab., 75 p.
© BRGM, 2005, ce document ne peut être reproduit en totalité ou en partie sans l'autorisation expresse du BRGM.

Modèle hydrodynamique de la Côte Basque. Partie I : marées, courants de marée et surcotes

Synthèse

Dans le cadre des missions de service public qui lui ont été confiées, le Service Géologique Régional Aquitaine du BRGM réalise une étude sur l'érosion de la Côte Basque qui s'intègre dans le Contrat de Plan Etat-Région 2001-2006 et fait partie des travaux menés par l'Observatoire de la Côte Aquitaine.

L'objectif final de l'étude de l'érosion de la Côte Basque est de mettre à disposition des acteurs de ce littoral, un outil d'aide à la décision et à la gestion de ce milieu face à son évolution géomorphologique constante. Dans ce contexte, le BRGM a en charge d'effectuer une étude qualitative hydro-sédimentaire de la Côte Basque, par modélisation, en prenant en compte la marée, la houle et les vents. Le présent rapport traite de la modélisation de la marée, des courants de marée, et en partie des surcotes.

La Côte Basque est un milieu complexe en particulier à cause de la présence du canyon de Cap Breton (fortes pentes bathymétriques) et de la faible largeur du plateau continental. Dans cette étude le logiciel hydrodynamique 2D *MARS*, développé par l'IFREMER, est utilisé. Toute modélisation 2D étant limitée à de faibles pentes bathymétriques (10%), le modèle est donc utilisé en dehors de son domaine de validité et les résultats obtenus sont donc à utiliser uniquement pour des études qualitatives.

L'impact du coefficient de marée est tout d'abord étudié. Pour une vive-eau moyenne, les hauteurs d'eau et courants obtenus sont en accord avec les données de marée et atlas de courant du SHOM. Les résultats mettent en évidence de faibles vitesses du courant, de l'ordre de 0,04 m/s. En morte-eau moyenne, les courants sont environ deux fois plus faibles.

L'impact du vent sur l'élévation de la surface libre a été étudié dans un premier temps pour une vive-eau et une morte-eau moyenne. L'amplitude des surcotes obtenues est peu dépendante du coefficient de marée. Pour des vents extrêmes (40 m/s), les vents de Sud engendrent des décotes à Saint-Jean-de-Luz de l'ordre de 5-10 cm qui diminuent vers le Nord, tandis que les vents d'Ouest engendrent des surcotes de l'ordre de 30 cm. Dans un deuxième temps, des simulations ont été effectuées pour la tempête du 26-29 décembre 1999. Les surcotes atteignent 15 cm à Saint-Jean-de-Luz et 19 cm à Vieux-Boucau. Ces valeurs sont en accord avec les surcôtes maximales issues du modèle de Météo-France, mais elles sont largement inférieures aux valeurs observées. Les courants obtenus sont de l'ordre de 0,4 m/s et peuvent donc difficilement engendrer un transport de sédiment.

Cette étude qualitative donne des résultats acceptables, en terme d'ordre de grandeur, par rapport aux observations ou résultats d'autres modèles. Des pistes d'amélioration ont été identifiées (conditions aux limites, forçage météorologique), en vue d'une étude quantitative.

Sommaire

1.		Introduction	11
2.		Présentation de la Côte Basque	15
2.1.		Présentation morphologique	15
2.2.		Océanographie descriptive	16
2.3.		Météorologie	17
2.4.		Sources de données	17
3.		Description du modèle MARS	21
3.1.		Choix du logiciel	21
3.2.		Description générale	21
3.3.		Exemples d'application	23
4.		Mise en place du modèle	27
4.1.		Maillage	27
4.2.		Bathymétrie	28
4.3.		Conditions aux limites	31
4.4.		Paramètres du modèle et temps d'initialisation	32
4.5.		Limites et problèmes rencontrés	32
5.		Impact du coefficient de marée	35
5.1.		Validation du modèle pour une vive-eau moyenne	35
	5.1.1.	Marée	35
	5.1.2.	Courants	36
5.2.		Morte-eau moyenne	41
	5.2.1.	Surface libre	41
	5.2.2.	Courants	41
6.		Impact des tempêtes	43

6.1.		Vive-eau moyenne et vents représentatifs	43
	6.1.1.	Surface libre	43
	6.1.2.	Courants	43
6.2.		Morte-eau moyenne et vents représentatifs	49
	6.2.1.	Surface libre	49
	6.2.2.	Courants	49
7.		Tempête de 1999	55
7.1.		Sans vent	55
7.2.		Avec vent	56
	7.2.1.	Choix des conditions de vent	56
	7.2.2.	Surface libre	57
	7.2.3.	Courants	58
7.3.		Conclusion et perspectives	60
8.		Conclusion	73
Bib	liogran	hie	75

Liste des illustrations

Figure 1 – Présentation du littoral basque français (Lambert 2 étendu). Source : Alexandre et al. (2003)	13
Figure 2 – Localisation de la zone d'étude (cadre gris). Bathymétrie (m) du Golfe de Gascogne. Référence : zéro hydrographique. Coordonnées : WGS84. Sources des données bathymétriques : IFREMER et SHOM	15
Figure 3 – Exemple de modèles emboîtés : modèles emboîtés de la plate-forme de modélisation des courants côtiers méditerrannéens (Garreau, 2002)	24
Figure 4 – Salinités et courants calculés en surface, plateau Atlantique, Modèle MARS 3D, Maille de 5 km. Source : http://www.ifremer.fr/delao/francais/hydrodynamique/atlantique/modgogas/index.htm	25
Figure 5 – Temps de résidence des masses d'eau, sur 500 m et par jour. Source : http://www.ifremer.fr/delao/francais/hydrodynamique/bretagne/index.htm	
Figure 6 – Bathymétrie du rang 0 et emprises des rangs 1, 2 et 3 du modèle (WGS84)	29
Figure 7 – Bathymétrie du modèle (rang 3) dans la zone d'étude. (WGS84)	30
Figure 8 – Niveaux de référence	31
Figure 9 – Marée simulée pour un coefficient de Strikler K = $20~{\rm m}^{1/3}{\rm s}^{-1}$ et un coefficient de marée de 95 (le 24/01/2004) et comparaison avec les prédictions du SHOM	36
Figure 10 – Courants de marée 3h50min avant la PM à Saint-Jean-de-Luz (a) et 2h10min après la PM (b). Le cadre rouge indique l'emprise du rang 3 du modèle mis en place et le cadre noir indique la zone finale d'intérêt. Les croix vertes indiquent les points de tracé A et B des courants issus du modèle. Les fonds de cartes comportant les courants sont extraits de scan de l'atlas de courant du Golfe de Gascogne (SHOM, 2002). La valeur du courant est portée en 10 ^{ième} de nœud (1 nd ~ 0,5 m/s) pour une vive-eau moyenne (2 premiers chiffres) et pour une morte-eau moyenne (2 derniers chiffres). La direction indiquée est en degrés, au-dessous des flêches, correspondant à la direction de vive-eau, en général identique à celle de morte-eau. Les flêches sont remplacées par des croix, dès que la vitesse du courant est inférieure à 0,05 nd	38
Figure 11 – Profil temporel de courant aux points A (Sud Canyon), B (Canyon). Positions indiquées sur la Figure 10. PM indique la Pleine Mer à Saint-Jean-de-Luz. Coefficient de marée 95, vent nul. Le 24/01/04	39
Figure 12 – Rose de courant aux points A (Sud Canyon), B (Canyon). Positions indiquées sur la Figure 10. Coefficient de marée 95, vent nul. Le 24/01/04. (U : Ouest-Est ; V : Sud- Nord)	39
Figure 13 – Courants de marée au flot (a) et au jusant (b), à 14:15:00 (24/01/2004) et 20:15:00 (24/01/2004). Coefficient de marée 95, sans vent	
Figure 14 – Marée simulée. Coefficient de marée 45, sans vent. Le 02- 03/01/04.Comparaison avec les prédictions du SHOM	41
Figure 15 – Courants de marée au flot (a) et au jusant (b) à 21:15:00 (02/01/2004) et	42

Figure 16 – Marée à Saint-Jean-de-Luz pour les trois configurations de VEM : sans vent, vent de 40 m/s Ouest, vent de 40 m/s Sud	45
Figure 17 – Surcote (vent Ouest, 40 m/s) et décote (vent Sud, 40 m/s) à Saint-Jean-de- Luz, VEM.	45
Figure 18 – Surcotes pour un vent d'Ouest de 40 m/s et un coefficient de marée 95. Surcote à la Pleine-Mer (17:30:00 - 24/01/2004).	46
Figure 19 – Décotes pour un vent de Sud de 40 m/s et un coefficient de marée 95. Décote à la Pleine-Mer (17:30:00 - 24/01/2004)	46
Figure 20 –Courants de marée au flot (a) et au jusant (b), à 14:15:00 (24/01/2004) et 20:15:00 (24/01/2004). Coefficient de marée 95, vent d'Ouest de 40 m/s	47
Figure 21 – Courants de marée au flot (a) et au jusant (b), le 24/01/2004, à 14:15:00 et 20:15:00. Coefficient de marée 95, vent de Sud de 40 m/s	48
Figure 22 – Marée à Saint-Jean-de-Luz pour les trois configurations de MEM : sans vent, vent de 40 m/s Ouest, vent de 40 m/s Sud	50
Figure 23 – Surcote (vent Ouest, 40 m/s) et décote (vent Sud, 40 m/s) à Saint-Jean-de- Luz, MEM	50
Figure 24 – Surcotes pour un vent d'Ouest de 40 m/s et un coefficient de marée 45. Surcote à la Pleine-Mer (00:30:00 – 03/01/2004)	51
Figure 25 – Décotes pour un vent de Sud de 40 m/s et un coefficient de marée 45. Décote à la Pleine-Mer (00:30:00 – 03/01/2004).	51
Figure 26 – Courants de marée au flot (a) et jusant (b) à 21:15:00 (02/01/2004) et 03:15:00 (03/01/2004). Coefficient de marée 45, vent d'Ouest de 40 m/s	52
Figure 27 – Courants de marée au flot (a) et jusant (b) à 21:15:00 (02/01/2004) et 03:15:00 (03/01/2004). Coefficient de marée 45, vent de Sud de 40 m/s	53
Figure 28 – Surcotes maximales (cm) calculées du 27 au 28 décembre 1999 par Météo-France, avec son modèle de surcote (Météo-France, 2001)	61
Figure 29 – Données de vent au point (45°N;-6.25°E) issues de WavewatchIII (NOAA). Intensité (a) et provenance (b). Convention nautique utilisée : Vent de Nord à 0°	62
Figure 30 – Elévation de la surface libre à Boucau-Bayonne. Le 1 ^{er} juillet 1999. Comparaison entre prédictions du SHOM et données SONEL	63
Figure 31 – Elévation de la surface libre à Boucau-Bayonne, 26-29 décembre 1999 (UT+0). Résultats du modèle Mars, avec et sans vent. Prédiction du SHOM. Données du réseau SONEL (données brutes, non validées, à Boucau)	64
Figure 32 – Surcotes engendrées par un forçage météorologique au point de coordonnées (45°N;-6.25°W). " Observation " correspond à la différence entre la marée observée à Boucau-Bayonne (SONEL) et la marée prédite (SHOM)	65
Figure 33 – Surcote le 28/12/1999, 12:00. Forçage météorologique issu de WaveWatch III au point de coordonnées (45°N;-6.25°W).	66
Figure 34 – Courants de flot (a) et jusant (b), sans vent, à 05:30:00 (le 29/12/1999) et 11:30:00 (le 29/12/1999)	67
Figure 35 – Courants de flot (a) et jusant (b), avec vent, à 05:30:00 (le 29/12/1999) et 11:30:00 (le 29/12/1999).	68
Figure 36 – Profil temporel de vitesse au point (-2°E : 44°N), rang 1. Avec vent	69

Figure 37 – Carte de courants de surface (3 m sous la surface) issue du GIP Mercator Ocean (Mercator Atlantique Nord et Méditerranée haute résolution 1/15°)	70
Figure 38 – Champs de vent issus du modèle COAMPS. Marqueur blanc : point de forçage du modèle MARS pour la tempête de 1999	71
Liste des tableaux	
Tableau 1 – Synthèse des données utilisées pour la mise en place et la validation du modèle de courants de la Côte Basque	18
Tableau 2 – Caractéristiques des maillages de chaque rang du modèle Côte Basque. Δ lat est la taille de maille en latitude (°), Δ long est la taille de maille en longitude (°), Δ x est la taille de maille approchée en longitude (m), Δ y est la taille de maille approchée en latitude (m). nx et ny sont le nombre de nœuds, resp. en longitude et latitude	27
Tableau 3 – Durées réelles simulées pour chaque rang, scénario de décembre 1999	32
Tableau 4 - Synthèse des données utilisées pour l'estimation de la qualité des résultats du modèle (tempête de décembre 1999).	55

1. Introduction

Suite au développement du tourisme, des ports de commerce et de la pêche dans les années 60, la frange littorale se voit soumise à un phénomène d'urbanisation, toujours en cours. Dans ce contexte, il s'agit de déterminer si les populations et les infrastructures de ces zones littorales sont exposées à des catastrophes naturelles telles que les tempêtes ou l'érosion des côtes.

C'est dans ce sens que l'Etat et le Conseil Régional d'Aquitaine ont demandé au BRGM de réaliser une étude qualitative hydro-sédimentaire de la Côte Basque, pour différents scenarii (tempêtes, temps calme). Ce travail s'effectue dans le cadre de la première partie du Contrat Plan Etat Région (CPER) 2001-2003 et des travaux de l'Observatoire de la Côte Aquitaine regroupant la Direction Régionale de l'Equipement, le Conseil Régional d'Aquitaine, le Conseil Général des Pyrénées-Atlantiques et le BRGM.

L'actuel CPER fait suite au CPER 1996-2000, où il avait été demandé au BRGM et à l'IFREMER de construire un outil d'aide à la décision sous forme de Système d'Information Géographique (SIG), portant sur la côte sableuse uniquement.

Dans le CPER 2001-2006, deux études préalables ont été réalisées portant :

- 1. Sur une synthèse bibliographique de l'érosion de la Côte Basque (Alexandre *et al.*, 2003).
- 2. Sur l'analyse du régime météorologique de la Côte Basque (Durand et Mallet, 2004).

Ces deux études ont permis d'avoir une meilleure connaissance du milieu.

La prochaine étape est de modéliser les courants, la houle, et le transport de sédiments, afin de pouvoir jouer des scenarii et, par exemple, d'évaluer l'impact des conditions extrêmes de tempêtes sur les problèmes d'érosion ou de surcote.

Les objectifs étant d'analyser le rôle des facteurs océanographiques (marée et houle) sur les instabilités de la côte basque. A ce titre, cette modélisation de la marée est effectuée de façon simultanée et coordonnée avec la modélisation de la propagation de la houle sur le plateau continental interne du Pays-Basque (Pedreros et Idier, 2005).

Le présent rapport traite uniquement de la marée, des courants de marée, des courants induits par le vent, et en partie des surcotes obtenues, par modélisation. Pour ce faire, le logiciel *MARS* est utilisé, mis à disposition par l'IFREMER (Lettre-contrat N°04/2210794/V). Le modèle mis en place a une résolution de 250 m. A notre connaissance, jusqu'à présent aucune modélisation de ce type n'a été réalisée à l'échelle de la Côte Basque.

Dans un premier temps, le site d'étude est décrit en terme de morphologie, océanographie et météorologie. Ensuite, le modèle de courants est mis en place et validé pour une vive-eau moyenne. Ceci permet des simuler les différents scenarii typiques suivant, avec et sans vent : vive-eau moyenne, morte-eau moyenne et tempête de décembre 1999. En particulier, les courants et surcotes dues au vent pendant la tempête de 1999 seront simulés et analysés.

Un second rapport est associé (Pedreros, 2004) et traite de la modélisation de la houle sur la Côte Basque (logiciel SWAN), pour différents scenarii.

L'un des objectifs de ce travail est également de mettre en place un modèle qui puisse être utilisé de façon relativement simple pour simuler des scenarii réels et qui puisse également être repris dans un futur proche (e.g. affinage du maillage) pour des études plus précises sur le littoral (e.g. érosion, dynamique des baies).

Avertissement

Les résultats présentés dans ce rapport sont des résultats préliminaires, l'étude ayant un but qualitatif et non quantitatif.

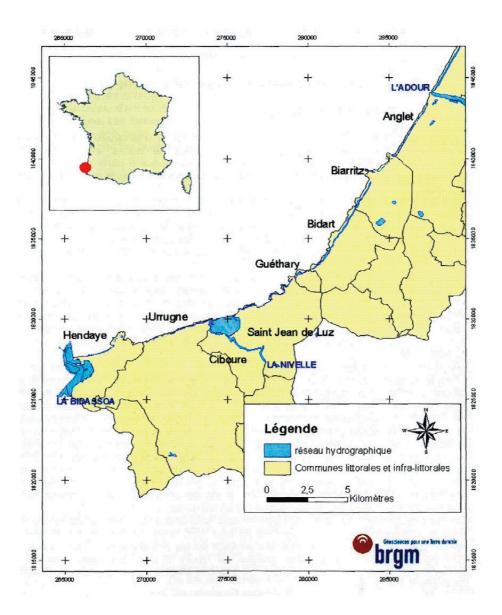


Figure 1 – Présentation du littoral basque français (Lambert 2 étendu). Source : Alexandre et al. (2003).

2. Présentation de la Côte Basque

2.1. PRÉSENTATION MORPHOLOGIQUE

La Figure 2 présente la bathymétrie du Golfe de Gascogne et la zone finale d'intérêt. Le Pays-Basque est situé au fond du Golfe de Gascogne (Figure 2), il est caractérisé par un plateau continental très étroit (30 à 50 km). En outre, il est situé juste au Sud du canyon de Cap Breton et il est tout proche du talus continental. Le littoral basque est essentiellement composé d'affleurements rocheux s'étirant sur 23 km, avec de nombreuses baies, plages et criques qui s'y sont encastrées (Alexandre et al., 2003).

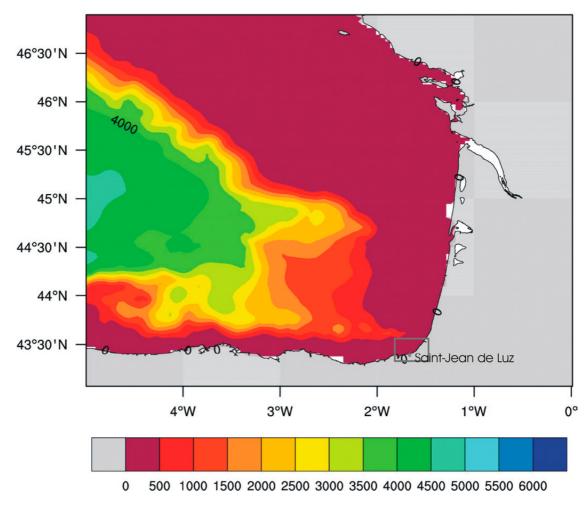


Figure 2 – Localisation de la zone d'étude (cadre gris). Bathymétrie (m) du Golfe de Gascogne. Référence : zéro hydrographique. Coordonnées : WGS84. Sources des données bathymétriques : IFREMER et SHOM.

2.2. OCÉANOGRAPHIE DESCRIPTIVE

La marée

La marée est la variation du niveau de la mer due à l'attraction exercée sur les molécules de l'océan, d'une part par la Lune en raison de sa proximité, d'autre part par le Soleil en raison de sa masse, les autres astres ayant une influence négligeable.

La marée sur les côtes françaises est de type semi-diurne, c'est-à-dire qu'on observe chaque jour deux pleines mers et deux basses mers séparées de 12h25 min. L'inégalité diurne (marée du matin plus forte ou plus faible que celle du soir) est faible (environ 30 cm à Brest). La différence de hauteur entre une pleine mer et une basse mer est le marnage. Les variations du marnage passent d'un minimum appelé morte-eau à un maximum appelé vive-eau au cours d'un demi-cycle lunaire. Le coefficient de marée théorique de morte-eau exceptionnel est de 20, celui de vive-eau exceptionnel est de 120.

La marée que l'on observe sur les côtes françaises est engendrée par une onde provenant de l'Atlantique. Cette onde de marée, de faible amplitude (inférieure à un mètre), progresse du Sud vers le Nord et atteint successivement les côtes du Maroc, du Portugal, de l'Espagne puis de la France.

Dans le Golfe de Gascogne, l'onde de marée venant du Sud-Ouest arrive à peu près en même temps sur tous les points de la côte situés entre Penmarc'h (Bretagne) et la frontière espagnole. Les marnages diminuent du Nord au Sud en même temps que le plateau continental se rétrécit.

Sur la Côte Basque, le marnage diminue du Sud vers le Nord avec des marnages en vive-eau moyenne (coefficient de marée 95) de 3,7 m à Saint-Jean-de-Luz, 3,5 m à Boucau-Bayonne et 3,35 m à Vieux-Boucau.

Les courants de marée

Les mouvements horizontaux dus à l'attraction de la Lune et du Soleil forment les courants de marée.

Les courants de marée dans le Golfe de Gascogne sont faibles au large, et augmentent à l'approches des côtes (SHOM, 2002). Les courants maximums sont observés principalement le long des côtes bretonnes avec des valeurs maximales de l'ordre de 4 m/s (en vive-eau moyenne), et dans l'estuaire de la Gironde, avec des vitesses de 2,5 m/s (vive-eau moyenne). D'après (SHOM, 2002), les courants de marée sur le plateau continental de la Côte Basque sont compris entre 0,025 et 0,075 m/s, pour une vive-eau moyenne (VEM), i.e. pour un coefficient de marée de 95.

A l'entrée de l'Adour, le LHF (Laboratoire Hydraulique de France) estime qu'avec des amplitudes qui varient entre 2,10 m en morte-eau moyenne et 3,60 m en vive-eau

d'équinoxe, les marées provoquent des courants dont l'influence est loin d'être négligeable. En effet, si les courants au large sont faibles et n'ont pas de direction marquée (vitesse inférieure à 0,2 m/s), ils s'intensifient aux approches de l'embouchure pour atteindre des vitesses maximales de 0,5 à 0,8 m/s en flot et 1,5 à 2 m/s en jusant (mesures de la D.D.E.). Ces informations sont issues de Enseeiht (1995).

2.3. MÉTÉOROLOGIE

Durand et Mallet (2004) ont effectué une analyse des caractéristiques météorologiques de la Côte Basque. En terme de vent, cette étude s'est basée sur des données décadaires acquises par Météo-France à Biarritz (1986-2002) et à Socoa (1991-2002). De cette étude, quelques caractéristiques peuvent être extraites.

La moyenne annuelle des vitesses du vent à Biarritz est de 33,6 km/h, contre 42,7 km/h à Socoa. Le régime des vents moyens ne présente pas de saisonnalité marquée, même si l'été apparaît comme la saison la moins ventée.

Les quelques informations sur la direction moyenne du vent, tirées des roses de vent de Météo-France et déduites des données tri-horaires enregistrées à Biarritz et Socoa, indiquent que, à Biarritz, les vents forts (intensité supérieure à 28,8 km/h) sont principalement des vents d'Ouest, tandis qu'à Socoa, ils proviennent du secteur Ouest, mais également du secteur Sud.

En terme de vitesse maximale, la saisonnalité est mieux marquée (vents faibles en été, forts en hiver). Durant l'hiver, 6,15% des décades présentent des pointes de vent comprises entre 100 et 140 km/h à Biarritz et 20,3% des décades présentent des pointes de vent comprises entre 100 et 160 km/h à Socoa.

En terme de surcotes, rappelons que l'action directe de la vitesse d'entraînement du vent n'est qu'une contribution aux surcotes. En effet, les surcotes sont dues aux phénomènes suivants :

- Vitesse d'entraînement du vent
- Champ de pression
- Set-up dû à la houle (augmentation du niveau de la surface libre)

2.4. SOURCES DE DONNÉES

Pour toute modélisation, il est nécessaire de disposer de données suffisantes, d'une part pour construire le modèle, d'autre part pour le valider. Le Tableau 1 synthétise les données utilisées.

Les données de hauteur d'eau utilisées pour la validation sont celles issues des marégraphes de Saint-Jean-de-Luz (1.667°W; 43.383°N), Boucau-Bayonne (1.517°W; 43.517°N) et Vieux Boucau (1.417°W; 43.783°N).

Etape	Donnée	Source
MNT	Bathymétrie	 SHOM¹ (Côte Basque : z_{NGF} < -4 m)
(Modèle		- GEBCO ^(a) (z _{NGF} < 0 m)
Numérique		- SRTM ^(b) (0 m < z _{NGF})
de Terrain)		– modèle <i>MARS</i> (Golfe de Gascogne)
	Niveau moyen / zéro hydrographique	- SHOM
Forçage	Hauteurs d'eau (conditions limites de marée)	 données FES 1999 (observations in-situ et assimilation de données)
	Vent	- Wavewatch III ^(c)
		- COAMPS EUROPE ^(d)
Validation	Hauteur d'eau	 SHOM^(e) (prédiction de marée)
		 SONEL^(f) (données de hauteur d'eau mesurées)
		Météo-France (modèle de surcotes)
	- Courant	 SHOM (atlas de courant de marée du Golfe de Gascogne)
		- TOPS (g)
		Mercator

Tableau 1 – Synthèse des données utilisées pour la mise en place et la validation du modèle de courants de la Côte Basque.

¹ © SHOM 2003 - Travaux effectués à partir des donné

18

¹© SHOM 2003 - Travaux effectués à partir des données communiquées par le service hydrographique et océanographique de la marine (contrat n°E042/2003) - www.shom.fr. Ce service ne peut être tenu pour responsable des résultats et de l'utilisation qui en est faite. Tous droits réservés sauf pour l'enseignement et la recherche.

(a) modèle maillé de 1,85 km de taille de maille.

Serveur: http://www.bodc.ac.uk/cgi-bin/framer?http://www.bodc.ac.uk/projects/gebco/gebco_one_minute_grid_front.htm

- (b) images radar acquises par la NASA, février 2000.
- (c) http://polar.ncep.noaa.gov/waves
- (d) http://mel.dmso.mil
- (e) Ce type de données fournit uniquement le signal de marée.

Serveur: http://www.shom.fr/fr page/fr serv prediction/ann marees f.htm

(f) Ces données sont les données brutes observées d'élévation de la surface libre, incluant les effets de la marée, mais aussi des tempêtes.

Serveur: http://sonel.ensg.ign.fr/

(9) Modèle de température et courants de surface, à couverture mondiale.

3. Description du modèle *MARS*

3.1. CHOIX DU LOGICIEL

Dans le cadre de cette étude, il s'agit de modéliser les courants 2D (intégrés sur la verticale). Pour atteindre cet objectif, il existe plusieurs logiciels, basés sur le même type d'équations (décrites dans § 3.2). Par rapport à des logiciels comme *Telemac* (EDF/LNHE) et *Delft3D* (WL| Delft Hydraulics), l'avantage d'utiliser *MARS* est qu'un modèle du Golfe de Gascogne a déjà été mis en place avec ce modèle, par l'IFREMER, ce qui permet de fournir des conditions aux limites au modèle de la Côte Basque. En outre, les temps de calcul de ce logiciel sont très courts, ce qui permet de réaliser facilement une étude paramétrique des effets de la marée et des tempêtes.

3.2. DESCRIPTION GÉNÉRALE

MARS est un code de calcul hydrodynamique développé par l'IFREMER. Ce code permet de simuler les courants marins en 2D ou 3D, les hauteurs d'eau et les concentrations en éléments solubles transportés par le courant. Ici, nous ne décrivons que les possibilités utilisées pour cette étude, à savoir les courants de marée 2D, sans transport d'éléments chimiques.

Ce code adopte la méthode des différences finies, dans un souci de minimisation des temps de calcul. La taille de maille au sein de chaque modèle est donc constante. Un modèle mathématique doit offrir une représentation de la réalité d'autant plus fine et précise que l'on se situe sur la zone d'intérêt. A cette fin le modèle *MARS* utilise une technique d'emboîtement de modèles sous forme gigogne (Figure 3). Par cette technique, un modèle de grande emprise et de grande maille contient lui-même un ou plusieurs sous-modèles (loupes). Ces derniers reçoivent des modèles qui les précèdent les conditions aux limites de leur périmètre. Au plan spatial, les modèles intermédiaires possèdent une maille environ 4 fois plus petite que celle du modèle précédent. Le modèle de grande emprise s'étend jusqu'au plateau continental et trouve ses conditions aux limites dans la valeur des ondes générant la marée au large.

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 vecteurs et de scalaires en coordonnées géographiques.

Ce type de modèle nécessite trois types d'information :

- La bathymétrie (fournie par une matrice de profondeurs);
- Les conditions aux limites ;
- Les flux d'eau à l'intérieur du domaine.

Les hypothèses du calcul valables en 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 :

$$\begin{cases} \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + g \frac{\partial \zeta}{\partial x} - fv + \varepsilon \left(\frac{\partial^{2} u}{\partial x^{2}} + \frac{\partial^{2} u}{\partial y^{2}} \right) + g \frac{u \sqrt{u^{2} + v^{2}}}{k^{2} H^{4/3}} + \frac{\partial Pa}{\partial x} + \frac{\tau_{x}}{\rho H} = 0 \\ \frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + g \frac{\partial \zeta}{\partial y} + fu + \varepsilon \left(\frac{\partial^{2} v}{\partial x^{2}} + \frac{\partial^{2} v}{\partial y^{2}} \right) + g \frac{v \sqrt{u^{2} + v^{2}}}{k^{2} H^{4/3}} + \frac{\partial Pa}{\partial y} + \frac{\tau_{y}}{\rho H} = 0 \\ \frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{\partial (Hu)}{\partial x} + \frac{\partial (Hv)}{\partial y} = 0 \end{cases}$$

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 (totale)

Pa: pression atmosphérique

 τ_{x} : contrainte au fond suivant la direction x (ici, suivant les parallèles)

 $au_{_{\scriptscriptstyle V}}$: contrainte au fond suivant la direction y (ici, suivant les méridiens)

arepsilon : viscosité turbulente

ho : masse volumique

En outre, un forçage météorologique peut être pris en compte sur toute la surface du modèle et ses éventuelles loupes successives.

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

3.3. EXEMPLES D'APPLICATION

Salomon et Breton (1993) et Salomon *et al.* (1993) constituent des exemples de référence d'application du modèle MARS. Ces exemples portent sur les circulations dans le détroit du Pas de Calais.

En outre, les exemples suivants d'application donnent une vision des possibilités de ce modèle. Ces exemples sont disponibles sur le site web de l'IFREMER.

Plate-forme de modélisation des courants côtiers méditerranéens

http://www.IFREMER.fr/delao/publication/doc/pgarreau2002 3 p.pdf.

L'IFREMER réalise, avec l'aide financière de l'Agence de l'Eau Rhône - Méditerranée - Corse, une étude concernant la modélisation des courants côtiers méditerranéens. L'objectif est de mettre en place sur le littoral méditerranéen une « plate-forme de modélisation hydrodynamique », c'est à dire une structure d'accueil regroupant bases de données (bathymétrie,...), interfaces et méthodes en vue de faciliter la réalisation des études de modélisation sur le littoral méditerranéen. La Figure 3 présente le type d'emboîtement de modèles nécessaire pour couvrir les différentes échelles d'intérêt. Le bassin occidental méditerranéen et le Golfe du Lion ont des mailles allant de 3 nautiques à 1 kilomètre environ.

Modèle hydrodynamique 3D du plateau Atlantique

http://www.IFREMER.fr/delao/francais/hydrodynamique/atlantique/modgogas/index.html

Le domaine du modèle 3D du plateau Atlantique mis en place par l'IFREMER s'étend de 8°W jusqu'aux côtes espagnoles pour pouvoir prendre en compte l'Adour, décrire l'hydrologie de la partie Sud du Golfe de Gascogne et mieux simuler le panache de la Gironde qui peut s'étaler dès le printemps vers le Sud et au-delà du talus sous l'action des vents . Dans un premier temps ce nouveau modèle n'est pas destiné à reproduire la dynamique du talus ni celle de la plaine abyssale du Golfe de Gascogne. Toutefois ce modèle est en mesure d'intégrer les processus du large au fur et à mesure du développement des connaissances et des progrès de leur modélisation. La Figure 4 présente la salinité et les courants calculés en surface, pour le 03/02/1995.

Modélisation numérique des courants sur la côte bretonne

http://www.IFREMER.fr/delao/francais/hydrodynamique/bretagne/index.htm

Le modèle *MARS* a aussi été appliqué pour simuler les courants de marée, sans vent, sur les côtes bretonnes, pour un coefficient de marée de 70. Ces simulations permettent non seulement de calculer le courant à chaque instant de la marée, mais aussi de déduire les vitesses résiduelles suite à un cycle de marée. De ces vitesses résiduelles, les temps de résidence peuvent être déduits (Figure 5). Ces temps de résidence sont utiles par exemple pour l'estimation des périodes de renouvellement des masses d'eau.

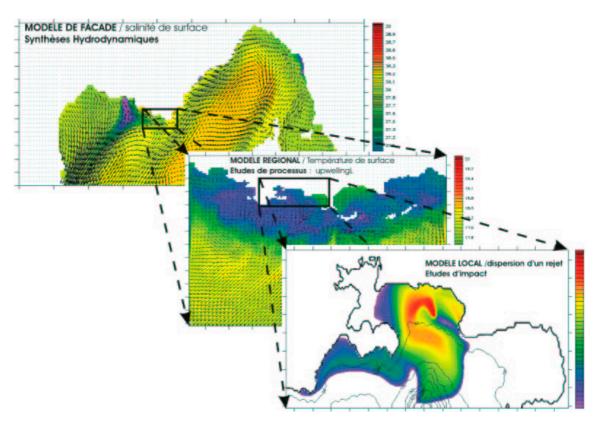


Figure 3 – Exemple de modèles emboîtés : modèles emboîtés de la plate-forme de modélisation des courants côtiers méditerrannéens (Garreau, 2002).

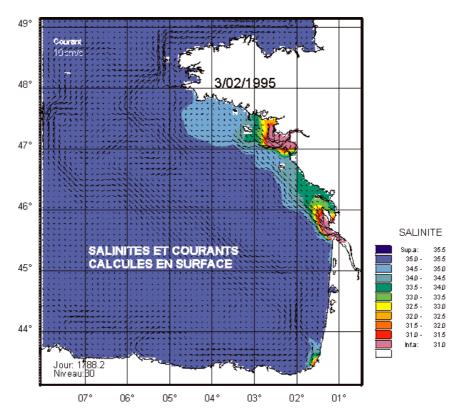


Figure 4 – Salinités et courants calculés en surface, plateau Atlantique, Modèle MARS 3D, Maille de 5 km. Source :

http://www.ifremer.fr/delao/francais/hydrodynamique/atlantique/modgogas/index.htm

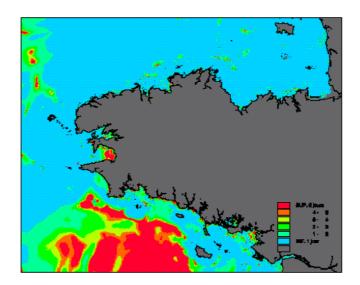


Figure 5 – Temps de résidence des masses d'eau, sur 500 m et par jour. Source : http://www.ifremer.fr/delao/francais/hydrodynamique/bretagne/index.htm

4. Mise en place du modèle

Via une convention de recherche avec l'IFREMER, le BRGM a utilisé le logiciel hydrodynamique *MARS* (version 2D) pour cette étude. Dans les paragraphes qui suivent, nous décrivons les différentes étapes de construction du modèle pour la Côte Basque.

4.1. MAILLAGE

Le maillage de *MARS* est à maille régulière en coordonnées géographiques. Pour la présente étude, 4 rangs (i .e. 4 boîtes, i.e. 4 modèles d'emprise décroissante) sont utilisés/mis en place (Figure 6). Les emprises et les caractéristiques des maillages de ces modèles sont synthétisées dans le Tableau 2. Le rang 0 est fourni par l'IFREMER (Figure 6) et constitue le modèle de plus grande emprise avec une taille de maille d'environ 11 km. A partir de ce modèle de grande emprise, des modèles d'emprise décroissante et comprenant la Côte Basque ont été construits de manière à ce que la taille de maille de chaque rang soit environ 3 à 4 fois plus petite que celle du rang supérieur. L'objectif étant de disposer d'un modèle d'une résolution de 250 m sur la Côte Basque. Trois rangs (1, 2 et 3) sont nécessaires pour que le dernier rang (rang 3) ait une taille de maille de 250 m (Figure 6).

N° de rang	Domaine (WGS84)	Δ lat.	∆ long.	Δ x (m)	Δ y (m)	nx	ny
Rang 0	(51,00N ;43,00N) (1,95E ;-12,0E)	0,1000	0,1500	11368	11113	94	81
Rang 1	(46,90N ;43,10N) (-0,14E ;-4,95E)	0,0342	0,0467	3809	3807	104	112
Rang 2	(44,33N ;43,13N) (-1,12E ;-2,35E)	0,0108	0,0147	1198	1202	85	112
Rang 3	(43,92N ;43,20N) (-1,27E ;-2,25E)	0,00225	0,00308	250.2	250.2	320	320

Tableau 2 — Caractéristiques des maillages de chaque rang du modèle Côte Basque. Δ lat est la taille de maille en latitude (°), Δ long est la taille de maille en longitude (°), Δ x est la taille de maille approchée en longitude (m), Δ y est la taille de maille approchée en latitude (m). Δ x et ny sont le nombre de nœuds, resp. en longitude et latitude.

4.2. BATHYMÉTRIE

Les données bathymétriques utilisées proviennent de :

- Bathymétrie du modèle MARS
- Les minutes bathymétriques du SHOM²
- La topographie SRTM (Shuttle Radar Topography Mission) (images radar acquises par la NASA, février 2000).
- Les données GEBCO (General Bathymetric Chart of Oceans) (modèle maillé de 1,85 km de taille de maille). [http://www.bodc.ac.uk/cgibin/framer?http://www.bodc.ac.uk/projects/gebco/gebco_one_minute_gri d front.htm]

Ces données couvrent la majeure partie du domaine couvert par le modèle (Figure 6). Toutefois, la zone littorale est moins bien décrite :

- Pas de données de qualité entre –5 et 0 m NGF
- Données disponibles des grandes profondeurs jusqu'à –5 m NGF, mais la grande mobilité des fonds entre –10 et –5 m NGF implique que ces données sont insuffisantes (trop anciennes) pour une modélisation précise de la zone –10 –5 m NGF.

Cependant, étant donné l'objectif qualitatif de cette étude ainsi que la résolution spatiale demandée (250 m), la qualité moindre des données dans la zone de littorale (-10 – 0 m NGF) est acceptable. Cependant, pour de futures études avec un résolution plus fine, il sera nécessaire de disposer de données complémentaires pour cette zone littorale.

Pour la construction de la bathymétrie du modèle, une sélection spatiale des données est effectuée afin que la source la meilleure soit utilisée dans chaque zone (ex : dans les zones où il existe des minutes du SHOM, ces dernières sont utilisées préférentiellement aux données GEBCO dont la résolution de 1,85 km est trop faible). L'ordre de préférences des données est le suivant :

- 1: minutes SHOM,
- 2 : GEBCO,

² (© SHOM 2003 - Travaux effectués à partir des données communiquées par le service hydrographique et océanographique de la marine (contrat n°E042/2003) - www.shom.fr. Ce service ne peut être tenu pour responsable des résultats et de l'utilisation qui en est faite. Tous droits réservés sauf pour l'enseignement et la recherche.)

3: MARS.

Les données SRTM sont utilisées pour faire le raccordement à la côte. A partir de ces données, la bathymétrie est alors calculée, soient par triangulation (à partir des minutes du SHOM), soit par la méthode du plus proche voisin (autres données). La bathymétrie des rangs 0 (modifiées par rapport à la bathymétrie initiale fournie par l'IFREMER), et 3 (dans la zone d'étude) est présentée respectivement sur les Figure 6 et Figure 7.

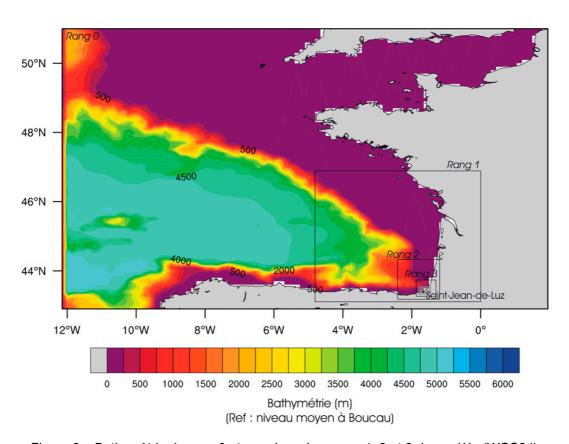


Figure 6 – Bathymétrie du rang 0 et emprises des rangs 1, 2 et 3 du modèle (WGS84).

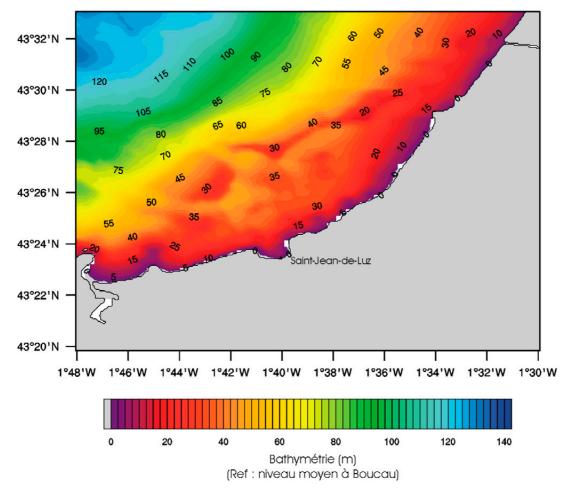


Figure 7 – Bathymétrie du modèle (rang 3) dans la zone d'étude. (WGS84).

Ces données bathymétriques sont fournies par rapport au zéro hydrographique. Or, la bathymétrie doit être ramenée par rapport au niveau moyen comme expliqué cidessous.

La Figure 8 illustre les différents niveaux de référence. Les hauteurs d'eau et la bathymétrie sont définies par rapport à une référence. Ce niveau de référence peut être :

- Le niveau des plus basses mers
- Le zéro hydrographique
- Le niveau moyen

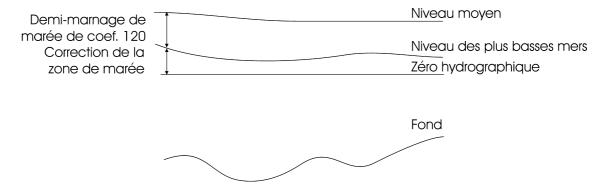


Figure 8 – Niveaux de référence.

Le zéro hydrographique a été défini à l'origine comme étant le niveau des plus basses mers. Cependant, les moyens de l'époque ne permettant pas de déterminer de manière exacte le niveau des plus basses mers, un décalage existe entre ce niveau et le zéro hydrographique. Cette correction de zone de marée, de l'ordre de quelques centimètres, est constante dans chaque zone de marée. Dans le Golfe de Gascogne, elle varie de 0 (Côte Basque) à 55 cm (Pointe de Grave).

Le niveau moyen est le niveau autour duquel oscille la surface de la mer. La différence entre le niveau des plus basses mers et le niveau moyen est approximativement le demi-marnage de vives eaux exceptionnelles (marée de coefficient 120). Par exemple, le niveau moyen est de 2,52 m à Boucau. Pour construire un modèle hydrodynamique, il est souhaitable de choisir comme niveau de référence le niveau moyen car il est proche du géoïde (équipotentielle de champ de pesanteur). Prendre comme niveau de référence un géoïde entraı̂ne que \vec{g} est orthogonal au plan z=0, hypothèse des équations de Saint-Venant. Généralement, les données bathymétriques sont référencées par rapport au zéro hydrographique. Il faut donc ajouter à ces données d'une part la correction de zone de marée, d'autre part le demi-marnage de vives-eaux exceptionnelles.

Dans la présente étude, étant donné le peu de données disponibles sur la Côte Basque pour définir le niveau moyen en mer, toute la bathymétrie est ramenée au niveau moyen à Boucau (2,52 m), via une option dans le logiciel *MARS*. La Figure 7 présente la bathymétrie sur l'emprise finale d'intérêt (Côte Basque), par rapport au niveau moyen.

4.3. CONDITIONS AUX LIMITES

Pour le rang 0, les conditions aux limites sont issues des données du modèle FES99 (Lefevre, 2000) (assimilation de données in-situ et altimétriques). Les données FES99 sont disponibles sur des grilles de 0,25°x0,25°. Le logiciel *MARS* utilise les 8 harmoniques principales de la marée (M2, S2, K1, O1, N2, P1, K2, Q1).

Pour la présente étude, trois configurations sont considérées :

- 1. Vive-eau moyenne (coefficient de marée égal à 95, le 24/01/04)
- 2. Morte-eau moyenne (coefficient de marée égal à 45, le 02-03/01/04)
- 3. Marée réelle (26-29 décembre 1999)

Ces configurations de vive-eau moyenne (VEM) et morte-eau moyenne (MEM) sont choisies car les atlas de courants du SHOM, utilisés pour évaluer la qualité des résultats du présent modèle, sont établis pour ces deux configurations. En outre, ces configurations sont représentatives des vives-eaux d'une part (grand marnage au cours des cycles vive-eau – morte-eau qui sont des cycles qui s'étalent sur 14 jours), et des mortes-eaux d'autre part (petit marnage au cours des cycles vive-eau – morte-eau). Concernant la période de décembre 1999 (configuration 3), elle est choisie en raison de la tempête qui a eu lieu durant cette période.

4.4. PARAMÈTRES DU MODÈLE ET TEMPS D'INITIALISATION

Le principal paramètre de calibration est le paramètre de frottement. Le logiciel *MARS* utilise 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 $K = 20 \text{ m}^{1/3}\text{s}^{-1}$ est utilisé.

Les simulations nécessitent un temps d'initialisation. A titre indicatif, pour le scénario de la tempête de 1999, les durées réelles simulées sont précisées dans le Tableau 3.

Rang	Début	Fin	
0	28/11/1999	30/12/1999	
1	03/12/1999	30/12/1999	
2	08/12/1999	30/12/1999	
3	12/12/1999	30/12/1999	

Tableau 3 – Durées réelles simulées pour chaque rang, scénario de décembre 1999.

4.5. LIMITES ET PROBLÈMES RENCONTRÉS

Tout d'abord, il faut garder à l'esprit que les équations de Saint-Venant ne sont valables que pour des pentes bathymétriques relativement faibles (inférieures à 10%). Or, sur le talus ou dans le canyon de Cap Breton, les pentes bathymétriques atteignent 30%. Les résultats de cette étude sont donc à considérer avec précautions. On peut noter que le rang 0 est stable dans la majeure partie du domaine, sauf sur la Côte

Basque où quelques oscillations sont observées. Ceci tend à confirmer que les fortes pentes bathymétriques posent un problème numérique dans cette zone.

En outre, les conditions aux limites imposées pour nos simulations sont basées sur les 8 ondes M2, S2, K1, O1, N2, P1, K2, Q1. Les ondes de type M4 par exemple ne sont donc pas prises en compte dans le forçage du modèle. Par contre, celles-ci peuvent être générées à l'intérieur du domaine de simulation, via des interactions M2-M2.

Les principaux problèmes rencontrés sont liés à la bathymétrie et aux conditions aux limites. En effet, en théorie, lorsque le flux est entrant, les vitesses devraient être imposées aux frontières du domaine (rang 3 par exemple), tandis que lorsque le flux est sortant, seules les hauteurs d'eau doivent être imposées. Or le logiciel n'autorise pour l'instant pas d'imposer les vitesses en conditions aux limites. Seules les hauteurs d'eau sont donc imposées. Cette méthode ne permet pas de résoudre correctement les équations de Saint-Venant près des frontières lorsque le flux est entrant : les termes d'advection (de la forme U.dU/dx) sont mal calculés, le plus souvent surestimés, et ce, d'autant plus que les gradients bathymétriques sont forts le long des frontières du domaine. Pour palier ce problème, nous avons étendu l'emprise du rang 3 car l'emprise initiale (longitude Ouest : 1°50'W) engendrait de trop forts gradients bathymétriques au niveau du canyon de Cap Breton sur la frontière Ouest du domaine.

Au final, la principale limite du modèle mis en place porte sur l'existence d'oscillations numériques, visibles sur les profils temporels de vitesses dans la zone du canyon de Cap Breton.

5. Impact du coefficient de marée

5.1. VALIDATION DU MODÈLE POUR UNE VIVE-EAU MOYENNE

Pour valider le modèle, la configuration 1 (vive-eau moyenne sans vent) est choisie. Les résultats en terme de marée (variations temporelles et spatiales de la cote surface libre) sont analysés et comparés aux données disponibles. Ceci permet d'effectuer un premier ajustement des paramètres du modèle (en l'occurrence, il s'agit ici du coefficient de frottement au fond). Ensuite, les résultats en terme de courants sont présentés et comparés aux données disponibles.

5.1.1. Marée

Pour évaluer les résultats en terme de marée pour une vive-eau moyenne, les hauteurs d'eau prédites par le SHOM pour un instant donné sont utilisées (non prise en compte des conditions météorologiques). Ces données de marée sont considérées comme des données de référence. En effet, elles sont issues de mesures marégraphiques validées et analysées pour déduire les composantes de marée.

La Figure 9 présente les variations temporelles de la surface libre à Saint-Jean-de-Luz, obtenues avec le modèle, comparées à celles issues des prédictions de marée du SHOM pour la marée réelle de coefficient 95 du 24/01/2004 à Saint-Jean-de-Luz. Le marnage obtenu à Saint-Jean-de-Luz est de 3,80 m, tandis que celui prédit par le SHOM est de 3,65 m. Le modèle surestime donc le marnage d'environ 15 cm, soit 4%. Cet écart est à rapprocher des erreurs entre modèle et mesure, de l'ordre de 12 à 25 cm à Anglet, obtenues par Brière (2004).

La Figure 9 montre aussi les courbes de marée aux trois ports Saint-Jean-de-Luz, Boucau-Bayonne et Vieux Boucau. Le marnage reste constant sur toute la Côte Basque avec une valeur de 3,80 m. Or, d'après les prédictions du SHOM, ce marnage devrait diminuer de Saint-Jean-de-Luz (3,65 m) à Vieux-Boucau (3,43 m).

Si l'on compare les résultats du modèle (coef. 95) à la marée prédite, la marée n'est donc pas reproduite de manière complètement satisfaisante avec un marnage constant sur la Côte Basque alors que celui-ci décroît du Sud vers le Nord. La qualité du modèle se dégrade donc vers le Nord.

Pour une étude plus quantitative, il conviendrait de résoudre le problème de surestimation du marnage, en prenant en compte par exemple plus de composantes de la marée au niveau des frontières du modèle.

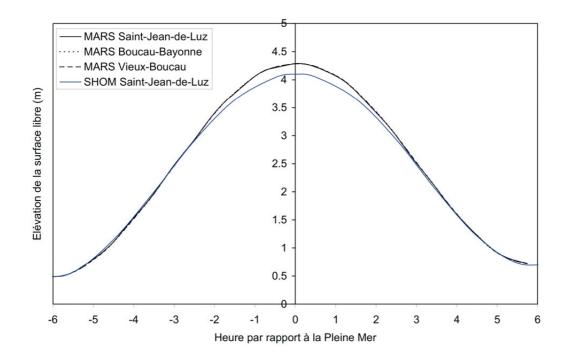


Figure 9 – Marée simulée pour un coefficient de Strikler $K = 20 \text{ m}^{1/3} \text{s}^{-1}$ et un coefficient de marée de 95 (le 24/01/2004) et comparaison avec les prédictions du SHOM.

5.1.2. Courants

Données disponibles pour la validation

En terme de courants de marée, peu de données sont disponibles et directement exploitables pour valider le modèle de courant en vive-eau moyenne. Aussi, les courants ont été comparés à l'atlas de courants du Golfe de Gascogne, édité par le SHOM (SHOM, 2002). Cet atlas donne peu de valeurs de courants dans la zone, étant donné la grande emprise du modèle du SHOM. Toutefois, ces quelques données permettent d'évaluer la qualité du modèle en terme de courants. Le courant de flot a lieu 2h50min (± 30 min) avant la Pleine Mer à Saint-Jean-de-Luz et le courant de jusant a lieu 3h10min (± 30 min) après la Pleine Mer à Saint-Jean-de-Luz. La marge de ± 30 min est due au fait que les planches de courants sont tracées uniquement toutes les heures dans les atlas de courants du SHOM. Sur la Côte Basque (point situé dans le canyon, près de la frontière Ouest du rang 3 de notre modèle), l'intensité des courants de flot et jusant est de l'ordre de 0,1 nd (aux arrondis près, comprise entre 0,05 et 0,15 nd), soit, 0,05 m/s (comprise entre 0,025 et 0,075 m/s) (Figure 10).

Résultats du modèle

La Figure 11 montre les profils temporels de courant obtenus avec le modèle, aux points A (-1,75E ;43,5N) et B (-1,8E ; 43,6N) situés respectivement au Sud du canyon

de Cap Breton et dans le canyon de Cap Breton. Le modèle n'est pas complètement stable : on observe des oscillations numériques de l'ordre de 0,002 m/s. Leur origine n'est pas clairement identifiée à ce stade. L'amplitude des oscillations étant faible dans l'absolu, ces résultats sont considérés comme acceptable pour cette étude qualitative. Les roses de courant correspondantes sont tracées sur la Figure 12. D'après les Figure 11 et Figure 12, le flot a lieu à 3h15min avant la Pleine-Mer tandis que le jusant a lieu 2h45min. Les planches de courants de flot et de jusant sont tracées sur la Figure 13.

Comparaison modèle - données

D'après le profil temporel de vitesse (Figure 11), l'intensité des courants en A et B est comprise entre 0,025 et 0,04 m/s. Le point B (où la vitesse atteint environ 0,04 m/s) correspond à un point de l'atlas de courant où la vitesse est de 0,1 nd (i.e. 0,025 m/s < U < 0,075 m/s). Les résultats obtenus en terme de courant sont donc acceptables par rapport aux données de l'atlas de courant.

En outre, les planches de courant (Figure 13) montrent que le courant, dans la zone d'étude, est globalement compris entre 0,02 m/s et 0,05 m/s, ce qui est cohérent avec l'atlas de courant du SHOM.

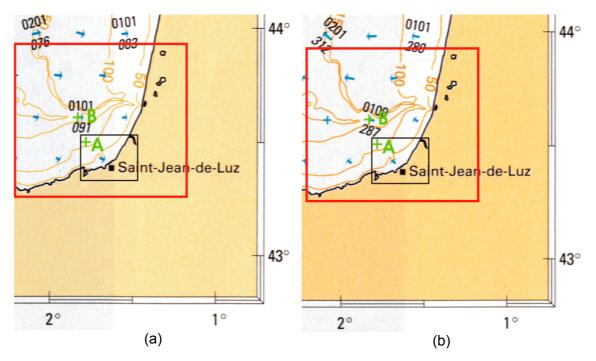


Figure 10 – Courants de marée 3h50min avant la PM à Saint-Jean-de-Luz (a) et 2h10min après la PM (b). Le cadre rouge indique l'emprise du rang 3 du modèle mis en place et le cadre noir indique la zone finale d'intérêt. Les croix vertes indiquent les points de tracé A et B des courants issus du modèle. Les fonds de cartes comportant les courants sont extraits de scan de l'atlas de courant du Golfe de Gascogne (SHOM, 2002). La valeur du courant est portée en 10^{ième} de nœud (1 nd ~ 0,5 m/s) pour une vive-eau moyenne (2 premiers chiffres) et pour une morte-eau moyenne (2 derniers chiffres). La direction indiquée est en degrés, au-dessous des flêches, correspondant à la direction de vive-eau, en général identique à celle de morte-eau. Les flêches sont remplacées par des croix, dès que la vitesse du courant est inférieure à 0,05 nd.

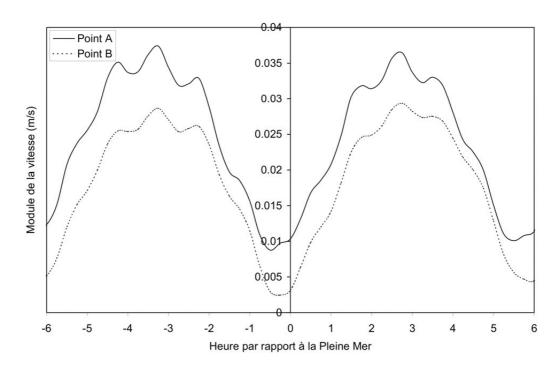


Figure 11 – Profil temporel de courant aux points A (Sud Canyon), B (Canyon). Positions indiquées sur la Figure 10. PM indique la Pleine Mer à Saint-Jean-de-Luz. Coefficient de marée 95, vent nul. Le 24/01/04.

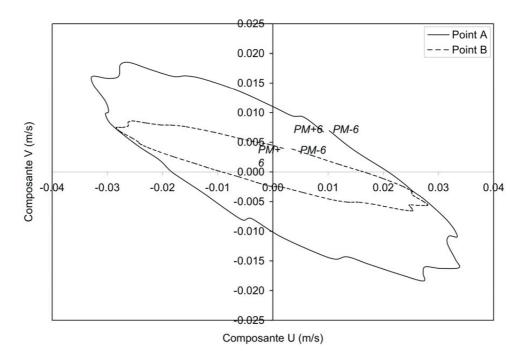


Figure 12 – Rose de courant aux points A (Sud Canyon), B (Canyon). Positions indiquées sur la Figure 10. Coefficient de marée 95, vent nul. Le 24/01/04. (U : Ouest-Est ; V : Sud- Nord)

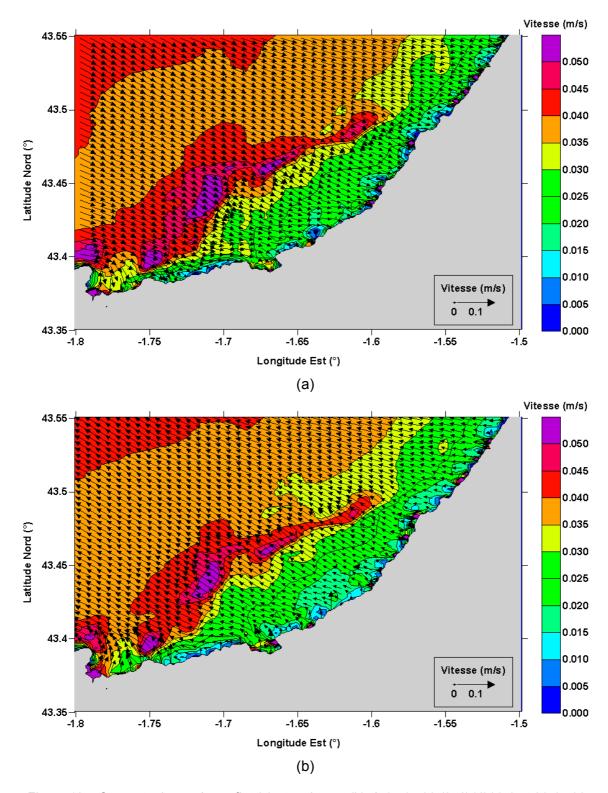


Figure 13 – Courants de marée au flot (a) et au jusant (b), à 14:15:00 (24/01/2004) et 20:15:00 (24/01/2004). Coefficient de marée 95, sans vent.

5.2. MORTE-EAU MOYENNE

La deuxième configuration de marée considérée est une Morte-eau Moyenne (M.E.M.).

5.2.1. Surface libre

La Figure 14 montre que la marée de morte-eau moyenne varie peu de Saint-Jean-de-Luz à Vieux-Boucau, tout comme pour la VEM. Le marnage obtenu à Saint-Jean-de-Luz est alors de 1,92 m. Les données SHOM prévoient un marnage de 1.8 m (erreur d'environ 6%). Les résultats du modèle sont donc acceptables en terme de hauteur d'eau, pour les objectifs d'étude hydro-sédimentaire qualitative de la Côte Basque.

5.2.2. Courants

En terme de courants, le tracé des courants de flot et de jusant (Figure 15) montre que les courants maximaux sont de l'ordre de 0,015 m/s. Or, l'atlas de courant donne une valeur de 0,1 nd au flot et 0 nd au jusant, soit une vitesse comprise entre 0,025 et 0,075 m/s au flot et comprise entre 0 et 0,025 m/s au jusant. Les ordres de grandeur sont donc respectés.

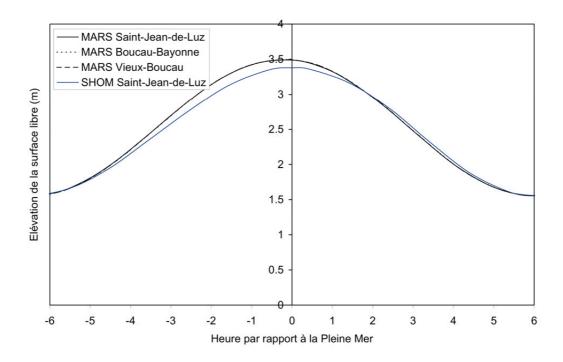


Figure 14 – Marée simulée. Coefficient de marée 45, sans vent. Le 02-03/01/04. Comparaison avec les prédictions du SHOM.

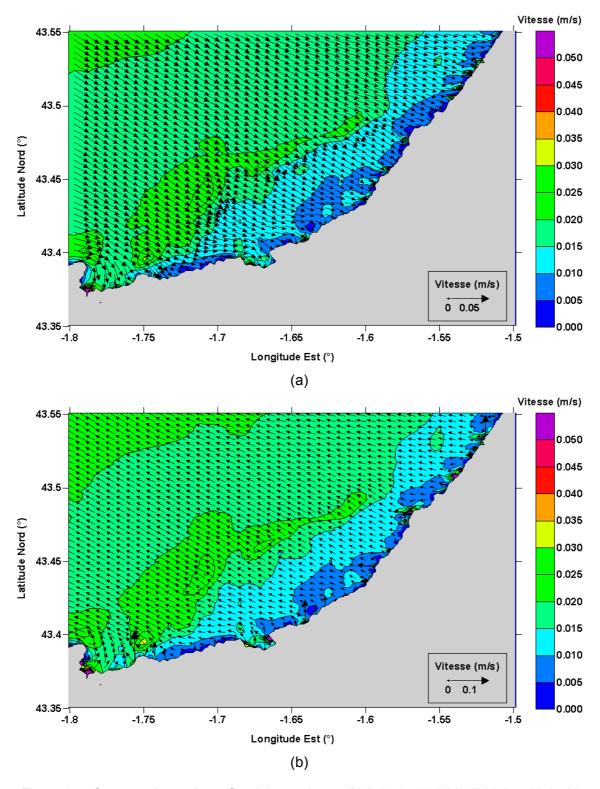


Figure 15 – Courants de marée au flot (a) et au jusant (b) à 21:15:00 (02/01/2004) et 03:15:00 (03/01/2004). Coefficient de marée 45, sans vent.

6. Impact des tempêtes

6.1. VIVE-EAU MOYENNE ET VENTS REPRÉSENTATIFS

A partir de l'étude des conditions météorologiques (§ 2.3), deux scenarii de vent sont étudiés : (1) vent de 40 m/s, provenance Ouest, (2) vent de 40 m/s, provenance Sud. L'influence de ces tempêtes est tout d'abord étudiée pour une vive-eau moyenne.

6.1.1. Surface libre

Dans les simulations, seul le forçage dû au vent est pris en compte, ainsi que la marée, mais les variations de pression sont négligées. Le vent est considéré homogène et stationnaire.

La Figure 16 montre les variations temporelles de surface libre à Saint-Jean-de-Luz pour les cas sans vent, avec vent d'Ouest et avec vent de Sud. Les vents d'Ouest engendrent une surcote, tandis que ceux de Sud engendrent une décote.

Le tracé des surcotes-décotes à Saint-Jean-de-Luz (Figure 17) montre que dans le premier cas (vent d'Ouest) la surcote est d'environ 30 cm. Cette surcote augmente vers le Nord (Figure 18). En effet, le vent tend à pousser la masse d'eau sur la façade Atlantique. Cette masse d'eau est piégée par l'Espagne et s'écoule le long de la côte Atlantique française, vers le Nord.

Dans le deuxième cas (vent du Sud) la décote à Saint-Jean-de-Luz est d'environ 5-10 cm (Figure 17). Cette décote diminue du Sud vers le Nord (Figure 19). En effet, le vent tend à transférer la masse d'eau du Sud vers le Nord, engendrant donc des décotes au Sud (côte espagnol) de la façade Atlantique.

En résumé, le modèle de courants de marée mis en place prédit des surcotes de plus de 30 cm, pour des vents d'Ouest de 40 m/s. Les vents de Sud ont un effet inverse et engendrent des décotes à Saint-Jean-de-Luz (5-10 cm).

6.1.2. Courants

La Figure 20 montre les courants induits par la marée (VEM) et le vent d'Ouest. Le courant est toujours orienté Nord-Ouest et qu'il n'y a plus de renverse du courant au cours d'un cycle de marée. En terme d'intensité, les courants sont largement plus forts (10 fois) et ont une valeur de l'ordre de 0,40 m/s, tandis que sans vent, les courants étaient de l'ordre de 0,04 m/s.

Pour les vents de Sud, tout comme pour les vents d'Ouest, il n'y a pas de renverse du courant au cours du cycle de marée : les courants sont toujours orientés Nord-

Ouest. En terme d'intensité, les courants sont légèrement plus faibles que pour le cas d'une tempête d'Ouest (0,25 m/s) et plus forts que pour le cas sans vent (0,025 m/s).

Les courants de marée apparaissent donc négligeables sur la Côte Basque, tandis que les courants dus au vent sont importants, avec une intensité de l'ordre de 0,40 m/s pour les vents d'Ouest.

En terme de transport de sédiment, pour exemple, d'après (Van Rijn, 1989), pour mettre en mouvement des grains de 0,1 mm par 10 m de fond, il faudrait une vitesse de 0,42 m/s. Les vitesses engendrées par les vents restent donc trop faibles pour mettre en mouvement des sédiments.

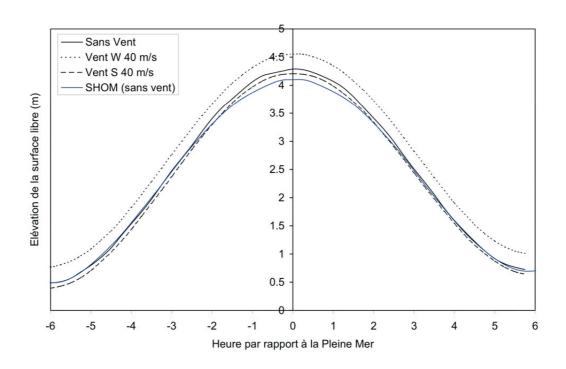


Figure 16 – Marée à Saint-Jean-de-Luz pour les trois configurations de VEM : sans vent, vent de 40 m/s Ouest, vent de 40 m/s Sud.

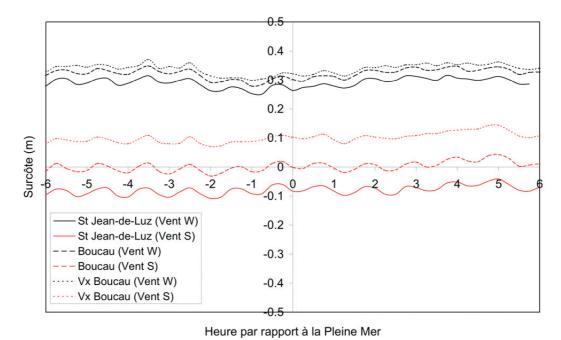


Figure 17 – Surcote (vent Ouest, 40 m/s) et décote (vent Sud, 40 m/s) à Saint-Jean-de-Luz, VEM.

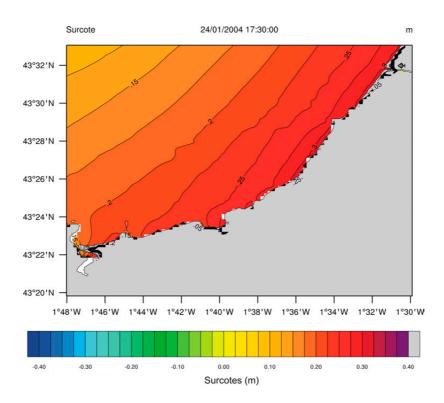


Figure 18 – Surcotes pour un vent d'Ouest de 40 m/s et un coefficient de marée 95. Surcote à la Pleine-Mer (17:30:00 - 24/01/2004).

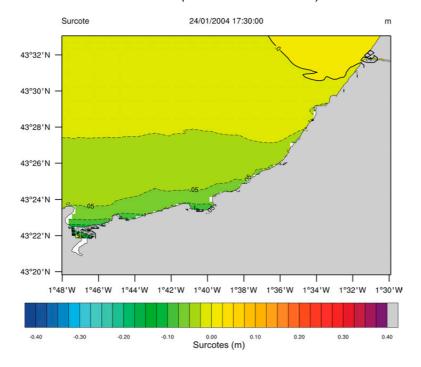


Figure 19 – Décotes pour un vent de Sud de 40 m/s et un coefficient de marée 95. Décote à la Pleine-Mer (17:30:00 - 24/01/2004).

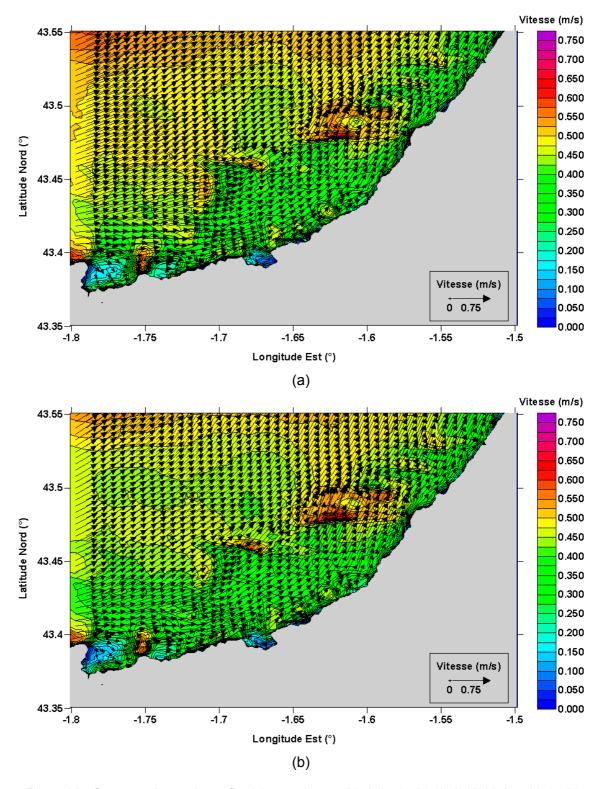


Figure 20 –Courants de marée au flot (a) et au jusant (b), à 14:15:00 (24/01/2004) et 20:15:00 (24/01/2004). Coefficient de marée 95, vent d'Ouest de 40 m/s.

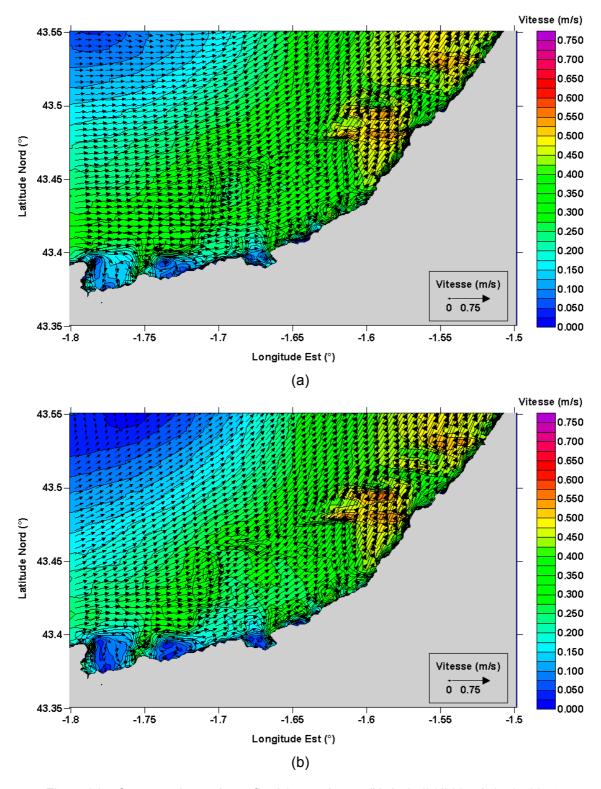


Figure 21 – Courants de marée au flot (a) et au jusant (b), le 24/01/2004, à 14:15:00 et 20:15:00. Coefficient de marée 95, vent de Sud de 40 m/s.

6.2. MORTE-EAU MOYENNE ET VENTS REPRÉSENTATIFS

L'impact des tempêtes pour une morte-eau moyenne est étudié. Les mêmes conditions météorologiques que pour la vive-eau moyenne sont prises en compte : (1) vent de 40 m/s, provenance Ouest, (2) vent de 40 m/s, provenance Sud.

6.2.1. Surface libre

La Figure 22 montre les résultats de surface libre obtenus à Saint-Jean-de-Luz. Tout comme pour la VEM, les vents d'Ouest y engendrent une surcote et ceux de Sud une décote.

D'après le modèle, les vents d'Ouest engendrent une surcote d'environ 30 cm à Saint-Jean-de-Luz (Figure 23). La Figure 24 montre que cette surcote augmente du Sud vers le Nord, le long du littoral.

Concernant les vents du Sud, ils engendrent une décote de 5-10 cm a Saint-Jean-de-Luz (Figure 23) et une surcote d'environ 10 cm à Vieux Boucau. La Figure 25 montre que cette décote diminue du Sud vers le Nord, le long du littoral.

Les surcotes et décotes sont donc du même ordre de grandeur que celles obtenues pour une VEM.

6.2.2. Courants

La Figure 26 montre les courants induits par la marée (MEM) et le vent d'Ouest. On constate que le courant est toujours orienté Nord-Ouest et qu'il n'y a plus de renverse du courant au cours d'un cycle de marée. En terme d'intensité, les courants sont plus forts et atteignent des valeurs de 0,40 m/s, tandis que sans vent, les valeurs étaient de l'ordre de 0,025 m/s.

La Figure 27 montre les courants induits par la marée (MEM) et le vent de Sud. Tout comme pour les vents d'Ouest, il n'y a pas de renverse du courant au cours du cycle de marée : les courants sont toujours orientés Nord-Ouest. En terme d'intensité, les courants sont légèrement plus faibles que pour le cas d'une tempête d'Ouest.

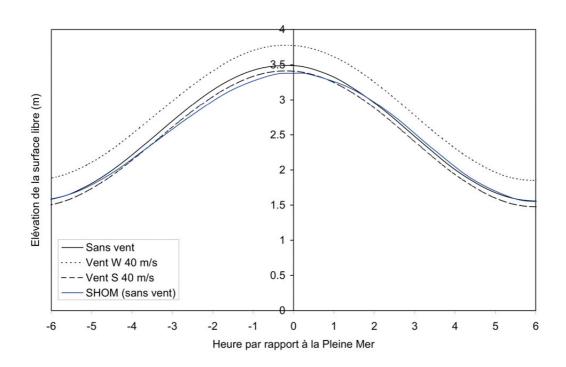
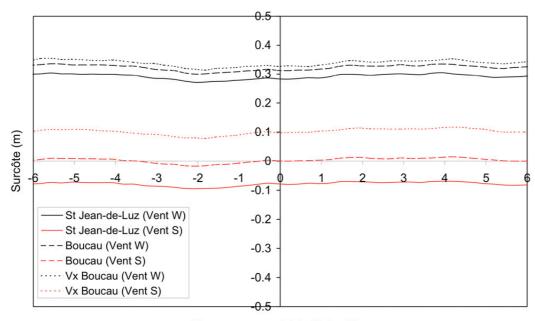


Figure 22 – Marée à Saint-Jean-de-Luz pour les trois configurations de MEM : sans vent, vent de 40 m/s Ouest, vent de 40 m/s Sud.



Heure par rapport à la Pleine Mer

Figure 23 – Surcote (vent Ouest, 40 m/s) et décote (vent Sud, 40 m/s) à Saint-Jean-de-Luz, MEM.

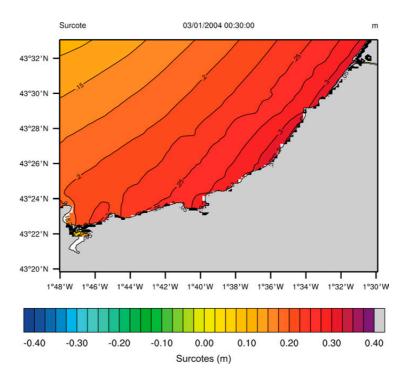


Figure 24 – Surcotes pour un vent d'Ouest de 40 m/s et un coefficient de marée 45. Surcote à la Pleine-Mer (00:30:00 – 03/01/2004).

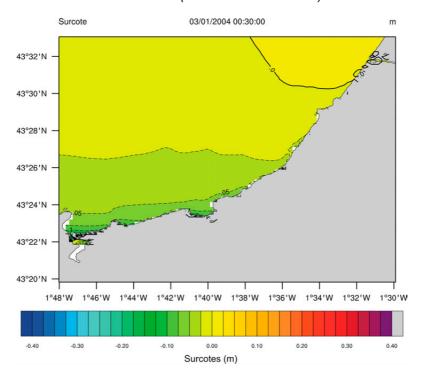


Figure 25 – Décotes pour un vent de Sud de 40 m/s et un coefficient de marée 45. Décote à la Pleine-Mer (00:30:00 – 03/01/2004).

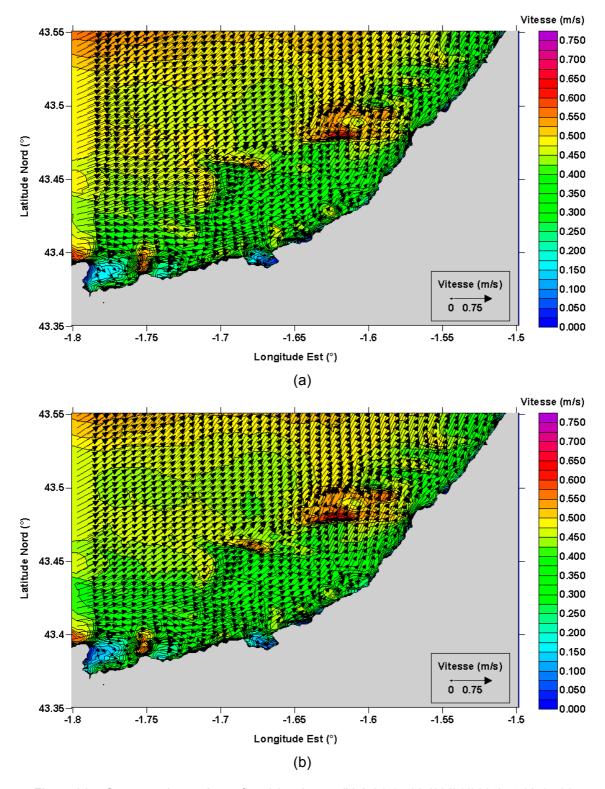


Figure 26 – Courants de marée au flot (a) et jusant (b) à 21:15:00 (02/01/2004) et 03:15:00 (03/01/2004). Coefficient de marée 45, vent d'Ouest de 40 m/s.

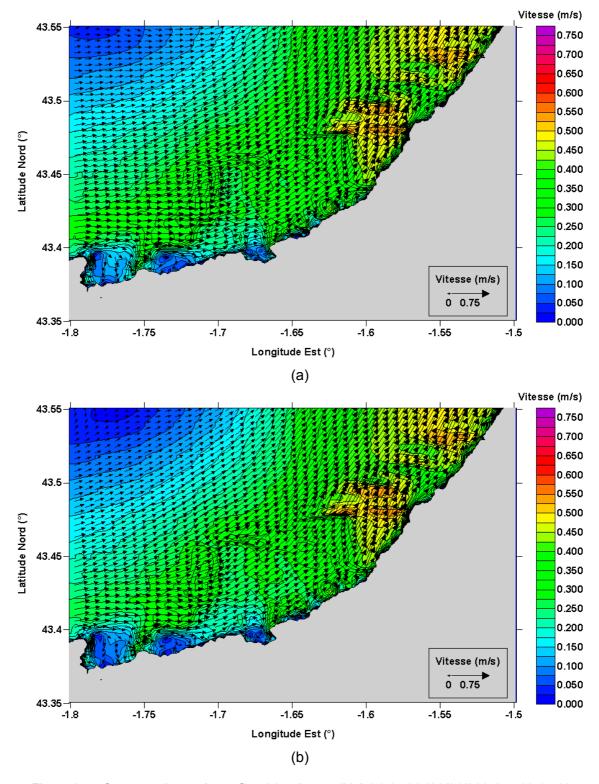


Figure 27 – Courants de marée au flot (a) et jusant (b) à 21:15:00 (02/01/2004) et 03:15:00 (03/01/2004). Coefficient de marée 45, vent de Sud de 40 m/s.

7. Tempête de 1999

La période du 26-29 décembre 1999 est choisie comme période réelle de simulation. Cette période intègre la tempête de 1999 qui a fait de nombreux dégâts sur la côte atlantique.

Cette tempête a eu lieu juste après une vive-eau. Les 26 et 27 décembre, les coefficients de marée étaient de 99 (26 matin), 94 (26 après-midi), 89 (27 matin), 83 (27 après-midi). Dans le Sud du Golfe de Gascogne, les vents maximaux atteignaient 25 m/s (Météo France, 2001), avec des vents à 17 m/s à Biarritz. Ces résultats sont issus de simulations horaires avec le modèle ALADIN de Météo France.

Dans la présente étude, afin de s'affranchir des conditions initiales (vent nul), les simulations sont effectuées sur une période plus longue, du 12 au 29 décembre 1999 (voir Tableau 3, p. 32).

En outre, le Tableau 4 synthétise les données utilisées pour estimer la qualité des résultats du modèle.

Cas		SHOM	SONEL	TOPS	Mercator	Météo- France
Vent nul	Marée	X	X			
	Courant	Х				
Vent	Marée					X
homogène, instationnaire	Courant			Х	X	

Tableau 4 - Synthèse des données utilisées pour l'estimation de la qualité des résultats du modèle (tempête de décembre 1999).

Comme les données SONEL ne sont disponibles qu'à Boucau-Bayonne, les comparaisons entre modèles et données sont effectuées à cet endroit au lieu de Saint-Jean-de-Luz comme précédemment.

7.1. SANS VENT

Une première simulation est effectuée en supposant un vent nul. Ceci permet d'évaluer l'importance des surcotes par la suite, et d'estimer la qualité du modèle pour une marée réelle.

La Figure 31 présente les résultats du modèle, sans vent, ainsi que la marée prédite par le SHOM, ne prenant en compte que la marée astronomique, et ce, à Boucau-Bayonne. Le modèle MARS à Boucau surestime toujours la marée : surestimation de la pleine-mer (~20 cm) et sous-estimation de la basse-mer (~20 cm).

7.2. AVEC VENT

7.2.1. Choix des conditions de vent

Pour prendre en compte le forçage dû au vent lors de la tempête de décembre 1999, nous disposons de plusieurs jeux de données et de plusieurs types de forçages.

Les jeux de données suivants ont été considérés :

- Sorties du modèle COAMPS Europe (http://mel.dmso.mil). T=6h, dx=0.2°, dy=0.2° avec T la période, dx le pas de maille en longitude et dy le pas de maille en latitude.
- Sorties du modèle WavewatchIII (NOAA, http://polar.ncep.noaa.gov/waves). T=3h, dx=1.25°, dy=1°.

Avec T la période des données disponibles, dx et dy les tailles de mailles en longitude et latitude.

Trois types de forçages sont possibles dans le logiciel MARS :

- Conditions stationnaires et homogènes (vent imposé)
- Conditions instationnaires et homogènes (vent imposé)
- Conditions instationnaires et non-homogènes (vent et pression imposés)

La première option (conditions stationnaires et homogènes) est trop simplificatrice des conditions météorologiques. En effet, il est difficile de choisir une valeur représentative des conditions de vent sur la zone d'emprise du modèle (rang 0) et représentative de l'intensité du vent (prendre la moyenne sur la période n'est pas recommandé, et sous-estime les surcotes). Concernant la troisième option, elle nécessite de disposer de données météorologiques sur tout le domaine (rang 0), au format adapté pour le logiciel *MARS*. Etant donné l'aspect qualitatif de cette étude, la deuxième option est choisie : conditions instationnaires homogènes.

Concernant le choix du type de données, un sous-échantillonnage temporel du forçage météorologique engendre une perte d'énergie et donc une sous-estimation des surcotes (Météo France, 2001). Par conséquent, les données issues du modèle WavewatchIII (NOAA) sont utilisées car l'échantillonnage temporel de ces données est meilleur (T=3h contre T=6h pour le modèle WAM).

Afin d'imposer des conditions de vent représentatives de la circulation générale induite par le vent dans le Golfe de Gascogne durant la tempête de 1999, le point de coordonnées (45°N;-6.25°E) est choisi pour extraire les données de WavewatchIII et forcer le modèle *MARS*. La Figure 29 présente le forçage effectivement utilisé. Notons que nous retrouvons bien les deux tempêtes du 26 et 27 décembre avec des vitesses de 26,5 et 28,7 m/s, venant de l'Ouest. Après le 27 décembre, la vitesse du vent diminue. Les deux tempêtes engendrent donc des conditions favorables aux surcotes (cf simulations précédentes à vive-eau moyenne et vent constant venant d'Ouest).

7.2.2 Surface libre

Pour estimer la qualité des résultats de surface libre, deux sources de données sont utilisées :

- Etude de surcote de Météo France (2001)
- Mesures de hauteur d'eau à Boucau-Bayonne (réseau SONEL)

L'étude de surcote réalisée par Météo France donne, pour la journée du 27/12/1999, des surcotes comprises entre 25 et 50 cm sur la Côte Basque (Figure 28), avec 25 cm à Biarritz et une surcote qui augmente le long de la cote, vers le Nord. Ces résultats ont été obtenus à partir d'un modèle basé sur les équations de Saint Venant et prenant en compte comme forçages la marée, le vent et le champ de pression.

Concernant les mesures du réseau SONEL, disponibles pour Boucau-Bayonne, elles font partie des données brutes, non validées, du réseau SONEL (pas de données validées disponibles pour ce port sur le réseau SONEL). Pour tester la validité des données de SONEL à Boucau-Bayonne, elles sont comparées aux prédictions du SHOM (Figure 30) pour une période précédée de 3 semaines de temps calme (vent < 10 m/s). La période choisie est le 1er juillet 1999. Les écarts restent relativement faibles, avec un écart maximal de 19 cm au moment du perdant (17:00). Par contre, les basses mers sont très proches. La surcote peut alors être estimée à Boucau-Bayonne en utilisant les mesures SONEL et les prédictions SHOM (Figure 32) avec un échantillonnage temporel de 1 h. Ces observations montrent que la surcote varie avec la marée : la surcote est plus importante à marée basse (~100 cm le 28/12/1999) qu'à marée haute (~40 cm le 28/12/1999). On note aussi un déphasage entre les pleinesmers sans vent (simulées ou prédites par le SHOM) et les pleines-mers avec le vent (simulées ou issues du réseau SONEL) (Figure 31) : le vent engendre un retard de la pleine-mer. Pour la journée du 27 décembre, la surcote maximale ainsi observée est de 95 cm.

Ces deux sources de données fournissent donc des surcotes très différentes : de l'ordre de 25-30 cm d'après Météo France et 95 cm d'après mesure de hauteur d'eau.

Le niveau de la mer à Boucau-Bayonne issue de notre modèle est alors tracé (Figure 31), avec et sans vent (échantillonnage temporel : 15 min) et superposée aux prédictions de marée du SHOM et mesures issues du réseau SONEL. La Figure 31 montre que le modèle sous-estime systématiquement la cote de la surface libre à

marée basse, avec un écart maximal de 1 m le 28 décembre. Lors des pleines-mers, les écarts sont moindres (maximum de 0,30 m le 28 décembre). En terme de surcotes, sur la période du 26 au 29 décembre 1999, le modèle donne une surcote comprise entre 15 cm et 19 cm, de Saint-Jean-de-Luz à Vieux Boucau (Figure 32). D'après le modèle, la surcote maximale est atteinte le 27 décembre, tandis que l'observation indique cette surcote est atteinte le 28 décembre, sachant que le pic de vent est atteint le 27 décembre. Il existe donc un retard entre surcote observée et pic de tempête. Le modèle ne semble pas reproduire ce retard. Le tracé des surcotes le 27/12/1999, à 15h15min, heure de surcote maximale d'après le modèle, montre l'augmentation de la surcote le long de la Côte Basque, de Saint-Jean-de-Luz à Vieux Boucau.

Par rapport aux données disponibles (Météo-France et SONEL), le modèle prédit une surcote du même ordre de grandeur que celle du modèle de Météo-France, mais largement inférieure (à basse-mer) que les surcotes maximales déduites des mesures SONEL. Plusieurs explications sont possibles :

- Différence avec le modèle Météo-France :
 - notre modèle prend en compte un forçage de vent instationnaire mais homogène, tandis que le modèle de Météo-France inclut un forçage instationnaire et non-uniforme
 - notre modèle ne prend pas en compte les effets de la pression, contrairement au modèle de Météo-France
- Différence avec la mesure SONEL :
 - Les effets de la houle ne sont pas pris en compte, aussi bien dans notre modèle, que dans celui de Météo-France. Or, d'après Weaver (2004), dans les zones de forte pente bathymétrique (comme la Côte Basque avec le Canyon de Cap Breton), les surcotes dues à la houle (non prise en compte dans ce rapport, mais prise en compte dans (Pedreros et Idier, 2005)) seraient dominantes devant celles dues uniquement à la force d'entraînement du vent (prise en compte dans ce rapport).
 - Le marégraphe utilisé (Boucau-Bayonne) est situé dans l'Adour et non sur la côte. Or l'Adour n'est pas représenté dans notre modèle. Ceci peut impliquer des effets liés à la morphologie de l'emplacement du marégraphe, ainsi qu'aux précipitations.

Les résultats du modèle semblent donc qualitativement acceptables, mais des pistes sont identifiées (effets de la houle, d'un forçage non-homogène et de la pression) pour améliorer ces résultats.

7.2.3. Courants

Sur la Côte Basque, la présence de courants saisonniers est souvent évoquée. Ces courants saisonniers correspondent par exemple aux courants issus du GIP Mercator

Ocean (Figure 37). Les données Mercator intègrent l'effet du vent et les circulations des masses d'eau (effets thermo-halins pris en compte) en 3D, mais pas l'effet de la marée. La présence du courant de la Nativité (Portugal) est associée à des situations météorologiques dépressionnaires qui affectent le large du Portugal et génèrent un régime de vent de SW. Ce vent provoque un afflux d'eau à la côte portugaise qui est ensuite canalisée par le courant de la Nativité jusqu'au fond du Golfe de Gascogne. D'après

ocean.fr/documents/actualites/news/Metier Previsionniste.pdf], l'ordre de grandeur de ces courants sur Côte Basque en période dépressionnaire est de 0,1 m/s. Donc ces courants ne sont pas négligeables par rapport aux courants de marée (0,04 m/s en vive-eau moyenne). Dans ce qui suit, l'importance relative des courants de marée et induits par le vent avec le modèle 2DH MARS par rapport à ce courant de la nativité sera évalué.

D'après le modèle, la surcote maximale est atteinte le 27 décembre à 15h15min. Les champs de courants sont donc tracés pour cette date, au flot et au jusant, sans et avec prise en compte du vent (Figure 34 et Figure 35). Ces figures montrent l'influence du vent sur les courants : le long de la Côte Basque, le courant reste parallèle à la côte, orienté de l'Espagne vers la France. En outre, l'intensité des courants est plus forte que lorsque le vent est négligé, avec une valeur de l'ordre de 0,25 m/s, atteignant localement 0,4 m/s, tandis que la vitesse maximale est de 0,025 m/s lorsque le vent est négligé. En terme de transport de sédiments, ces courants restent insuffisants pour mettre en mouvement les sédiments sableux. En effet, pour exemple, pour mettre en mouvement des grains de 0,3 mm par 30 m de fond, il faudrait une vitesse de l'ordre de 0,47 m/s (van Rijn, 1989).

Pour estimer la qualité du modèle en terme de courants, deux sources de données sont utilisées :

- Modèle TOPS : résolution de 1°.
- Mercator : résolution de 1/15°.

Le modèle TOPS donne les courants de surface induits par le vent, sans prise en compte de la marée. Etant donné la faible intensité des courants de marée dans la zone (inférieure à 0,04 m/s en VEM), utiliser cette source de données semble raisonnable. Le point le plus près du domaine d'étude a pour coordonnées (-2°E; 44°N). Sur la période du 27/12/1999 au 28/12/1999, avec un échantillonnage temporel de 6 à 12h, la vitesse maximale en ce point est de 0,3 m/s.

Les résultats issus du rang 3 du modèle ne peuvent pas être comparés directement à ces données, puisque le domaine du rang 3 n'inclut pas le point (-2°E; 44°N). La vitesse en ce point, issue du rang 1 est donc tracée (Figure 36). L'intensité du courant en ce point le 27/12/1999 est, d'après le modèle, de l'ordre de 0,1 m/s, i.e. du même ordre de grandeur que le courant issu du modèle TOPS.

En outre, par rapport aux courants de la nativité de l'ordre de 0,1 m/s, notons que notre modèle donne des résultats du même ordre de grandeur. A titre indicatif, le modèle

Mercator, le 1^{er} octobre 2003 (Figure 37), donne une vitesse moyenne, à 3 m sous la surface de l'eau, de l'ordre de 0,25 m/s au niveau du point de coordonnées (-2°E; 44°N), ce qui est du même ordre de grandeur que les données TOPS et notre modèle.

Il semble donc que, avec le modèle 2DH mis en place dans cette étude (Mars) forcé par un modèle de vent, on puisse aussi reproduire ce phénomène de courant de la Nativité, de manière qualitative puisque nous obtenons des vitesses de l'ordre de 0,1 m/s sur un point de grille Mercator, en période de tempête (octobre 1999).

7.3. CONCLUSION ET PERSPECTIVES

Les courants ont été simulés pour la tempête de décembre 1999 en supposant un vent homogène. Malgré cette hypothèse, les résultats obtenus avec le modèle présentent des ordres de grandeur cohérents avec les données disponibles issues de Météo-France. D'après le modèle, la surcote maximale sur la Côte Basque varie de 15 cm à Saint-Jean-de-Luz, à 19 cm à Vieux Boucau. Ces valeurs sous-estimées sont en accord avec les surcotes maximales observées à Boucau-Bayonne, mais sont du même ordre de grandeur que les surcotes obtenues avec le modèle de Météo France. En terme de courants, l'impact de la tempête est important, avec des courants restant orientés de l'Espagne vers la France, atteignant localement 0,4 m/s, ce qui est toutefois insuffisant pour mettre en mouvement des sédiments sableux. Cependant, l'intensité moyenne de l'ordre de 0,25 m/s n'a pas pu être validée, faute de données disponibles pour cette période de tempête, dans cette zone.

Des écarts ont été observés concernant la cote de la surface libre, dans le cas avec prise en compte du vent. Rappelons que le modèle est forcé par un vent instationnaire homogène. Or, pendant cette période, comme le montre la Figure 38, le vent n'était pas homogène. Une prochaine étape serait donc de prendre en compte le vent instationnaire non-homogène, avec prise en compte du champ de pression, et d'évaluer si cette prise en compte améliore les résultats en terme de surcotes.

Surcote maximum du 27 au 28 decembre 1999: 109 cm

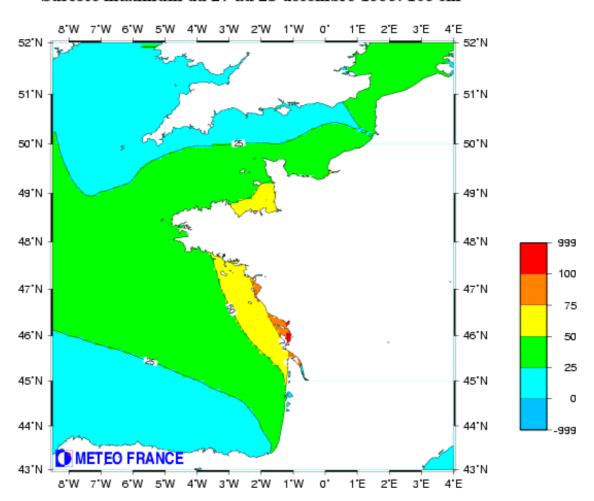


Figure 28 – Surcotes maximales (cm) calculées du 27 au 28 décembre 1999 par Météo-France, avec son modèle de surcote (Météo-France, 2001).

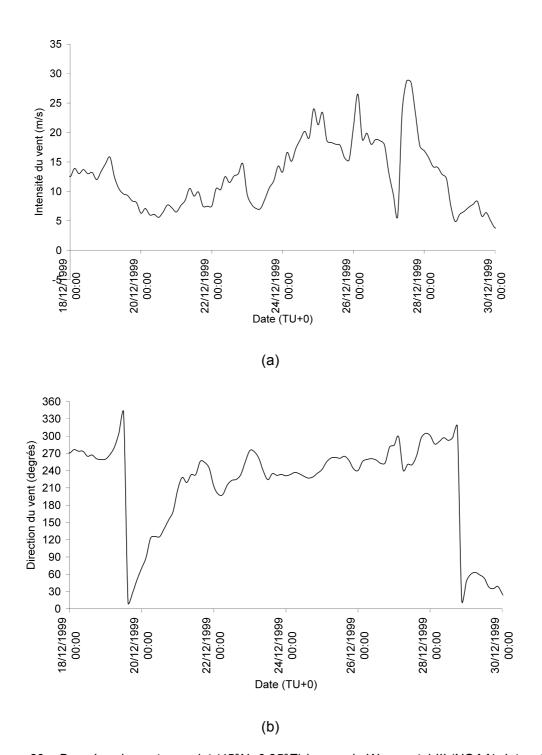


Figure 29 – Données de vent au point (45°N;-6.25°E) issues de WavewatchIII (NOAA). Intensité (a) et provenance (b). Convention nautique utilisée : Vent de Nord à 0°.

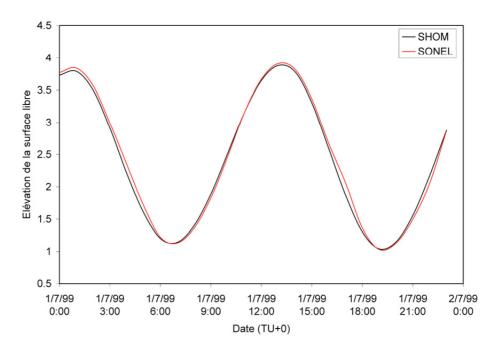


Figure 30 – Elévation de la surface libre à Boucau-Bayonne. Le 1^{er} juillet 1999. Comparaison entre prédictions du SHOM et données SONEL

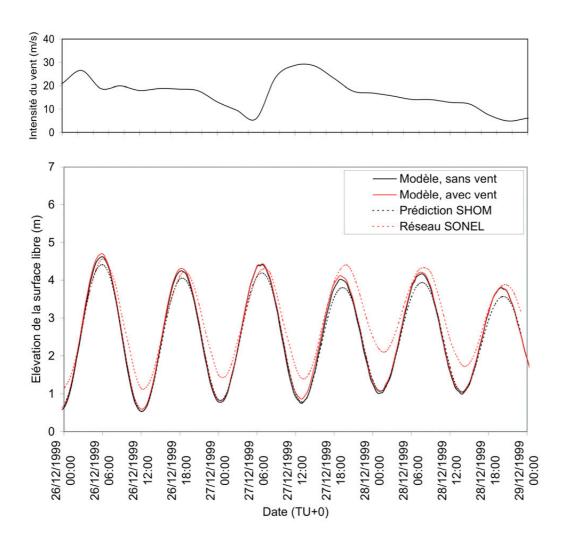


Figure 31 – Elévation de la surface libre à Boucau-Bayonne, 26-29 décembre 1999 (UT+0). Résultats du modèle Mars, avec et sans vent. Prédiction du SHOM. Données du réseau SONEL (données brutes, non validées, à Boucau).

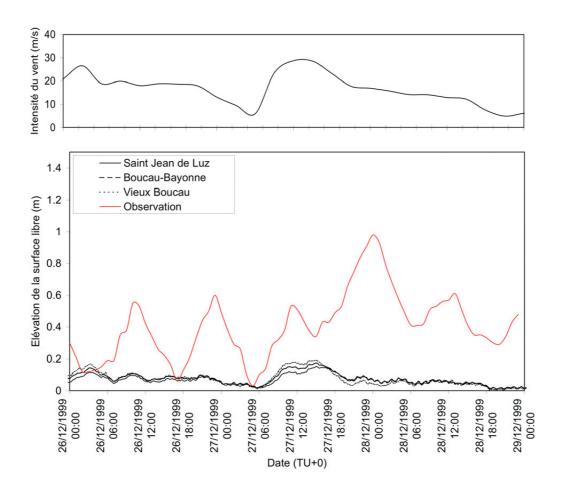


Figure 32 – Surcotes engendrées par un forçage météorologique au point de coordonnées (45°N;-6.25°W). "Observation "correspond à la différence entre la marée observée à Boucau-Bayonne (SONEL) et la marée prédite (SHOM).

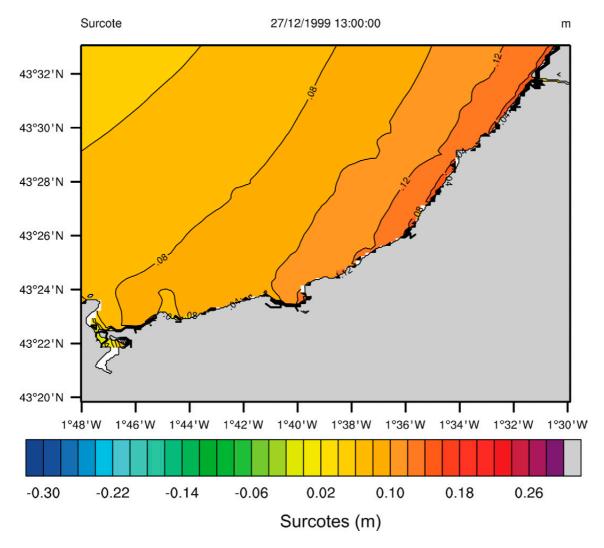


Figure 33 – Surcote le 28/12/1999, 12:00. Forçage météorologique issu de WaveWatch III au point de coordonnées (45°N;-6.25°W).

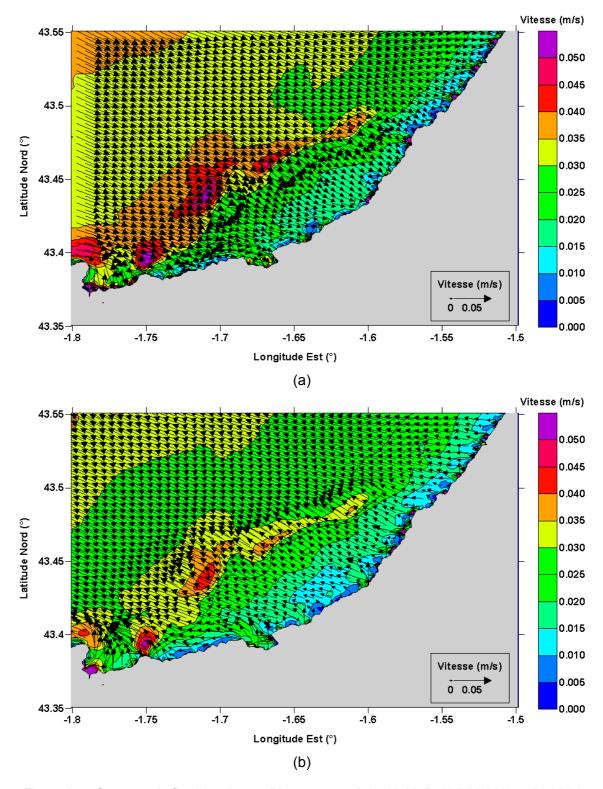


Figure 34 – Courants de flot (a) et jusant (b), sans vent, à 05:30:00 (le 29/12/1999) et 11:30:00 (le 29/12/1999).

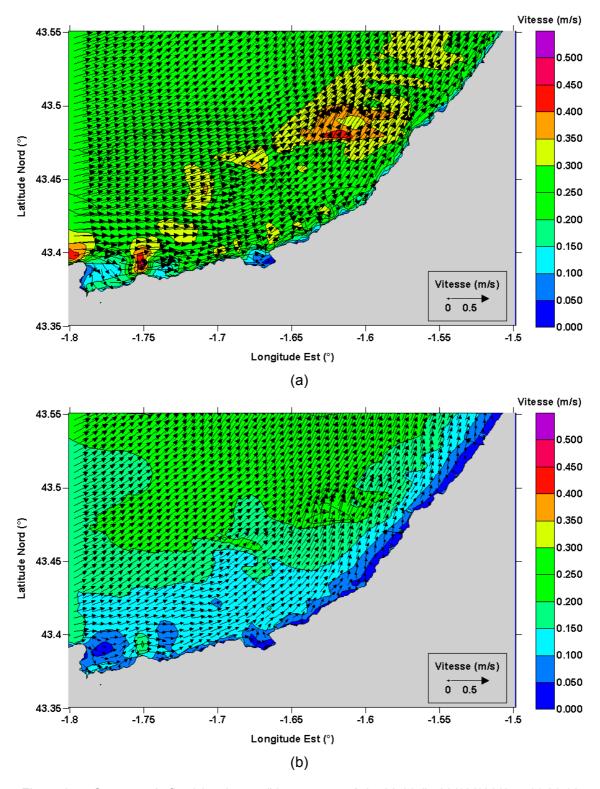


Figure 35 – Courants de flot (a) et jusant (b), avec vent, à 05:30:00 (le 29/12/1999) et 11:30:00 (le 29/12/1999).

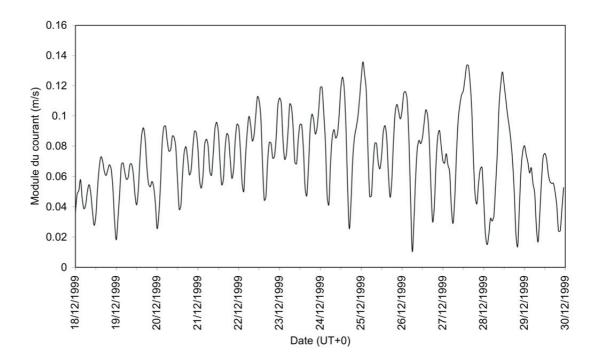


Figure 36 – Profil temporel de vitesse au point (-2°E; 44°N), rang 1. Avec vent.

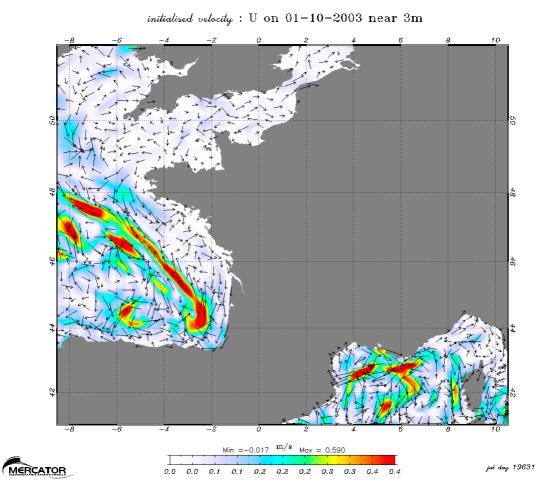


Figure 37 – Carte de courants de surface (3 m sous la surface) issue du GIP Mercator Ocean (Mercator Atlantique Nord et Méditerranée haute résolution 1/15°).

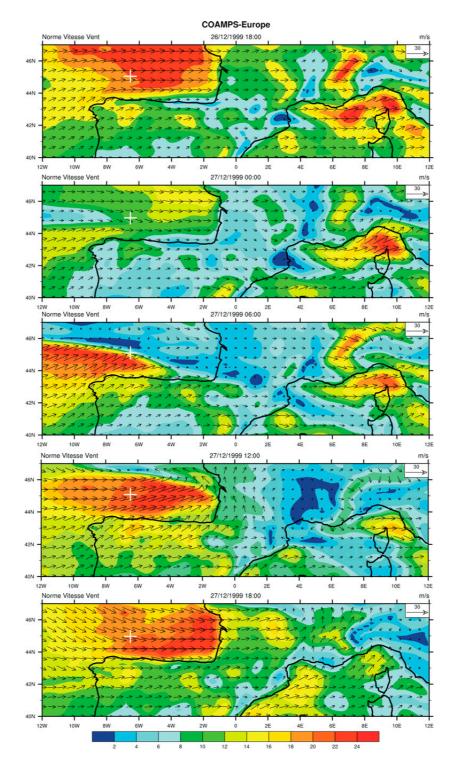


Figure 38 – Champs de vent issus du modèle COAMPS. Marqueur blanc : point de forçage du modèle MARS pour la tempête de 1999.

8. Conclusion

Dans le cadre des travaux de l'Observatoire de la Côte Aquitaine (Contrat Plan Etat – Région 2000-2003) pour l'étude qualitative des transports hydro-sédimentaires sur la Côte Basque, le BRGM a mis en place un modèle de courants associés à la marée et aux contraintes dues au vent. Ce modèle a été validé en terme d'ordres de grandeurs. Les objectifs étant d'analyser le rôle des facteurs océanographiques (marée et houle) sur les instabilités de la côte basque. A ce titre, cette modélisation des courants est effectuée de façon simultanée et coordonnée avec la modélisation de la propagation de la houle sur le plateau continental interne du Pays-Basque (Pedreros et Idier, 2005).

Ce modèle de courants est basé sur le logiciel *MARS* développé par l'IFREMER et mis à disposition pour cette étude. A partir de ce logiciel, des modèles emboîtés d'emprises décroissantes, du Golfe de Gascogne (maille d'environ 11 km) jusqu'à la Côte Basque (maille de 250 m), ont été construits.

Ce modèle a été mis en place pour une vive-eau moyenne. Quelques oscillations numériques sont observées sur le champ de vitesse. Cependant, les ordres de grandeurs des variations de surface libre (marée) et des courants sont cohérents avec les données disponibles.

L'influence du coefficient de marée a été étudiée. Les courants de marée pour une vive-eau moyenne sont de l'ordre de 0,04 m/s, tandis qu'en morte-eau moyenne ils sont de l'ordre de 0,015 m/s. Les courants de marée sur la Côte Basque sont donc faibles. En outre, les courants de flot sont orientés de Est à Sud-Est, tandis que les courants de jusant sont orientés de Ouest à Nord-Ouest.

L'influence des tempêtes a aussi été étudiée. Sur la côte Basque, les vents dominants viennent de l'Ouest ou du Sud. En outre, les vitesses maximales de vent sont de l'ordre de 40 m/s. L'effet du vent a été étudié pour ces deux configurations (Sud et Ouest), via l'imposition d'un vent stationnaire homogène. Les simulations ont été effectuées en VEM et en MEM. L'amplitude des surcotes-décotes semble insensible aux coefficients de marée. D'après les résultats du modèle, les vents de Sud engendrent des décotes (environ 5-10 cm, à Saint-Jean-de-Luz), tandis que les vents d'Ouest engendrent des surcotes (environ 30 cm, à Saint-Jean-de-Luz). En terme de risques, les tempêtes de Sud présentent peu de risques de surcotes pour la Côte Basque. En terme de courants, le vent entraîne des courants largement plus forts que les courants uniquement dus à la marée. Ces courants atteignent une valeur de 0,4 m/s pour un vent d'Ouest par exemple, et il n'y a alors plus de renverse de courant (les courants sont parallèles à la côte, du Sud vers le Nord).

Enfin, le cas réel de la tempête du 26-29 décembre 1999 a été étudié. Le vent a été supposé instationnaire - homogène. Les données de vent sont extraites d'un modèle mondial de houle (WavewatchIII – NOAA) en un point considéré comme représentatif du climat de vent dans le Golfe de Gascogne. Les résultats ainsi obtenus indiquent des surcotes de 15 à 19 cm, du même ordre de grandeur que les surcotes maximales

obtenues avec le modèle de Météo-France, mais largement inférieures aux surcotes observées à Boucau-Bayonne. En outre, les courants maximaux sont plus forts et atteignent des valeurs de 0,4 m/s, ne pouvant toutefois pas engendrer du transport sédimentaire. En outre, le courant est alors orienté de l'Espagne vers la France (pas de renverse du courant).

Cette étude a permis de caractériser de manière qualitative l'hydrodynamique liée aux courants de marée et aux courants induits par le vent. Le modèle mis en place est portable et a été implanté de façon à pouvoir être utilisé pour d'autres applications (cas réels), telles que des études de cas (érosion, polluants, etc...).

Ce modèle pourrait être amélioré, en particulier concernant les instabilités numériques et surestimation du marnage observées dans les cas sans vent. Dans le cas réel, il existe des différences entre les résultats du modèle et les observations. Une piste identifiée est de forcer le modèle avec un vent instationnaire non homogène et le champ de pression, au lieu d'un vent instationnaire homogène, sans champ de pression. Enfin, des données complémentaires de hauteur d'eau et courant sont nécessaires à une validation quantitative du modèle.

En vue d'applications à plus haute résolution, des données complémentaires de bathymétrie sur la frange littorale seraient aussi nécessaires.

Ce modèle pourrait alors être utilisé pour réaliser des simulations dans des zones de baies, de plages, ... à condition d'affiner le maillage et d'utiliser une bathymétrie de qualité suffisante. Ce modèle peut être utilisé pour des applications comme le suivi de traceurs, l'estimation du temps de résidence des masses d'eau ou le calcul des vitesses résiduelles.

Bibliographie

Alexandre A., Mallet C., Dubreuilh J., (2003) – Etude de l'érosion de la Côte Basque. Synthèse bibliographique. Rapport BRGM/RP-52370-FR, 125 p., 32 fig., 4 tab., 30 photos, 3 ann.

Brière C. (2004) – Etude de l'hydrodynamique d'une zone côtière anthropisée : l'embouchure de l'Adour et les plages adjacents d'Anglet. Université de Pau et des Pays de l'Adour.

Durand N. et Mallet C. (2004) - Analyse du régime météorologique de la Côte Basque. BRGM/RP52955, 60 p, 31 fig, 8 tab.

Enseeiht (1995) - http://www.enseeiht.fr/hmf/travaux/CD9598/travaux/optsee/beisee95/group1/be2/couranto.htm

Lefevre (2000) – Modélisation des marées océaniques à l'échelle globale : assimilation de données in situ et altimétriques, Thèse UPS III (Toulouse), 280 pp.

Garreau P. (2002) - Modélisation des courants côtiers Méditerranéens. Guide de l'utilisateur et synthèse des résultats et produits. Rapport IFREMER, 33 pp.

Météo France (2001) - Cartographie des zones à risque de surcotes sur les côtes de la Manche et de l'Atlantique, Rapport final, 2001. 80 pp.

Marsaleix, P., Lux, M., Pairaud, I., Lyard, F., Lettelier, T., (Date inconnue) - Modélisation de la circulation des ondes de gravité dans le Golfe de Gascogne. Présentation .ppt [http://www.aero.obs-mip.fr/activite_scientifique/oceano/index2.htm]

Pedreros, R. (2004) - Modélisation hydrodynamique de la Côte Basque. Partie II : propagation de la houle. BRGM/RP-53706-FR.

Salomon J.C., Breton M. (1993) An atlas of long term currents in the Channel, Oceanologica Acta, vol 16 n°5-6, pp 439-448.

Salomon J.C., Breton M., Guegueniat P. (1993) Computed residual flow through the Dover Strait, Oceanologica Acta, vol 16, n°5-6, pp 449-455.

SHOM (2002) – Courants de marée et hauteurs d'eau, Golfe de Gascogne, ISBN : 2-11-088305-7.

Van Rijn, L.C., Handbook : Sediment Transport by Currents and Waves, Report H 461, Delft Hydraulics, 1989.

Weaver, R.J. (2004) – Effect of wave forces on storm surge, Master thesis, university of Florida, 65 p.



Centre scientifique et technique

3, avenue Claude-Guillemin BP 6009

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