

Systeme de prevision de surcotes en Manche/Atlantique et Mediterranee

Amelioration du systeme existant sur la facade
Manche/Gascogne [D4]

Rapport final

BRGM/ RP-61019-FR

Juin 2012

Système de prévision de surcotes en Manche/Atlantique et Méditerranée

Amélioration du système existant sur la façade
Manche/Gascogne [D4]

Rapport final

BRGM/RP-61019-FR

Juin 2012

Étude réalisée dans le cadre des projets
de Service public du BRGM 2012

D. Idier¹, H. Muller¹, R. Pedreros¹, J. Thiébot¹, M. Yates¹

Avec la collaboration de
**R. Créach², G. Voineson², F. Dumas³, F. Lecornu³,
L. Pineau-Guillou³, P. Ohl⁴, D. Paradis⁴**

¹ BRGM, ² SHOM, ³ IFREMER, ⁴ METEO-FRANCE

Vérificateur :

Nom : C. Oliveros

Date : 04/06/2012

Signature :

Approbateur :

Nom : J.L. Foucher

Date : 26/06/2012

Signature :



En l'absence de signature, notamment 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.

 Ifremer

Avertissement

Ce rapport est copropriété de l'IFREMER et du BRGM, conformément aux termes de la convention.

Pour la diffusion réalisée par le BRGM, ce rapport est en accès différé au public (2 ans après la fin du projet, i.e. le 01/10/2014) et en accès restreint pour les auteurs et participants aux comités de pilotage du projet.

Le BRGM ne saurait être tenu comme responsable de la divulgation du contenu de ce rapport à un tiers qui ne soit pas de son fait, et des éventuelles conséquences pouvant en résulter.

Mots-clés : Surcotes, Modélisation 2DH, Manche-Gascogne, Wave set-up, Coefficient de traînée.

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

Idier D., Muller H., Pedreros R., Thiébot J., Yates M., avec la collaboration de **Créach R., Voineson G., Dumas F., Lecornu F., Pineau-Guillou L., Ohl P., Paradis D.** (2012) - Système de prévision de surcotes en Manche/Atlantique et Méditerranée : Amélioration du système existant sur la façade Manche/Gascogne [D4]. Rapport final. BRGM/RP-61019-FR, 165 p., 71 fig., 11 tabl., 9 ann.

© BRGM, 2012, ce document ne peut être reproduit en totalité ou en partie sans l'autorisation expresse du BRGM.

Synthèse

PREVIMER est un projet partenarial d'Océanographie Côtière Opérationnelle identifié au sein du Contrat de Projets État-Région Bretagne qui a pour objectif de construire et de mettre en ligne sur le site www.previmer.org un système d'informations et de prévisions multi échelles sur les façades métropolitaines Atlantique et Méditerranée. Le système opérationnel fonctionne à l'heure actuelle à l'échelle du plateau nord-ouest européen et produit, entre autres, des résultats de niveau marin à haute fréquence, c'est-à-dire les variations du niveau marin engendrées par l'effet de la marée astronomique et de la dynamique atmosphérique.

Afin d'améliorer la qualité des résultats en termes de prévision de surcotes, un partenariat de recherche et développements a été mis en place entre l'IFREMER et le BRGM (réf. : Ifremer 09/2 211 160). Il porte sur le développement d'un système de prévision de surcotes en Manche/Atlantique et Méditerranée, destiné à être utilisé sur la plateforme opérationnelle d'océanographie côtière. Les principaux points abordés dans ce projet sont : (1) une bibliographie décrivant les différents systèmes de prévision et d'analyse de la dynamique du niveau marin dans le monde soit à partir de la littérature scientifique soit à partir de sites dédiés à l'océanographie opérationnelle à l'instar de PREVIMER ; (2) la collecte, le traitement et la validation de données qui permettront à la fois de qualifier le système et de comprendre son fonctionnement ; (3) une amélioration de la configuration du système de calcul des surcotes sur le plateau nord-ouest européen existant ; (4) la mise au point d'une configuration de modèle pour le calcul des surcotes sur la façade méditerranéenne.

Le présent rapport (délivrable dénommé D4 dans le partenariat de recherche PREVIMER-BRGM) porte sur le point n° 3, et plus précisément sur : (1) l'étude de sensibilité des résultats du modèle aux formulations de coefficients de traînée et aux données météorologiques, (2) les processus de génération des surcotes atmosphériques, et en particulier les interactions entre marée et surcote, (3) l'estimation de la contribution du *wave set-up* (niveau stationnaire induit par les vagues ayant déferlé) dans le signal de surcote totale. Ce travail est effectué pour la zone Manche-Gascogne.

Tout d'abord, une configuration de MARS2D (aussi appelé MARS dans ce rapport), dite de référence, est présentée. Cette configuration, dont l'emprise spatiale s'étend jusqu'en Islande, a une résolution de 2 km et un coefficient de traînée constant. Cette configuration est forcée par des conditions météorologiques issues de ARPEGE 6h (analyses) et des conditions de marée issues de FES2004. La qualité de cette configuration de référence est tout d'abord estimée à l'échelle événementielle (quatre événements considérés : nov. 2007, Johanna, Quentin et Xynthia) et pluri-annuelle (~ 7 ans), par comparaison aux données traitées dans le rapport précédent (Idier *et al.*, 2010b). Ces comparaisons montrent que le modèle sous-estime les surcotes, jusqu'à 1 m pour certains événements (exemple : Dunkerque, nov. 2007).

Ensuite, des tests de sensibilité aux coefficients de traînée (Makin, Moon et Charnock, intégrant des conditions de vagues issues du projet IOWAGA) sont effectués et montrent que la formulation de Charnock (intégrant les vagues) permet de reproduire des pics de surcotes plus forts, avec une augmentation de quelques centimètres à dizaines de centimètres pour tous les ports étudiés (Dunkerque, Saint-Malo, Le Conquet, La Rochelle-La Pallice).

Un deuxième jeu de tests de sensibilité est effectué, cette fois-ci par rapport aux données météorologiques utilisées. Ainsi, des tests sont réalisés avec les données ARPEGE 3h (mode prévision 3h et analyse 6h) et AROME (mode prévision 24h). Les résultats montrent que, l'utilisation de ces données engendre des surcotes plus fortes de quelques centimètres à dizaine de centimètres, se rapprochant ainsi des observations. Globalement, ce sont les simulations réalisées avec en entrée les données ARPEGE 3h qui donnent les meilleurs résultats.

Ces tests de sensibilité aboutissent à proposer la configuration optimale de la modélisation des surcotes en Manche-Gascogne suivante : MARS2D avec un coefficient de traînée de Charnock intégrant les caractéristiques de vagues (issues de IOWAGA) et des conditions météorologiques issues de ARPEGE 3h. Cette configuration optimale, par rapport à la configuration de référence, permet de réduire les écarts entre surcotes observées et modélisées de quelques centimètres à une quarantaine de centimètres pour les fortes surcotes.

Afin d'analyser plus en détail les phénomènes en jeu dans le signal de surcotes, la configuration de référence MARS2D est aussi utilisée pour quantifier les termes d'interaction entre surcotes et marée, ainsi que les rôles respectifs des termes de pression et vent dans le signal de surcotes. Tout d'abord, les interactions sont étudiées par modélisation, en comparant la surcote atmosphérique modélisée en prenant en compte la marée, et la surcote modélisée en négligeant la marée. La différence (interaction), suivant les événements considérés atteint quelques centimètres à plusieurs dizaines de centimètres (80 cm dans le détroit du Pas-de-Calais pour la tempête de novembre 2007). Ce terme peut être soit positif, *i.e.* amplifiant la surcote engendrée uniquement par les champs de vent et pression, ou négatif, *i.e.* diminuant cette surcote. Une analyse spatiale des contributions respectives de la pression atmosphérique et du vent permet aussi d'identifier les zones où les termes de pression/vent sont dominants. Les résultats obtenus dans cette analyse de processus permettent de proposer une modélisation optimale des niveaux d'eau totaux (marée et surcotes).

Enfin, outre les surcotes atmosphériques, les vagues, via le wave set-up peuvent contribuer à la surcote totale. Aussi, une étude du wave set-up est réalisée sur le site du Truc Vert, sur la base des données acquises pendant la campagne ECORS2008. Les données traitées indiquent des surcotes totales atteignant 1 m et une contribution du wave set-up atteignant quasiment 50 % de la surcote totale. Des travaux de modélisation ont été réalisés avec le code SWAN et confirment l'importance non négligeable du wave set-up dans le signal de surcote totale pour un site comme celui du Truc Vert, et ce, pour les trois événements considérés (Johanna, Quentin, Xynthia).

Comité de pilotage et remerciements

Un comité de pilotage a été constitué pour le présent projet. Il inclut l'IFREMER, METEO-FRANCE et le SHOM. Les auteurs remercient vivement les participants à ce comité de pilotage (Gael André, Fabrice Arduin, Rémi Baraille et Guillaume Voineson), ainsi que Carlos Oliveros pour ses commentaires sur le présent rapport.

En outre, les données de niveau d'eau utilisées dans le présent rapport sont des données produites par le SHOM et mises à disposition via le réseau SONEL (aujourd'hui dénommé REFMAR). Le SHOM et le réseau SONEL sont donc remerciés pour cette mise à disposition de données.

Les données utilisées pour le site du Truc Vert ont été acquises dans le cadre de la campagne ECORS2008 menée par le SHOM et EPOC qui sont ici remerciés.

Sommaire

1. Introduction	15
1.1. CONTEXTE.....	15
1.2. OBJET DU PRÉSENT RAPPORT.....	15
2. Modèle de surcotes atmosphériques de référence Manche-Gascogne : méthode et évaluation	19
2.1. MÉTHODE DE COMPARAISON MESURES – MODÈLES	19
2.2. CONFIGURATION DE RÉFÉRENCE.....	21
2.2.1. Description (données d’entrée et paramétrage physique)	21
2.2.2. Qualité de la marée.....	23
2.2.3. Qualité des surcotes (évaluation pluriannuelle et événementielle).....	24
3. Analyse de processus sur la formation des surcotes	33
3.1. REVUE BIBLIOGRAPHIQUE	33
3.1.1. Dynamique de la surcote atmosphérique	33
3.1.2. Interaction marée – surcotes	34
3.2. PROCESSUS DE SURCOTES POUR LA ZONE MANCHE-GASCOGNE	37
3.2.1. Méthode	37
3.2.2. Interaction marée et surcotes	38
3.2.3. Baromètre inverse et surcotes induites par la pression atmosphérique ..	42
3.2.4. Influences relatives des termes de pression et vent dans le signal de surcote	43
3.2.5. Implications pour la modélisation optimale des niveaux d’eau	45
4. Modèle de surcotes atmosphériques Manche-Gascogne : étude de sensibilité et configuration optimale	49
4.1. ÉTUDE DE SENSIBILITÉ.....	49
4.1.1. Sensibilité à la formulation du coefficient de traînée	49
4.1.2. Sensibilité aux données météorologiques	59
4.2. CONFIGURATION OPTIMALE	72
4.2.1. Description	72
4.2.2. Qualité par rapport aux observations.....	72
4.2.3. Bilan.....	73

5. Contribution du wave set-up dans le signal de surcotes	79
5.1. ANALYSE DE DONNÉES : ECORS 2008	79
5.1.1. Niveaux d'eau en zone intertidale.....	79
5.1.2. Estimation des signaux de surcote et wave set-up	82
5.2. APPROCHE EMPIRIQUE	88
5.2.1. Formulation de Stockdon <i>et al.</i> (2006) v.s. observations	88
5.2.2. Formulation de Stockdon <i>et al.</i> (2006) : set-up prédit pour les évènements.....	93
5.3. MODÉLISATION : MISE EN PLACE ET VALIDATION	93
5.3.1. Mise en place	93
5.3.2. Validation	94
5.4. MODÉLISATION : WAVE SET-UP ET SURCOTES EN PÉRIODE DE TEMPÊTE	98
5.4.1. Introduction	98
5.4.2. Évènement Johanna (10 mars 2008).....	99
5.4.3. Évènement Quentin (10 février 2009).....	99
5.4.4. Évènement Xynthia (28 février 2010)	100
5.4.5. Conclusion	100
5.5. IMPLICATIONS	100
6. Conclusion.....	103
7. Bibliographie	105

Liste des figures

Figure 1 : Schéma de principe des traitements appliqués aux observations et aux modèles. Voir Idier <i>et al.</i> (2010b).....	19
Figure 2 : Emprise de la configuration de MANGA.....	21
Figure 3 : Séries temporelles des niveaux d'eau issus de MARS2D (rouge) et SHOMAR (diamant) le 10/01/2009.....	22
Figure 4 : Critères de validation pluriannuelle.....	24
Figure 5 : Exemples de surcotes « artéfacts » issues de dysfonctionnements des marégraphes à La Rochelle (a) et Saint-Malo (b).....	25

Figure 6 :	Séries temporelles des surcotes issues de MARS2D (rouge) et SONEL (noir) pour les tempêtes de novembre 2007 (a) et JOHANNA de mars 2008 (b, c, d) aux quatre ports d'étude.....	27
Figure 7 :	Séries temporelles des surcotes issues de MARS2D (rouge) et SONEL (noir) pour la tempête QUENTIN (février 2009) aux quatre ports d'étude.....	28
Figure 8 :	Séries temporelles des surcotes issues de MARS2D (rouge) et SONEL (noir) pour la tempête Xynthia (février 2010) aux quatre ports d'étude.	29
Figure 9 :	Critères de validation événementielle pour la configuration de référence pour les événements de : (a) novembre 2007 pour Dunkerque et Johanna pour Saint-Malo, Le Conquet et La Rochelle, (b) Quentin et (c) Xynthia.....	31
Figure 10 :	Écarts types entre des surcotes-décotes en fonction des hauteurs de pleines-mers (référence : zéro hydrographique). Source : Simon (1994).....	34
Figure 11 :	Distributions fréquentielles des surcotes positives et négatives (seuil de surcote : 0,15 m persistant pendant au moins 3 h à Southend), relatives à l'instant du niveau de pleine-mer, à Lerwick (northern North Sea) et Southend (Thames Estuary).	35
Figure 12 :	Séries temporelles de surcotes observées (ligne continue) et simulées (tiretés), ainsi que la surcote pure (pointillés) pour la période 00 h - 8 Octobre à 23 h - 9 Octobre 1999.....	36
Figure 13 :	Surcotes maximales S1 en mètre (colonne de gauche) et valeur maximale positive du terme I en mètre (colonne de droite) d'interaction entre marée et surcote, pour les quatre événements : (a) 09/11/07 ; (b) : 10/03/08 (Johanna) ; (c) : 11/02/09 (Quentin) ; (d) : 28/02/10 (Xynthia).	39
Figure 14 :	Terme d'interaction I (valeur max) pour les quatre événements : (a) nov. 07, (b) mars 08, (c) fév. 09, (d) fév. 10.	40
Figure 15 :	Zones d'interactions I négligeables (<5 cm, indiqué en rouge sur la figure) entre marée et surcotes pour les événements sélectionnés.	40
Figure 16 :	Niveaux de marée et totaux par rapport au niveau moyen (avec (J2) et sans (J1+J3) interactions entre surcotes et marée), surcotes S1 et S2, et termes d'interaction I, pour les sites de Dunkerque en novembre 2007 (a) et de La Rochelle lors de l'évènement Johanna de mars 2008 (b).	41
Figure 17 :	Iso-contours de surcotes obtenus avec la formule du baromètre inverse (traits fins) et avec des simulations avec le code MARS2D prenant en compte uniquement les forçages de pression (traits épais).	42
Figure 18 :	Surcotes maximales dues aux termes de pression P et vitesse du vent U (colonne de gauche), au terme de pression uniquement (colonne centrale) et au terme de vent uniquement (colonne de droite), pour chacun des événements sélectionnés : novembre 2007 (a), février 2008 (b), mars 2009 (c), février 2010 (d).	44
Figure 19 :	Représentation schématique de ce que pourrait être une configuration optimale du modèle de niveau d'eau total.	47
Figure 20 :	Indicateurs d'erreur pluriannuelle.	53
Figure 21 :	Séries temporelles des surcotes issues de MARS2D avec différentes formulations de coefficient de traînée et SONEL (noir) pour les tempêtes de novembre 2007 et JOHANNA aux quatre ports d'étude.....	54

Figure 22 :	Séries temporelles des surcotes issues de MARS2D avec différentes formulations de coefficient de traînée et SONEL (noir) pour la tempête QUENTIN aux quatre ports d'étude.	55
Figure 23 :	Séries temporelles des surcotes issues de MARS2D avec différentes formulations de coefficient de traînée et SONEL (noir) pour la tempête XYNTHIA aux quatre ports d'étude.	56
Figure 24 :	Cartes des coefficients de traînée issus de la paramétrisation de (a,d) Charnock, (b,e) Moon et (c,f) Wu pour le 09/11/2007, à 00:00 et 06:00 TU.	57
Figure 25 :	Cartes des coefficients de traînée issus de la paramétrisation de (a) Charnock et (b) Moon <i>et al.</i> (2007) le 10/03/2008 00:00, 10/02/2009 00:00 et le 28/02/2010 00:00 TU.	58
Figure 26 :	Cartes du module du vent le 09/02/2009 00:00 TU issues de (a) ARPEGE, (b) ALADIN, (c) AROME, (d) FUSION ARPEGE-AROME, avec l'emprise AROME en noir.....	62
Figure 27 :	Cartes du module du vent le 28/02/2010 06:00 TU issues de (a) ARPEGE, (b) ALADIN, (c) AROME, (d) FUSION ARPEGE-ALADIN-AROME, avec l'emprise AROME en noir.....	63
Figure 28 :	Indicateur d'erreur pluriannuelle.	65
Figure 29 :	Séries temporelles des surcotes issues de MARS2D avec différents forçages météorologiques et SONEL (noir) pour les tempêtes de novembre 2007 et JOHANNA aux ports d'étude : (a) Dunkerque, (b) Saint-Malo, (c) Le Conquet, (d) La Rochelle.	66
Figure 30 :	Séries temporelles des surcotes issues de MARS2D avec différents forçages météorologiques et SONEL (noir) pour la tempête QUENTIN aux ports d'étude : (a) Dunkerque, (b) Saint-Malo, (c) Le Conquet, (d) La Rochelle.	67
Figure 31 :	Séries temporelles des surcotes issues de MARS2D avec différents forçages météorologiques et SONEL (noir) pour la tempête XYNTHIA aux ports d'étude : (a) Dunkerque, (b) Saint-Malo, (c) Le Conquet, (d) La Rochelle.	68
Figure 32 :	Comparaison des vents (m/s) QuikSCAT et ARPEGE 3H lors des événements 1, 2 et 3.	71
Figure 33 :	Critères de validation pluriannuelle.....	74
Figure 34 :	Séries temporelles des surcotes issues de MARS2D avec la configuration de référence (rouge), la configuration avec un coefficient de traînée constant (0,0016) et les forçages ARPEGE 3H (points rouges) et la configuration optimale (rose) et SONEL (noir) pour les tempêtes de novembre 2007 et JOHANNA aux quatre ports d'étude : (a) Dunkerque, (b) Saint-Malo, (c) Le Conquet, (d) La Rochelle.	75
Figure 35 :	Séries temporelles des surcotes issues de MARS2D avec la configuration de référence (rouge), la configuration avec un coefficient de traînée constant (0,0016) et les forçages ARPEGE 3H (points rouges) et la configuration optimale (rose) et SONEL (noir) pour la tempête QUENTIN aux quatre ports d'étude : (a) Dunkerque, (b) Saint-Malo, (c) Le Conquet, (d) La Rochelle.....	76
Figure 36 :	Séries temporelles des surcotes issues de MARS2D avec la configuration de référence (rouge), la configuration avec un coefficient de traînée constant (0,0016) et les forçages ARPEGE 3H (points rouges) et la configuration optimale (rose) et SONEL (noir) pour la tempête XYNTHIA aux quatre ports d'étude.	77

Figure 37 :	Décalage horaire entre l'instant du modèle ARPEGE 3H et l'instant de la mesure QuikSCAT (a) pour l'événement 1 (b) pour l'événement 2.	78
Figure 38 :	Localisation des capteurs de pression pour la période de validation 1 (9-10 mars 2008).....	80
Figure 39 :	Localisation des capteurs de pression pour la période de validation 2 (22-23 mars 2008).....	81
Figure 40 :	Schéma de principe du calcul du wave set-up. Capteurs A (qui mesure le niveau de l'eau au large, sans setup) et B (qui mesure le niveau de l'eau à la plage, avec set-up).....	82
Figure 41 :	Recalage des données des ADCPs en utilisant les périodes d'observation avec un minimum de surcote (la boîte rouge et la boîte grise pour ADCP2 et ADCP1, respectivement) pour déterminer le décalage vertical des instruments par rapport au marégraphe1 (en zéro hydrographique).	84
Figure 42 :	Analyse des périodes de temps quand les capteurs (ADCPs et marégraphes) au large sont probablement affectés par le setup dû au déferlement des vagues.	85
Figure 43 :	Estimations (en haut) du setup mesurées par les PAUs et de la hauteur de vagues mesurée au large, (centre) la surcote estimée au large et (en bas) la surcote totale mesurée aux PAUs.	86
Figure 44 :	(a) surcote (observations aux marégraphes et ADCP's moins la marée prédite à partir des constantes harmonique Truc Vert fournies par le SHOM) au large, lors des périodes où les vagues n'ont pas déferlé au niveau du capteur au large ($\gamma = 0,6$, voir Figure 40) et baromètre inverse (données de pression : capteurs PAU en zone intertidale), (b) mouvements des ADCP's (rouge : ADCP2 ; noir : ADCP1).	87
Figure 45 :	Les trois définitions de la pente de la côte utilisés pour tester l'application de la formule de Stockdon <i>et al.</i> (2006) pour estimer le setup.....	89
Figure 46 :	Profils temporels des différentes formulations de pente de plage, calculés à partir des mesures au large, des mesures au niveau du capteur de pression PAU1, et de la topo-bathymétrie du 11 février 2008.	90
Figure 47 :	Comparaison de l'amplitude de setup mesuré et estimé avec la formule de Stockdon <i>et al.</i> (2006), avec trois estimations différentes de la pente de la côte (z_i = dans la zone intertidale, f = « foreshore », sz = « surf zone ») et la topo-bathymétrie du 11/02/2008.	91
Figure 48 :	Comparaison de la différence entre le setup mesuré par les PAUs et le setup estimé avec la formule de Stockdon <i>et al.</i> (2006), avec trois estimations différentes de la pente de la plage pour les quatre capteurs de pression, et en utilisant la topo-bathymétrie du 11/02/2008.	91
Figure 49 :	Wave set-up prédit avec la formulation de Stockdon <i>et al.</i> (2006), en utilisant la pente de plage intertidale et les données de vagues issues de WW3-Previmmer, Bouée Cap Ferret. (a) Johanna, 2008, (b) Quentin, 2009, (c) Xynthia, 2010.	93
Figure 50 :	Bathymétrie de février (référence altimétrique : IGN 69).....	94
Figure 51 :	Caractérisation des vagues au large (observations, 20 m de profondeur) pour les deux périodes de validation. Période 1 : a,c,e. Période 2 : b, d, f.	95
Figure 52 :	Set-up mesuré et modélisé pendant la période 1.....	96
Figure 53 :	Set-up mesuré et modélisé pendant la période 2.....	96

Figure 54 :	Wave set-up modélisé pour différentes bathymétries et plusieurs paramétrisations du déferlement, au capteur Pau3, période 2.	98
Figure 55 :	Profils temporels des niveaux d'eau observés et de marée recomposés à partir de MAS, des hauteurs significatives de vague, des surcotes atmosphériques et des surcotes totales, des wave set-up moyen, minimal et maximal issus de SWAN pour la tempête JOHANNA.	101
Figure 56 :	Profils temporels des niveaux d'eau modélisés et de marée recomposés à partir de MAS, des hauteurs significatives de vague, des surcotes atmosphériques et des surcotes totales, des wave set-up moyen, minimal et maximal issus de SWAN pour la tempête JOHANNA.	101
Figure 57 :	Profils temporels des niveaux d'eau modélisés et de marée recomposés à partir de MAS, des hauteurs significatives de vague, des surcotes atmosphériques et des surcotes totales, des wave set-up moyen, minimal et maximal issus de SWAN pour la tempête QUENTIN.....	102
Figure 58 :	Profils temporels des niveaux d'eau modélisés et de marée recomposés à partir de MAS, des hauteurs significatives de vague, des surcotes atmosphériques et des surcotes totales, des wave set-up moyen, minimal et maximal issus de SWAN pour la tempête XYNTHIA.	102
Figure 59 :	Bathymétrie de la configuration MARS2D (a) initiale et (b) corrigée au niveau de la côte.....	109
Figure 60 :	Bathymétrie de la configuration MARS2D (a) initiale et (b) corrigée au niveau du pertuis de Maumusson.	110
Figure 61 :	Profils temporels de niveaux d'eau et surcotes à Dunkerque.....	113
Figure 62 :	Profils temporels de niveaux d'eau et surcotes à Saint-Malo.	114
Figure 63 :	Profils temporels de niveaux d'eau et surcotes au Conquet.....	115
Figure 64 :	Profils temporels de niveaux d'eau et surcotes à La Rochelle.	116
Figure 65 :	Cartes des coefficients de traînée issus de la paramétrisation de Moon (en haut) et Charnock (en bas) pour la tempête Johanna (du 09/03/2008-18h au 10/03/2008-18h).	123
Figure 66 :	Cartes des coefficients de traînée issus de la paramétrisation de Moon (en haut) et Charnock (en bas) pour la tempête Quentin (du 09/03/2009-12h au 10/02/2009-12h).	124
Figure 67 :	Cartes des coefficients de traînée issus de la paramétrisation de Moon (en haut) et Charnock (en bas) pour la tempête Xynthia (du 27/02/2010-18h au 28/02/2010-18h).	125
Figure 68 :	Critères de validation événementielle pour les différentes configurations MARS2D et pour les événements de novembre 2007 à Dunkerque (a) et Johanna à Saint-Malo (b), au Conquet (c) et à La Rochelle (d).	129
Figure 69 :	Critères de validation événementielle pour les différentes configurations MARS2D et pour l'évènement Quentin à Dunkerque (a), à Saint-Malo (b), au Conquet (c) et à La Rochelle (d).....	130
Figure 70 :	Critères de validation événementielle pour les différentes configurations MARS2D et pour l'évènement Xynthia à Dunkerque (a), à Saint-Malo (b), au Conquet (c) et à La Rochelle (d).....	131

Figure 71 : Séries temporelles des surcotes issues de MARS2D avec différentes formulations de coefficient de traînée et forçages météorologiques, SONEL (noir) pour la tempête de novembre 2007, à Dunkerque. 135

Liste des tableaux

Tableau 1 : Synthèse des simulations analysées. Nb : nombre de simulations réalisées..... 17

Tableau 2 : Critères de validation du modèle de surcote (d'après Idier *et al.*, 2010a)..... 20

Tableau 3 : Valeurs des surcotes de périodes de retour 6 mois, 1 an et 2 ans issues des observations aux quatre ports d'étude. 30

Tableau 4 : Étude de processus des surcotes : simulations et objectifs. 37

Tableau 5 : Maximum et minimum du terme d'interaction I, pour chaque port et chaque évènement. 41

Tableau 6 : Synthèse des conclusions issues de l'analyse de processus en termes des rôles respectifs des interactions entre marée et surcotes, et surcotes induites par le vent et la pression. 48

Tableau 7 : Synthèse des simulations réalisées pour l'étude de sensibilité à la formulation du coefficient de traînée. 50

Tableau 8 : Synthèse de l'étude de comparaison des forçages météorologiques ARPEGE (6H et 3H) avec les données de sémaphores, concernant les pics de vent et les minima de pression, par ports et par évènements de tempête. 60

Tableau 9 : Synthèse des simulations réalisées pour l'étude de sensibilité à la résolution spatio-temporelle des données météorologiques. 62

Tableau 10 : Données utilisées pour construire la série temporelle du niveau d'eau au large. 83

Tableau 11 : Synthèse de l'étude d'inter-comparaison des forçages météorologiques ARPEGE 6H, ARPEGE 3H et AROME concernant les pics de vent et de surcotes et les minima de pression, par ports et par évènements de tempête. 162

Liste des annexes

Annexe 1 : Correction de la bathymétrie 107

Annexe 2 : Analyse de processus (interaction marée-surcotes) 111

Annexe 3 : Formulations testées pour le calcul du coefficient de traînée..... 117

Annexe 4 : Coefficients de traînée pour les évènements sélectionnés 121

Annexe 5 : Critères de validation événementielle pour les simulations réalisées pour les différents événements aux quatre ports	127
Annexe 6 : Étude de sensibilité complémentaire : intercomparaison des paramétrisations.....	133
Annexe 7 : Étude IFREMER : Comparaison des données ARPEGE/AROME et du diffusiomètre QuikSCAT	137
Annexe 8 : Inter-comparaison des données météorologiques ARPEGE (6h et 3h) et AROME et des surcotes modélisées	159
Annexe 9 : SWAN : fichier de paramètres	163

1. Introduction

1.1. CONTEXTE

PREVIMER est un projet partenarial d'Océanographie Côtière Opérationnelle identifié au sein du Contrat de Projets État-Région Bretagne qui a pour objectif de construire et mettre en ligne sur le site www.previmer.org un système d'informations et de prévisions multi échelles sur les façades métropolitaines Manche, Atlantique et Méditerranée.

Parmi les grandeurs dont le système PREVIMER vise à reproduire la dynamique figure celle du niveau marin à haute fréquence, c'est à dire engendrée par l'effet de la marée astronomique et de la dynamique atmosphérique.

Un système opérationnel fonctionne à l'heure actuelle à l'échelle du plateau nord-ouest européen et produit des résultats accessibles sur le site de PREVIMER. Des raffinements locaux fournissent également des informations à plus haute résolution sur quelques sites particuliers (mer d'Iroise, Arcachon, Nord Bretagne...) <http://www.previmer.org/previsions/niveaux>.

Afin d'améliorer la qualité des résultats en termes de prévision de surcotes, un partenariat de recherche et développements a été mis en place entre l'IFREMER et le BRGM (réf. : Ifremer 09/2 211 160) portant sur le développement d'un système de prévision de surcotes en Manche/Atlantique et Méditerranée, destiné à être utilisé sur la plateforme opérationnelle d'océanographie côtière www.previmer.org. Le projet a une durée de 24,5 mois à compter de la date T0 de lancement (17/12/2009). Les principales actions conduites dans ce projet sont :

- une bibliographie décrivant les différents systèmes de prévision et d'analyse de la dynamique du niveau marin dans le monde à partir de la littérature scientifique ou de sites dédiés à l'océanographie opérationnelle à l'instar de PREVIMER ;
- la collecte, le traitement et la validation de données qui permettront à la fois de qualifier le système et de comprendre son fonctionnement ;
- une amélioration de la configuration du système de calcul des surcotes sur le plateau nord-ouest européen existant ;
- la mise au point d'une configuration de modèle pour le calcul des surcotes sur la façade méditerranéenne.

1.2. OBJET DU PRÉSENT RAPPORT

Le présent rapport (délivrable dénommé D4 dans le partenariat de recherche PREVIMER-BRGM) porte sur l'amélioration de la configuration du système de calcul des surcotes sur le plateau nord-ouest européen existant.

Le lecteur est renvoyé au rapport de Idier *et al.* (2010a,b) (délivrables D1 et D3 du projet) pour :

- les définitions des différentes composantes de la surcote ; une revue des différentes méthodes de modélisation numérique des surcotes ; les méthodes de traitement des données de niveau d'eau et de validation des modèles de surcotes (délivrable D1) ;
- le choix des sites et des évènements, ainsi que la collecte et le traitement des données en vue de valider les modèles de surcotes (délivrable D3).

Le présent rapport comporte cinq parties principales.

- **Chapitre 2 : Méthode et évaluation du modèle de surcote Manche-Gascogne de référence (Tâches 3.1 et 3.4 du cahier des charges)**

Ce travail est effectué sur la base d'une configuration de MARS2D, dite de référence. Cette configuration, dont l'emprise spatiale s'étend jusqu'en Islande, a une résolution de 2 km, et un coefficient de traînée constant (0,0016). Cette configuration est forcée par des conditions météorologiques issues de ARPEGE 6h (analyses) et des conditions de marée issues de FES2004. La méthode d'estimation de la qualité du modèle est basée sur une estimation événementielle et pluriannuelle (~ 7 ans).

- **Chapitre 3 : Analyse de processus sur la formation des surcotes/décotes (Tâche 3.2 du cahier des charges)**

Plusieurs pistes sont explorées pour comprendre les mécanismes de génération des surcotes sur les quatre situations spécifiques sélectionnées dans Idier *et al.* (2010b), à l'aide de la configuration MARS2D de référence. Tout d'abord on analyse les principaux termes des équations dans la formation des surcotes et donc mécanismes de génération intervenants dans les surcotes et interactions avec la marée. L'effet de la pression atmosphérique isolé pourra être comparé à celui du baromètre inverse. Ensuite, on analyse la structure spatiale de la surcote et de son évolution, en relation avec les forçages par la dynamique atmosphérique. Pour cette partie (Chapitre 3), on fera des simulations en l'absence de marée pour mieux percevoir les effets de la dynamique atmosphérique et aussi quantifier l'importance des interactions marée/surcotes. On supprimera aussi certaines parties des forçages (le gradient de pression atmosphérique, la tension de vent). On hiérarchisera les effets de chacun des termes. On évaluera aussi la limite au-delà de laquelle (allant du large vers la côte), il n'est plus possible de négliger la marée du fait de ses trop fortes interactions avec les surcotes ; cela en vue de pouvoir mettre en place un nouveau protocole de modélisation des surcotes et marée associées en s'affranchissant du double run existant à l'heure actuelle.

- **Chapitre 4 : Étude de sensibilité du modèle de surcote Manche-Gascogne et configuration optimale (Tâches 3.3, 3.4 et 5 du cahier des charges)**

À partir de la configuration de référence du modèle de surcote Manche Gascogne (Chapitre 2), des tests d'améliorations et/ou étude de sensibilité (Tâches 3.3 et 3.4).

Cette étape comporte l'étude de sensibilité aux différentes formulations de coefficients de traînée identifiées dans Idier *et al.* (2010b), ainsi que l'étude de sensibilité aux sources de données météorologiques. Ces tests sont utilisés pour définir la configuration optimale retenue dans le cadre de Previmer, ainsi que sa qualité par rapport aux observations.

- **Chapitre 5 : Contribution du wave set-up dans le signal de surcote (Tâche 3.3.4 du cahier des charges)**

À petite échelle (*e.g.* à proximité de la côte, par petits fonds), on examinera l'effet des vagues et leur impact sur la surcote (composante wave set-up) par le transport qu'elles génèrent (Chapitre 5). Ce travail sera fait sur un rang suffisamment fin en taille de mailles (de l'ordre de 20 m). Cette tâche se focalisera sur le site du Truc Vert (côte aquitaine). Tout d'abord le modèle sera mis en place et validé par rapport aux données *in situ* acquises lors de la campagne ECORS 2008. Les données seront traitées pour estimer le wave set-up. Ensuite, on rejouera les événements sélectionnés, à savoir Johanna, Quentin et Xynthia. Parallèlement, les valeurs de wave set-up de ces événements seront estimées en utilisant l'approche empirique de Stockdon *et al.* (2006).

Le tableau suivant récapitule les différentes simulations réalisées et analysées dans la présente étude.

Cadre	Caractéristiques	N° sous tâche	Nb	Période et durée cumulée simulée
Estimation qualité du modèle de référence	Marée avec et sans météorologie	3.1, 3.4	2	01/01/2003-31/03/2010 (7,25 ans)
Analyse processus	Influence des termes Pression, vents et marée	3.2	20	4 mois (4 évènements)
Étude de sensibilité	Coefficient de traînée	3.3, 3.4	5	01/01/2003-31/03/2010 (7,25 ans)
Étude de sensibilité	Données de vents	3.3, 3.4	2	01/01/2003-31/03/2010 (7,25 ans)
Configuration optimale	Coef. de traînée et donnée de vent optimale	5	1	01/01/2003-31/03/2010 (7,25 ans)
Modélisation fine	Wave set-up : Validation	3.0, 3.3	4	3 mois (3 évènements)
	Wave set-up : Simulation		3	

Tableau 1 : Synthèse des simulations analysées. Nb : nombre de simulations réalisées.

2. Modèle de surcotes atmosphériques de référence Manche-Gascogne : méthode et évaluation

2.1. MÉTHODE DE COMPARAISON MESURES – MODÈLES

Dans le cadre du présent projet, la surcote est calculée en soustrayant le niveau de marée prédit, obtenu par l'approche harmonique (code MAS, SHOM) au niveau d'eau total. La surcote instantanée ainsi obtenue comprend donc la contribution liée à l'interaction marée - surcotes. Afin de pouvoir comparer des variables de même nature, ce traitement est appliqué à la fois aux observations et aux résultats du modèle MARS2D (Idier *et al.*, 2010b).

Plus précisément, la surcote dite « observée » obtenue à partir des observations est définie comme [surcote 1h = SONEL 1h – MAS(SONEL 1h sur la période 01/01/2003 – 01/03/2010)]. De la même manière, on obtient la surcote dite « modélisée » à partir des résultats de MARS2D [surcote MARS2D 1h = MARS2D 1h – MAS(MARS2D 1h sur la période 01/01/2003 – 01/03/2010)]. Ce traitement est appliqué stricto sensu à toutes les simulations réalisées sur la période 01/01/2003-01/03/2010 (voir Figure 1). Ceci étant, certaines simulations, par exemple celles réalisées avec les données météorologiques AROME, n'ont été réalisées que sur des événements (1 mois simulé). Pour ce type de simulation, la durée simulée est trop courte pour en extraire la marée prédite avec MAS (voir partie 4.1.3. de Idier *et al.*, 2010b). Aussi, dans ces cas-là, la marée prédite retranchée au niveau d'eau modélisé est issue de la marée prédite à partir des composantes de marée obtenues via l'application de MAS au résultat de niveau d'eau issu de la configuration de référence, sur la période 01/01/2003-01/03/2010.

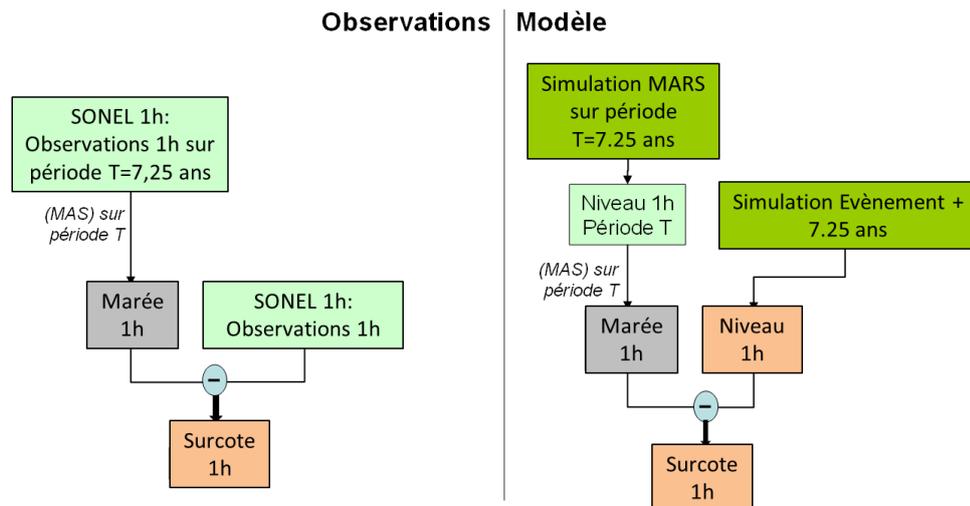


Figure 1 : Schéma de principe des traitements appliqués aux observations et aux modèles. Voir Idier *et al.* (2010b).

Deux types d'analyses ont été réalisées dans le cadre des comparaisons modèle – mesures pour valider les surcotes aux échelles événementielles et pluriannuelles. Elles utilisent chacune une série d'indicateurs d'erreur (Tableau 2) pour évaluer la qualité du modèle. Concernant le calcul du biais, une modification a été apportée à la formulation définie dans Idier *et al.* (2010a), afin de s'affranchir des valeurs très faibles du biais dues à la division par le nombre N de données. Par conséquent, pour la suite du projet, le biais est défini tel que :

$$biais = \frac{\sum_{i=1}^N (D_i - M_i)}{\sum_{i=1}^N |D_i|} \quad (1)$$

où D_i et M_i représentent respectivement les surcotes issues des données et du modèle à l'instant i .

	Validation pluriannuelle (sur 7,25 ans)		Validation événementielle (sur 3 jours)
	Surcote (t)	Surcote de période de retour 0,5, 1, 2 ans	Surcote (t)
Erreur (ER)		X	
Erreur absolue moyenne (MOY)	X		X
Erreur max (MAX)	X		X
Erreur RMS (RMS)	X		X
Fonction coût (COUT)	X		X
Différence d'écart-type (DET)			X
Biais (BIAIS)	X		
Coef. d'efficacité (EFF)	X		X
Erreur pic (EP)	X		X
Déphasage	X		X

Tableau 2 : Critères de validation du modèle de surcote (d'après Idier et al., 2010a).

En outre, la méthode de calcul de l'erreur pic et du déphasage diffère suivant la validation événementielle ou la validation pluriannuelle. Dans le cadre de la validation pluriannuelle, une recherche des événements indépendants pendant lesquels la surcote dépasse le seuil qui correspond au 1^{er} centile de la série de données qui couvre 7,5 ans, a été effectuée. Les événements séparés d'au moins 7 jours ont été définis comme indépendants. En effet, le phénomène de surcote peut engendrer des fluctuations du niveau d'eau (un pic principal de surcote et des pics secondaires) et peut persister dans le temps. Il est donc nécessaire de prendre un temps suffisamment long pour être sûr d'avoir des événements indépendants. La durée de 7 jours assure l'indépendance des événements. Concernant les études de sensibilités réalisées avec le modèle MARS2D, les événements communs aux différentes simulations ont été identifiés pour permettre le calcul de l'erreur pic moyenne et du déphasage moyen.

Pour la validation événementielle, les calculs de l'erreur pic et du déphasage se basent sur la détection du pic de surcote pendant l'évènement concerné.

2.2. CONFIGURATION DE RÉFÉRENCE

2.2.1. Description (données d'entrée et paramétrage physique)

La configuration de référence du modèle de surcotes, à 2 km de résolution, utilise la version V8.12 de MARS2D sur l'emprise MANGA [latitude Nord : 64.98° ; latitude sud : 40° ; longitude Est : 14.99 ; longitude Ouest : -20°] (Figure 2). La bathymétrie de cette configuration, livrée par l'IFREMER en avril 2010, a subi quelques modifications, centrées sur les quatre sites d'étude sélectionnés (Dunkerque, Saint-Malo, Le Conquet, La Rochelle) :

- valeurs négatives proches de -400 près de la côte mises à -999. Ces valeurs proviennent de l'interpolation entre des points à terre et des points en mer (voir Annexe 1) ;
- correction au niveau du pertuis de Maumusson (voir Annexe 1) ;
- modification au niveau du trait de côte en utilisant les valeurs de la bathymétrie envoyée par l'IFREMER en septembre 2010.



Figure 2 : Emprise de la configuration de MANGA.

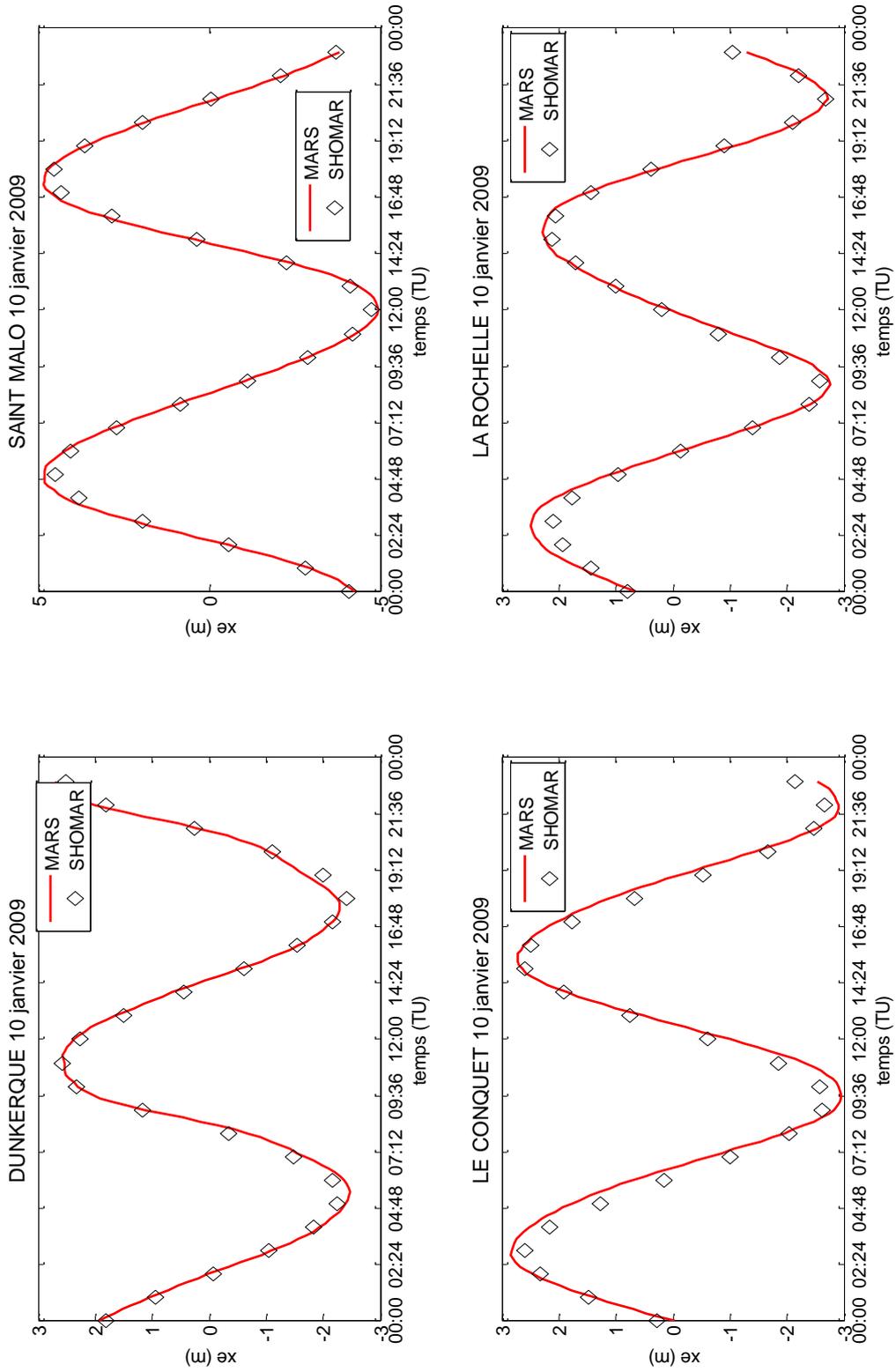


Figure 3 : Séries temporelles des niveaux d'eau issus de MARS2D (rouge) et SHOMAR (diamant) le 10/01/2009.

Les ajustements de cette bathymétrie ont été réalisés afin d'obtenir la meilleure adéquation possible entre la marée reproduite avec MARS2D et la marée prédite SHOMAR (cf. § 0.).

Le paramétrage du frottement au fond repose sur un coefficient de friction calculé à partir du coefficient de Strickler pris égal à $35 \text{ m}^{1/3} \cdot \text{s}^{-1}$.

En ce qui concerne les forçages météorologiques, les champs de vent et de pression appliqués au modèle proviennent du modèle ARPEGE de Météo-France à $0,5^\circ$ de résolution spatiale, avec un échantillonnage temporel de 6 h. Pour la période qui couvre 2003 à mars 2009, il s'agit d'analyses toutes les 6 h et pour la période mars 2009 – 2010, il s'agit d'analyses à 0h et de prévisions à 6 h, 12 h et 18 h.

Le frottement en surface paramétré avec une formulation quadratique, utilise un coefficient de traînée constant C_D égal à 0,0016.

Aux limites ouvertes, ce modèle barotrope est forcé par l'élévation de la surface libre provenant du modèle global de marée FES2004 de Lyard *et al.* (2006), à partir de 14 composantes harmoniques (M2, K1, K2, 2N2, M4, Mf, Mm, Msqm, Mtm, N2, O1, P1, Q1 et S2).

La simulation de référence couvre la période 01/01/2003-31/03/2010.

2.2.2. Qualité de la marée

Une vérification du modèle en termes de reproduction de la marée est réalisée pour deux raisons :

- la marée peut en théorie influencer les surcotes. En effet, il est possible qu'il existe des interactions entre marée et surcotes, et il est donc important de reproduire les bons ordres de grandeur en termes de marée ;
- vérifier que le modèle reproduit correctement la marée permet de s'assurer que les caractéristiques principales du modèle sont relativement correctes : bathymétrie, coefficient de frottement, paramètres numériques...

Pour s'assurer de la validité de l'amplitude de marée estimée, une simulation sans forçage météorologique a été réalisée sur la période du 1/01/2009 au 15/01/2009. L'élévation de la surface libre calculée par MARS2D a ensuite été comparée à la marée prédite SHOMAR. Les résultats obtenus sont présentés sur environ deux cycles de marée sur la Figure 3. Ces séries temporelles montrent que le modèle MARS2D reproduit globalement de manière satisfaisante la marée. Plus précisément, pour les quatre ports (Dunkerque, Saint-Malo, Le Conquet et La Rochelle), les coefficients de corrélation issus de la comparaison entre les résultats de modèle et les prédictions SHOMAR sont de l'ordre de 99 % et les erreurs RMS sont comprises entre 15 et 29 cm.

2.2.3. Qualité des surcotes (évaluation pluriannuelle et évènementielle)

La validité des surcotes obtenues à partir du modèle MARS2D dans sa configuration de référence, a été estimée d'un point de vue pluriannuel (Figure 4) et d'un point de vue évènementiel (Figure 6 à Figure 8) aux quatre ports d'étude : Dunkerque, Saint-Malo, Le Conquet et La Rochelle.

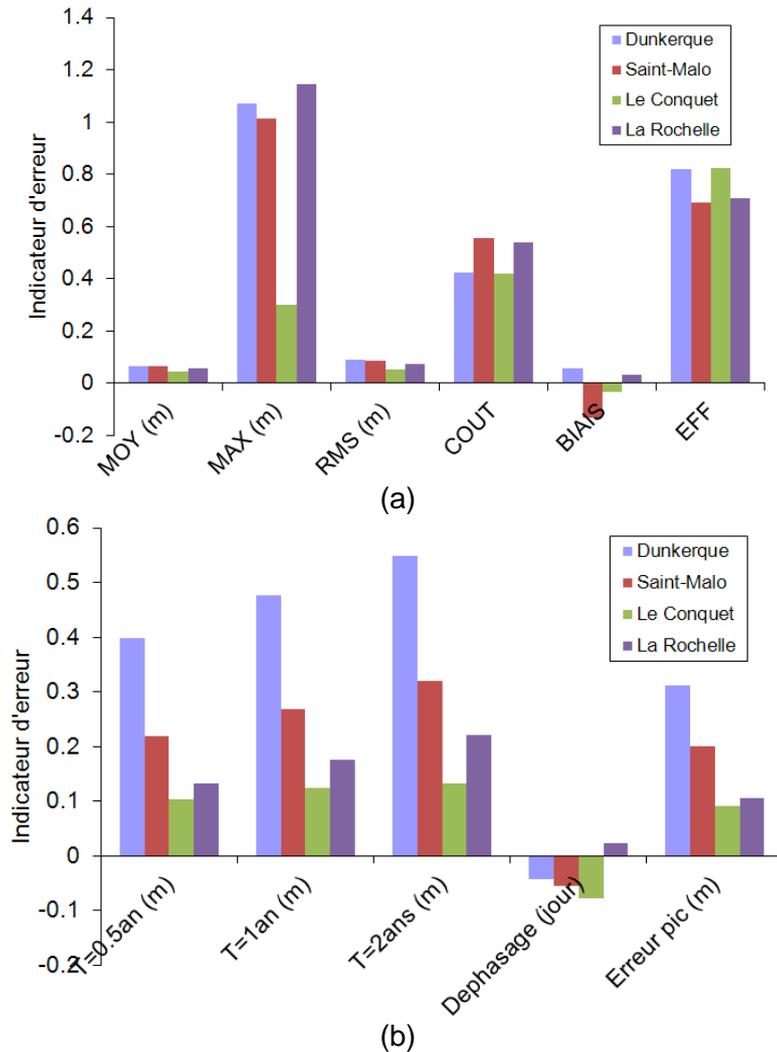
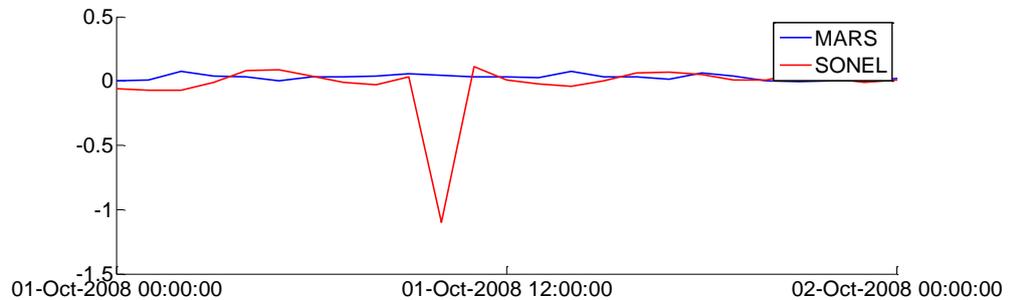


Figure 4 : Critères de validation pluriannuelle.

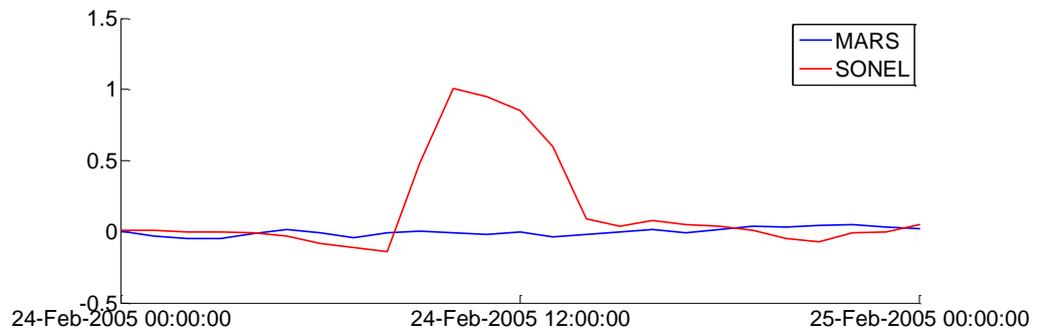
(a) statistiques générales (MOY : erreur absolue moyenne, MAX : erreur maximale, RMS : Erreur quadratique moyenne, COUT : fonction coût, BIAIS : biais moyen, EFF : coefficient d'efficacité) - (b) statistiques pour les fortes surcotes (T = 0,5 an : erreur associée à la surcote de période de retour 0,5 an ; T = 1 an : erreur associée à la surcote de période de retour 1 an ; T = 2 ans : erreur associée à la surcote de période de retour 2 ans ; Déphasage : déphasage moyen des pics de surcotes ; Erreur pic : erreur pic moyenne calculée pour les pics de surcotes détectés).

Pour ce qui est de l'évaluation pluriannuelle, les indicateurs d'erreur choisis renseignent à la fois sur la qualité de la reproduction de l'ensemble des surcotes (Figure 4a) et sur celle des fortes surcotes (Figure 4b). Sur les sept années étudiées, **l'erreur RMS** et la **valeur absolue du biais** sont inférieures à 15 cm. **L'erreur maximale** est supérieure à 1 m pour

Dunkerque (1,1 m le 9/11/2007 à 6 h), La Rochelle (1,14 m le 1/10/2008 à 10 h) et Saint-Malo (1,01 m le 24/02/2005 à 10 h). Au Conquet, l'**erreur maximale** ne dépasse pas 30 cm.



(a)



(b)

Figure 5 : Exemples de surcotes « artéfacts » issues de dysfonctionnements des marégraphes à La Rochelle (a) et Saint-Malo (b).

Ces erreurs maximales correspondent respectivement : à une mauvaise reproduction de la tempête de novembre de 2007 par le modèle, à un artefact dans les mesures le 1/10/2008 à La Rochelle (décote de 1 m en 1 h, Figure 5a), et à *a priori* un autre artefact dans les données traitées à Saint-Malo étant donné qu'une surcote de 1 m est observée alors que la situation météorologique était anticyclonique (Figure 5b). Il convient ici de préciser que, compte-tenu de la présence de ces quelques artéfacts, les indicateurs d'erreur calculés dans cette étude sont majorants. Pour les fortes surcotes, **les écarts pour les surcotes de période de retour 2 ans** sont compris entre 10 et 60 cm pour des surcotes observées comprises entre 65 cm et 1,6 m (voir Figure 4) et le **déphasage moyen** est inférieur à 2 h. D'un port à l'autre, la qualité des surcotes modélisées varie. Ainsi, aussi bien en termes de statistiques générales que de statistiques pour les fortes surcotes, ce sont les surcotes modélisées au Conquet qui présentent les écarts les plus faibles par rapport aux observations. Concernant les autres ports, à l'échelle pluriannuelle, les statistiques générales d'écarts observations-modèle sont similaires, tandis que les statistiques sur les fortes surcotes donnent la hiérarchisation de qualité, en fonction du port, suivante (par qualité décroissante) : La Rochelle, Saint-Malo, Dunkerque.

L'évaluation événementielle a été réalisée sur la tempête de novembre 2007 (9/11/2007 à Dunkerque), la tempête Johanna (10/03/2008 à Saint-Malo, au Conquet et à La Rochelle), la tempête Quentin (10/02/2009 aux quatre ports) et la tempête Xynthia (28/02/2010 aux quatre ports).

Les séries temporelles de surcotes aux quatre ports durant les quatre tempêtes (Figure 6 à Figure 8) montrent la tendance générale du modèle à sous-estimer le signal de surcotes par rapport aux observations avec des erreurs maximales pouvant atteindre 1 m, notamment à Dunkerque en 2007. Ceci étant, on peut noter que la surcote observée à Dunkerque en 2007 dépasse 2 m. Les **erreurs absolues moyennes** et **RMS** sont au maximum de l'ordre de 30 cm (Figure 4). Sur l'ensemble des 4 ports, elles sont les plus faibles pour la tempête Quentin et les plus élevées pour la tempête Xynthia. L'analyse statistique indique également des **déphasages** pouvant atteindre 10 h entre les résultats du modèle et les observations (voir Figure 6c et Figure 9a). De telles valeurs sont obtenues lorsque le pic principal modélisé correspond en fait à un pic secondaire observé, au sein d'un même événement météorologique.

En effet, il faut bien garder à l'esprit que l'estimation du **déphasage** est basée sur l'écart temporel entre les maxima de surcotes observées et modélisées. Or, comme illustré par les séries temporelles de surcotes (Figure 6c), ces fortes valeurs de déphasage sont en fait plus dues à la sous-estimation du pic de surcotes par le modèle à l'instant du maximum de surcote observé qu'à un réel décalage dans le temps de la reproduction des événements. La Figure 6c indique un cas où l'indicateur de déphasage donne un décalage temporel de 10 h, alors que le modèle prédit un pic de surcote 2 h avant le pic observé.

L'analyse événementielle a révélé ici seulement un cas sur seize (quatre événements sur quatre sites) où le pic de surcote issu des résultats du modèle ne correspondait pas à celui issu des données. On peut noter que la méthode employée pour calculer le déphasage moyen dans l'analyse pluriannuelle peut également être biaisée par ce type de situation, puisqu'elle repose sur une détection des pics de surcotes communs aux sorties de modèle et aux données sur une plage de 3 jours. Cependant, dans le contexte de l'analyse pluriannuelle, ce type de biais concerne uniquement le calcul de **l'erreur pic moyenne** et du **déphasage moyen** et étant donné qu'ils sont calculés sur 7,5 ans, il est réaliste de penser que ces biais seront négligeables. Enfin, pour l'événement Xynthia, on peut noter un biais pour les quatre ports, particulièrement visible à Saint-Malo, Le Conquet et La Rochelle. Si on analyse les niveaux moyens journaliers de chacun de ces ports, on retrouve, pour la période du 10 février au 1^{er} mars, l'existence d'une anomalie positive du niveau moyen journalier par rapport au niveau moyen du SHOM, atteignant environ 20 cm à Dunkerque et 50 cm à La Rochelle. Il semble donc que le modèle 2DH, avec l'emprise spatiale choisie, ne permette pas de reproduire ce type d'anomalie. Des investigations ultérieures sont nécessaires pour mieux comprendre les phénomènes physiques responsables de ces anomalies de niveau moyen journalier. Certaines pistes ont toutefois été identifiées : effets stériques, marée interne... (Caballero *et al.*, 2008).

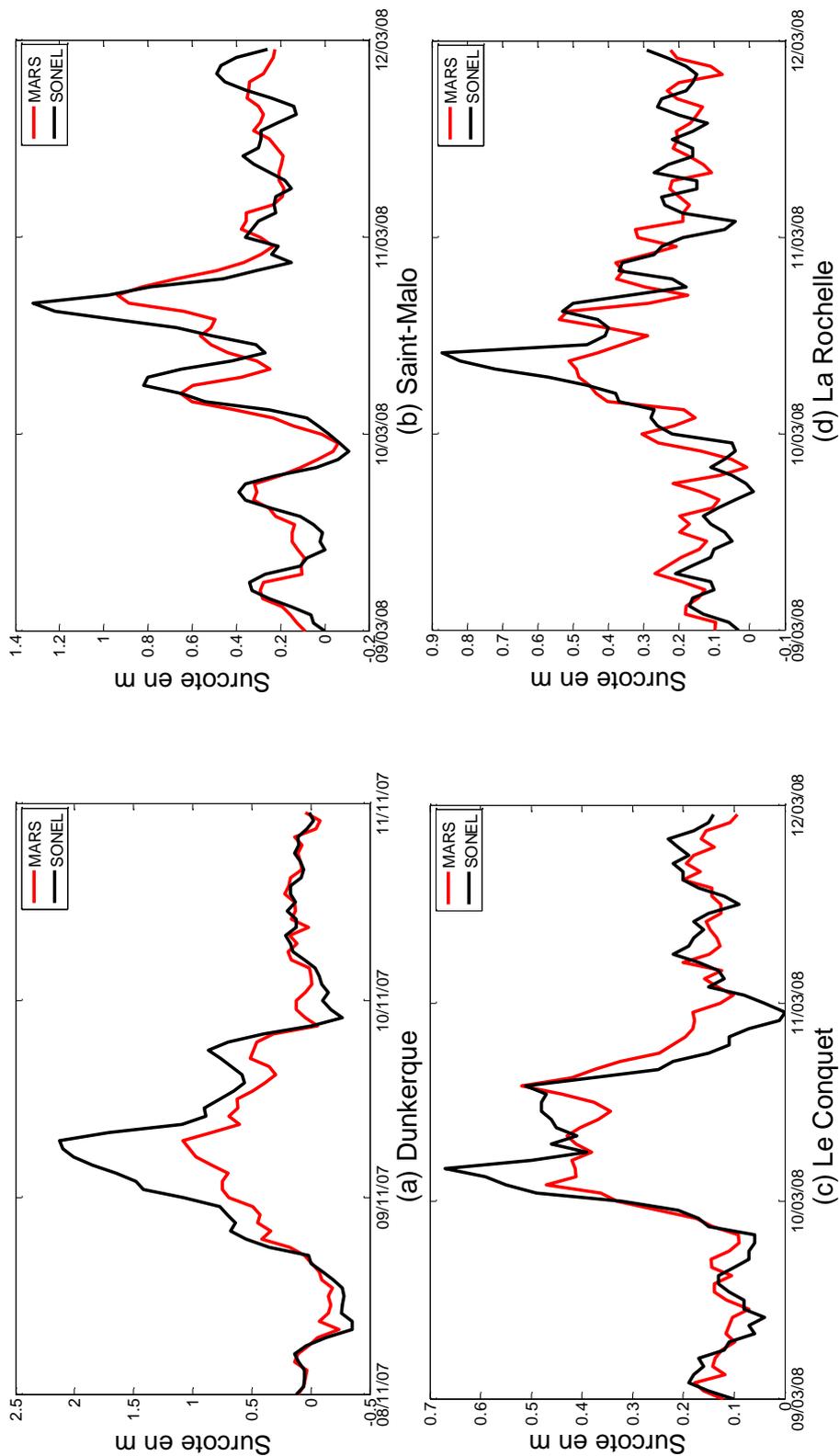


Figure 6 : Séries temporelles des surcotes issues de MARS2D (rouge) et SONEL (noir) pour les tempêtes de novembre 2007 (a) et JOHANNA de mars 2008 (b, c, d) aux quatre ports d'étude.

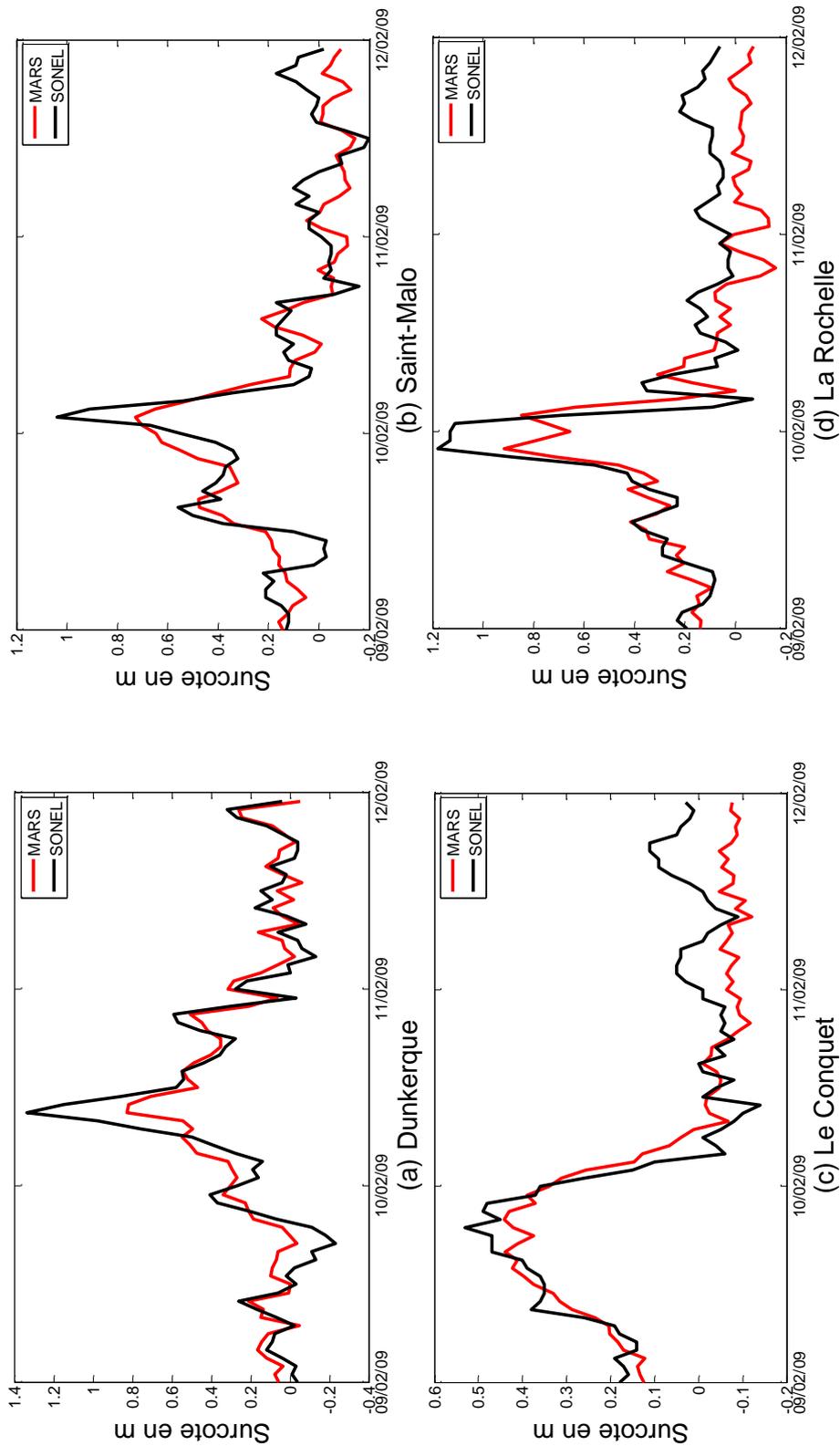


Figure 7 : Séries temporelles des surcotes issues de MARS2D (rouge) et SONEL (noir) pour la tempête QUENTIN (février 2009) aux quatre ports d'étude.

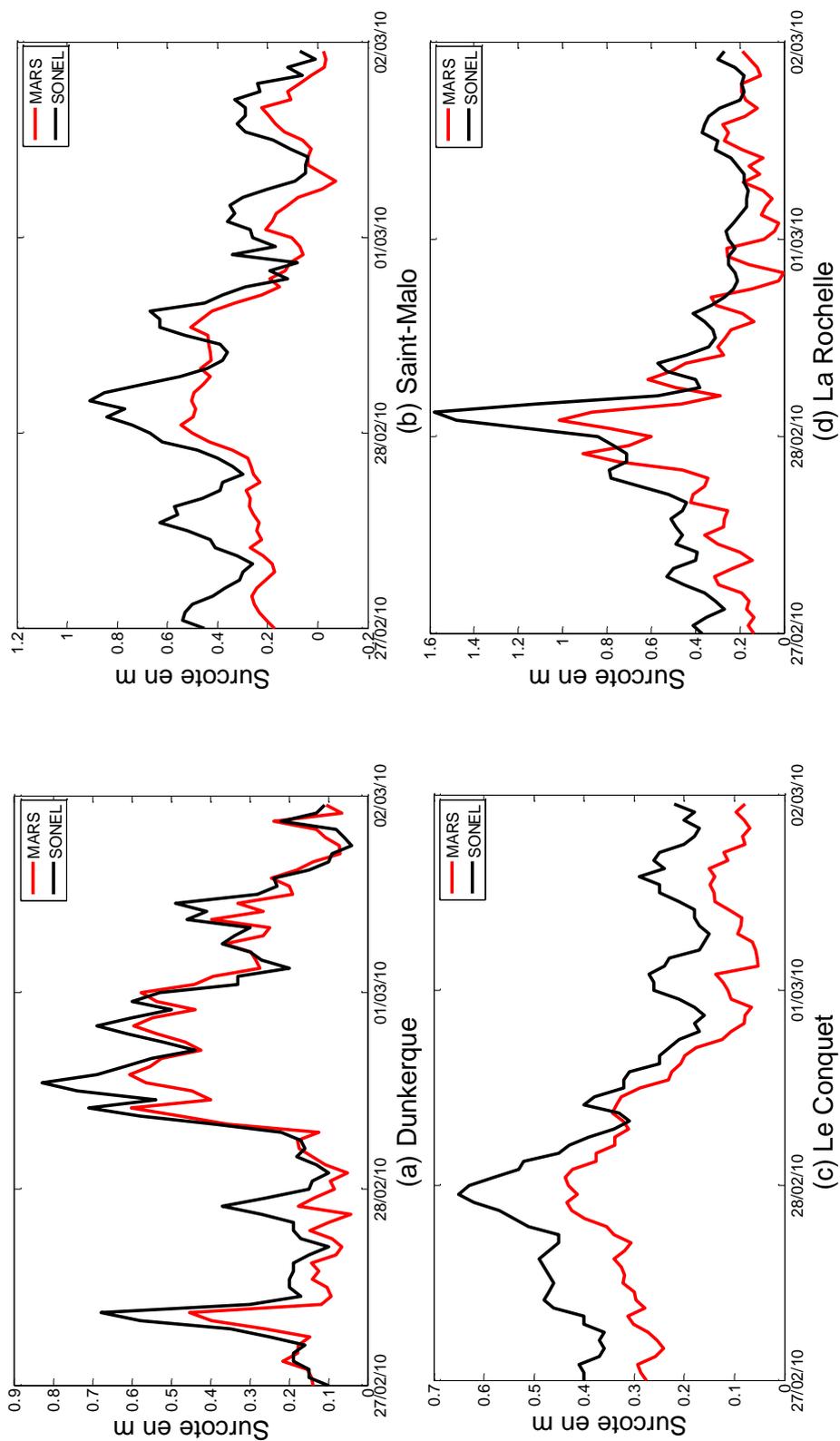


Figure 8 : Séries temporelles des surcotes issues de MARS2D (rouge) et SONEL (noir) pour la tempête Xynthia (février 2010) aux quatre ports d'étude.

La comparaison entre les résultats du modèle dans sa configuration de référence et les observations a montré que **le modèle sous-estime le signal de surcotes avec des écarts moyens de l'ordre de la dizaine de centimètres et des écarts maximums ponctuels pouvant avoisiner le mètre**, comme par exemple à Dunkerque lors de la tempête de novembre 2007. **Les écarts observés entre les surcotes modélisées et observées sont les plus faibles au Conquet**. Par contre, **les pics de surcotes les moins bien reproduits sont obtenus pour le site de Dunkerque** ; ceci peut être dû à différents facteurs (qualité la bathymétrie dans cette zone, qualité des données météorologiques de forçages...) dont certains seront analysés dans la suite de ce rapport.

Les écarts de la configuration de référence par rapport aux observations étant identifiés, nous pouvons étudier la sensibilité du modèle au paramétrage de la friction de surface (coef. de traînée) et à la qualité des données météorologiques utilisées en entrée.

	Surcote de période de retour 6 mois	Surcote de période de retour 1 an	Surcote de période de retour 2 ans
Dunkerque	1,21 m	1,40 m	1,57 m
Saint-Malo	0,77 m	0,90 m	1,03 m
Le Conquet	0,52 m	0,60 m	0,66 m
La Rochelle	0,67 m	0,80 m	0,93 m

Tableau 3 : Valeurs des surcotes de périodes de retour 6 mois, 1 an et 2 ans issues des observations aux quatre ports d'étude.

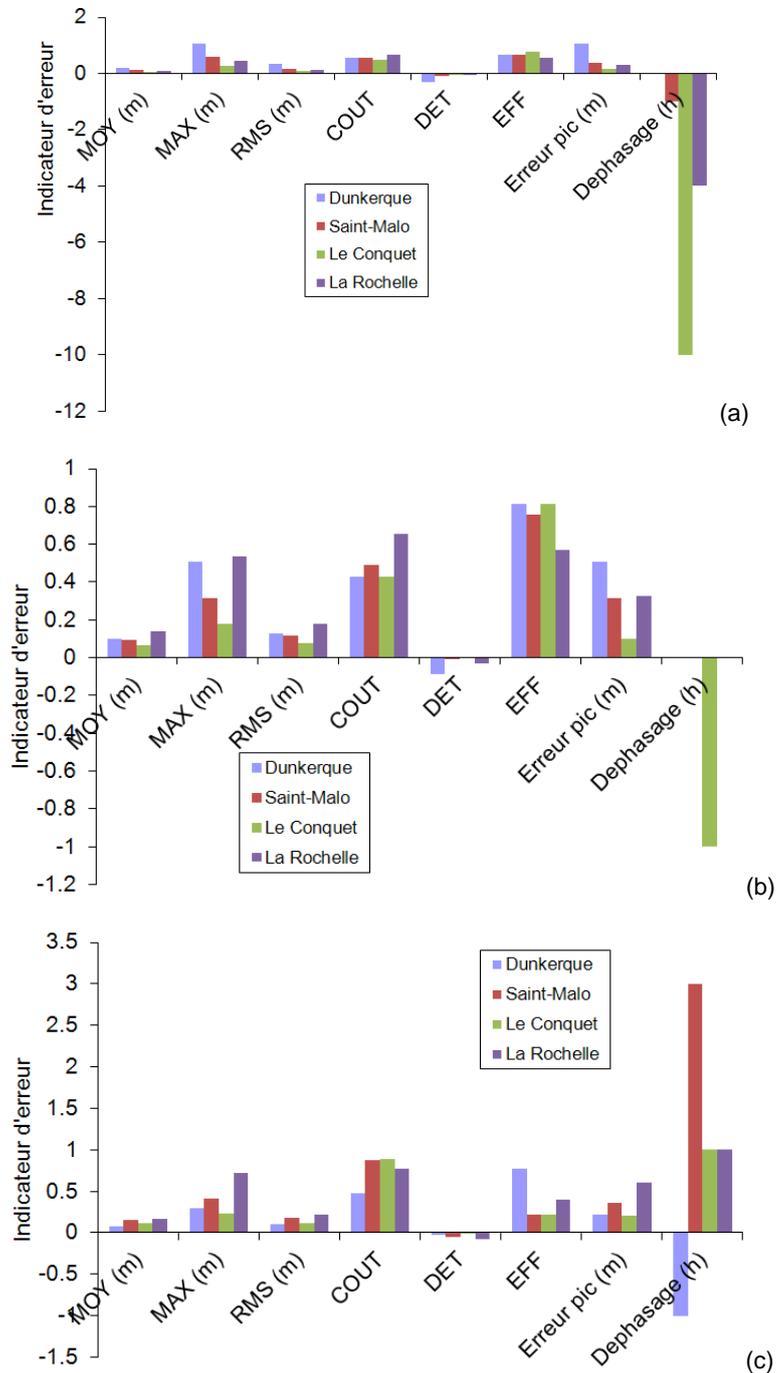


Figure 9 : Critères de validation événementielle pour la configuration de référence pour les événements de : (a) novembre 2007 pour Dunkerque et Johanna pour Saint-Malo, Le Conquet et La Rochelle, (b) Quentin et (c) Xynthia.

3. Analyse de processus sur la formation des surcotes

La configuration de référence présentée dans le chapitre précédent est utilisée pour mieux identifier les processus de formation des surcotes (et décotes) atmosphériques. Un rappel de la connaissance existante sur ces processus et en particulier les interactions entre marée et surcotes est tout d'abord présenté (§ 3.1.). Ensuite, le modèle est utilisé pour explorer ces processus (§ 3.2.). Enfin Les résultats obtenus sont discutés en termes de stratégie de modélisation des niveaux d'eau totaux (§ 3.2.5.c).

3.1. REVUE BIBLIOGRAPHIQUE

3.1.1. Dynamique de la surcote atmosphérique

Il est possible d'analyser directement les équations hydrodynamiques 2DH pour mieux comprendre la dynamique de la surcote (Flather, 2001).

Tout d'abord, si le courant est nul et la contrainte du vent est nulle, alors les équations 2DH s'écrivent :

$$g\nabla\xi + (1/\rho)\nabla p_a = 0 \quad (2)$$

ce qui mène à la relation du baromètre inverse classique, telle qu'une variation de 1 hPa engendre une variation du niveau de l'eau de 1 cm.

Dans le cas générique, on a (Flather, 2001) :

$$\frac{\partial \vec{q}}{\partial t} + \vec{q} \cdot \nabla \vec{q} - f\vec{k} \times \vec{q} = -g\nabla(\xi - \bar{\xi}) - \frac{1}{\rho} \nabla p_a + \frac{1}{\rho D} (\bar{\tau}_s - \bar{\tau}_b) + A\nabla^2 \vec{q} \quad (3)$$

avec \vec{q} le vecteur quantité de mouvement. Cette équation illustre que le terme de pression n'est pas divisé par la hauteur d'eau, tandis que celui lié aux termes de frottement induits par le vent ($\bar{\tau}_s / \rho D$) l'est.

Ainsi, Flather (2001) montre que :

- les termes de pression (P_a) dominant en domaine profond (au large), tandis que les termes de frottement liés à la vitesse du vent (U_{vent}) dominant en domaine peu profond ;
- les surcotes les plus fortes se produisent quand un vent fort agit sur une zone étendue peu profonde.

D'autres travaux confirment ces résultats sur les rôles respectifs des termes de pression et contrainte du vent, comme par exemple Rego and Li (2010), ou encore Bertin *et al.* (2012) qui analysent les contributions relatives de ces termes dans le

signal de surcotes sur la façade atlantique métropolitaine. Il est ainsi montré, par modélisation que, suivant les sites, les termes de pression peuvent être largement dominants, comme par exemple lorsque les vents soufflent vers le large (Concarneau) ou bien que le plateau continental est étroit (Saint-Jean-de-Luz), tandis que la contribution du vent apparaît dominante (70 à 80 % du signal de surcote) pour la partie centrale de la façade atlantique (La Rochelle-La Pallice, Le Verdon, Les Sables d'Olonne).

Flather (2001) précise aussi que l'amplification des surcotes peut-être due à l'effet d'entonnoir dans les zones de convergence du trait de côte ou dans les estuaires, ou encore par un phénomène de résonance, comme par exemple pour les cas où le forçage du vent se déplace à la même célérité que l'onde de tempête (*i.e.* la même célérité que la surcote) ou bien possède la même période naturelle d'oscillation que le bassin/baie étudié, menant alors au phénomène de seiches.

3.1.2. Interaction marée – surcotes

L'analyse des interactions entre marée et surcotes peut être faite soit à partir de l'analyse d'observations, soit par analyse des équations physiques hydrodynamiques, soit par simulations numériques.

À partir d'observations

Simon (1994) a étudié l'indépendance entre marée et surcotes en calculant les variances des surcotes de pleine-mer pour diverses classes de hauteurs de pleine-mer sur 14 ports du littoral métropolitain Manche-Atlantique. Aucune dépendance n'a été détectée, comme l'illustre l'analyse faite à partir des données du marégraphe de Brest (Figure 10). L'auteur note cependant la restriction qu'aucun port de référence étudié n'est un port fluvial, cas où vraisemblablement l'hypothèse d'indépendance ne serait pas vérifiée. Un point important à souligner est que ce travail a été fait uniquement pour les surcotes de pleine-mer. Aucune information n'est donnée pour l'analyse de la dépendance des décotes de basse-mer en fonction des classes de hauteur de basse-mer.

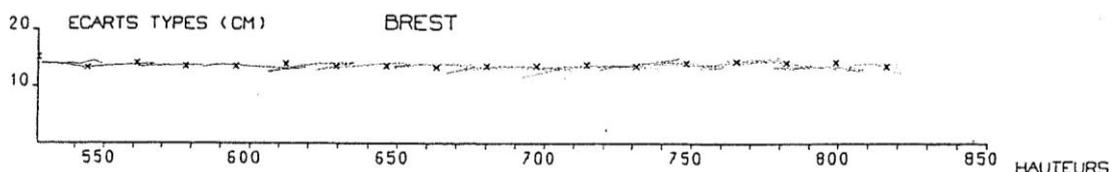


Figure 10 : Écarts types entre des surcotes-décotes en fonction des hauteurs de pleines-mers (référence : zéro hydrographique). Source : Simon (1994).

D'autres analyses semblent montrer qu'il existe parfois une dépendance entre les pics de surcote instantanée et la marée. Ainsi, Flather (2001) rappelle les analyses statistiques faites par Prandle and Wolf (1978) sur des mesures marégraphiques réalisées à Lerwick (northern North Sea) et Southend (Thames Estuary) : les distributions fréquentielles des surcotes maximales positives (surcote) et négatives

(décote) (Figure 11), relatives à l'instant du niveau de pleine-mer montrent que la distribution de phase à Lerwick est aléatoire, tandis que les pics de surcotes apparaissent préférentiellement à marée montante (Figure 11, entre PM-4h et PM-2h), pour le site de Southend. Ce comportement de la surcote à Southend est dû aux interactions entre marée et surcotes.

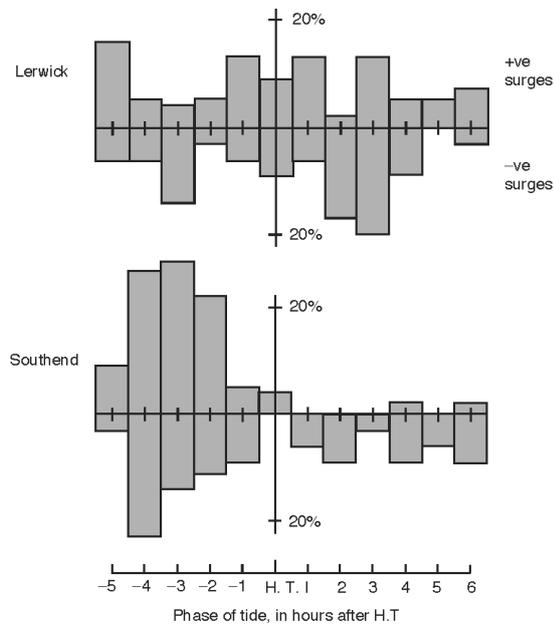


Figure 11 : Distributions fréquentielles des surcotes positives et négatives (seuil de surcote : 0,15 m persistant pendant au moins 3 h à Southend), relatives à l'instant du niveau de pleine-mer, à Lerwick (northern North Sea) et Southend (Thames Estuary).

(issu de Prandle D. and Wolf J., 1978, The interaction of surge and tide in the North Sea and River Thames. *Geophys. J. R. Astr. Soc.*, 55: 203|216, by permission of the Royal Astronomical Society). Source : Flather (2001).

À partir de l'analyse d'équations physiques

Flather (2001) a réalisé aussi une analyse des équations hydrodynamiques 2DH (Eq. 5). Il montre que dans les zones où la marée est significative et où les profondeurs d'eau sont faibles, la composante marée et la composante de surcotes se modifient mutuellement via la contrainte de frottement au fond, et la variation de hauteur d'eau dans une moindre mesure. En effet, la contrainte au fond s'exprime comme suit :

$$\tau_b = k\rho U|U| \quad (4)$$

avec k le coefficient de frottement au fond et U la vitesse intégrée sur la verticale.

Dans le cas où il y a à la fois marée et surcotes, on a $U = U_t + U_s$, avec U_t le courant induit par la marée et U_s le courant induit par les conditions météorologiques. La contrainte au fond est alors plus forte que dans le cas d'une surcote seule ou bien d'une marée seule. Dans les équations hydrodynamiques, cette contrainte est divisée par la hauteur d'eau, résultant elle-même d'une composante de marée et d'une

composante surcote. En résumé, le terme de frottement augmente quand la hauteur d'eau diminue et/ou quand les courants de marée sont importants. Par ailleurs, ce n'est pas pris en compte dans l'analyse de Flather (2001), mais les vagues influent aussi sur cette contrainte au fond (Nicolle *et al.*, 2009).

Ainsi, les configurations où les surcotes seraient le plus dépendantes de la marée seraient telles que la zone soit une zone de courants de marée non négligeables et où les hauteurs d'eau ne sont pas trop élevées. Dans de telles zones, à forçage météorologique uniforme et constant, le maximum de surcote devrait être obtenu pendant la phase de la marée comprise entre la basse-mer (hauteur d'eau minimale) et le courant de marée maximum. C'est ce qui est observé dans l'estuaire du Thames (Figure 11).

À partir de simulations numériques

Par une approche de modélisation numérique 2DH, Zhang *et al.* (2007) ont étudié les interactions entre surcotes et marée dans la zone du détroit de Taiwan, et donc dans une zone de faible hauteur d'eau (< 50 m). Leurs simulations numériques mettent en évidence la modulation de la surcote par la marée et les courants de marée associés. En outre, en comparant les surcotes avec et sans l'effet de la marée et des courants associés, ils obtiennent des écarts de 24 cm sur la surcote calculée, et ce pour les quatre stations étudiées (Figure 12).

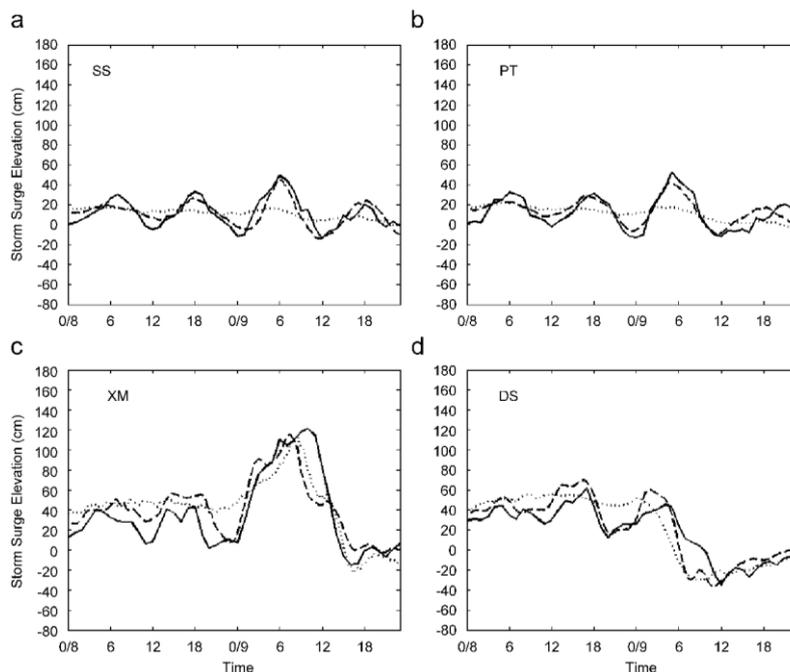


Figure 12 : Séries temporelles de surcotes observées (ligne continue) et simulées (tiretés), ainsi que la surcote pure (pointillés) pour la période 00 h - 8 Octobre à 23 h - 9 Octobre 1999. La surcote pure est obtenue par modélisation en négligeant la marée et ne prenant en compte que les conditions météorologiques. Source : Zhang *et al.* (2007).

D'autres auteurs ont aussi mis en évidence les interactions non-linéaires, surtout en domaine peu profond (shallow-water), entre l'écoulement induit par le vent et les niveaux de marée (Hall and Davies, 2002 ; Davies *et al.*, 2001).

Conclusion

Le littoral Manche-Gascogne étant soumis par endroits à de forts marnages et/ou courants de marée (exemple : détroit du Pas-de Calais), il est possible qu'il y ait des interactions non négligeables entre marée et surcotes le long du littoral métropolitain Manche-Gascogne, et ce, préférentiellement lors des phases entre la basse-mer et le moment où le courant de marée est maximal.

Pour mieux quantifier ces interactions et pour identifier les zones d'interactions significatives entre marée et surcotes instantanées, des simulations numériques sont réalisées avec le code MARS2D (voir § 0.).

3.2. PROCESSUS DE SURCOTES POUR LA ZONE MANCHE-GASCOGNE

3.2.1. Méthode

Afin de mieux comprendre les phénomènes de surcotes (rôles respectifs du vent et de la pression, interaction entre marée et surcotes) et leur emprise spatiale associée dans la zone Manche-Gascogne, nous utilisons l'approche par simulations numériques avec le code MARS2D.

Pour caractériser au mieux ces interactions, nous nous concentrons sur les quatre évènements sélectionnés pour cette étude en raison de leurs complémentarités en termes de trajectoires de tempêtes et coefficients de marée, à savoir : novembre 2007, mars 2008, février 2009, février 2010. En outre, une analyse spatiale et une analyse temporelle plus fine sont réalisées pour chacun des quatre ports sélectionnés pour cette étude (Dunkerque, Saint-Malo, Le Conquet, La Rochelle).

Pour chacun des évènements, des simulations sont effectuées en activant/désactivant successivement les différents termes de forçages (Tableau 4).

Nom de la simulation	Forçages activés			Interaction marée - surcote	Effet barométrique	Rôles respectifs du vent et de la pression
	marée	vent	pression			
J1	x			x		
J2	x	x	x	x		
J3		x	x	x		x
J4		x				x
J5			x		x	x

Tableau 4 : Étude de processus des surcotes : simulations et objectifs.

3.2.2. Interaction marée et surcotes

Tout d'abord, il est important de rappeler que l'analyse des distributions de probabilité des surcotes instantanées par rapport à l'heure de pleine-mer, réalisée dans le cadre de l'étude des observations pour les quatre ports sélectionnés (Idier *et al.*, 2010), a permis de mettre en évidence une dépendance claire entre surcote et marée pour les ports de Dunkerque (zone de forts courants de marée) et de Saint-Malo (zone de fort marnage). **Ainsi, les fortes surcotes instantanées arrivent préférentiellement près de la basse-mer pour Dunkerque et après la pleine-mer pour Saint-Malo.**

Afin de mieux comprendre les phénomènes à l'origine de la modulation des surcotes par la marée nous analysons, pour chacune des quatre tempêtes sélectionnées, les simulations suivantes : (J1) marée seule, (J2) marée, vent, pression, (J3) vent et pression. Ainsi, par comparaison des jeux des données J1, J2 et J3, la composante d'interaction entre marée et surcote peut être estimée, en particulier en comparant la surcote S1 résultant de la différence entre J2 et J1, et la surcote S2 résultant uniquement de J3, sans interaction avec la marée.

La composante d'interaction I ($S1-S2$) peut être soit négative, soit positive. Nous nous intéressons tout d'abord aux valeurs maximales positives car elles signifient que l'interaction marée-surcotes engendre une surcote plus forte que si l'interaction est négligée. La Figure 13 présente, pour les quatre événements de novembre 2007, mars 2008, février 2009 et février 2010, la surcote maximale (S1) pour une tempête donnée, et la composante d'interaction ($I = S1 - S2$) maximale positive sur cette même période. Tout d'abord, on note que les zones où I (positif) est le plus fort, se situent globalement au sud de la Mer du Nord et en Manche, mais aussi, avec des valeurs toutefois plus faibles, sur la façade Atlantique, en particulier les pertuis charentais et la baie de Bourgneuf (Figure 13). En outre, ces termes d'interactions sont plus forts pour les événements de novembre 2007 (tempête de Mer du Nord) et mars 2008 (tempête venant de l'ouest de l'Islande) que pour les événements de février 2009 (tempête venant de nord-ouest du Portugal) et février 2010 (tempête venant du sud-ouest du Portugal). La zone où les termes d'interactions sont les plus forts est donc la Manche-Mer du Nord. Dans cette zone, cette composante I est de plusieurs dizaines de centimètres et atteint 60 cm dans le détroit du Pas-de-Calais lors de l'évènement Johanna (mars 2008). En comparant ces résultats à la surcote maximale ($\max(S1)$), on montre l'importance de ce terme d'interaction I dans le signal de surcote. La contribution de ce terme dans le signal de surcote dépasse le plus souvent 20 % (dans les zones à fortes surcotes) pour les événements étudiés et atteint jusqu'à 50 % de la surcote maximale à Dunkerque pour la tempête de novembre 2007.

Enfin, si on se concentre sur les zones où le terme d'interaction est inférieur à 5 cm, alors on peut identifier plusieurs zones où le terme d'interaction peut être considéré comme négligeable (Figure 13 à Figure 15) : Côte Finistère Nord, Belle-Île et l'île d'Yeu, et enfin la côte Aquitaine, pour sa partie au sud de Lacanau (en excluant le bassin d'Arcachon où ce terme d'interaction dépasse 5 cm pour certains des événements étudiés).

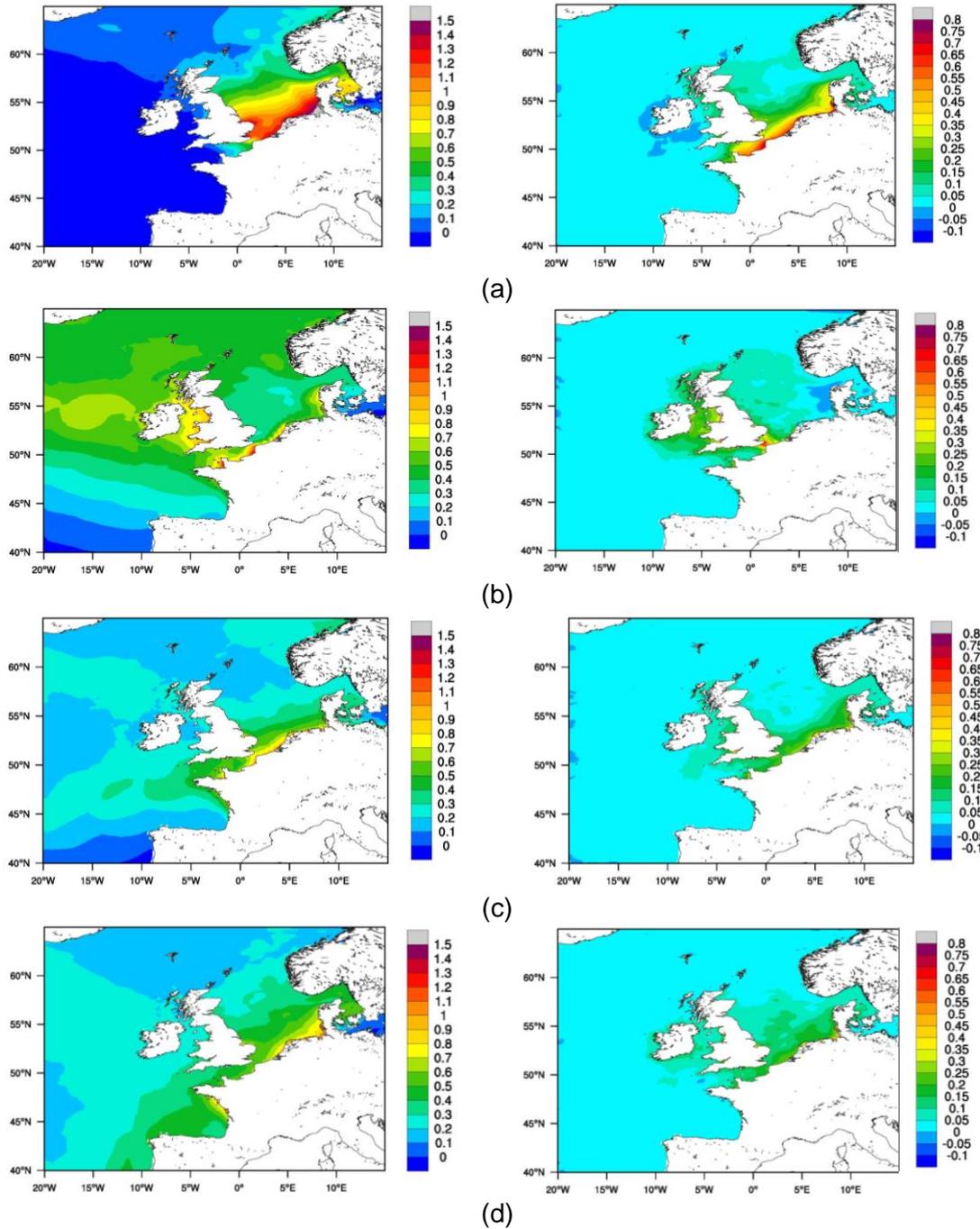


Figure 13 : Surcotes maximales $S1$ en mètre (colonne de gauche) et valeur maximale positive du terme I en mètre (colonne de droite) d'interaction entre marée et surcote, pour les quatre évènements : (a) 09/11/07 ; (b) : 10/03/08 (Johanna) ; (c) : 11/02/09 (Quentin) ; (d) : 28/02/10 (Xynthia).

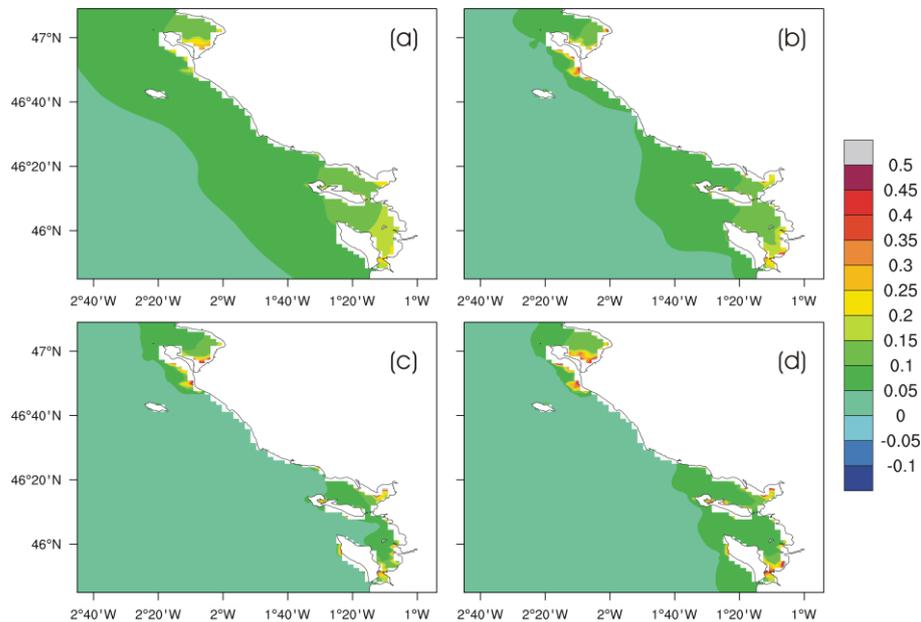


Figure 14 : Terme d'interaction I (valeur max) pour les quatre évènements : (a) nov. 07, (b) mars 08, (c) fév. 09, (d) fév. 10.

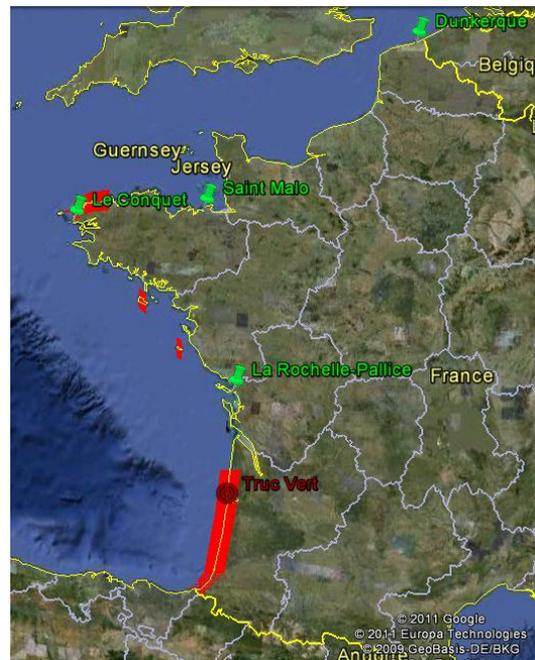


Figure 15 : Zones d'interactions I négligeables (< 5 cm, indiqué en rouge sur la figure) entre marée et surcotes pour les évènements sélectionnés.

L'analyse temporelle en chacun des quatre sites permet de compléter ces résultats (profils temporels : voir Annexe 2). Tout d'abord, nous avons vérifié que le modèle reproduit bien une modulation du signal de surcote (S1) par la marée (Figure 16). La

modulation obtenue s'explique *a priori* par le fait que la surcote atmosphérique, en générant un niveau d'eau plus important, modifie les courants et la contrainte au fond, engendrant un déphasage de la marée (accélération de la propagation, d'après Wolf (2009)).

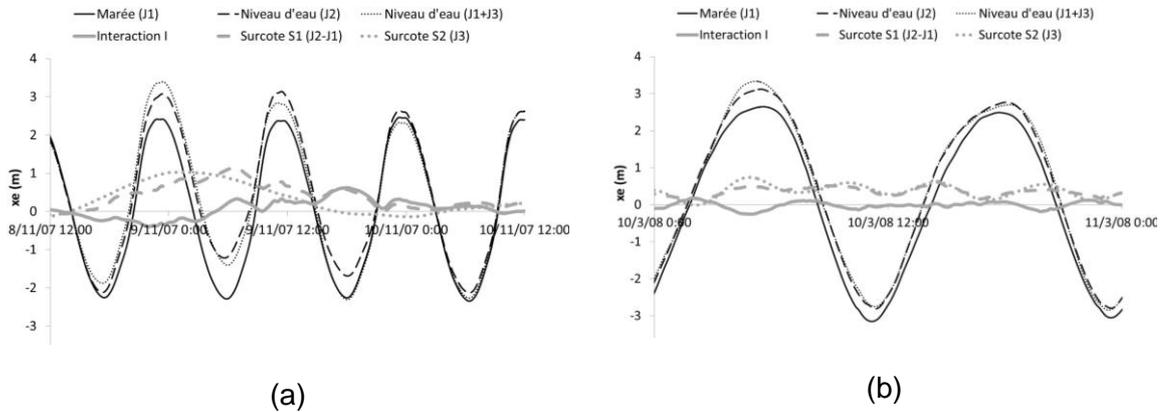


Figure 16 : Niveaux de marée et totaux par rapport au niveau moyen (avec (J2) et sans (J1+J3) interactions entre surcotes et marée), surcotes S1 et S2, et termes d'interaction I, pour les sites de Dunkerque en novembre 2007 (a) et de La Rochelle lors de l'évènement Johanna de mars 2008 (b).

Le Tableau 5 synthétise ces analyses locales. Globalement, pour les évènements étudiés (novembre 2007, février 2007, mars 2008, février 2010), au Conquet, le terme d'interaction I est négligeable (< 8 cm), tandis que pour les trois autres ports, ce terme est compris entre -47 et +63 cm (atteint à Dunkerque, Figure 16a). En se focalisant sur les surcotes au moment de la pleine-mer (PM), le terme d'interaction I atteint la dizaine de centimètres pour les ports de Dunkerque (Figure 16aa), Saint-Malo et La Rochelle (Figure 16b).

Période	Maximum et minimum du terme d'interaction I (en cm)							
	Dunkerque		Saint-Malo		Le Conquet		La Rochelle	
08/11/07-11/11/07	62,18	-39,91	25,97	-12,09	6,66	-3,14	16,18	-10,88
09/03/08-12/03/08	46,54	-46,86	17,07	-22,09	7,39	-5,07	18,35	-25,58
09/02/09-12/02/09	26,89	-28,99	18,46	-19,26	6,45	-8,51	11,28	-12,09
27/02/10-02/03/10	24,56	-26,98	18,81	-19,02	4,21	-5,78	10,03	-19,39

Tableau 5 : Maximum et minimum du terme d'interaction I, pour chaque port et chaque évènement.

Pour Saint-Malo et La Rochelle, à la PM, ce terme est négatif, induisant une surcote S1 inférieure à la surcote S2, et ce, pour les quatre évènements. Afin de mieux comprendre ce résultat, il pourrait être intéressant d'étudier séparément les contributions des termes non-linéaires d'advection et de frottement, ainsi que l'effet de la hauteur d'eau (« shallow water effect ») (Eq. 2). Pour le site de Dunkerque, ce terme est négatif lors de la PM précédant le maximum de surcote et positif lors de la PM succédant ce maximum, pour les évènements de novembre 2007 (Figure 16a), février 2009 et février 2010.

En résumé, ces résultats montrent qu'au Conquet la surcote est bien indépendante de la marée, mais qu'il existe des interactions marée-surcotes non négligeables pour les autres sites, ces interactions engendrant des variations positives ou négatives de quelques dizaines de centimètres au moment de la pleine mer.

3.2.3. Baromètre inverse et surcotes induites par la pression atmosphérique

Lorsque l'on utilise l'approche du baromètre inverse, l'action des courants induits par les gradients de pression et les contraintes imposées par la terre sont négligées. Pour identifier les erreurs ainsi introduites, les surcotes obtenues par modélisation avec MARS2D, en ne prenant en compte que la pression (simulation J5), sont comparées avec celles issues de la formule du baromètre inverse.

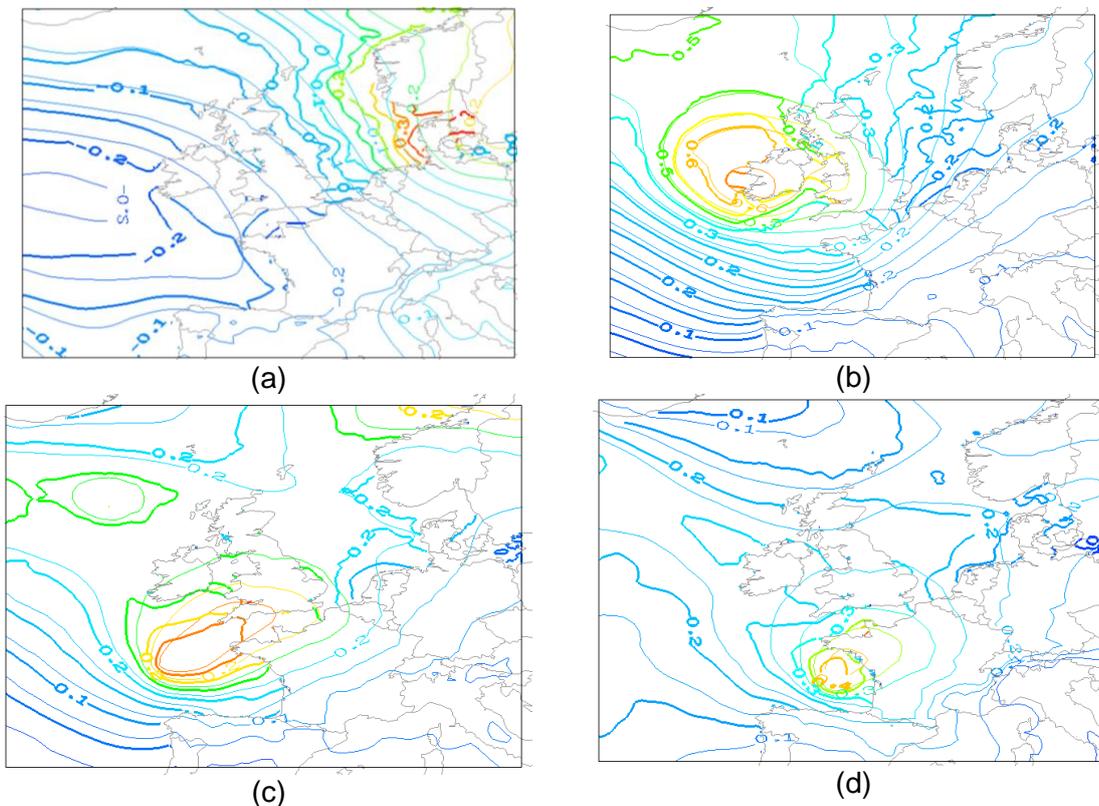


Figure 17 : Iso-contours de surcotes obtenus avec la formule du baromètre inverse (traits fins) et avec des simulations avec le code MARS2D prenant en compte uniquement les forçages de pression (traits épais).

(a) 9/11/2007 12h, (b) 10/03/2008 6h, (c) 9/02/2009 18h, (d) 28/02/2010 00h.

Pour les quatre évènements, les comparaisons mettent en évidence qu'il n'est pas rare d'atteindre, le long du littoral des écarts de 10 à 20 cm entre l'approche basée sur le baromètre inverse et celle basée sur des simulations hydrodynamiques prenant en compte uniquement la pression. Ce phénomène est particulièrement marqué pour l'évènement de novembre 2007, où le baromètre inverse donne des valeurs de

surcotes plus faibles (0,2 m à l'est de la Mer du Nord) que la modélisation J5 prenant en compte uniquement la pression (0,3 m à l'est de la Mer du Nord). En effet, ce type de tempête, provenant de Mer du Nord, zone peu profonde, est propice à des interactions entre les champs de courants générés et le terme de pression local.

Cette comparaison sommaire met en évidence que l'approche par baromètre inverse ne suffit pas, *a priori*, pour prendre en compte la surcote induite par la pression atmosphérique seule sur les côtes Manche-Gascogne, avec des écarts pouvant atteindre 30 % de la surcote due à la pression (Figure 17a).

3.2.4. Influences relatives des termes de pression et vent dans le signal de surcote

Afin de mieux analyser les rôles respectifs des termes de pression et d'entraînement de la surface de l'eau par la vitesse du vent, nous comparons les surcotes obtenues en prenant en compte : le vent et la pression (P-U, simulation J3), le vent uniquement (U, simulation J4) et la pression uniquement (P, simulation J5).

La visualisation spatiale (Figure 18) de ces trois cas pour chaque évènement montre que, au large, le terme de pression est dominant dans le signal de surcote, tandis que le terme de contrainte du vent en surface est négligeable.

Près des côtes, l'équilibre entre surcotes induites par le vent et la pression dépend du site et de l'évènement. Ainsi, pour les quatre évènements, on note que, pour le Finistère, Belle-Île, l'île d'Yeu, et au sud de Lacanau, les surcotes induites par les champs de pression restent dominantes, avec, par exemple pour l'évènement de février 2009, une surcote induite par la pression de 30 à 40 cm sur la pointe Finistère, contre une surcote induite par le vent de 10 à 20 cm. Pour l'évènement de février 2010, sur le Pays basque, la surcote induite par la pression est de 30 à 40 cm contre 0 à 5 cm pour celle induite par le vent. On peut remarquer la similarité de zonage avec les zones où l'interaction entre marée et surcotes est négligeable.

En revanche, dans les autres zones du littoral, l'équilibre entre surcotes induites par la pression et par les vents semble dépendre de l'origine de la dépression. Ainsi, pour les trois évènements dépressionnaires venant d'Atlantique (mars 2008, février 2009 et février 2010), les termes de pression et de contrainte du vent en surface sont du même ordre de grandeur, en particulier en Manche et entre Belle-Île et Lacanau (Figure 18b,c,d).

Par contre, pour la dépression venant de Mer du Nord (Figure 18a), les surcotes induites par le vent dominant celles induites par la pression. Ceci peut sans doute s'expliquer par le fait que la Mer du Nord a une profondeur relativement faible impliquant que le terme de contrainte du vent en surface dans les équations de Saint-Venant devient dominant. Globalement, on retrouve ici le même type de zonage que celui où les interactions entre marée et surcotes ont été jugées comme non négligeables.

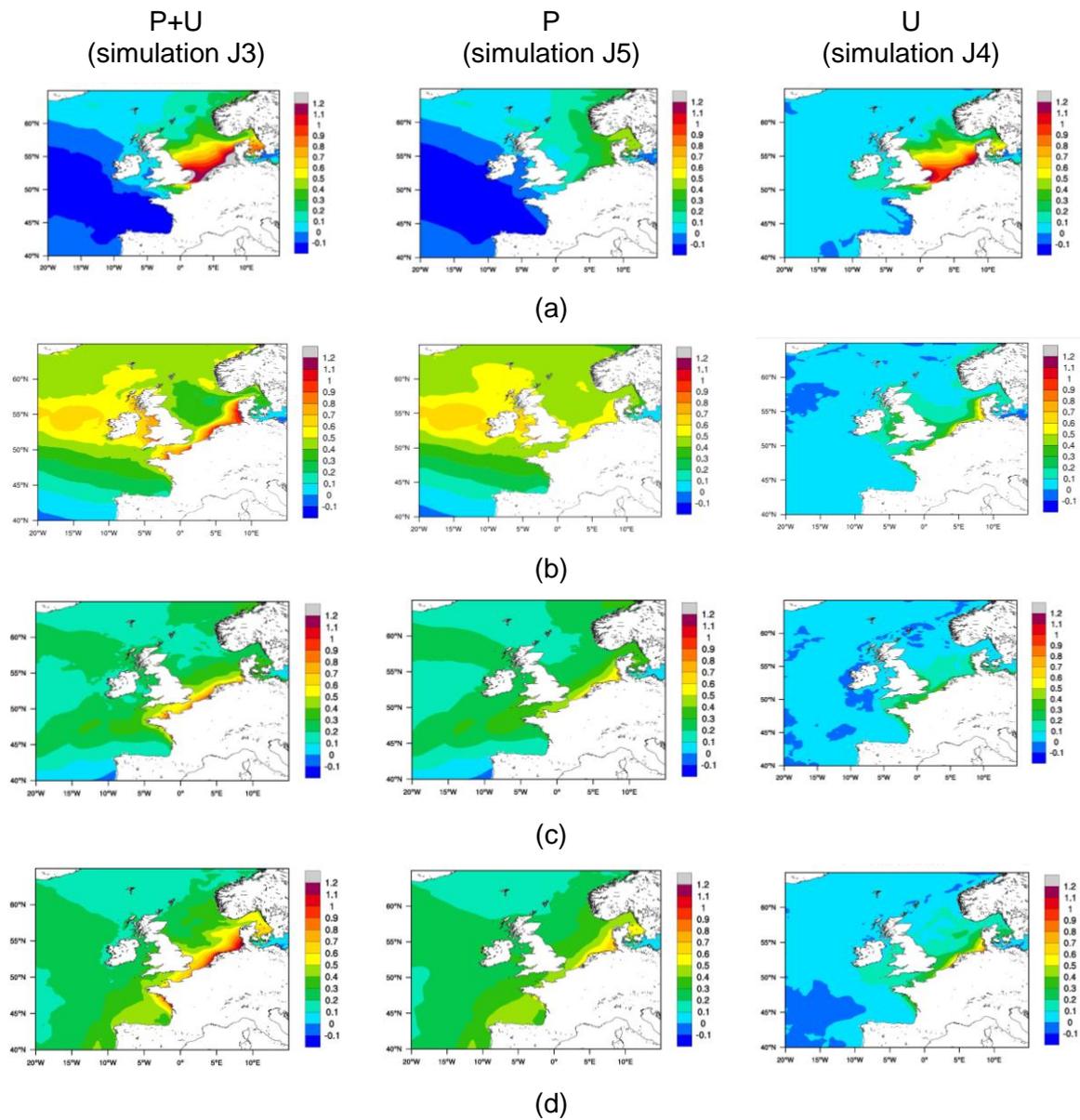


Figure 18 : Surcotes maximales dues aux termes de pression P et vitesse du vent U (colonne de gauche), au terme de pression uniquement (colonne centrale) et au terme de vent uniquement (colonne de droite), pour chacun des événements sélectionnés : novembre 2007 (a), février 2008 (b), mars 2009 (c), février 2010 (d).

On peut rappeler que ces tests ont été effectués avec la configuration de référence c'est-à-dire avec un coefficient de traînée constant (0,0016) pour le calcul de la tension de surface. Or la formulation optimale (Charnock intégrant les caractéristiques de vagues) implique un coefficient de traînée plus fort, soit un terme de contrainte en surface induite par la vitesse du vent plus fort, et donc une surcote induite par ce terme de vent plus importante. Ainsi, l'analyse des surcotes montre une augmentation des

surcotes de 10 à 50 % lorsqu'on utilise la formulation de Charnock combinée avec des données de vent ARPEGE 3H (Figure 34 à Figure 36).

Ceci implique que, pour certains sites situés en Manche ou sur la partie centrale de la façade atlantique métropolitaine, les surcotes induites par le vent peuvent représenter une part dominante du signal de surcote. Pour le Finistère et au sud de Lacanau, ces termes de vents devraient rester négligeables.

Effectuer le même type d'analyse avec la configuration optimale (Charnock et données ARPEGE 3H) devrait donc aboutir à des conclusions similaires à celles obtenues avec la configuration de référence, tout en permettant d'identifier des zones et des périodes où la surcote induite par le vent est dominante.

3.2.5. Implications pour la modélisation optimale des niveaux d'eau

En termes de modélisation optimale des niveaux d'eau, *i.e.* à la fois de la marée et des surcotes, les résultats ci-dessus permettent de dresser les grandes lignes de ce que serait ce modèle optimal.

Au large : phénomènes dominants et implications pour la modélisation

- Au large, en dehors du plateau continental, les termes d'interaction entre la surcote et la marée sont négligeables (< 5 cm).
→ Aussi, pour cette zone, il n'est pas nécessaire de prendre en compte une marée de qualité optimale. La base de données FES2004 est suffisante. Il pourrait même être envisagé de ne pas prendre en compte la marée pour la modélisation des surcotes au large.
- Au large, la surcote engendrée par la pression, obtenue par modélisation hydrodynamique, n'est pas égale à la surcote issue du baromètre inverse, avec des écarts globalement inférieurs à 5 cm.
→ Si on veut une modélisation optimale, pour calculer la surcote au large induite par la pression, il est préférable d'avoir recours à un modèle hydrodynamique prenant en compte la pression atmosphérique, plutôt que d'utiliser l'approche baromètre inverse.
- Au large, le terme de pression est dominant dans le signal de surcote, tandis que le terme de contrainte du vent en surface est négligeable.
→ En dehors du plateau continental, prendre en compte les forçages météorologiques uniquement de pression semble suffisant pour reproduire la surcote en dehors du plateau.

À la côte : phénomènes dominants et implications pour la modélisation

- Les termes d'interactions entre marée et surcotes sont non négligeables (> 5 cm) sur la majeure partie du littoral Manche-Gascogne français. Ce terme d'interaction peut atteindre plusieurs dizaines de centimètres.

→ Afin de réduire les erreurs de modélisation des surcotes, il est donc important de prendre en compte ce terme en utilisant un modèle hydrodynamique prenant en compte la marée, et si possible la marée dont la qualité par rapport aux observations est la meilleure possible à l'heure actuelle, i.e. la marée issue de cstFrance (Shom).

- Pour les évènements sélectionnés, les termes d'interactions entre marée et surcotes sont négligeables (< 5 cm) sur une partie du littoral Manche-Gascogne français : Côte Finistère Nord, Belle-Île, île d'Yeu, côte aquitaine à partir de Lacanau en allant vers le Sud (bassin d'Arcachon exclu).

→ Ceci implique que pour ces zones, une modélisation des surcotes (sans prise en compte de la marée) serait suffisante, et pour obtenir le niveau total il suffirait d'ajouter cette surcote modélisée à la marée prédite à partir de la base de données cstFrance (SHOM).

- Près des côtes, en particulier pour les dépressions venant d'Atlantique, les termes de pression et de contrainte du vent en surface sont du même ordre de grandeur, et en théorie devraient interagir entre eux dans les mêmes zones où le terme d'interaction I n'est pas négligeable.

→ Près des côtes, il est indispensable de prendre en compte à la fois les termes de pressions et de contrainte du vent en surface dans un modèle hydrodynamique.

Proposition de modèle optimal des niveaux d'eau à la côte

Le Tableau 6 récapitule les conclusions des analyses ci-dessus. En particulier, on peut noter la cohérence entre zones où l'interaction entre marée et surcotes est non négligeable et zones où les surcotes induites par le vent est non négligeable.

Ainsi, si on devait concevoir un modèle optimal de niveaux d'eau, on proposerait alors le système suivant :

- Une modélisation hydrodynamique grande emprise (rang 0', Figure 19), permettant de bien reproduire les surcotes au large intégrant les champs de pression et de vent. On peut s'interroger sur la nécessité de prendre en compte les données de vent au large (surcotes induites par le vent négligeables au large). Ceci étant, pour le vérifier, il faudrait faire des tests et analyses complémentaires, comme par exemple effectuer des simulations où le vent au large (exemple pour les profondeurs supérieures à 200 m) serait pris égal à zéro, et comparer les résultats avec les simulations où le vent est pris en compte sur tout le domaine du rang 0'. Quoiqu'il en soit, on peut penser que la qualité des données de vent au large n'est pas cruciale, contrairement à la zone de plateau continental.
- Si on désire avoir une résolution spatiale plus fine que 2 km, alors, en fonction de la zone finale étudiée (i.e. si elle est dans les zones identifiées comme zones à interactions marée-surcotes négligeables), une modélisation fine d'emprise réduite peut être faite directement, en imposant aux bords du domaine la surcote du rang 0' et la marée prédite issue de cstFrance (SHOM) (Figure 19, cadre rouge). Sinon, une

modélisation intermédiaire couvrant le plateau continental doit être effectuée (rang 1', Figure 19, cadre bleu).

- Si on ne désire pas avoir une résolution spatiale meilleure que 2 km, alors, on peut se contenter, pour les zones à interactions marée-surcotes négligeables (Finistère Nord et côte aquitaine au sud de Lacanau, hors bassin Arcachon), d'uniquement utiliser la surcote du rang 0' et de l'additionner au niveau de marée prédite à partir de cstFrance.

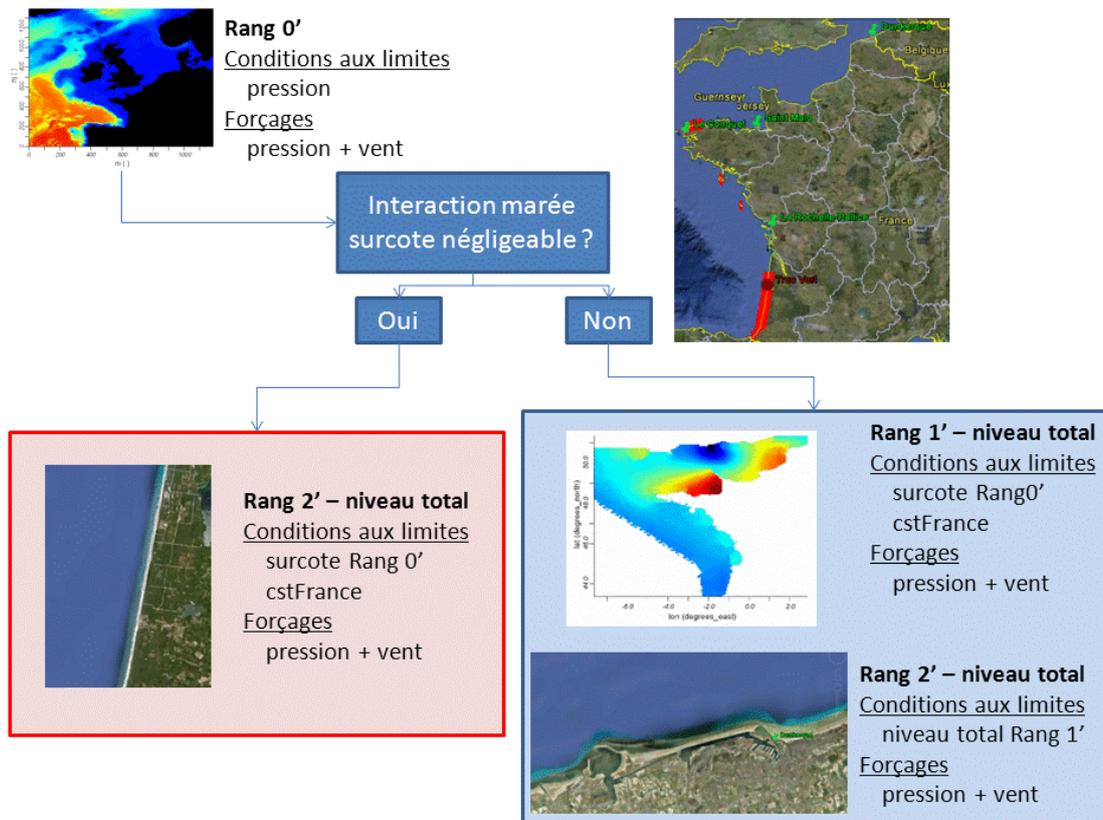


Figure 19 : Représentation schématique de ce que pourrait être une configuration optimale du modèle de niveau d'eau total.

Domaine géographique		Contributions au signal de surcote atmosphérique		
		Interaction marée surcote	Pression	Vent
Au large		Négligeable	Dominante	Négligeable
À la côte	Finistère Nord ET Côte aquitaine au sud de Lacanau (sauf Bassin Arcachon)	Négligeable	Dominante	Négligeable
	Reste du littoral métropolitain Manche-Gascogne	Non négligeable	Non négligeable	Non négligeable

Tableau 6 : Synthèse des conclusions issues de l'analyse de processus en termes des rôles respectifs des interactions entre marée et surcotes, et surcotes induites par le vent et la pression.

4. Modèle de surcotes atmosphériques Manche-Gascogne : étude de sensibilité et configuration optimale

Dans ce chapitre, nous nous concentrons sur la définition du modèle de surcotes optimal en vue d'une intégration dans le système opérationnel de prévision de surcotes de PREVIMER. Afin de déterminer cette configuration optimale, une étude de sensibilité est effectuée à partir de la configuration de référence (§ 4.1.). La configuration donnant les meilleurs résultats est ensuite présentée (§ 4.2.).

4.1. ÉTUDE DE SENSIBILITÉ

4.1.1. Sensibilité à la formulation du coefficient de traînée

Ici, nous étudions la sensibilité de la configuration MANGA à la formulation du coefficient de traînée. La configuration de référence à laquelle les résultats seront comparés, est celle décrite dans le paragraphe 2.2, qui utilise un coefficient de traînée constant de 0,0016. Cette configuration de référence sera appelée « CD CONSTANT » dans la suite.

Simulations réalisées

La sensibilité de la modélisation des surcotes est étudiée au travers de cinq formulations de coefficients de traînée (C_D). À l'issue de la première phase du projet (tâche 1 du cahier des charges), il a été décidé de tester la formulation avec un coefficient de traînée constant ($C_D = 0,0016$), celle de Moon *et al.* (2007) et celle de Makin (2005). Après cette première phase, il est apparu pertinent de tester la formulation de Charnock (1955) qui tient compte de la rugosité de surface liée aux vagues et la formulation de Wu (1982) utilisée et validée par Météo-France à Dunkerque sur la tempête de Novembre 2007. Ces formulations, décrites dans Idier *et al.* (2010a), sont rappelées dans l'Annexe 3.

Pour rappel, les équations hydrodynamiques 2DH peuvent s'écrire sous la forme suivante :

$$\begin{aligned} \frac{\partial \xi}{\partial t} + \nabla \cdot (D\vec{q}) &= 0 \\ \frac{\partial \vec{q}}{\partial t} + \vec{q} \cdot \nabla \vec{q} - f\vec{k} \times \vec{q} &= -g\nabla(\xi - \bar{\xi}) - \frac{1}{\rho} \nabla p_a + \frac{1}{\rho D} (\vec{\tau}_s - \vec{\tau}_b) + A\nabla^2 \vec{q} \end{aligned} \quad (5)$$

où \vec{q} représente le vecteur quantité de mouvement, f , le paramètre de Coriolis, ξ , l'élévation de la surface libre, g , l'accélération de pesanteur, ρ , la densité, p_a , la

pression atmosphérique, D , la profondeur, $\bar{\tau}_s$, la contrainte de surface, $\bar{\tau}_b$, la contrainte de fond, et A , le coefficient de diffusion horizontale turbulente.

La contrainte de surface s'exprime sous la forme $\bar{\tau}_s = \rho_a C_D U_{10}^2$ avec ρ_a la masse volumique de l'air, C_D le coefficient de traînée et U_{10} la vitesse du vent à 10 m.

Ainsi, toute chose égale par ailleurs, on peut noter que si le coefficient de traînée augmente, alors la contrainte d'entraînement à la surface de l'eau augmente, et la surcote augmente. Ainsi, à forçage météorologique identique (U_{10}), comme les différentes formulations de coefficient de traînée dépendent toutes directement du vent (sauf Charnock, intégrant les vagues), les pics de surcotes devraient être simultanés et seule leur amplitude devrait changer. Pour la formulation de Charnock implémentée dans le modèle de surcote, le coefficient de traînée s'exprime en fonction du coefficient de Charnock (1955), intégrant l'âge des vagues via l'utilisation du modèle de vagues utilisé dans IOWAGA. Les sorties dénommées « cha » (IOWAGA) utilisées dans le projet, de résolution spatiale de $0,5^\circ$, sont échantillonnées à 3h, et leur forçages météorologiques (vent) sont issus de Climate Forecast System Reanalysis (CFSR) (Saha *et al.*, 2010) jusqu'en 2005 inclus, puis du European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF) jusqu'en 2010. Concernant les champs météorologiques ECMWF, il s'agit d'analyses à $0,5^\circ$ avec un échantillonnage temporel à 6 h entre 2006 et juin 2008, et d'analyses à $0,25^\circ$ à 6 h entre juillet 2007 et 2010. Les différentes simulations correspondant aux différentes formulations du coefficient de traînée sont résumées dans le Tableau 7. De la même manière que pour la validation des surcotes pour la configuration de référence, l'étude de sensibilité se base sur des analyses évènementielles et pluriannuelles.

Nom de la simulation	Période simulée	Ports d'étude
CD CONSTANT	01/01/2003-01/03/2010	Dunkerque, Saint-Malo, Le Conquet, La Rochelle
MOON		
MAKIN		
CHARNOCK		
WU	01/10/2007-01/12/2007	Dunkerque

Tableau 7 : Synthèse des simulations réalisées pour l'étude de sensibilité à la formulation du coefficient de traînée.

Résultats et analyses

• Analyse pluriannuelle

L'analyse pluriannuelle a été réalisée sur la période 01/01/03-01/03/2010 et concerne les simulations CD CONSTANT, MOON, MAKIN et CHARNOCK. Les mêmes indicateurs d'erreur que ceux utilisés pour valider la simulation de référence ont été calculés.

Les indicateurs d'erreur relatifs au comportement général du signal (Figure 20a) montrent que le paramétrage de Charnock donne les résultats les plus proches des observations d'un point de vue pluriannuel, essentiellement à Dunkerque. Ainsi, l'erreur

maximale pour les surcotes est réduite de 40 cm à Dunkerque avec le paramétrage de Charnock, par rapport à celle de la configuration de référence ($C_D = 0,0016$). Les erreurs RMS et la valeur absolue du biais sont d'environ 8 cm à Dunkerque et Saint-Malo et d'environ 3 cm au Conquet et La Rochelle quelle que soit le paramétrage utilisé. **Pour Saint-Malo, Le Conquet et La Rochelle, les paramétrages de Moon et al. (2007) et Charnock donnent des résultats très proches concernant les statistiques générales** (Figure 20a2, a3, a4). La sensibilité du signal de surcote aux différentes formulations du coefficient de traînée est la plus visible pour les indicateurs d'erreur relatifs aux fortes surcotes (Figure 20b). **La formulation de Charnock donne les erreurs sur les surcotes de période de retour supérieures à 6 mois les plus faibles, suivie par la formulation de Moon et al. (2007)**. La même tendance est visible sur les erreurs pics. Concernant les déphasages, ils sont les plus élevés au Conquet (~1,8 h) et les plus faibles à La Rochelle (< 0,5 h). Le fait que les différences entre les paramétrisations sont plus visibles sur les statistiques pour les fortes surcotes que sur les statistiques générales est cohérent avec le comportement des coefficients de traînée en fonction du vent. En effet, comme montré dans Idier *et al.* (2010a), pour des vents faibles (de l'ordre de 10 m/s) les coefficients de traînée (exemple : Moon *et al.*, 2007) ont des valeurs proches de 0,0016, alors que pour les vents forts (> 30 m/s) les écarts de ces coefficients de traînée par rapport à la valeur 0,0016 sont plus grands (plusieurs dizaines de pourcents). Ces différences de coefficients de traînée entraînent donc des écarts en termes de surcotes d'autant plus grands que le vent est fort. Ce point est aussi illustré par l'analyse événementielle qui suit.

L'analyse pluriannuelle montre que même si les résultats obtenus par les différents paramétrages sont assez proches, le paramétrage de Charnock donne les meilleurs résultats.

• Analyse événementielle

L'analyse événementielle a été réalisée sur les quatre ports d'étude et pour les simulations CD CONSTANT, MOON, MAKIN, CHARNOCK et WU. Elle concerne les événements de Novembre 2007, Johanna, Quentin et Xynthia, à l'exception de la simulation WU qui a uniquement été étudiée sur la tempête de Novembre 2007 à Dunkerque. Tous les résultats sont présentés en Annexe 5. L'Annexe 4 indique les valeurs de coefficients de traînée avec les formulations de Moon *et al.* (2007) et Charnock, sur 24 h, pour les événements de mars 2008 (Johanna), février 2009 (Quentin) et février 2010 (Xynthia).

Pour la **tempête de Novembre 2007**, les paramétrages de Charnock, Wu (1982) et Moon *et al.* (2007) donnent les résultats les plus proches des observations. L'apport des paramétrages de Moon *et al.* (2007) et Charnock est le plus évident à Dunkerque et Saint Malo. En effet, ils réduisent les erreurs maximales et les erreurs pics d'environ 20 cm (Figure 21a,b) par rapport à celles obtenues en comparant la simulation de référence aux observations. Les cartes des coefficients de traînée obtenus à partir des formulations de Charnock, Moon *et al.* (2007) et Wu (1982) pour la journée du 9/11/2007 montrent que, suivant les formulations utilisées, les différences entre les coefficients sont de l'ordre de 20 % (Figure 24). Les structures spatiales des coefficients de traînée sont très proches pour les trois formulations représentées. La

similitude dans les structures spatiales explique le comportement analogue des courbes de surcotes réalisées à partir des différentes formulations. De plus, au niveau de la tempête de Novembre 2007, les coefficients de traînée les plus élevés sont obtenus avec la formulation de Charnock, puis de Wu (1982) et enfin de Moon *et al.* (2007), ce qui explique la qualité décroissante obtenue avec ces formulations respectives pour la reproduction des surcotes à Dunkerque. Le paramétrage de Wu (1982), uniquement testé à Dunkerque permet d'obtenir des erreurs maximales et des erreurs pics du même ordre de grandeur que celles obtenues avec Charnock (voir Annexe 6), et ce, pour l'évènement novembre 2007.

Pour la **tempête Johanna**, les paramétrages de Charnock et Moon *et al.* (2007) donnent les résultats les plus proches des observations. En effet, on peut noter que les coefficients de traînée sont nettement supérieurs à la valeur de la configuration de référence qui est de 0,0016 (Figure 25) et que la formulation de Charnock engendre les coefficients de traînée les plus forts, avec un écart de l'ordre de 20 % par rapport à la formulation de Moon *et al.* (2007). L'amélioration des résultats de surcotes, avec cette formulation, à La Rochelle et au Conquet est moins nette que pour la tempête de novembre 2007, même si les indicateurs d'erreur restent les plus faibles avec les formulations de Moon *et al.* (2007) et Charnock qu'avec les autres formulations (voir Annexe 6).

Pour la **tempête Quentin**, l'erreur pic est diminuée de 20 cm avec la formulation de Charnock à La Rochelle (voir Annexe 6) par rapport à la simulation de référence. En termes de coefficients de traînée, la formulation de Charnock donne un coefficient maximal d'environ 0,003 localisé en face des Pertuis Charentais, soit deux fois plus que le coefficient constant de 0,0016, d'où une augmentation significative des surcotes modélisées à La Rochelle. Toutefois, l'erreur maximale est moins importante avec la simulation de référence (voir Annexe 6) mais ceci s'explique par le fait que la diminution des surcotes après le pic principal se fait plus lentement avec la simulation utilisant la formulation de Charnock (Figure 22d). La formulation de Charnock ayant tendance à augmenter l'intensité des pics de surcotes par rapport aux autres formulations, l'erreur maximale peut se retrouver amplifiée lorsqu'il y a un important déphasage par rapport aux observations au départ. Au niveau de Dunkerque, du Conquet et de Saint Malo, l'amélioration des résultats en utilisant les formulations de Moon *et al.* (2007) et Charnock est moins nette qu'à La Rochelle (Figure 22a, Figure 22b et Figure 22c).

Pour la **tempête Xynthia**, la formulation de Charnock donne les résultats les plus satisfaisants au Conquet et à La Rochelle (Figure 23c et Figure 23d) où les erreurs pics sont diminuées (d'environ 10 cm à La Rochelle). Tout comme pour la tempête Quentin, on peut noter que les coefficients de Charnock prennent localement des valeurs importantes ($> 0,003$, Figure 25), en particulier au sud-est de La Rochelle. À Dunkerque et à Saint-Malo, les différences obtenues entre les différentes simulations sont plus faibles (Figure 23a et Figure 23b) (voir Annexe 5). Ceci s'explique par la présence de plusieurs pics de surcotes d'intensité très proches durant cet évènement et suivant le paramétrage de friction de surface utilisée, le modèle ne reproduit pas ces pics avec la même intensité, ce qui va augmenter les déphasages et les erreurs maximales.

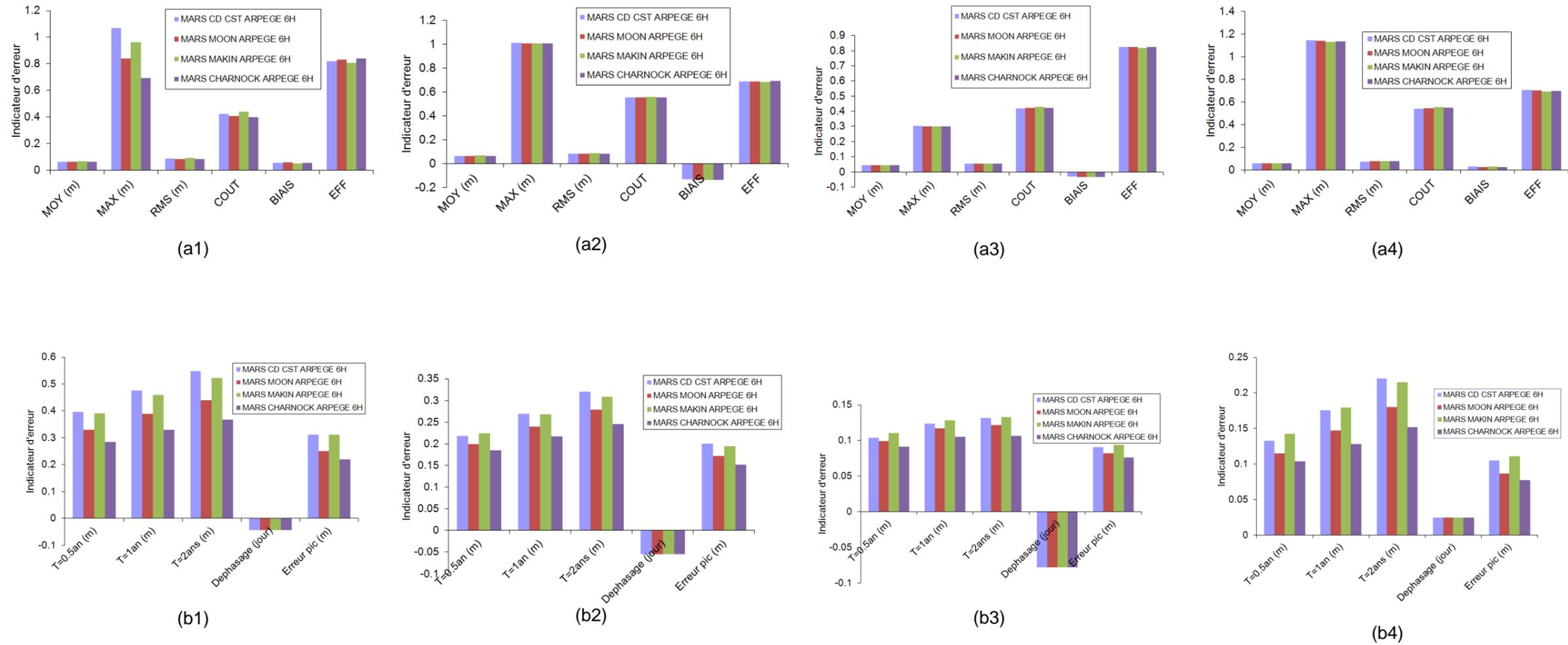


Figure 20 : Indicateurs d'erreur pluriannuelle.

(a) statistiques générales (MOY : erreur absolue moyenne, MAX : erreur maximale ; RMS : Erreur quadratique moyenne ; COUT : fonction coût ; BIAIS : biais moyen ; EFF : coefficient d'efficacité), (b) statistiques pour les fortes surcotes (T = 0,5 an : erreur associée à la surcote de période de retour 0,5 an ; T = 1 an : erreur associée à la surcote de période de retour 1 an ; T = 2 ans : erreur associée à la surcote de période de retour 2 ans ; Déphasage : déphasage moyen des pics de surcotes ; Erreur pic : erreur pic moyenne calculée pour les pics de surcotes détectés) à Dunkerque (1), Saint-Malo (2), Le Conquet (3), La Rochelle (4).

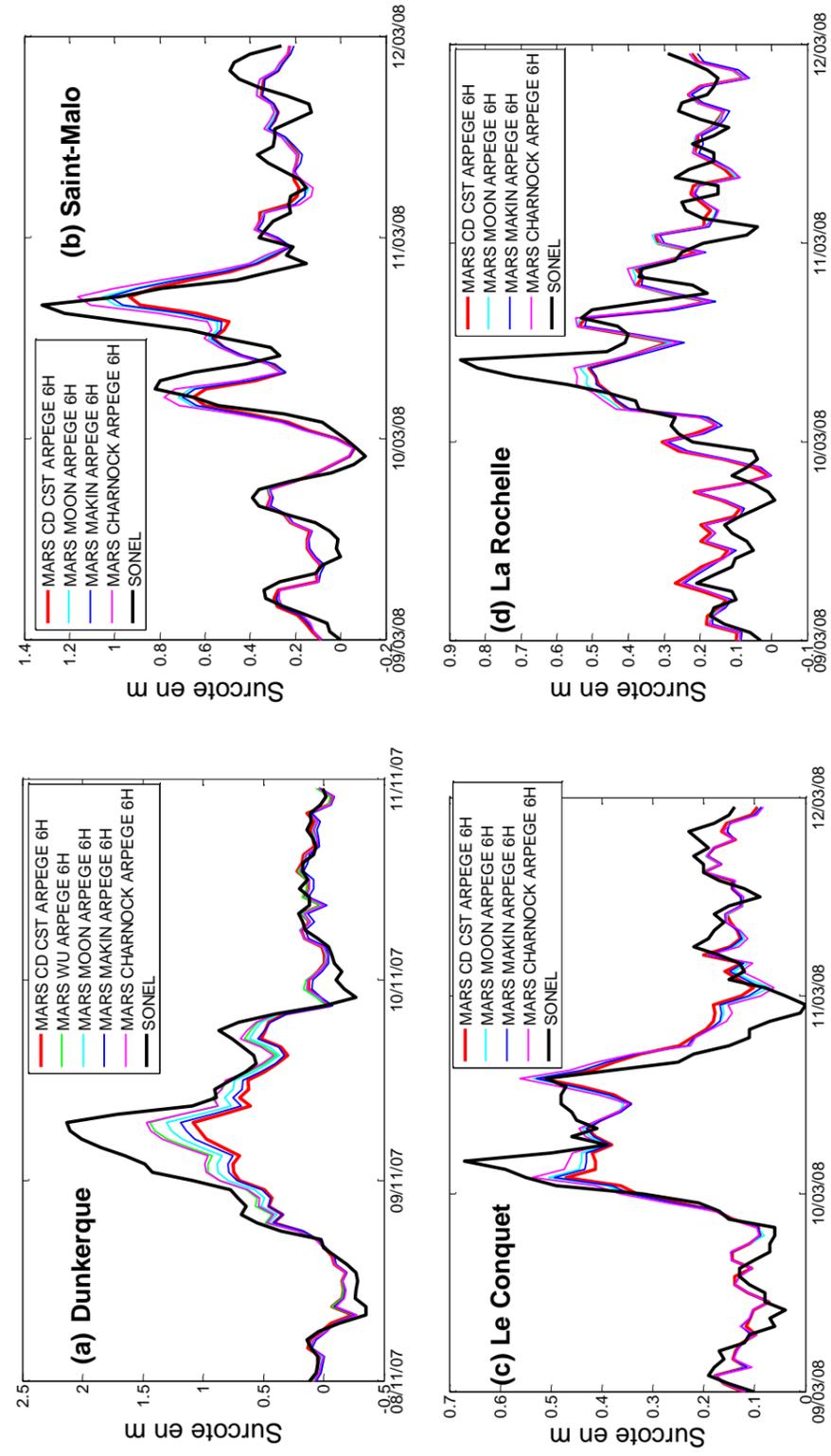


Figure 21 : Séries temporelles des surcotes issues de MARS2D avec différentes formulations de coefficient de traînée et SONEl (noir) pour les tempêtes de novembre 2007 et JOHANNA aux quatre ports d'étude.

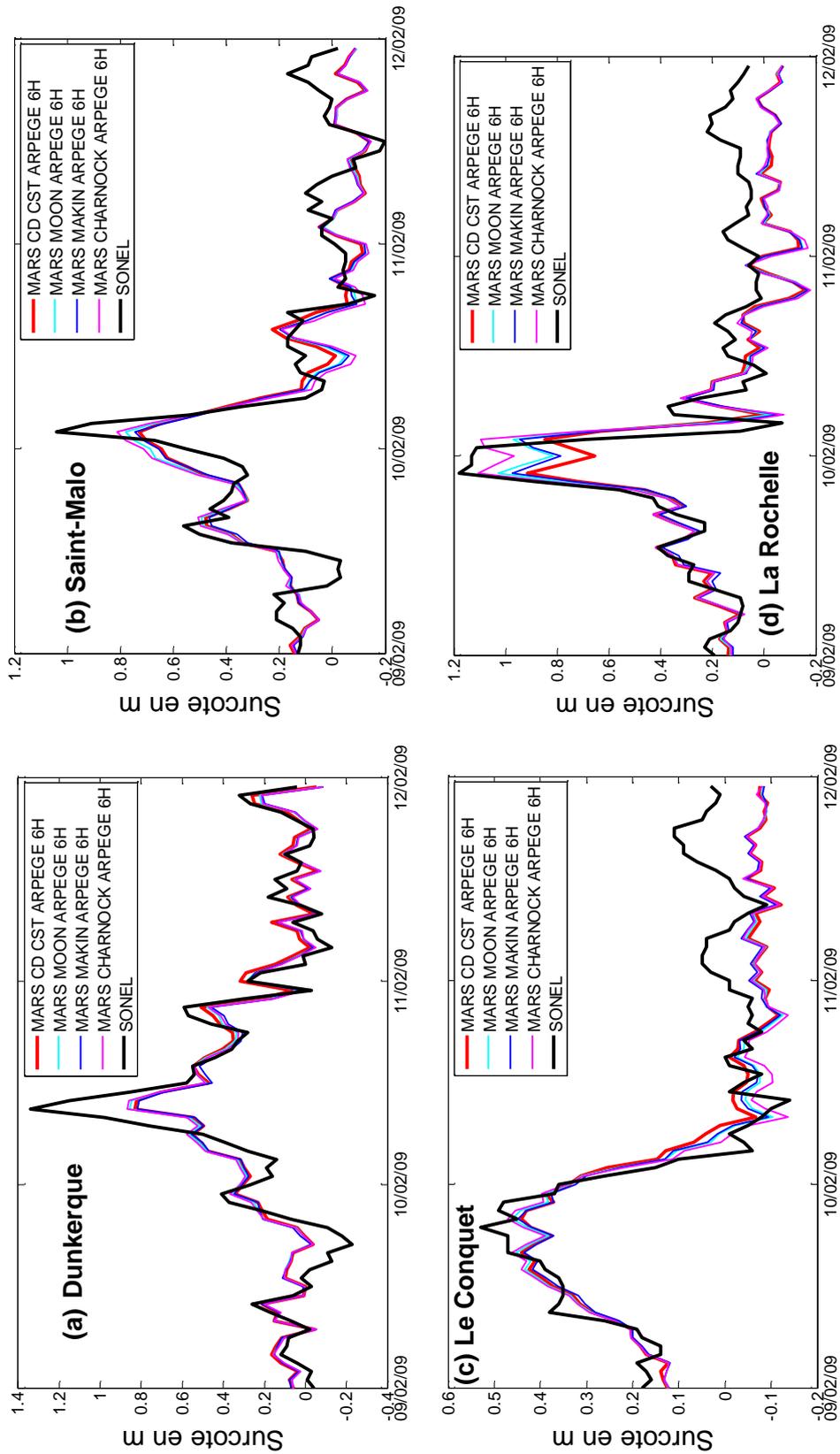


Figure 22 : Séries temporelles des surcotes issues de MARS2D avec différentes formulations de coefficient de traînée et SONEl (noir) pour la tempête QUENTIN aux quatre ports d'étude.

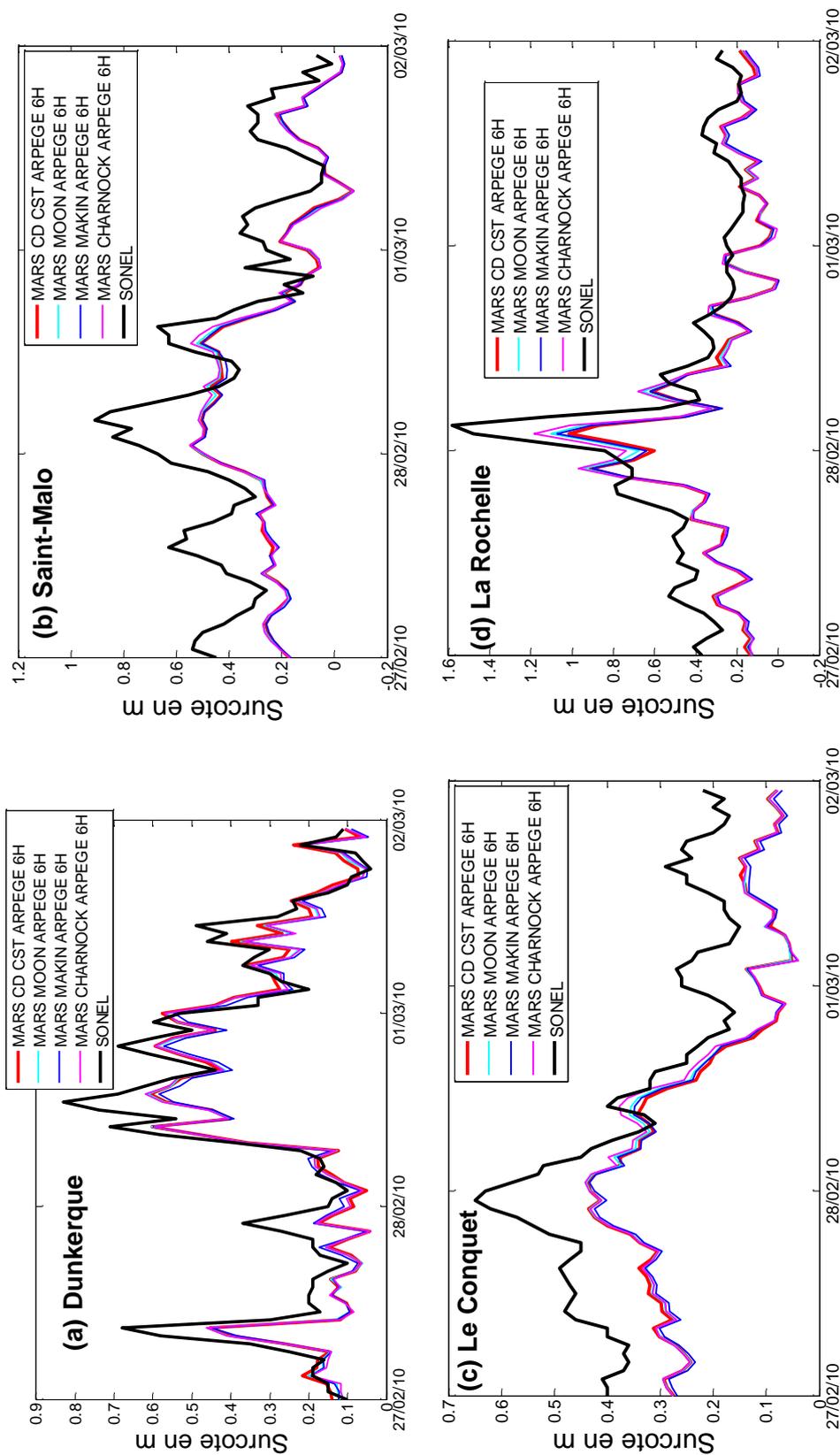


Figure 23 : Séries temporelles des surcotes issues de MARS2D avec différentes formulations de coefficient de traînée et SONEl (noir) pour la tempête XYNTHIA aux quatre ports d'étude.

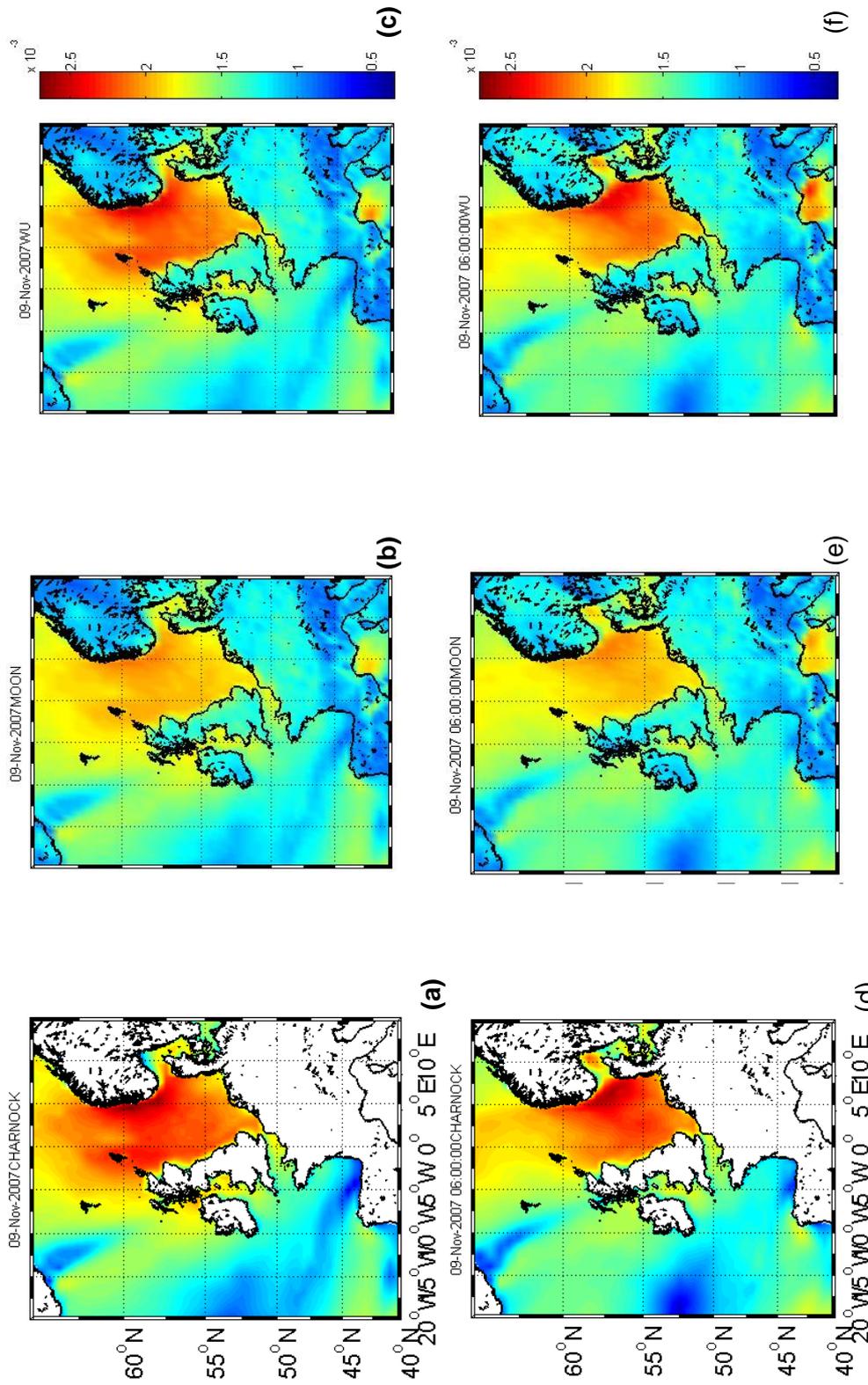


Figure 24 : Cartes des coefficients de traînée issus de la paramétrisation de (a,d) Charnock, (b,e) Moon et (c,f) Wu pour le 09/11/2007, à 00:00 et 06:00 TU.

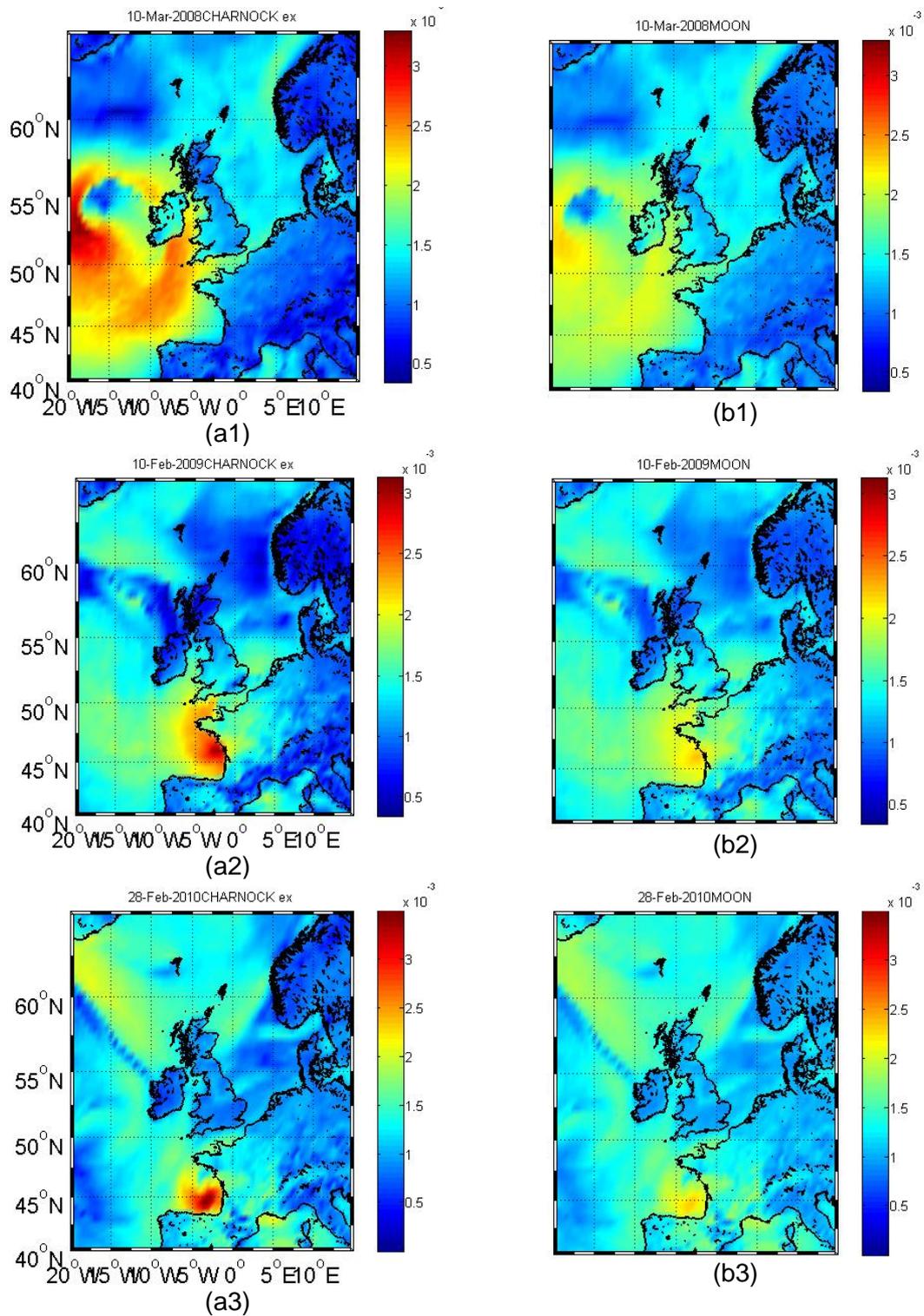


Figure 25 : Cartes des coefficients de traînée issus de la paramétrisation de (a) Charnock et (b) Moon et al. (2007) le 10/03/2008 00:00, 10/02/2009 00:00 et le 28/02/2010 00:00 TU.

La comparaison des cartes de coefficients de traînée issus de Wu (1982), Moon *et al.* (2007) et Charnock (1955) révèle des structures spatiales très proches pour les trois formulations représentées. Par contre, les coefficients diffèrent par leurs intensités et leurs disparités spatiales. La paramétrisation de Charnock fait plus ressortir les zones de vents forts et de vents faibles (voir Figure 24 et Figure 25), ce qui permet d'expliquer le fait que pics de surcotes et les creux de surcotes sont accentués avec cette formulation du coefficient de traînée.

Cette analyse évènementielle montre l'apport de la formulation de Charnock dans la reproduction des surcotes. Les surcotes obtenues avec cette formulation sont plus importantes au niveau des pics de surcotes et moins intenses au niveau des creux de surcotes (surtout visible au Conquet autour du 11/03/2008, Figure 21c).

Conclusion

L'analyse de sensibilité à la formulation du coefficient de traînée a permis de montrer **l'apport de la formulation de Charnock pour la reproduction des surcotes à l'échelle pluriannuelle, tant sur le comportement général des surcotes que sur les évènements énergétiques** (voir statistiques générales et statistiques liées aux fortes surcotes dans la section 4.1.1.b). **L'analyse à l'échelle évènementielle est venue confirmer l'amélioration des résultats par la formulation de Charnock. Elle a néanmoins mis en évidence de forts écarts entre les surcotes modélisées et celles observées**, quelle que soit la formulation utilisée pour le calcul du coefficient de traînée et ce particulièrement pour l'évènement de novembre 2007 à Dunkerque. Des éléments d'amélioration sont donnés dans la suite de ce rapport.

4.1.2. Sensibilité aux données météorologiques

Données météorologiques : description et qualité

Dans cette partie, la sensibilité des surcotes aux données météorologiques est étudiée. Pour ce faire, l'étude s'appuie sur trois types de données météorologiques :

- ARPEGE 6H : les données issues du modèle de météo-France ARPEGE à 0,5° de résolution, disponibles toutes les 6 heures couvrant la période de 2003 à 2010 avec quatre analyses par jour entre 2003 et mars 2009 et une analyse à 0 h avec trois prévisions calculées pour 6 h, 12 h et 18 h entre mars 2009 et 2010 ;
- ARPEGE 3H : les mêmes que (1) avec un échantillonnage à 3 heures, des analyses à 6h et des prévisions à 3 h sur la période 2003-2010 ;
- AROME : les données issues du modèle de météo-France AROME à 0,025° de résolution, disponibles toutes les heures entre 2009 et 2010 avec des analyses à 0 h et des prévisions de 1 h à 24 h.

Des comparaisons entre les données ARPEGE 3H (point de grille du modèle de surcote de Météo-France au 1/10°, en mer, à proximité du marégraphe du port concerné

(Dunkerque, Saint-Malo, Le Conquet ou La Rochelle)) et des observations en différents sites terrestres proches (Paradis and Ohl, 2011) ont été réalisées. Compte tenu du frottement supérieur de l'air sur la surface terrestre, le vent observé devra être un peu plus faible que le vent modèle en mer, sauf si la mesure a été faite très au-dessus du niveau marin. Cette comparaison indique que, pour les événements étudiés, il existe des écarts (entre données et modèle) plus ou moins importants en termes de vents ou de pression. Le tableau 8 synthétise ces résultats. Si les paramètres météorologiques (vent et pression) issus de ARPEGE 3H sont du même ordre de grandeur que les données, le signe « ~ » est utilisé. De plus, le signe « + » traduit le fait que le modèle surestime le vent ou la pression et le signe « - » qu'il les sous-estime. Globalement, le modèle ARPEGE reproduit assez correctement le vent et la pression sur ces quelques sites (changement de direction, pic (amplitude et phase) de vent fort, minimum de pression) avec toutefois une tendance à surestimer le module du vent fort à la Rochelle.

Évènements	Ports d'étude	ARPEGE 3H	
		pression	vent
Évènements 1	Dunkerque	~	~
Évènements 2 : JOHANNA	Saint-Malo	~	~
	Le Conquet	+ surestimation de 4hPa max	~
	La Rochelle	~	+ surestimation de 10 à 20 %
Évènements 3 : QUENTIN	Dunkerque	~	~
	Saint-Malo	~	~
	Le Conquet	~	~
	La Rochelle	~	+ surestimation de 2 à 4 m/s
Évènements 4 : XYNTHIA	Dunkerque	~	~
	Saint-Malo	~	- légère sous-estimation
	Le Conquet	~	~
	La Rochelle	~	+ surestimation de 5 m/s max

Tableau 8 : Synthèse de l'étude de comparaison des forçages météorologiques ARPEGE (6H et 3H) avec les données de sémaphores, concernant les pics de vent et les minima de pression, par ports et par événements de tempête.

Remarque : il s'agit de comparaisons de données issues du modèle ARPEGE en mer avec des observations sur terre.

Ainsi, pour compléter la discussion, une analyse spatiale de la qualité des données météorologiques ARPEGE 3H a été effectuée par comparaison avec des données de vent issues de l'analyse de données satellites (voir Annexe 7). La Figure 37 illustre le type de comparaison effectuée. Tout d'abord, il faut noter que cette comparaison a pu être effectuée uniquement au moment du passage du satellite au-dessus de l'Europe de l'Ouest, et donc pas forcément au moment du pic de tempête, mais généralement quelques heures avant. En outre, elle a été effectuée uniquement pour les événements de novembre 2007, mars 2008 et février 2009 (pas de données pour l'évènement de février 2010). La comparaison (exemple : Figure 32) montre tout d'abord qu'on retrouve bien des structures similaires entre observations et données ARPEGE 3H. Pour la tempête du 9/11/2007 à 6h, ARPEGE 3H a tendance à sous-estimer les vents en Mer du Nord (Figure 32a). Dans le flux rapide de NNW, les écarts atteignent localement 6 à 8 m/s. À 21 h, ARPEGE 3H a tendance à surestimer les vents le long de la côte Est de l'Angleterre alors qu'il les sous-estime au milieu de la Mer du Nord. Pour la tempête du 10/03/2008, à 6 h, ARPEGE 3H a également plutôt tendance à sous-estimer le flux de

NW dans la traîne, tandis qu'il les surestime près de l'Irlande à proximité de la dépression (Figure 32b). À 18 h, les données sont plutôt concordantes. Pour la tempête du 10/02/2009, les données sont également en accord (Figure 32c).

Pour ce qui est de la sensibilité de la reproduction des surcotes aux deux types de données ARPEGE, compte tenu de la disponibilité de ces différentes sources de données, elle a été évaluée d'un point de vue pluriannuel et événementiel, alors que pour les données AROME, seule l'évaluation événementielle a été considérée. Ainsi, l'analyse pluriannuelle des simulations MARS2D utilisant les forçages météorologiques ARPEGE 6H et ARPEGE 3H, a été réalisée sur la période comprise entre le 01/01/2003 et le 28/02/2009 et l'analyse événementielle a été réalisée sur les événements de Novembre 2007, Johanna, Quentin et Xynthia. Cependant, l'inter-comparaison entre les simulations MARS2D forcées par AROME, ARPEGE 6H et ARPEGE 3H s'est uniquement faite pour les tempêtes Quentin et Xynthia compte-tenu de la disponibilité des données AROME. En outre, il est important de garder à l'esprit le changement de nature des données ARPEGE 6H après mars 2009, lors de l'interprétation des résultats de la comparaison des simulations MARS2D forcées avec ARPEGE 6H et ARPEGE 3H pour la tempête Xynthia.

Par ailleurs, les emprises des forçages météorologiques issus de AROME ne couvrant pas l'emprise de la configuration MANGA dans sa totalité, un travail de fusion et d'interpolation spatio-temporelle a été réalisé avec les données des modèles de Météo-France ARPEGE et ALADIN (Figure 26d et Figure 27d). Une vérification de la cohérence entre les trois modèles a été réalisée préalablement à cette fusion. Ainsi, pour des dates où une incohérence a été observée entre ALADIN et les deux autres modèles (Figure 26), la fusion a uniquement été réalisée entre ARPEGE et AROME.

Pour la fusion, les données météorologiques issues de ARPEGE et ALADIN sont interpolées à la même résolution spatio-temporelle que les données AROME. L'interpolation spatiale est bicubique et l'interpolation temporelle est linéaire. La fusion entre les trois grilles utilise des zones de transition dont la taille a été fixée. Il s'agit de 40 points de grille entre les grilles ARPEGE et ALADIN interpolées à la résolution spatio-temporelle de AROME, c'est-à-dire une zone tampon de 80 km et 20 points de grille entre ALADIN et AROME à la même résolution spatio-temporelle, c'est-à-dire une zone tampon de 40 km. Pour les fusions ARPEGE-AROME dans les cas d'incohérence avec ALADIN, la zone de transition est de 20 points de grille. Le choix de la taille de ces zones de transition s'est basé sur la méthode de fusion ARPEGE/ALADIN employée en opérationnel dans le cadre de Previmer.

Trois types de simulation, utilisant les différents forçages météorologiques décrits précédemment, ont été réalisés pour cette étude de sensibilité. Toutes ces simulations utilisent la paramétrisation de la configuration de référence pour l'expression de la friction de surface, c'est-à-dire avec un coefficient de traînée constant égal à 0,0016. Elles sont résumées dans le Tableau 9. Toutefois, une étude de sensibilité complémentaire a été réalisée afin de tester la paramétrisation de Wu (1982) avec les forçages ARPEGE 3H. Elle concerne uniquement le port de Dunkerque et est présentée en Annexe 6.

Nom de la simulation	Formulation du coefficient de traînée	Période simulée	Ports d'étude
MARS CD CST ARPEGE 6H (Référence)	Cd constant (0,0016)	2003-début 2010	Dunkerque, Saint-Malo, Le Conquet, La Rochelle
MARS CD CST ARPEGE 3H	Cd constant (0,0016)	2003-28/02/2009	
MARS CD CST AROME 1H	Cd constant (0,0016)	10/01/2009-20/02/2009 01/02/2010-10/03/2010	

Tableau 9 : Synthèse des simulations réalisées pour l'étude de sensibilité à la résolution spatio-temporelle des données météorologiques.

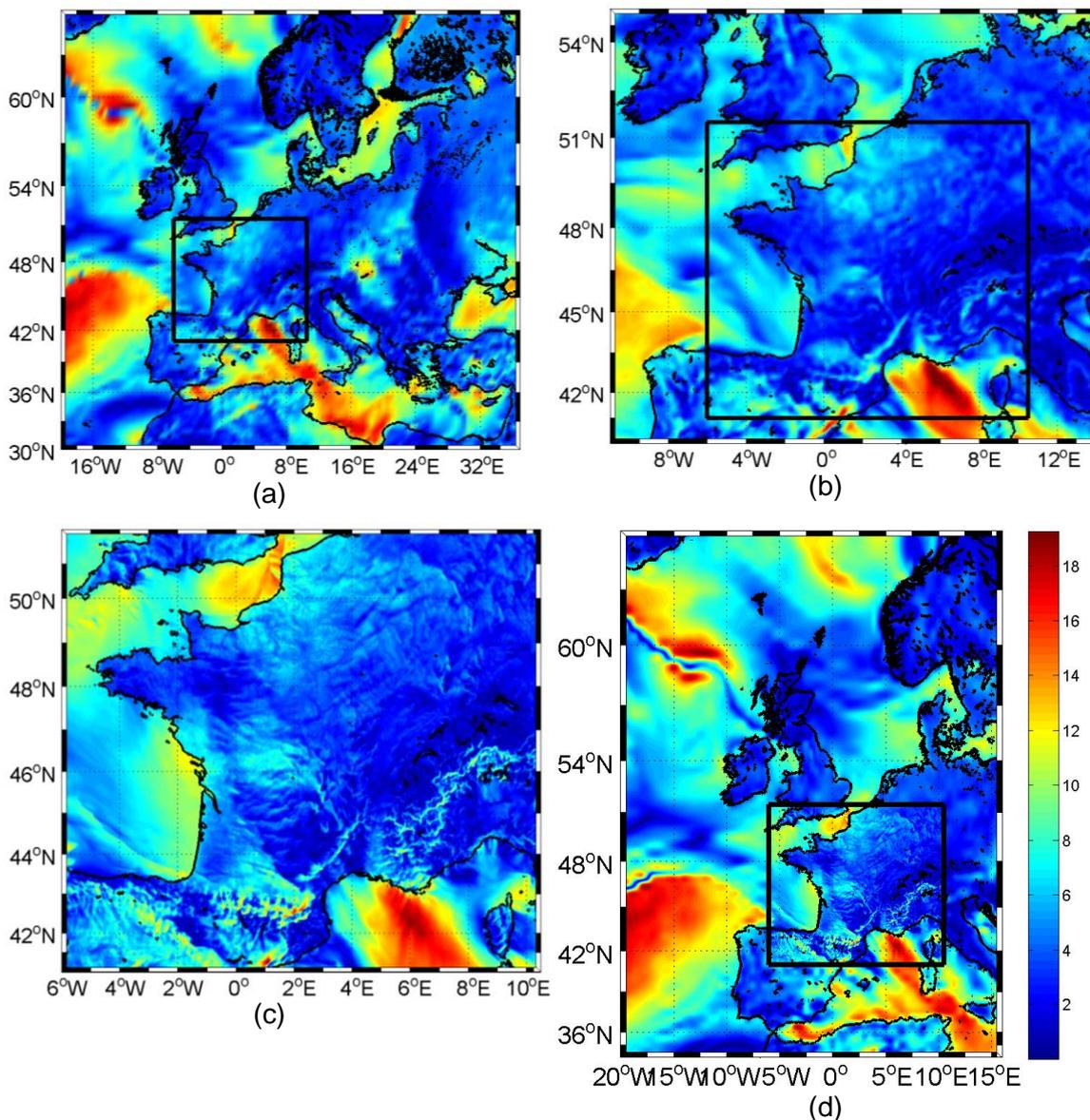


Figure 26 : Cartes du module du vent le 09/02/2009 00:00 TU issues de (a) ARPEGE, (b) ALADIN, (c) AROME, (d) FUSION ARPEGE-AROME, avec l'emprise AROME en noir.

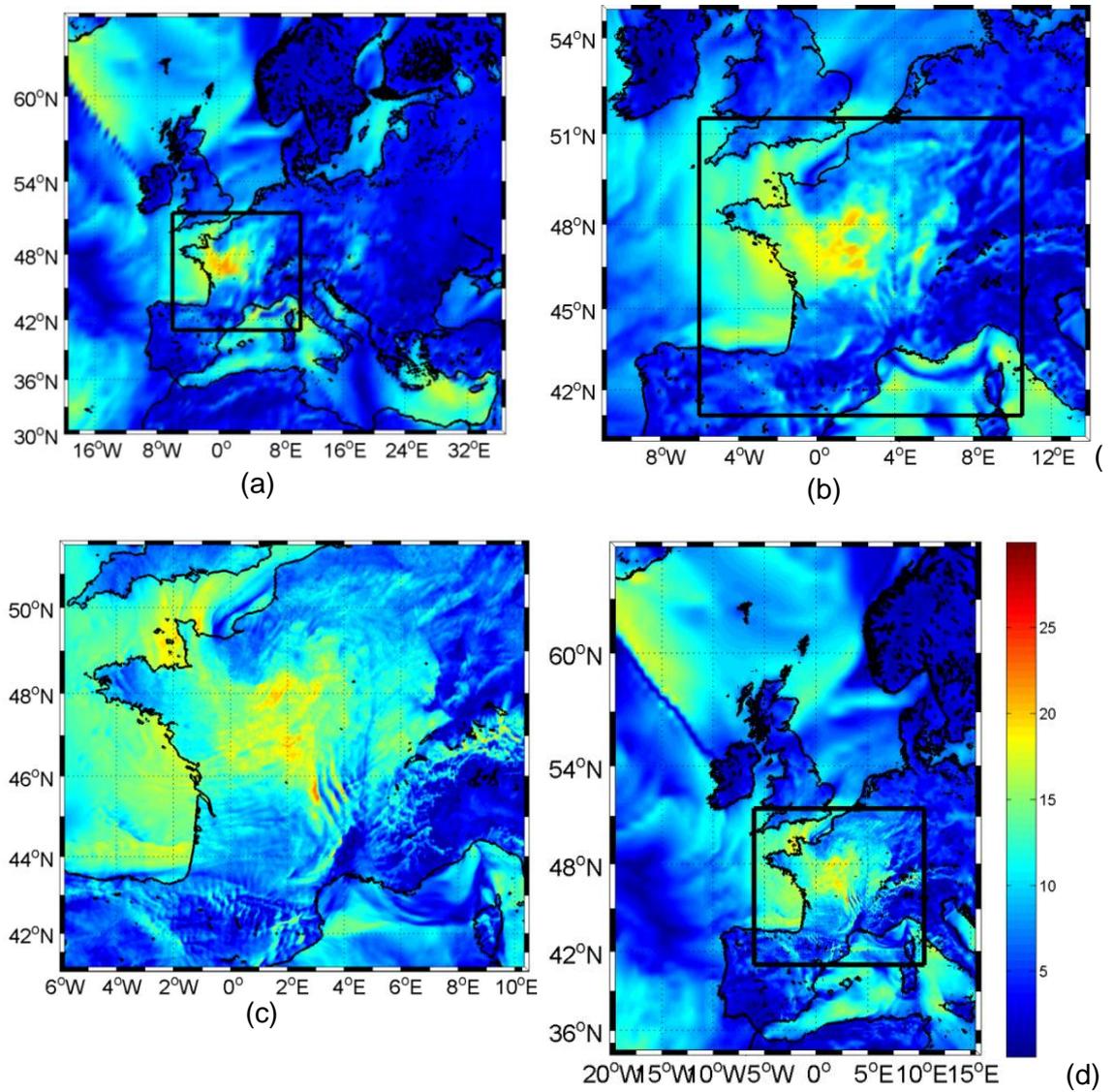


Figure 27 : Cartes du module du vent le 28/02/2010 06:00 TU issues de (a) ARPEGE, (b) ALADIN, (c) AROME, (d) FUSION ARPEGE-ALADIN-AROME, avec l'emprise AROME en noir.

Résultats et analyses

• Analyse pluriannuelle

L'analyse pluriannuelle a été réalisée sur la période de 2003 à fin février 2009, pour la simulation de référence et la simulation ARPEGE 3H.

La simulation ARPEGE 3H donne des résultats un peu plus satisfaisants aux ports de Dunkerque, de Saint-Malo, du Conquet et de La Rochelle d'après les statistiques générales (Figure 28a) et encore plus, pour les statistiques relatives aux fortes surcotes (Figure 28b). Pour ces ports, les erreurs pour les surcotes de périodes de retour 0,5 an, 1 an et 2 ans diminuent d'environ 2 cm avec les forçages météorologiques à 3 h par rapport à ceux à 6 h. De même, les erreurs pics sont plus faibles d'environ 7 % avec les surcotes produites à partir de données météorologiques avec une meilleure résolution temporelle.

Toutefois, cette amélioration concernant les surcotes instantanées sur les sept ans et demi étudiés, limitée à quelques centimètres, reste faible si l'on se cantonne aux statistiques générales (Figure 28, ligne a), tandis qu'elle est plus visible sur les fortes surcotes, avec une réduction de presque 5 cm à Dunkerque pour les erreurs associées aux surcotes de période de retour 0,5 ans, 1 an et 2 ans. Ainsi, l'analyse pluriannuelle montre que l'utilisation des forçages ARPEGE 3H, par rapport aux forçages ARPEGE 6H, permet de mieux reproduire les surcotes.

• Analyse évènementielle

Pour la **tempête de Novembre 2007** et l'**évènement Johanna**, les pics de surcotes sont mieux reproduits et le signal de surcotes suit des variations plus proches des observations avec le forçage ARPEGE 3H qu'avec le forçage ARPEGE 6H (voir Figure 29). C'est particulièrement visible à Dunkerque et au Conquet. Les déphasages au Conquet et à La Rochelle se retrouvent réduits du fait de la meilleure reproduction des pics de surcotes (voir Annexe 5).

Pour l'**évènement Quentin (février 2009)**, les forçages ARPEGE 3H et AROME permettent également d'améliorer la reproduction des pics de surcotes et leurs variations sauf au Conquet et à La Rochelle (Figure 30). Pour ces deux ports, les pics de surcotes sont moins bien reproduits qu'avec la configuration de référence, ce qui engendre des déphasages plus importants. Toutefois, les variations obtenues avec les forçages ARPEGE 3H sont plus cohérentes avec les mesures au niveau des maxima de surcotes observés au Conquet et à la Rochelle.

Pour l'**évènement Xynthia (février 2010)**, les simulations ARPEGE 3H et AROME améliorent la reproduction des pics de surcotes de manière plus nette, essentiellement au Conquet et à Saint-Malo (Figure 31), par rapport au forçage ARPEGE 6H. Par contre, à La Rochelle, elles introduisent un déphasage d'environ une heure par rapport à la simulation de référence qui se trouve être en accord avec les observations.

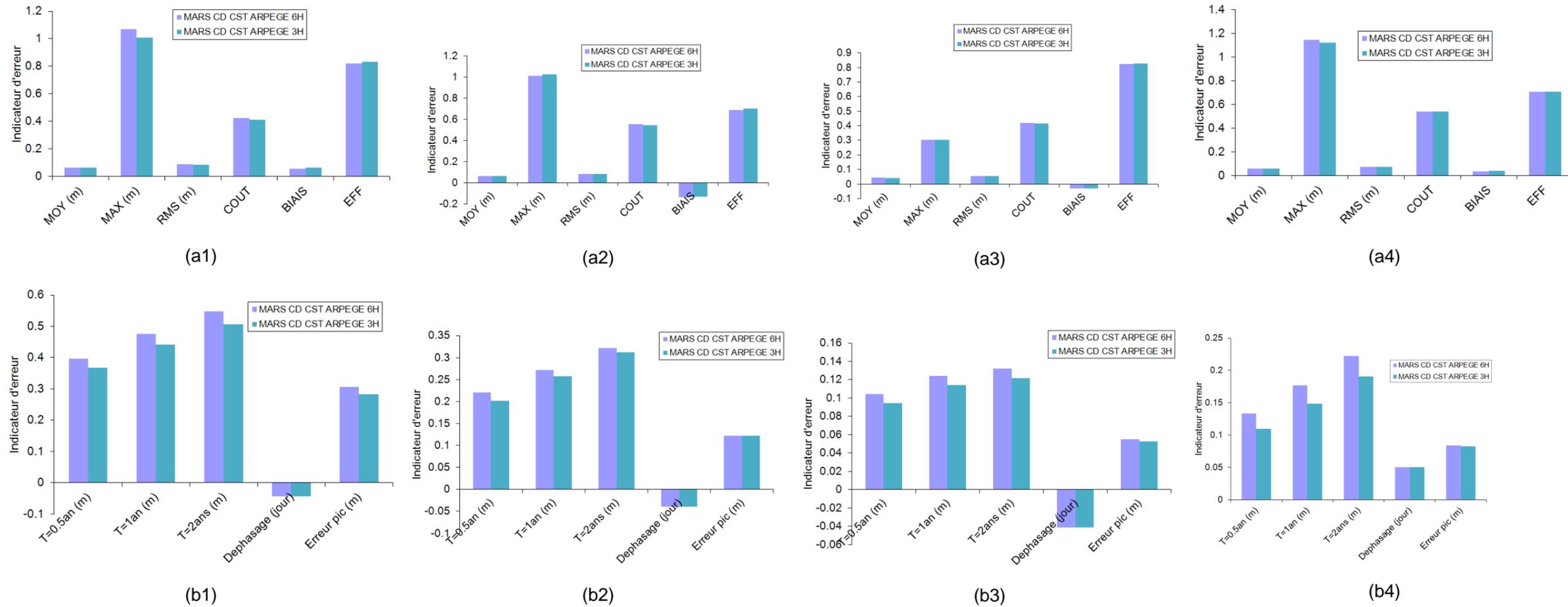


Figure 28 : Indicateur d'erreur pluriannuelle.

a) statistiques générales (MOY : erreur absolue moyenne ; MAX : erreur maximale ; RMS : Erreur quadratique moyenne, COUT : fonction coût ; BIAIS : biais moyen ; EFF : coefficient d'efficacité) b) statistiques pour les fortes surcotes (T = 0,5 an : erreur associée à la surcote de période de retour 0,5 an ; T = 1 an : erreur associée à la surcote de période de retour 1 an ; T = 2 ans : erreur associée à la surcote de période de retour 2 ans ; Déphasage : déphasage moyen des pics de surcotes ; Erreur pic : erreur pic moyenne calculée pour les pics de surcotes détectés), en fonction des données météorologiques, à : (1) Dunkerque, (2) Saint-Malo, (3) Le Conquet, (4) La Rochelle.

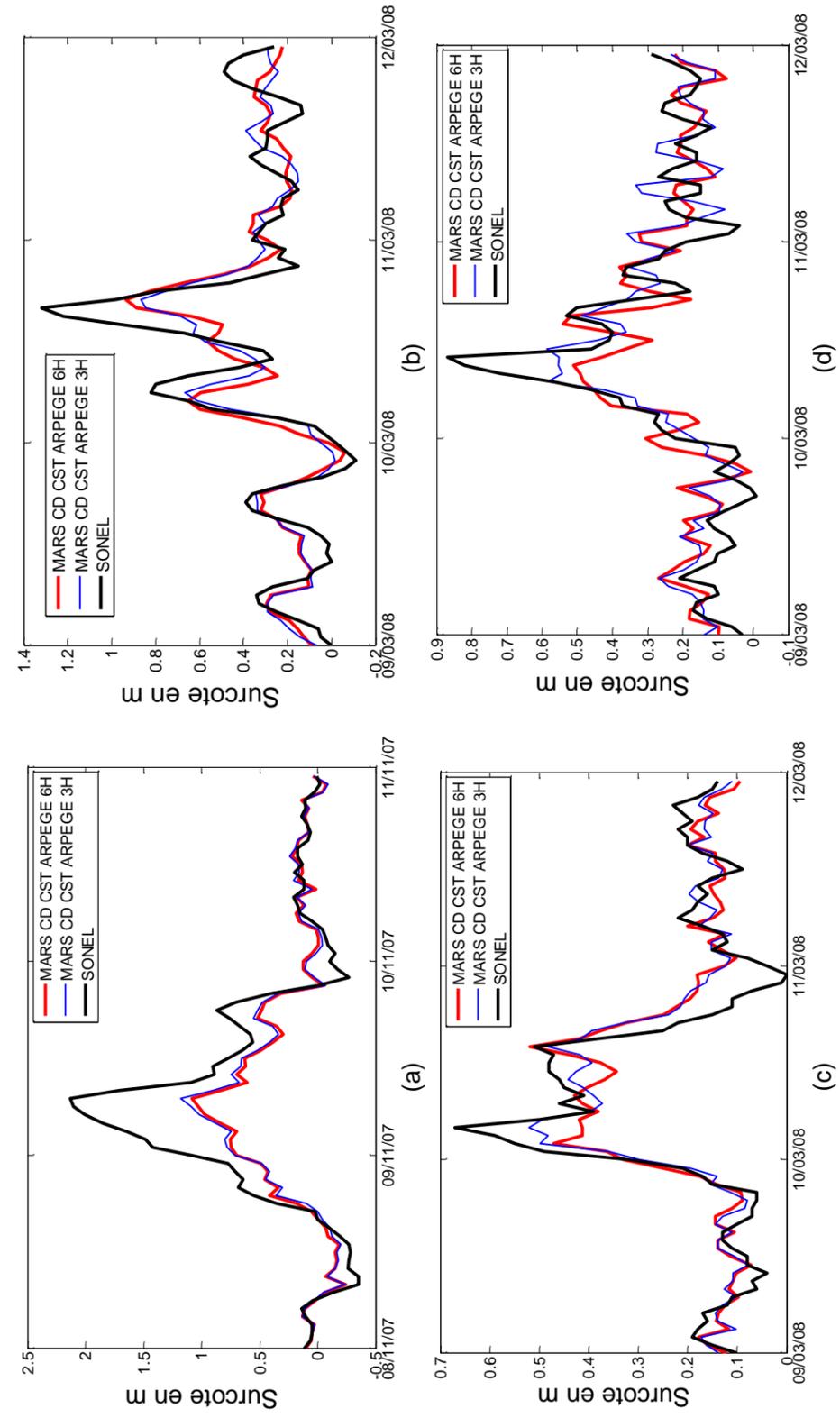


Figure 29 : Séries temporelles des surcotes issues de MARS2D avec différents forçages météorologiques et SONEL (noir) pour les tempêtes de novembre 2007 et JOHANNA aux ports d'étude : (a) Dunkerque, (b) Saint-Malo, (c) Le Conquet, (d) La Rochelle.

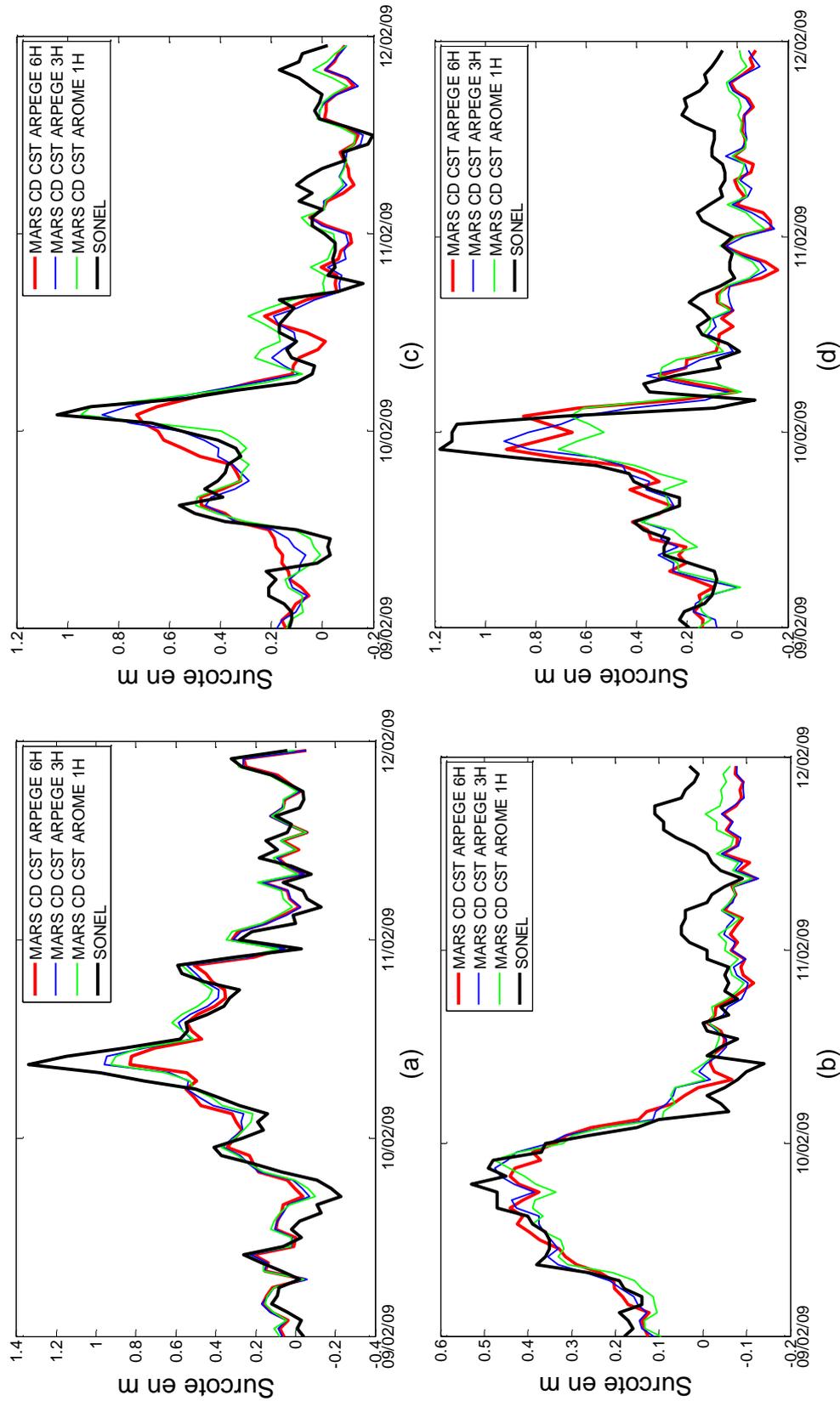


Figure 30 : Séries temporelles des surcotes issues de MARS2D avec différents forçages météorologiques et SONEL (noir) pour la tempête QUENTIN aux ports d'étude : (a) Dunkerque, (b) Saint-Malo, (c) Le Conquet, (d) La Rochelle.

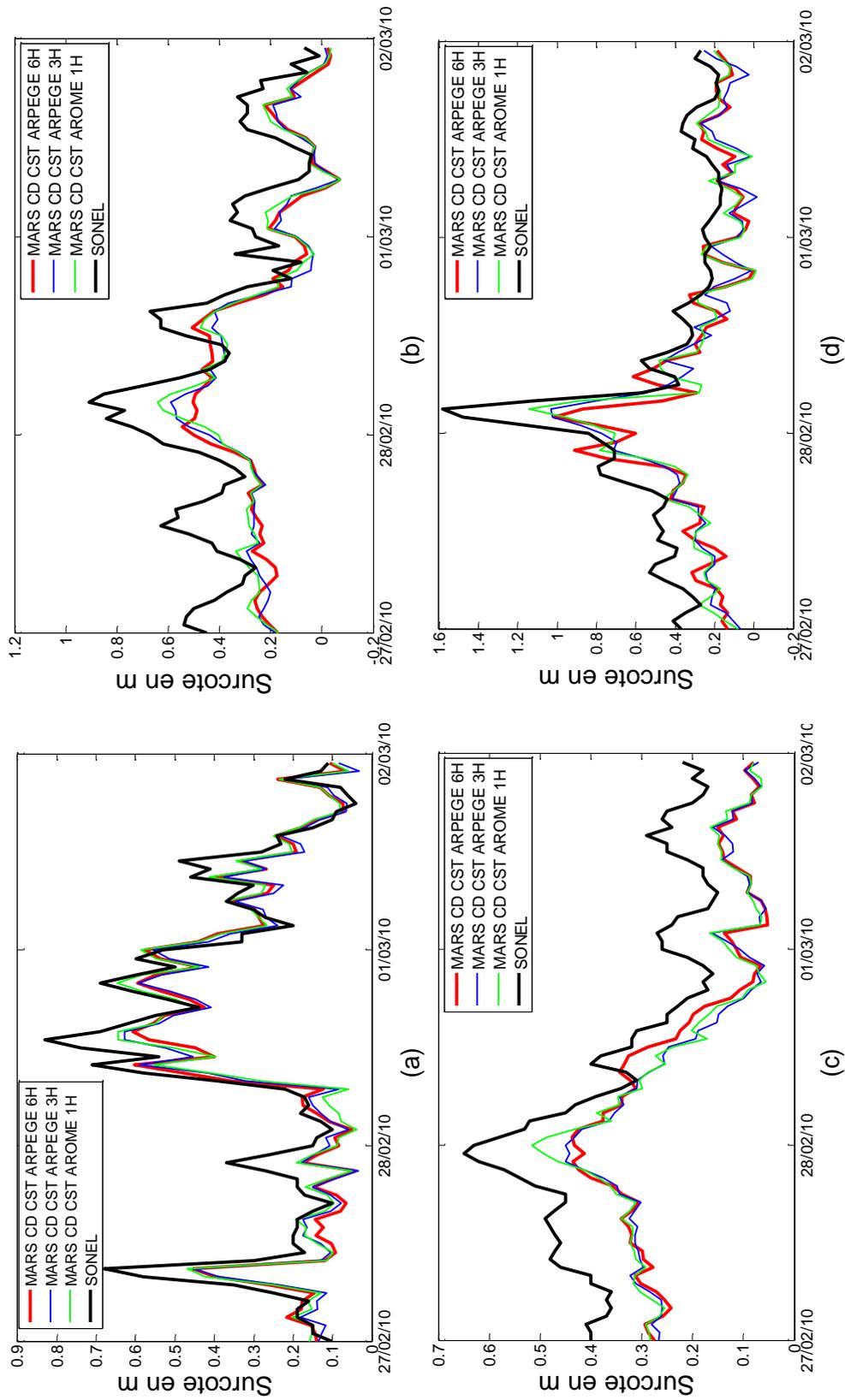


Figure 31 : Séries temporelles des surcotes issues de MARS2D avec différents forçages météorologiques et SONEL (noir) pour la tempête XYNTHIA aux ports d'étude : (a) Dunkerque, (b) Saint-Malo, (c) Le Conquet, (d) La Rochelle.

Pour compléter cette analyse, nous avons confronté les inter-comparaisons des données météorologiques ARPEGE 6H, ARPEGE 3H et AROME aux inter-comparaisons des pics de surcotes modélisés associés (voir Annexe 8). L'objectif était de voir si les pics de surcotes les plus (resp. moins) forts correspondaient localement aux vents les plus (resp. moins) forts et aux pressions les plus (resp. moins) faibles. Une cohérence se dégage pour une partie des événements et ports. Ainsi, pour la tempête Johanna, au Conquet et à La Rochelle, les surcotes les plus importantes sont obtenues à partir des vents ARPEGE 3H qui sont plus intenses que les vents ARPEGE 6H au moment du pic de tempête. Il en est de même pour les surcotes obtenues avec les forçages AROME lors des tempêtes Quentin et Xynthia à Saint-Malo. De plus, la pression issue de AROME est plus faible pour les tempêtes Quentin et Xynthia, notamment au Conquet, ce qui peut expliquer la meilleure reproduction du pic de surcote avec le forçage AROME au Conquet en 2010. Toutefois, on ne peut pas tirer de corrélation systématique entre les caractéristiques locales météorologiques (vents, pression) et les pics de surcotes, même si ces caractéristiques apparaissent constantes pour un peu moins de la moitié des événements et ports analysés (voir Annexe 8).

Discussion et conclusion

Il ressort de cette étude que les pics de surcotes les plus forts sont généralement obtenus avec les forçages météorologiques qui contiennent les pics de vent les plus importants.

Les tests de sensibilité effectués montrent que l'utilisation des données ARPEGE 3H en particulier permet d'améliorer les résultats, au niveau de l'intensité des pics surcotes mais aussi des variations du signal de surcotes pour tous les ports, cette amélioration étant moins nette à La Rochelle. En particulier, les données ARPEGE 3H permettent d'obtenir les pics de surcotes les plus forts. C'est aussi avec ce jeu de données que les indicateurs d'erreurs par rapport aux surcotes observées sont les plus faibles.

De la même manière, l'utilisation des forçages AROME 1H permet également d'améliorer les résultats de surcotes au niveau des pics et de leurs variations, par rapport à ceux obtenus avec les forçages ARPEGE 6H, sauf à La Rochelle en 2009. Cependant, il convient de rappeler ici que les forçages AROME 1H sont des prévisions de 1 h à 24 h et par conséquent, ils ne sont pas directement comparables aux analyses 6 h et prévisions 3 h des forçages ARPEGE 3H. Ainsi, de par la nature des données AROME 1H utilisées, il nous semble plus justifié de privilégier les forçages ARPEGE 3H pour cette étude.

À ce stade, il est utile de se référer à la qualité de ces données d'entrée (voir § 4.1.2.a) pour mieux conclure sur la validité de la conclusion intermédiaire qui est que les données ARPEGE 3H engendrent les pics de surcotes les mieux reproduits avec la configuration de référence, et donc devraient être utilisées dans une modélisation optimale des surcotes. En effet, l'analyse météorologique, décrite dans la section 4.1.2.a, implique qu'un modèle de surcote parfait utilisant ARPEGE 3H en données d'entrée devrait sous-estimer les surcotes pour les événements 1 (nov. 2007) et 2 (mars 2008) et prédire des surcotes plus proches des observations pour l'événement 3

(fév. 2009). Il convient de rappeler ici que les comparaisons ARPEGE 3H/Observations terrestres, à la base de cette analyse ne sont effectuées que localement, alors que la surcote résulte de l'impact du vent sur un grand domaine peu profond (Golfe de Gascogne, Manche et Mer du Nord).

Les résultats obtenus avec la configuration utilisant un coefficient de traînée constant et les données ARPEGE 3H présentent effectivement des écarts aux observations plus forts pour les événements 1 et 2 que pour l'évènement 3, avec toujours une sous-estimation des surcotes. Nous avons donc vérifié la cohérence des résultats des simulations avec la qualité des données météorologiques, d'un point de vue spatial.

Nous avons vu qu'avec la configuration intégrant un coefficient de traînée constant (0,0016) et les données ARPEGE 3H, on obtient toujours une sous-estimation des surcotes, alors que pour certains événements (ex : événement 3), étant donné la qualité des données ARPEGE 3H, on devrait avoir des surcotes modélisées proches des observations si le modèle était parfait. Ceci implique que le modèle, avec un coefficient de traînée constant de 0,0016 sous-estime intrinsèquement certains phénomènes, comme par exemple l'action des vagues en surface. Or, comme nous l'avons vu dans le paragraphe 4.1.2.b, le modèle sous-estime vraisemblablement le coefficient de traînée si l'on compare la valeur 0,0016, ou les valeurs obtenues avec les formulations de Moon *et al.* (2007) et Wu (1982), à celles obtenues avec Charnock (associé à cambrure des vagues) dans les zones de vents forts.

L'étude réalisée dans cette partie laisse supposer que les forçages météorologiques optimaux pour cette configuration de référence pourraient être ceux issus de AROME avec des analyses à 6 h. Pour s'en assurer, cela nécessiterait de compléter l'étude de sensibilité réalisée, en effectuant des simulations complémentaires avec les données AROME 1H avec Analyses toutes les 6 h. Ne disposant pas de ces données dans le cadre de la présente étude, ce sont les données ARPEGE 3H qui sont privilégiées pour une configuration optimale du modèle de surcotes.

Ainsi, à l'issue de l'étude de sensibilité aux coefficients de traînée et aux données météorologiques (dans la limite des données disponibles), on peut conclure que la configuration optimale pour la modélisation des surcotes en Manche-Gascogne doit combiner un coefficient de traînée de type Charnock (incluant les caractéristiques des vagues) et les données ARPEGE 3H.

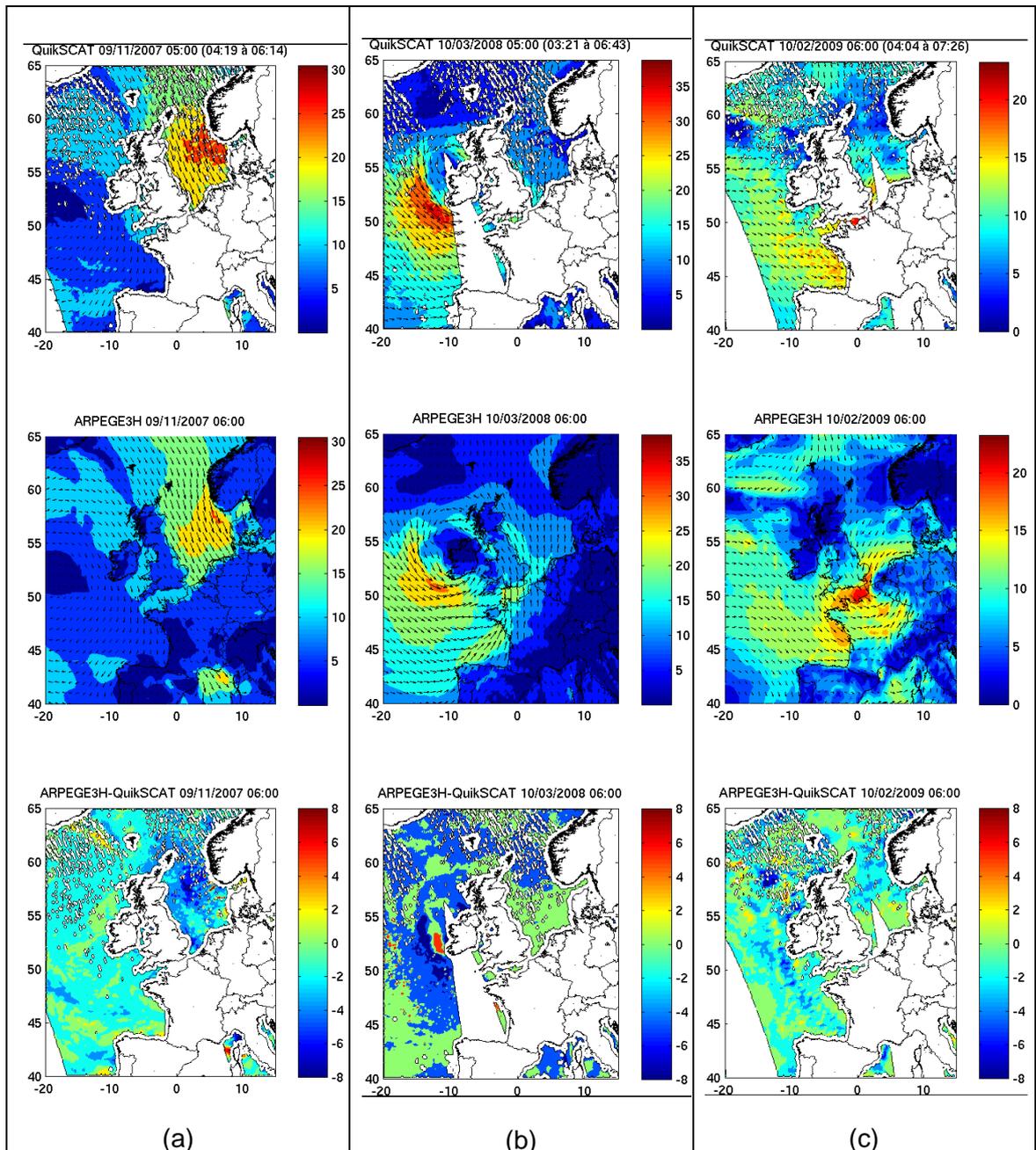


Figure 32 : Comparaison des vents (m/s) QuikSCAT et ARPEGE 3H lors des événements 1, 2 et 3. Pour plus de résultats, voir Annexe 6.

4.2. CONFIGURATION OPTIMALE

4.2.1. Description

Les études de sensibilité aux différentes formulations du coefficient de traînée et à la qualité des forçages météorologiques utilisés pour modéliser les surcotes ont permis de définir une configuration optimale. D'après les sections 4.1. et 4.1.2., cette configuration optimale combine le paramétrage de Charnock (coefficient de traînée intervenant dans la formulation de la tension de surface) et les forçages météorologiques ARPEGE 3h.

4.2.2. Qualité par rapport aux observations

De la même manière que pour les études de sensibilité réalisées dans les sections 4.1. et 4.1.2., l'estimation de la qualité de la configuration optimale est réalisée d'un point de vue pluriannuel et d'un point de vue évènementiel, par comparaison avec la configuration de référence. Il nous a paru pertinent ici de confronter les résultats de la configuration optimale et de la configuration de référence avec ceux de la configuration utilisant un coefficient de traînée constant (0,0016) et les forçages ARPEGE 3H, afin de pouvoir évaluer les apports respectifs de la résolution temporelle des forçages et de la formulation du coefficient de traînée dans l'amélioration de la reproduction des surcotes.

Validation pluriannuelle

D'un point de vue pluriannuel, les résultats obtenus avec la configuration optimale (MARS CHARNOCK ARPEGE 3H) sont nettement plus satisfaisants que ceux obtenus avec la configuration de référence (MARS CD CST ARPEGE 6H) et avec la configuration MARS CD CST ARPEGE 3H (voir Tableau 9), en ce qui concerne les statistiques pour les fortes surcotes (Figure 33). À Dunkerque, les erreurs pour les surcotes de périodes de retour inférieures à 2 ans diminuent de 25 cm maximum et les erreurs pics de 10 cm maximum. Concernant les statistiques générales, les écarts entre les résultats obtenus à partir des deux configurations sont moins importants sauf à Dunkerque où l'erreur maximale diminue de 40 cm avec la configuration optimale. L'apport de l'utilisation des données météorologiques ARPEGE 3H par rapport aux données ARPEGE 6H est nettement moindre concernant les fortes surcotes. Les statistiques générales sont très proches pour les trois configurations sauf à Dunkerque. Toutefois, la configuration MARS CD CST ARPEGE 3H ne permet de réduire l'erreur maximale que de 10 cm par rapport à la configuration de référence (MARS CD CST ARPEGE 6H).

Validation évènementielle

Les résultats obtenus avec la configuration optimale (MARS CHARNOCK ARPEGE 3H) pour **les tempêtes de Novembre 2007 et Johanna**, sont plus proches des observations que ceux obtenus avec la configuration de référence (MARS CD CST ARPEGE 6H) en ce qui concerne la reproduction des pics de surcotes à Dunkerque, au Conquet et à La Rochelle.

La configuration optimale a permis de réduire l'écart entre les résultats du modèle et les mesures de 10 à 50 cm pour ces trois ports et de 5 cm à Saint-Malo. Elle a également permis de réduire le déphasage. Ceci est particulièrement visible à Saint-Malo pour le premier pic de surcote du 10/03/2008 (Figure 34b) et à La Rochelle pour le pic secondaire de la même date (Figure 34d).

De la même manière, les maxima des surcotes modélisées avec la configuration optimale pour **la tempête Quentin** sont mieux reproduits qu'avec la configuration de référence (Figure 35). Pour les ports de Saint-Malo et de la Rochelle, les écarts entre les maxima de surcotes issus de la configuration optimales et les données SONEL sont de l'ordre du centimètre.

Pour **la tempête Xynthia** (Figure 36), l'apport de la configuration optimale par rapport à la configuration de référence est moins net pour Dunkerque, Saint-Malo et Le Conquet. Par contre, à La Rochelle, la configuration optimale permet de réduire l'écart entre modèle et mesure d'environ 30 cm au niveau du pic de surcotes.

L'apport de la formulation de Charnock par rapport aux forçages ARPEGE 3H est visible pour tous les ports en 2007 et 2008. En 2009, il est moins évident au Conquet. Enfin, en 2010, il est le plus flagrant à La Rochelle. La comparaison entre ces quatre ports, pour ces quatre événements, montre que l'amélioration de la reproduction des pics de surcote grâce à la formulation de Charnock est nettement plus importante à la Rochelle, quel que soit l'évènement météorologique concerné ici.

4.2.3. Bilan

Les résultats obtenus avec la configuration optimale montrent que l'on continue de sous-estimer les pics de surcotes sur certains sites et événements. Ceci peut s'expliquer non seulement par la qualité des données météorologiques, mais aussi par la qualité et la résolution spatiale de la bathymétrie, une paramétrisation du frottement au fond simplifiée (ne tient pas compte de l'action des vagues), la non prise en compte de la dynamique 3D dans la modélisation ou encore par le fait que les mesures contiennent éventuellement le set-up.

Il convient de noter qu'une autre donnée d'entrée importante qui contribue à la qualité des résultats est la donnée de vagues utilisée pour calculer le coefficient de Charnock. Aussi, si tant est que le modèle de vagues sous-estime la rugosité de la surface de l'océan, alors le coefficient de Charnock est sous-estimé, et la surcote modélisée est moindre. Pour certains événements, la qualité de ce paramètre peut avoir une importance non négligeable (Bertin *et al.*, 2012)

Enfin, tous les résultats issus des différentes configurations ont été obtenus avec un modèle de résolution spatiale de 2 km. Aussi, en fonction des sites, il peut exister une variabilité spatiale des surcotes dans les zones environnantes les marégraphes étudiés. Cette variabilité spatiale physique peut alors potentiellement engendrer des différences de quelques centimètres sur les valeurs absolues de surcotes. Toutefois, ceci n'influence pas le choix de la configuration optimale.

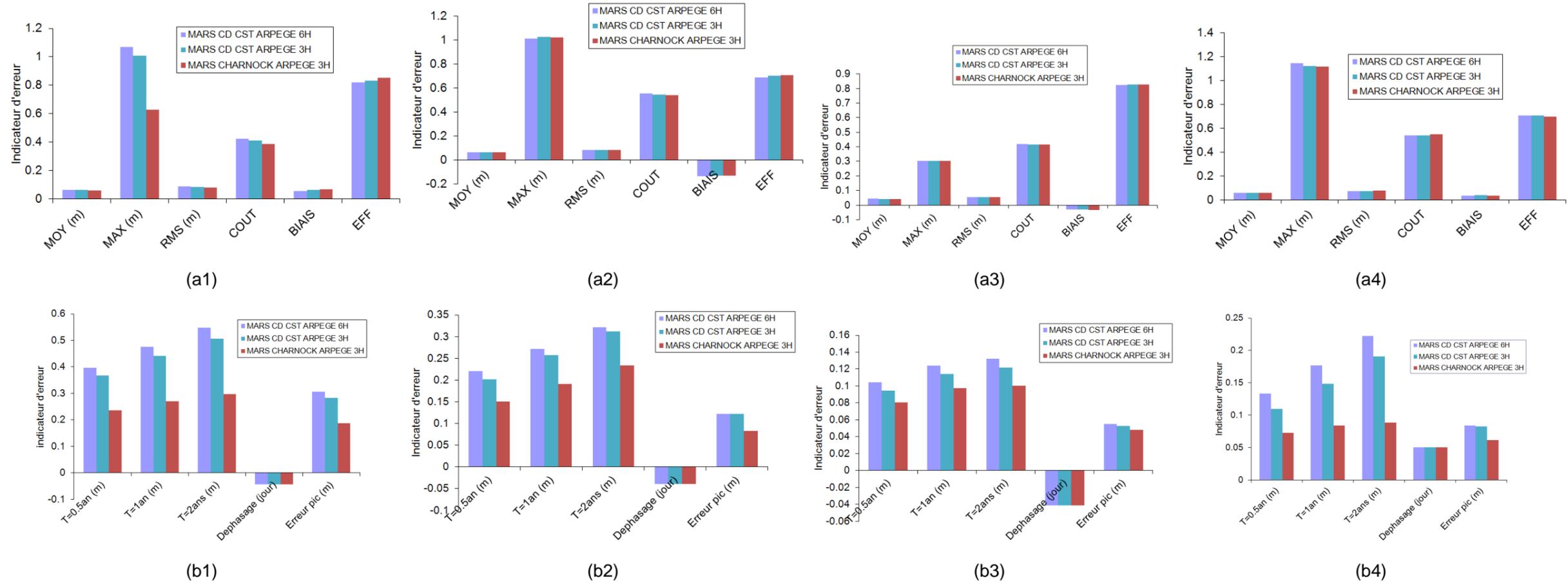


Figure 33 : Critères de validation pluriannuelle.

a) statistiques générales (MOY : erreur absolue moyenne ; MAX : erreur maximale ; RMS : Erreur quadratique moyenne ; COUT : fonction coût ; BIAIS : biais moyen ; EFF : coefficient d'efficacité) - b) statistiques pour les fortes surcotes (T = 0,5 an : erreur associée à la surcote de période de retour 0,5 an ; T = 1 an : erreur associée à la surcote de période de retour 1 an ; T = 2 ans : erreur associée à la surcote de période de retour 2 ans ; Déphasage : déphasage moyen des pics de surcotes ; Erreur pic : erreur pic moyenne calculée pour les pics de surcotes détectés), pour les configurations de référence, optimales et MARS CD CST ARPEGE 3H à : (1) Dunkerque, (2) Saint-Malo, (3) Le Conquet, (4) La Rochelle.

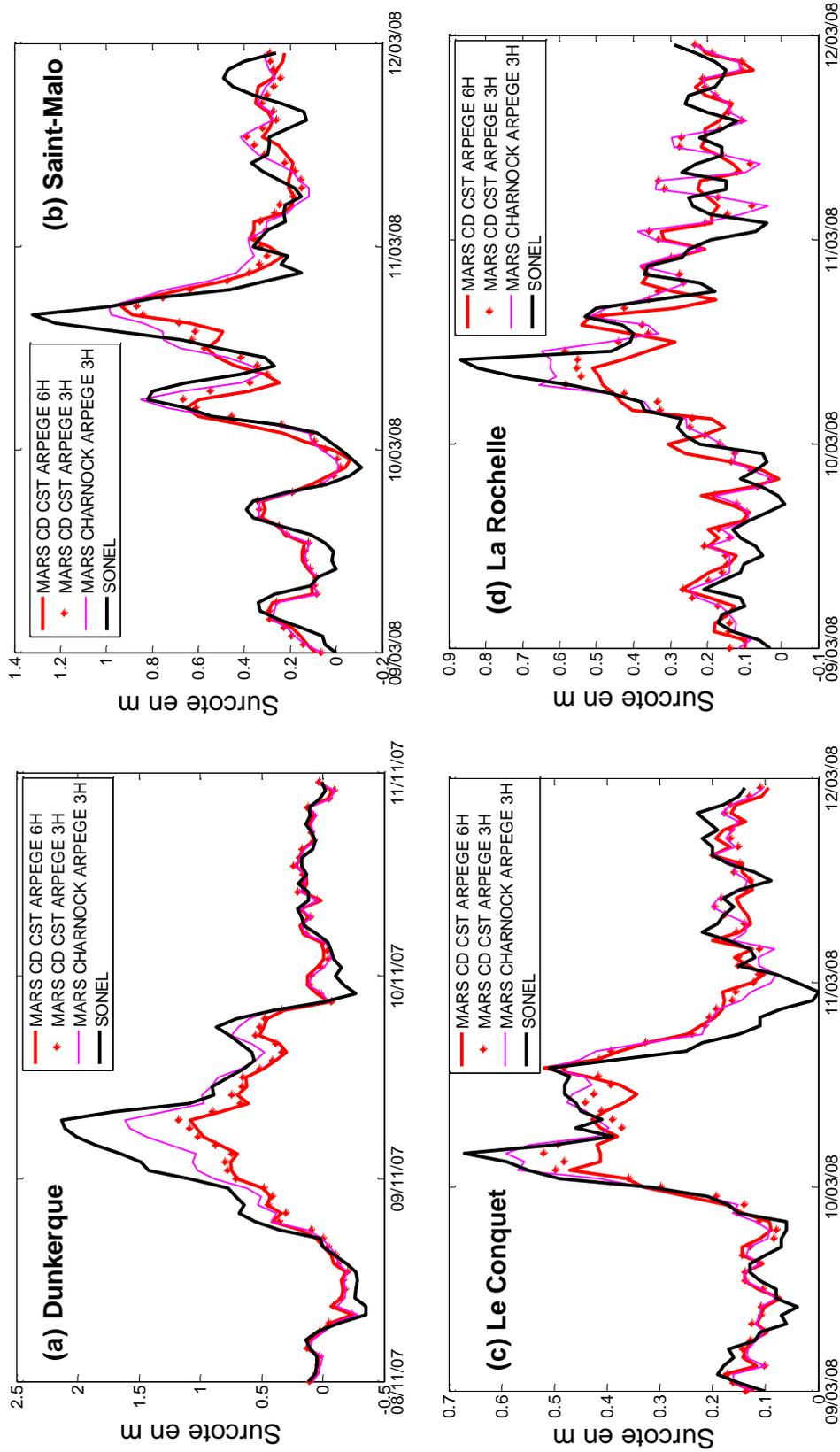


Figure 34 : Séries temporelles des surcotes issues de MARS2D avec la configuration de référence (rouge), la configuration avec un coefficient de traînée constant (0,0016) et les forçages ARPEGE 3H (points rouges) et la configuration optimale (rose) et SONEL (noir) pour les tempêtes de novembre 2007 et JOHANNA aux quatre ports d'étude : (a) Dunkerque, (b) Saint-Malo, (c) Le Conquet, (d) La Rochelle.

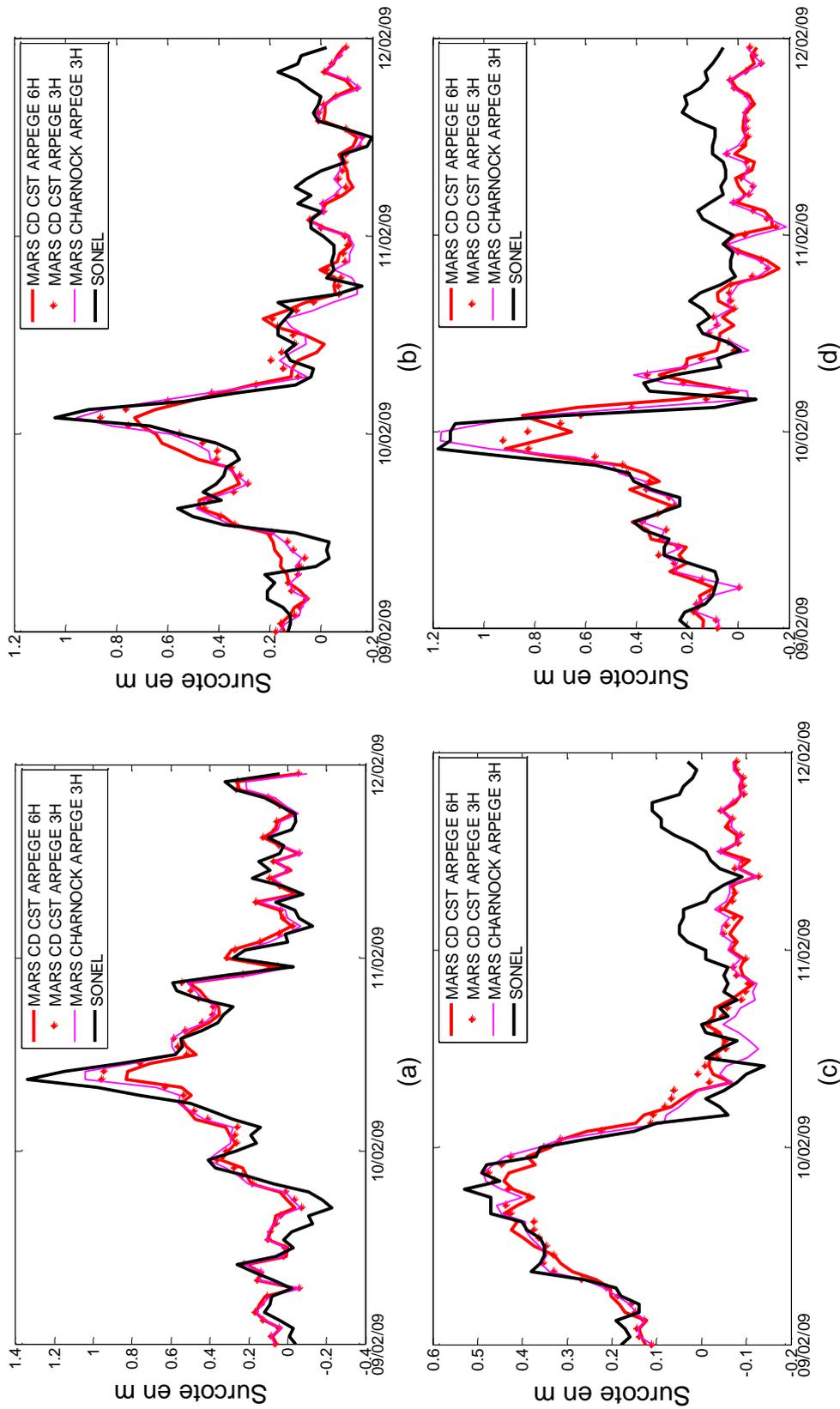


Figure 35 : Séries temporelles des surcotes issues de MARS2D avec la configuration de référence (rouge), la configuration avec un coefficient de traînée constant (0,0016) et les forçages ARPEGE 3H (points rouges) et la configuration optimale (rose) et SONEL (noir) pour la tempête QUENTIN aux quatre ports d'étude : (a) Dunkerque, (b) Saint-Malo, (c) Le Conquet, (d) La Rochelle.

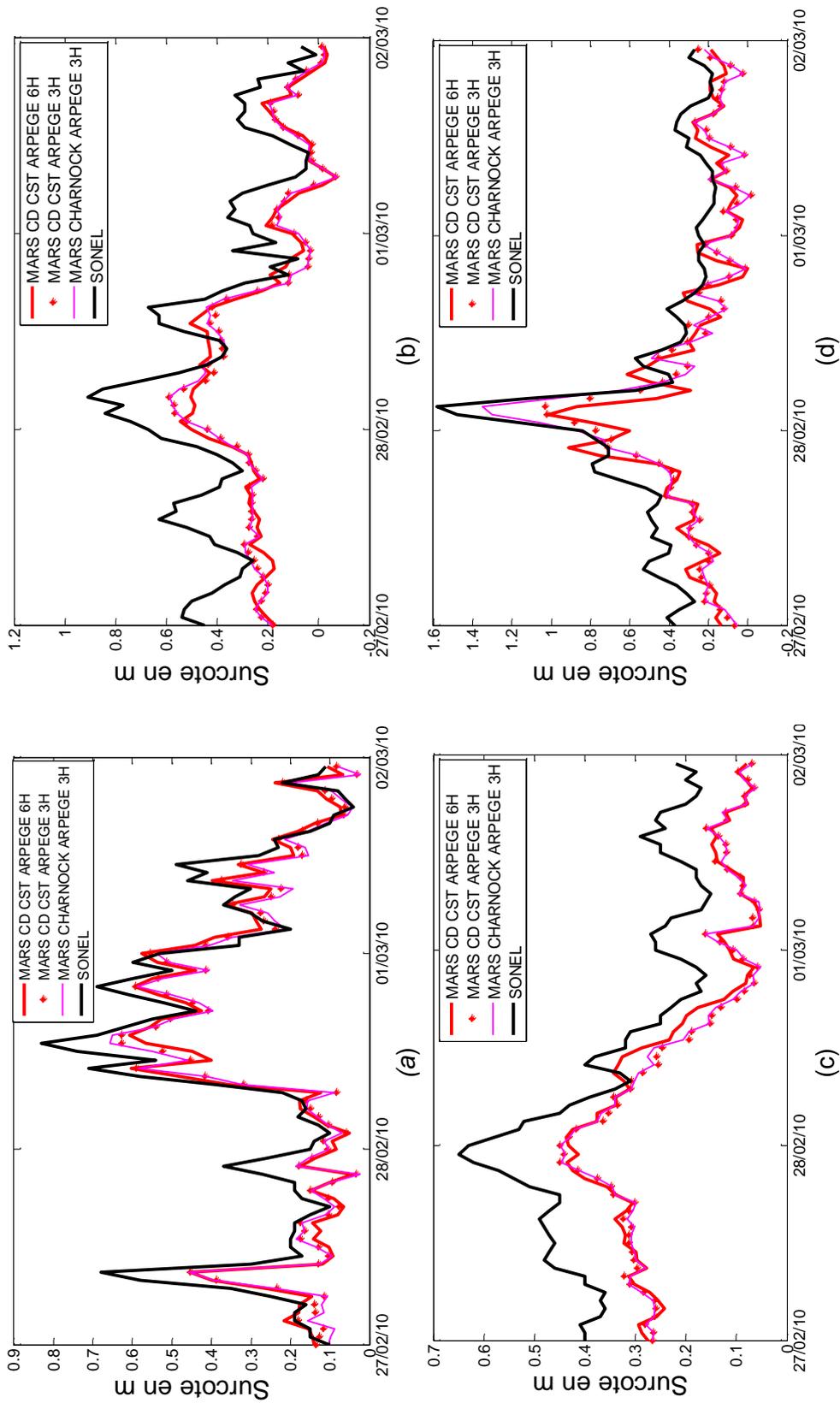
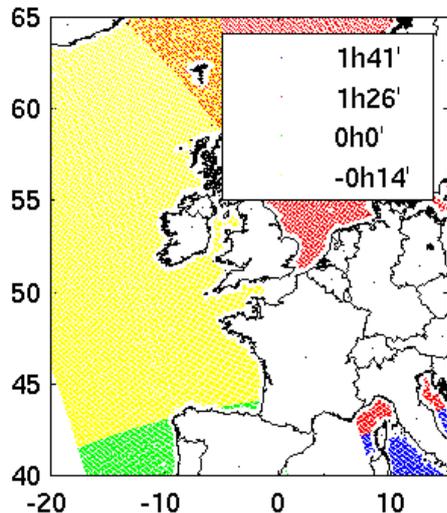
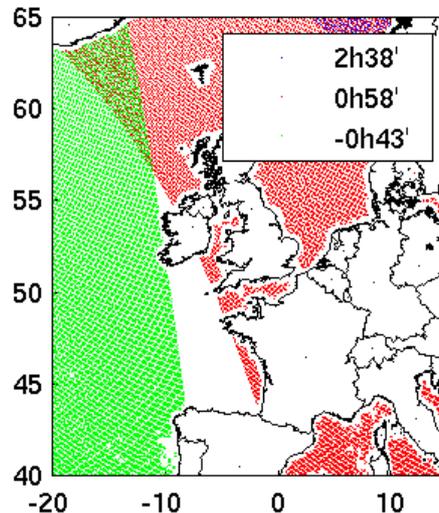


Figure 36 : Séries temporelles des surcotes issues de MARS2D avec la configuration de référence (rouge), la configuration avec un coefficient de traînée constant (0,0016) et les forçages ARPEGE 3H (points rouges) et la configuration optimale (rose) et SONEl (noir) pour la tempête XYNTHIA aux quatre ports d'étude.

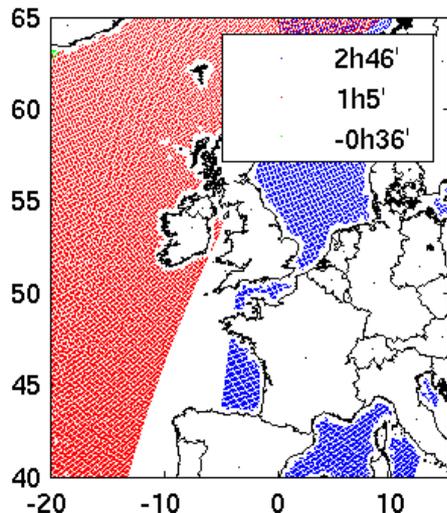
ARPEGE3H 09/11/2007 06:00 - QuikSCAT



ARPEGE3H 10/03/2008 06:00 - QuikSCAT

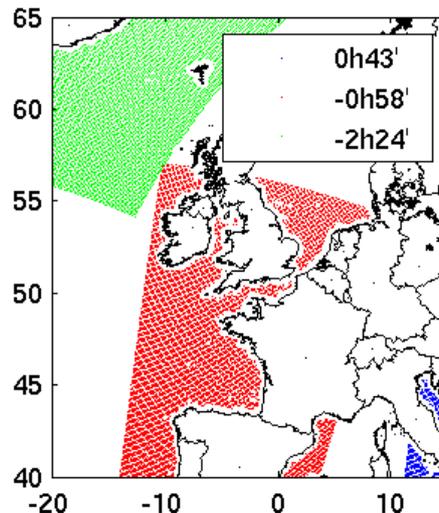


ARPEGE3H 09/11/2007 21:00 - QuikSCAT



(a)

ARPEGE3H 10/03/2008 18:00 - QuikSCAT



(b)

Figure 37 : Décalage horaire entre l'instant du modèle ARPEGE 3H et l'instant de la mesure QuikSCAT (a) pour l'événement 1 (b) pour l'événement 2.

5. Contribution du wave set-up dans le signal de surcotes

Comme rappelé par Idier *et al.* (2010a), la surcote totale résulte de différents phénomènes dont la surcote atmosphérique (étudiée dans les chapitres précédents) et le wave set-up (surélévation du plan d'eau induite par le déferlement des vagues). Ce chapitre vise à estimer la contribution des vagues (wave set-up) dans le signal de surcote, par observation et modélisation.

5.1. ANALYSE DE DONNÉES : ECORS 2008

Le site du Truc Vert, associé à la campagne de mesure ECORS (Sénéchal *et al.*, 2008) a été retenu comme site test d'estimation de la contribution relative du wave set-up dans le signal de surcotes. La première étape est d'estimer le wave set-up observé, et ce, à partir de mesures de niveau d'eau au large (avant déferlement) et après déferlement.

5.1.1. Niveaux d'eau en zone intertidale

Données brutes : capteurs de pression et pression atmosphérique

Pendant la campagne de terrain sur le site du Truc Vert, entre le 06/03/2008 et le 09/04/2008, quatre capteurs de pression étaient installés dans trois configurations spatiales différentes. Les Figure 38 et Figure 39 indiquent deux de ces configurations. Les données brutes des capteurs de pression (appelé PAU) sont acquises à une fréquence de 5 Hz pour capturer les signaux de niveaux d'eau jusqu'à une échelle temporelle correspondant à celle du clapot. Les capteurs de pression ont été installés sur les tiges dans la zone de déferlement et ils étaient ajustés verticalement ou déplacés pendant la campagne quand il y avait trop d'érosion ou de dépôt autour des instruments.

Une donnée complémentaire nécessaire est la pression atmosphérique locale. Ici, elle est issue du sémaphore du Cap Ferret (Météo-France), situé à environ 13 km du site du Truc Vert. Cette donnée est disponible au pas de temps horaire.

Traitement

Les capteurs de pression se situent dans la zone de déferlement, entre 0 et 2 m de profondeur, selon la phase de la marée. À l'exception du PAU1, qui était submergé continuellement pendant une période d'environ une semaine, les capteurs de pression n'étaient submergés que pendant la marée haute. Cela permet la calibration des capteurs de pression par rapport à la pression atmosphérique pendant chaque cycle de la marée, en corrigeant les valeurs de la pression mesurées par les PAU avec la

pression atmosphérique mesurée à la station météo du Cap Ferret. Cette première correction permet ainsi d'obtenir une mesure des hauteurs d'eau.

Topographie du 7mars 2008 (Marée Basse, vers 11 h TU)

(Coordonnées en Lambert 3 et altitude par rapport au 0 IGN69)

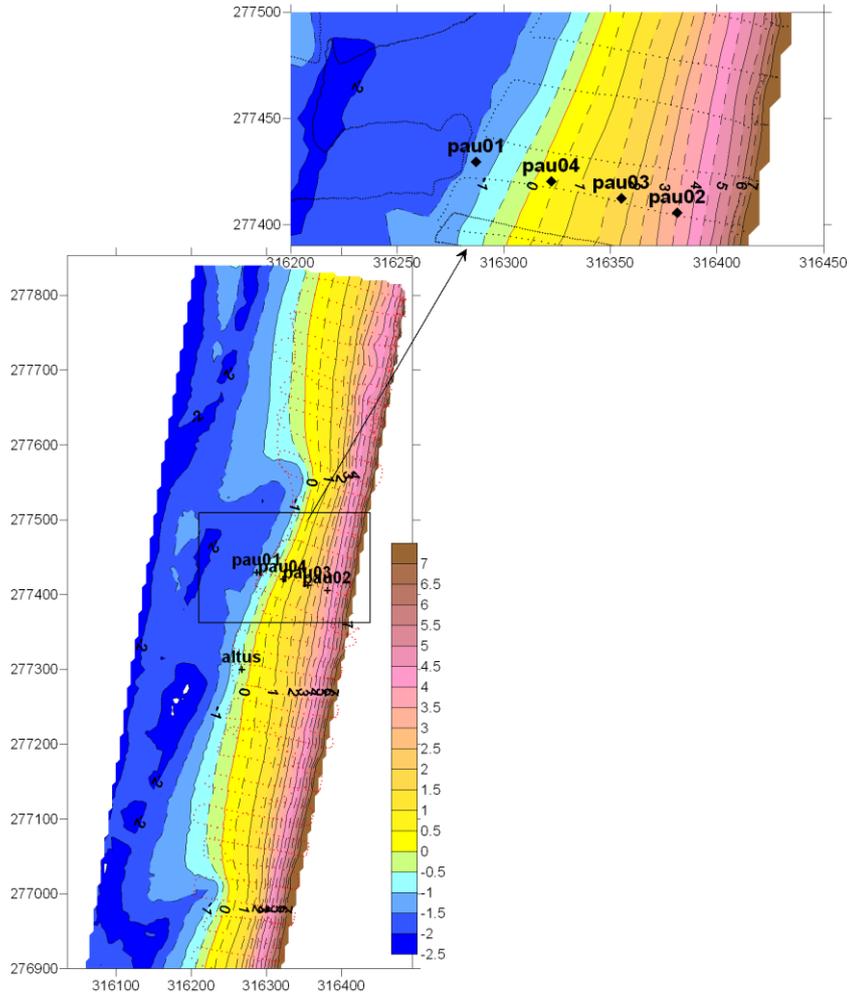


Figure 38 : Localisation des capteurs de pression pour la période de validation 1 (9-10 mars 2008).

Topographie du 20 mars 2008 (Marée Basse)

(Coordonnées en Lambert 3 et altitude par rapport au 0 IGN69)

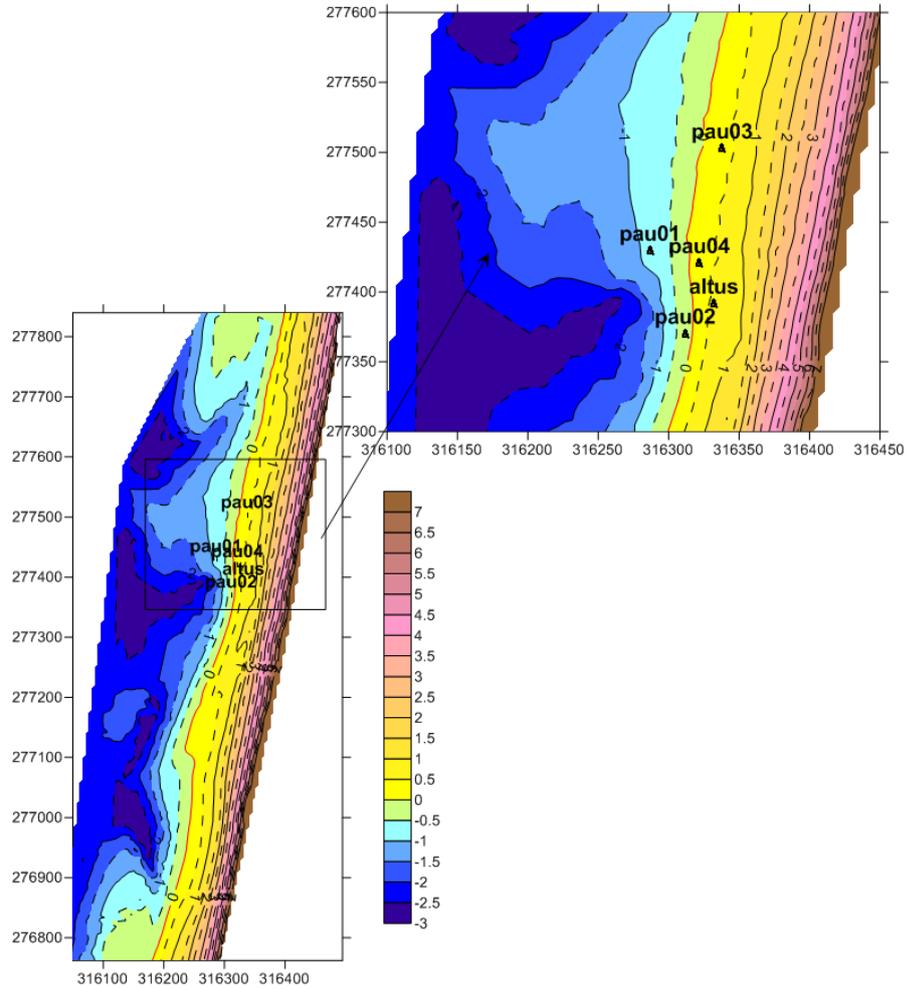


Figure 39 : Localisation des capteurs de pression pour la période de validation 2 (22-23 mars 2008).

En outre, une deuxième correction de pression est faite pour corriger la dérive des capteurs dans le temps. Cette deuxième correction est faite en comparant, pendant chaque phase où le capteur est émergé, la mesure de pression avec la mesure de pression faite au sémaphore du Cap Ferret.

Ainsi, il est possible de convertir les données de pression [en bars] mesurées en niveau d'eau, en mètres, en utilisant une valeur standard pour la masse volumique de la mer : $1\,025,9\text{ kg/m}^3$. Les valeurs de moins de 2 cm ne sont pas considérées significatives et sont remplacées par NaN. Ensuite, les hauteurs d'eau sont référencées par rapport au 0-IGN en utilisant les mesures de la position verticale des capteurs de pression, mesure acquise par GPS différentiel cinématique par rapport à une base de référence. Enfin, le niveau de l'eau mesuré à chaque capteur est moyenné toutes les 10 minutes pour avoir une estimation du niveau moyen de l'eau (incluant la marée, surcote atmosphérique et le wave set-up).

Lors du traitement, quelques problèmes ont été identifiés pour les mesures PAU1 (10/03/2008 – 22/03/2008) et le PAU3 (06/03/2008 – 10/03/2008) (localisations respectives des capteurs : voir Figure 38 et Figure 39). Pendant ces deux périodes, ces capteurs de pression montrent un changement important de la pression atmosphérique entre les marées basses successives, qui est probablement lié à la dérive de l'instrument ou à d'autres forçages non-identifiés. Une partie de ces observations a été recalée en faisant une comparaison avec d'autres capteurs de pression qui étaient stables pendant la même période.

5.1.2. Estimation des signaux de surcote et wave set-up

L'objectif du traitement de donnée est de distinguer dans le niveau d'eau total les contributions :

- du wave setup (lié au processus de déferlement de vagues) ;
- de la surcote atmosphérique ;
- de la marée.

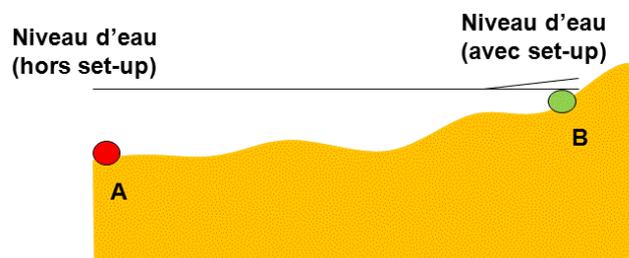


Figure 40 : Schéma de principe du calcul du wave set-up. Capteurs A (qui mesure le niveau de l'eau au large, sans setup) et B (qui mesure le niveau de l'eau à la plage, avec set-up).

Pour déterminer le wave setup à la côte, il est possible de prendre l'hypothèse qu'il correspond à la différence entre la hauteur d'eau mesurée au large (sans les effets de

déferlement de vagues) et la hauteur d'eau mesurée près de la côte (avec les effets de déferlement de vagues) (Figure 40). Le niveau d'eau mesuré au capteur A contient seulement les effets de surcote atmosphérique et de marée (en prenant l'hypothèse que le capteur A n'est pas dans la zone de déferlement), alors que capteur B, qui est situé entre la zone de déferlement et la ligne d'eau, mesure aussi le wave set-up. Donc, le set-up est la différence du niveau d'eau (x_e) entre les deux capteurs :

$$\text{Setup}(B) = x_e(B) - x_e(A).$$

Ensuite, pour estimer la contribution de la surcote atmosphérique, on estime la marée par analyse harmonique (logiciel MAS, SHOM). La surcote atmosphérique résulte alors de la différence entre le niveau d'eau mesuré au large et la marée prédite :

$$\text{Surcote atmosphérique (A)} = x_e(A) - \text{MAS}(A).$$

Enfin, la surcote totale à la position du capteur B est la somme des deux composantes :

$$\text{Surcote}(B) = \text{setup}(B) + \text{surcote atmosphérique (A)}.$$

Malheureusement, aucun instrument n'a mesuré le niveau d'eau au large pendant toute la période de la campagne. Afin de reconstituer un signal de niveau d'eau au large pendant la période des mesures des PAUs, des observations de deux marégraphes et de deux ADCPs ont été utilisées (Tableau 10).

Le traitement des données au large a posé plusieurs difficultés : un décalage vertical entre les deux marégraphes (résolu par le SHOM), le mouvement des ADCPs pendant la période des mesures (résolu en identifiant les périodes avec des mesures stables), un décalage difficilement quantifiable entre le 0-hydro des marégraphes et le 0 IGN69 (résolu en utilisant des données des PAU), et une contamination des mesures au large avec du setup dû à la profondeur faible des ADCPs pendant des périodes de grosses vagues.

Instrument	Période d'utilisation	Profondeur moyenne
Marégraphe 1	12/02 – 26/02/2008	~ 20 m
ADCP 2	04/03 – 21/03/2008	~ 4 m
ADCP 1	22/03 – 28/03/2008	~ 8 m
Marégraphe 3	03/04 – 09/04/2008	~ 20 m

Tableau 10 : Données utilisées pour construire la série temporelle du niveau d'eau au large.

Les observations des deux marégraphes comportaient un décalage vertical d'environ 29 cm, qui a été corrigé par le SHOM. Ces données couvrent la période juste avant la campagne et à la fin de la campagne. Des mesures ADCPs sont donc utilisées pour compléter la période manquante (Tableau 10). À cause du mouvement des ADCPs après leur installation (qui est évident en regardant le « pitch, roll, and heave » mesuré), seulement deux périodes de données ont été sélectionnées pour reconstruire le niveau d'eau au large. Afin de déduire la hauteur d'eau, nous avons considéré une densité de l'eau de $1\,025,9 \text{ kg/m}^3$ correspondant à celle pour une température de $12 \text{ }^\circ\text{C}$ et une salinité de 34 psu. Ne disposant pas de périodes de mesures communes avec les marégraphes, la profondeur de l'eau mesurée par les ADCPs a été convertie en niveau d'eau par rapport au 0-hydro en comparant le niveau moyen d'eau pendant

des périodes de conditions énergétiques très faibles et de faible surcote (Figure 41) au niveau moyen du marégraphe 1. On obtient ainsi un décalage de niveau moyen de 5,54 m pour l'ADCP1 et 1,87 m pour l'ADCP2.

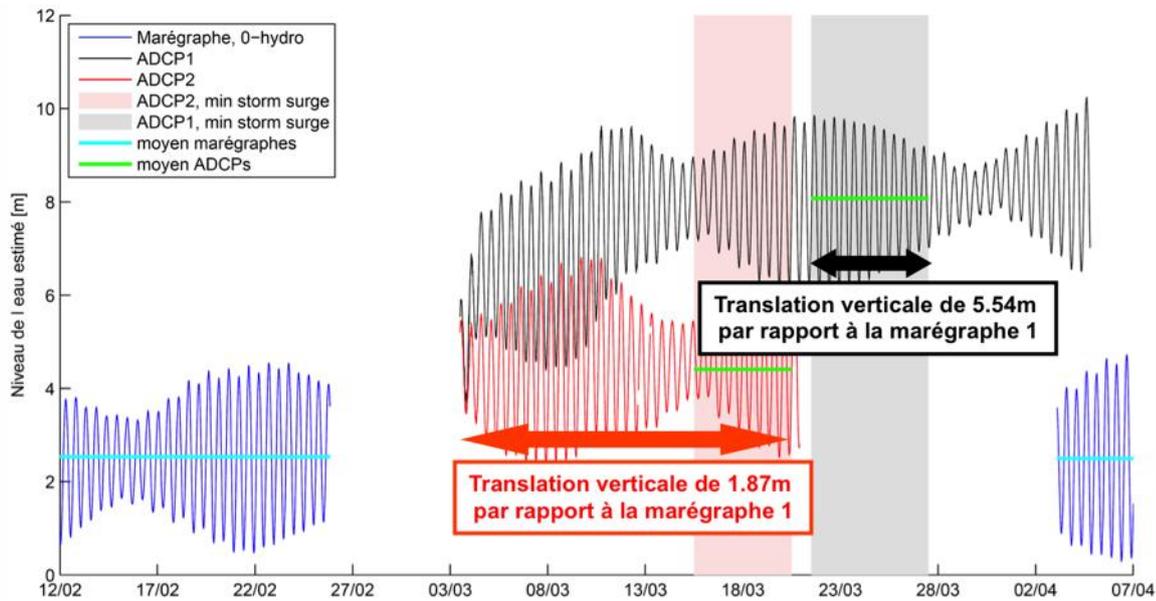


Figure 41 : Recalage des données des ADCPs en utilisant les périodes d'observation avec un minimum de surcote (la boîte rouge et la boîte grise pour ADCP2 et ADCP1, respectivement) pour déterminer le décalage vertical des instruments par rapport au marégraphe1 (en zéro hydrographique).

À noter : les courbes associées aux marégraphes correspondent à des niveaux d'eau par rapport au 0-hydrographique tandis que les courbes associées aux ADCP's correspondent à des hauteurs d'eau.

Ensuite, comme on ne disposait pas d'une mesure fiable de la différence entre le zéro hydrographique (ZH) et le zéro IGN69 (IGN), il a été décidé d'estimer le décalage en utilisant la série temporelle de niveau d'eau au large et le niveau d'eau mesuré aux PAUs. On fait l'hypothèse que le niveau au large et le niveau mesuré aux PAUs est comparable pendant les périodes avec peu de vagues et donc peu de setup aux capteurs :

$$XeZH(A) + \Delta ZH-IGN \approx xeIGN(B1,2,3,4).$$

La période avec un minimum de vagues, entre 06/04/2008 et le 09/04/2008, a été choisie pour évaluer le $\Delta ZH-IGN$. Pendant cette période, la différence moyenne entre les quatre capteurs de pression et le niveau de l'eau au large est de $2,28 \pm 0,03$ m. Cette valeur est donc utilisée pour convertir le niveau d'eau de 0-hydro à 0-IGN ($\Delta ZH-IGN$).

Pour compléter le traitement des données au large et pour identifier la composante liée à la marée, le SHOM a évalué les composantes principales de marée en utilisant des données archivées correspondant à une campagne de mesures antérieure à celle de 2008, près du Truc Vert. Le niveau de la marée est donc estimé en utilisant MAS, permettant l'estimation de la surcote atmosphérique au large.

Ceci étant, ces données ainsi traitées comportent quelques limites. En effet, les ADCPs se situent en eau peu profonde (Tableau 10), de telle sorte qu'il est probable que lors de certaines périodes, les vagues déferlent au niveau de ces capteurs. Afin de mieux identifier ces périodes, nous analysons le ratio entre la hauteur des vagues déferlant (H) et la profondeur d'eau (D) au niveau des ADCP's. En effet, lorsque ce ratio dépasse un certain seuil γ , alors on peut considérer que les vagues ont déferlé et que, par voie de conséquence, les mesures réalisées au point étudié sont probablement aussi affectés par le setup pendant ces périodes déferlement. Une variété d'études a estimé ce seuil. Battjes et Stive (1985) concluent que ce seuil varie entre 0,6 et 0,8. Pour le cas présent, par exemple pour l'ADCP1, il y aurait ainsi déferlement et contamination du signal par du wave set-up, pour des vagues de 4,8 (correspondant à $\gamma = 0,6$) à 6,4 (correspondant à $\gamma = 0,8$) m de haut.

Pendant ces périodes, avec du setup mesuré au large, il n'est plus possible d'estimer le setup total aux PAUs. Le seuil γ est donc utilisé pour estimer les périodes pour lesquelles les vagues déferlent aux ADCPs. La Figure 42 montre la hauteur d'eau pour chaque capteur au large (ADCP et marégraphe), ainsi que les périodes pendant lesquelles le niveau d'eau mesuré au large est considéré comme potentiellement impacté par le setup (selon une gamme de valeurs de γ). Dans la suite du traitement, une valeur conservatrice de 0,6 est retenue pour exclure les périodes affectées par le setup.

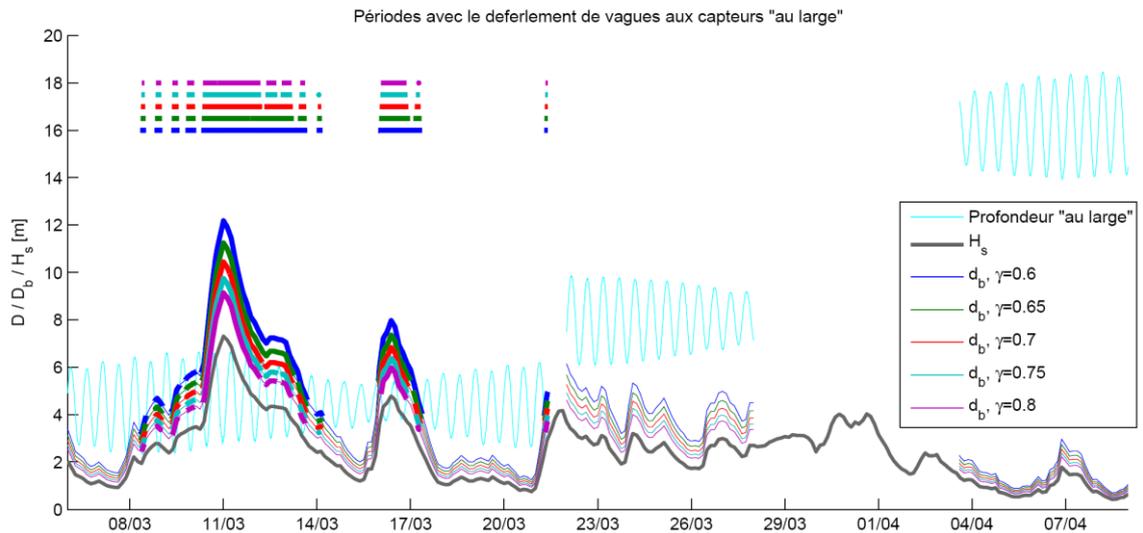


Figure 42 : Analyse des périodes de temps quand les capteurs (ADCPs et marégraphe) au large sont probablement affectés par le setup dû au déferlement des vagues.

On peut noter que, malheureusement, seulement l'ADCP2, qui était dans ~ 4 m d'eau, a fonctionné pendant la tempête Johanna, alors que les vagues dépassaient 6 m de haut, et donc que le niveau d'eau au large est contaminé par le wave set-up et donc qu'il n'est pas possible de calculer le setup aux PAUs pendant le pic de tempête. Les mesures donnent la surcote totale, mais il n'est pas possible de distinguer le setup de la surcote atmosphérique.

Enfin, en prenant en compte ces difficultés, le setup aux PAUs, la surcote atmosphérique aux capteurs au large, et le niveau de la surcote totale sont estimés pendant des périodes différentes de la campagne (Figure 43). Alors qu'il n'y a pas de mesures de setup pendant le pic de la tempête, il existe des mesures de setup de ~ 0 à presque 0,6 m pendant des conditions de vagues de ~ 0 à plus de 4 m de hauteur. Dans les mesures, le setup a atteint un maximum entre 0,5-0,6 m pour des périodes où les hauteurs de vagues étaient de l'ordre de 3 m (22 mars et au début de la tempête Johanna). La surcote atmosphérique varie aussi entre -0,2 à +0,2 m pendant toute la campagne, c'est-à-dire les périodes où les mesures au large ne sont pas impactées par le setup (Figure 44a).

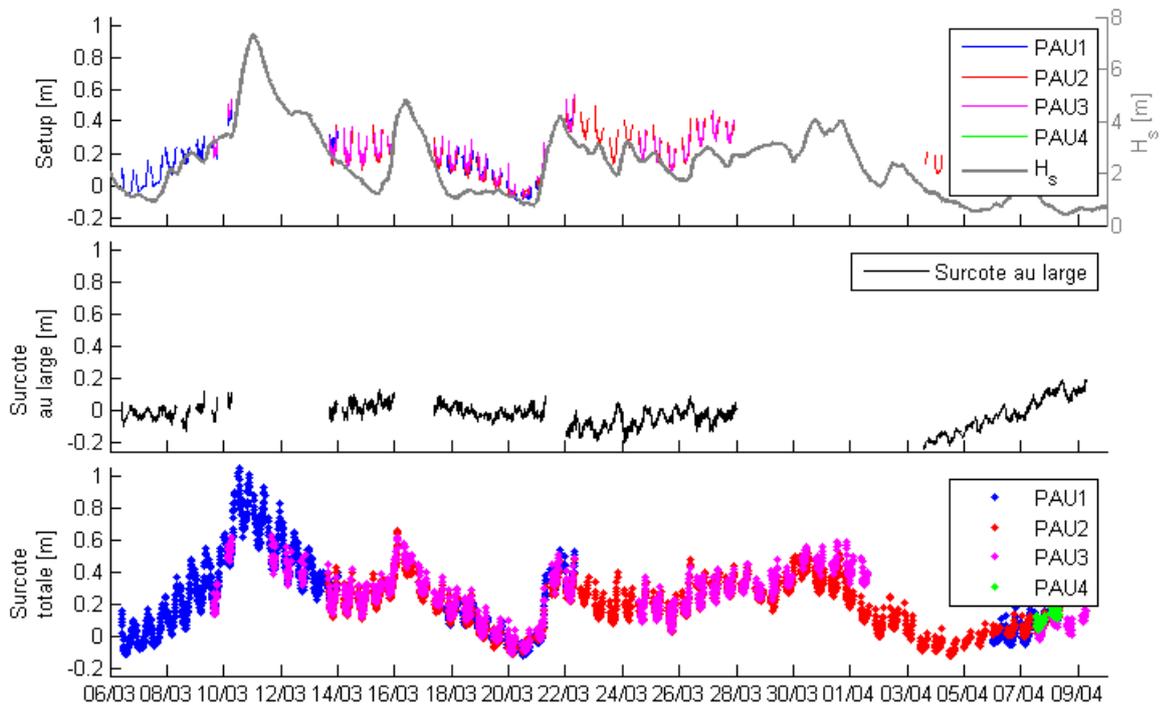


Figure 43 : Estimations (en haut) du setup mesurées par les PAUs et de la hauteur de vagues mesurée au large, (centre) la surcote estimée au large et (en bas) la surcote totale mesurée aux PAUs.

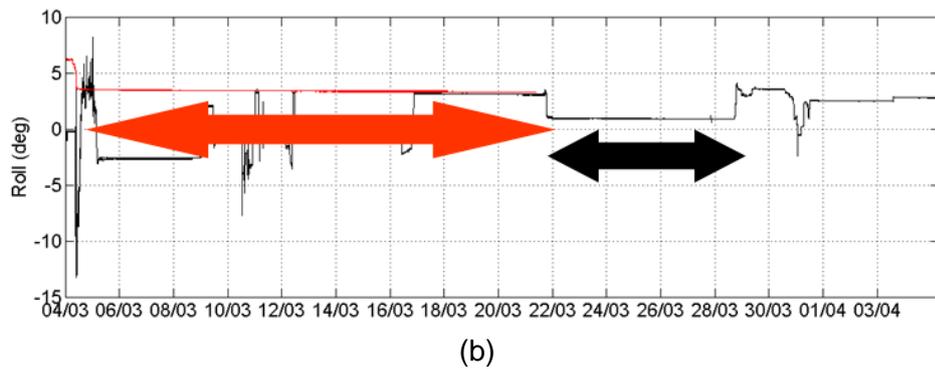
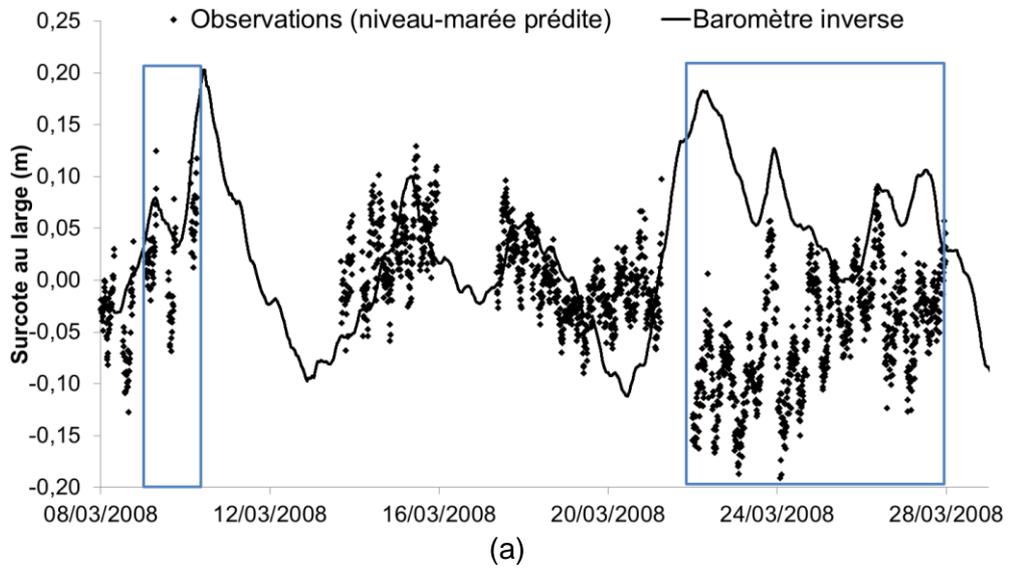


Figure 44 : (a) surcote (observations aux marégraphes et ADCP's moins la marée prédite à partir des constantes harmonique Truc Vert fournies par le SHOM) au large, lors des périodes où les vagues n'ont pas déferlé au niveau du capteur au large ($\gamma = 0,6$, voir Figure 40) et baromètre inverse (données de pression : capteurs PAU en zone intertidale), (b) mouvements des ADCP's (rouge : ADCP2 ; noir : ADCP1).

Enfin, il faut noter que les estimations de wave set-up pendant la période du 22 mars au 28 mars par exemple, sont sans doute surestimées, d'environ une vingtaine de centimètres, pour deux raisons :

- il est possible que le niveau d'eau au large (ADCP2 alors mouillé par 8 m de fond) ait été impacté par le set-down quand l'ADCP2 se situait dans la zone de shoaling. Des simulations effectuées avec SWAN sur la période du 22 au 23 mars tendent à montrer que ce capteur serait effectivement dans la zone de shoaling pendant cette période, avec un shoaling de quelques centimètres ;
- l'analyse de la surcote au large reconstituée après recalage des mesures de niveau d'eau au large indique une inconsistance pendant cette période, cette inconsistance semble être due aux mouvements de l'ADCP1 pendant cette période, mouvements qui fausseraient quelque peu la mesure de niveau d'eau sur cette période (Figure 44).

C'est pourquoi, deux périodes de validation sont choisies :

- le 9-10 mars, avant le pic de surcote de l'évènement Johanna, où les hauteurs de vagues sont de l'ordre de 3 m ;
- le 22-23 mars, après l'évènement Johanna, où les hauteurs de vagues sont de l'ordre de 3,5 m, mais en sachant que le set-up estimé est vraisemblablement entaché d'une surestimation de l'ordre de la vingtaine de centimètres.

Finalement, pendant le pic de la tempête, le niveau maximum de la surcote totale instantanée (setup + surcote atmosphérique) a atteint environ 1 m au PAU1 (localisation : voir Figure 38). Ce capteur n'était pas situé sur la ligne d'eau à cet instant, il était légèrement submergé (environ 0,5 m). Il est donc probable que la surcote totale au niveau de la ligne d'eau était supérieur à 1 m.

5.2. APPROCHE EMPIRIQUE

5.2.1. Formulation de Stockdon *et al.* (2006) v.s. observations

Les mesures *in situ* sont ensuite comparées avec des formules existantes pour estimer le setup. La formule la plus utilisée est celle de Stockdon *et al.* (2006), qui a été développée en utilisant des données de dix campagnes de terrains différentes sur des plages divers (dissipatives et réfléchives). Selon Stockdon *et al.* (2006), le setup dépend de la pente de la côte, et la hauteur et période (ou longueur d'onde) des vagues :

$$setup = 0.35\beta\sqrt{H_0L_0}$$

où β est la pente de la côte, H_0 est la hauteur de vagues au large et L_0 est la longueur d'onde des vagues au large. La formule est très sensible au choix de la pente de plage et donc plusieurs définitions ont été testées en comparaison avec les observations (Figure 45). Les trois définitions sont :

- β_f est définie comme la pente de côte dans la zone de swash [« foreshore », Stockdon *et al.* (2006)]. Après avoir soustrait le niveau de la marée des mesures au niveau d'eau brut, le niveau moyen d'eau ($\langle \eta \rangle$) et l'écart type (σ) de ce niveau sont estimés avec des séries temporelles de 10 minutes de longueur. La pente de plage dans la zone de swash est donc estimée $\pm 2 \sigma$ autour de $\langle \eta \rangle$. Cette valeur varie en fonction de temps avec les vagues et le niveau de la marée, et d'un profil cross-shore à l'autre avec la bathymétrie (Figure 45, haut). Dans le cas présent, elle varie entre 0,01 et 0,08 ;
- β_{zi} est définie comme la pente de plage dans la zone intertidale, en prenant le niveau d'eau maximal et minimal pendant la campagne. Cette valeur ne varie qu'avec la bathymétrie sur les profils cross-shore différents (Figure 45, centre). Dans le cas présent, elle varie entre 0,02 et 0,03. On peut noter que c'est souvent cette définition qui est utilisée dans les applications, même si elle ne correspondait pas à la définition originale utilisée par Stockdon *et al.* (2006) ;
- β_{sz} est définie comme la pente de plage dans la zone de surf [« surf zone », Stockdon *et al.* (2006)] et varie donc en fonction de sa largeur. Cette zone est définie par la distance entre la position horizontale du niveau d'eau moyen ($\langle \eta \rangle$), et la ligne de déferlement des vagues. Pour déterminer la profondeur de déferlement des vagues, le critère de $\gamma = 0,6$ est encore appliqué. Cette valeur est donc une estimation qui varie en fonction de la hauteur des vagues, du niveau de marée, de la largeur de la zone de surf et de la bathymétrie du profil cross-shore (Figure 45, bas). Dans le cas présent, elle varie entre 0,01 et 0,1.

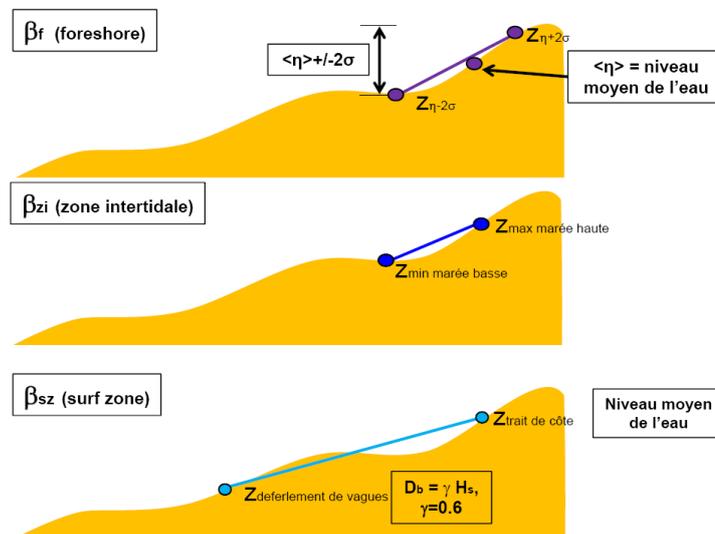


Figure 45 : Les trois définitions de la pente de la côte utilisés pour tester l'application de la formule de Stockdon *et al.* (2006) pour estimer le setup.

La Figure 46 montre les variations temporelles de ces différentes formulations de pente de plage calculées en utilisant les mesures du capteur PAU1, et en considérant la topo-bathymétrie du 11 février 2008. Elle illustre les fortes variations de pentes de plage en fonction de la formulation choisie.

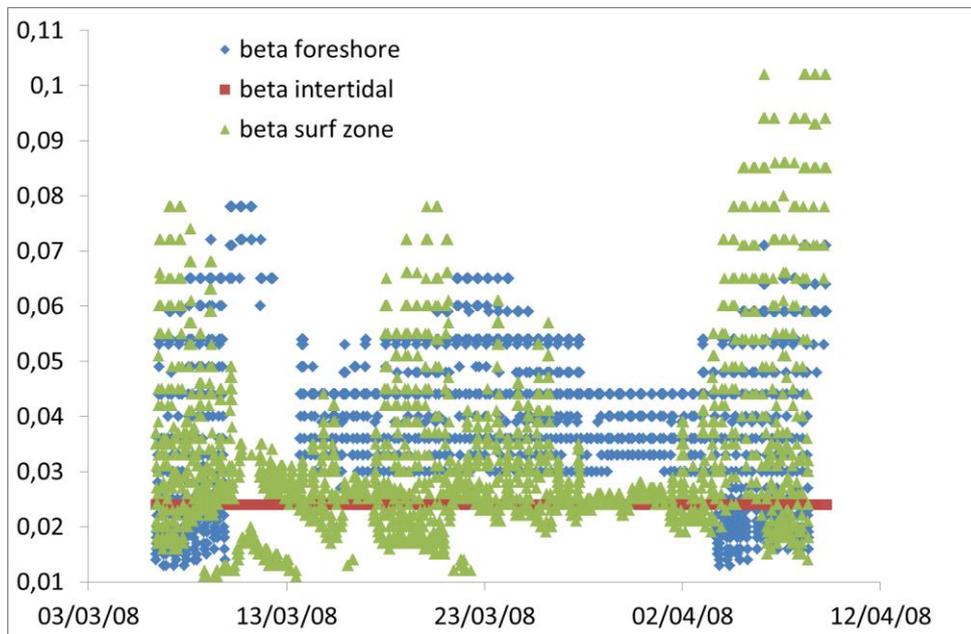


Figure 46 : Profils temporels des différentes formulations de pente de plage, calculés à partir des mesures au large, des mesures au niveau du capteur de pression PAU1, et de la topo-bathymétrie du 11 février 2008.

Lors de la campagne ECORS2008, il y a eu deux levés bathymétriques : un avant la campagne (11 février 2008) et l'autre après (4 avril 2008). Ceci implique une incertitude supplémentaire dans l'analyse des résultats obtenus avec les formulations de Stockdon *et al.* (2006). Dans les exemples montrés ici, la bathymétrie du 11 février 2008 a été utilisée. En utilisant la deuxième bathymétrie (4 avril 2008), la pente de plage estimée varie un peu plus ($\beta_f = 0,01-0,09$, $\beta_{sz} = 0,01-0,11$, $\beta_{zi} = \sim 0,02$). Cependant, ces variations dues à la bathymétrie ne changent pas significativement les estimations du setup (maximum de 15 cm, où 25 % pendant la tempête Johanna, avec des vagues de 8 m de hauteur), ni les conclusions finales sur l'application de la formule (Figure 47 - Figure 48).

La différence entre Stockdon *et al.* (2006) et les mesures varient entre -0,6 et +0,4 m (Figure 47, en bas). Les différences de moins de 0,1 m sont dans la marge d'erreur et ne sont donc pas significatives. Pourtant, il existe des périodes avec plus de 0,4 m de différence. L'amplitude de ces différences semble être en fonction de la hauteur des vagues.

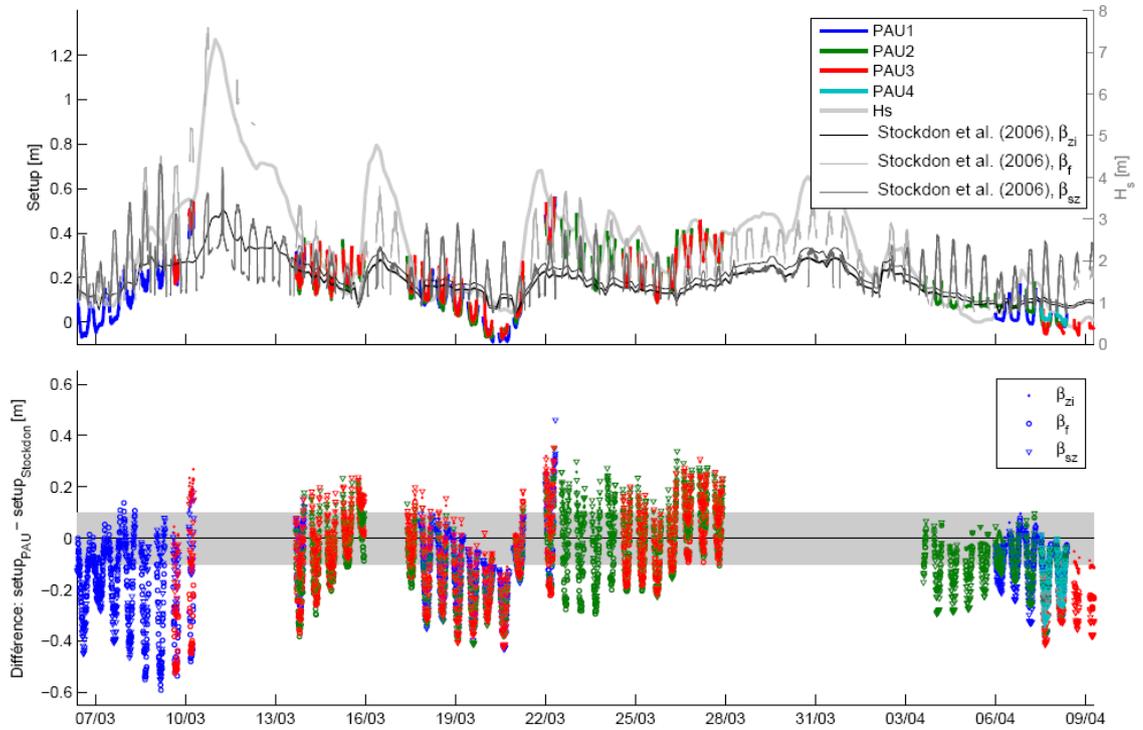


Figure 47 : Comparaison de l'amplitude de setup mesuré et estimé avec la formule de Stockdon et al. (2006), avec trois estimations différentes de la pente de la côte (z_i = dans la zone intertidale, f = « foreshore », sz = « surf zone ») et la topo-bathymétrie du 11/02/2008.

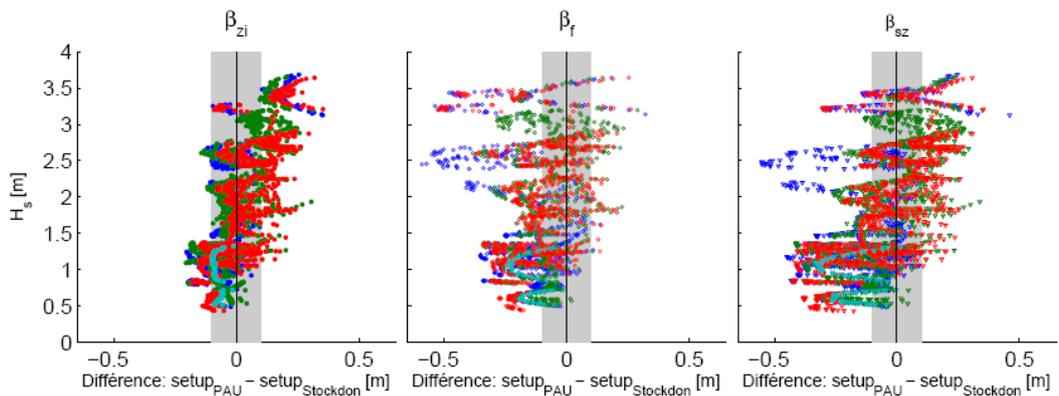


Figure 48 : Comparaison de la différence entre le setup mesuré par les PAUs et le setup estimé avec la formule de Stockdon et al. (2006), avec trois estimations différentes de la pente de la plage pour les quatre capteurs de pression, et en utilisant la topo-bathymétrie du 11/02/2008. Les couleurs indiquent les PAUs, avec la même légende que la Figure 47.

En effet, le tracé (Figure 48) de la hauteur de vagues avec la différence entre le setup mesuré et le setup estimé avec la formule de Stockdon *et al.* (2006) montre que **la formule a tendance à surestimer le setup avec les vagues plus petites et à sous-estimer le setup avec les vagues plus grosses** quand la pente de la côte est estimée avec β_{sz} ou β_{zi} . En utilisant β_f et β_{sz} , les estimations avec la formule de Stockdon *et al.* (2006) montrent plus de variabilité. Pour rappel, la formule de Stockdon *et al.* (2006) a été établie pour des hauteurs de vagues H_s inférieures à 2,5 m. Nous obtenons un bon accord pour les hauteurs de vagues de 1,5 à 2 m, ce qui est cohérent avec la gamme de hauteur de vagues considérées par Stockdon *et al.* (2006). Pendant la période 22-28/03, les vagues avaient une hauteur plus forte, de 4 à 3 m. Pour ces gammes de hauteur, l'écart entre estimation avec la formule de Stockdon *et al.* (2006) et les observations est plus fort, avec une surestimation atteignant 20 cm, comme mis en évidence plus haut. Les résultats de la période 22-28/03 doivent donc être utilisés avec précaution.

Jusqu'à présent, nous avons comparé une valeur de set-up observé en un point fixe à la valeur donnée par la formule de Stockdon *et al.* (2006), sachant que cette formule donne la valeur maximale de set-up à un instant donné (si on considère un profil cross-shore, cette valeur maximale se produit au niveau de la ligne d'eau, dont la position est variable dans le temps). Pour compléter l'analyse ci-dessus, nous comparons les données des capteurs de pression avec les résultats obtenus avec la formule de Stockdon (pente de plage β_{zi}) pendant les périodes où les capteurs sont le plus près de la ligne d'eau, i.e. pendant les périodes où les observations sont plus directement comparables aux prédictions obtenues avec les formules de setup. Ainsi, un simple traitement préliminaire a été effectué tel que, pendant chaque période de submersion des instruments et pour chacun des instruments, ce traitement identifie les mesures du maximum de set-up quand la profondeur d'eau atteint un minimum (et donc le capteur est le plus près du niveau de la ligne d'eau).

Il faut noter que la hauteur d'eau varie pour chaque capteur de pression, et que même ces mesures ne sont pas prises exactement au niveau de la ligne d'eau. Avec ce traitement, la moyenne et l'écart-type des différences entre la formule de Stockdon *et al.* (2006) et les mesures sont $0,07 \pm 0,12$ m et $-0,05 \pm 0,17$ m pour les levés bathymétriques du 11/02/2008 et 04/04/2008, respectivement. En outre, les RMSE des différences sont de 0,14 m et 0,18 m, respectivement. Pour calculer un pourcentage d'écart, on ne considère que les mesures de plus de 10 cm de set-up (les mesures de moins de 10 cm de set-up ne sont pas considérées comme significatives), en calculant la différence du set-up entre les résultats obtenus avec la formule de Stockdon *et al.* (2006) et les mesures, par rapport aux mesures $[(\text{setup}_{\text{stockdon}} - \text{setup}_{\text{mes}}) / \text{setup}_{\text{mes}}]$. Le pourcentage d'écart est alors de 39,2 % et 45,1 %, pour les topo-bathymétries du 11/02/2008 et 04/04/2008, respectivement. Cependant, il faut noter que cette analyse d'écart est effectuée pendant les périodes où les vagues n'ont pas déferlé au niveau du capteur au large. Ceci implique que ces périodes intègrent aussi la période du 22 au 28/03 où l'on sait que le wave set-up observé est *a priori* sur-estimé (§ 5.1.2). Les écarts entre les résultats obtenus avec la formule de Stockdon *et al.* (2006) et les observations sont donc probablement plus faibles que celles indiquées ci-dessus.

5.2.2. Formulation de Stockdon *et al.* (2006) : set-up prédit pour les évènements

Afin d'estimer les ordres de grandeurs du wave set-up pour chaque évènement, outre les simulations numériques avec le code SWAN (cf. § suivant), la formule de Stockdon *et al.* (2006) est utilisée. De plus, afin de se mettre dans la situation la plus courante où nous ne disposons pas de mesures de niveau d'eau en haut de plage permettant d'estimer la pente de plage β_f , la pente de plage utilisée correspond à β_{zi} , *i.e.* la pente de la zone intertidale. Les valeurs calculées étant comprises entre 0,02 et 0,03, une valeur de 0,025 est choisie.

Parmi les quatre évènements étudiés, seuls trois ont touché la façade Atlantique, nous nous concentrons donc sur ces trois évènements : mars 2008, février 2009 et février 2010. En termes de données de vagues, les données issues de WW3-Previmmer à la bouée Cap Ferret sont utilisées. En termes d'ordres de grandeurs, on constate que le set-up le plus fort s'est produit lors de la tempête Johanna (mars 2008) avec un set-up prédit de 38 cm, tandis que le set-up le moins fort est obtenu pour la tempête Xynthia (février 2010) avec un set-up prédit de 28 cm (Figure 49).

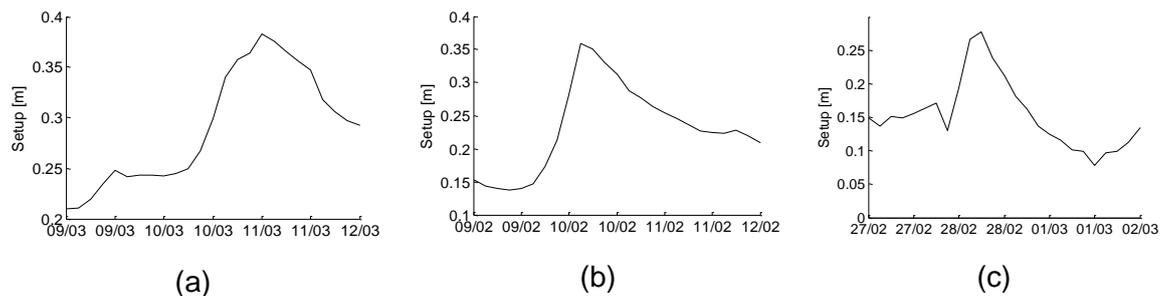


Figure 49 : Wave set-up prédit avec la formulation de Stockdon *et al.* (2006), en utilisant la pente de plage intertidale et les données de vagues issues de WW3-Previmmer, Bouée Cap Ferret. (a) Johanna, 2008, (b) Quentin, 2009, (c) Xynthia, 2010.

5.3. MODÉLISATION : MISE EN PLACE ET VALIDATION

Des tests préliminaires visant à comparer les observations, les résultats du modèle MARS2D-SWAN (Bruneau *et al.*, 2011) et des résultats du modèle SWAN ont montré que le modèle MARS2D-SWAN ne permettait pas, en l'état, d'améliorer significativement l'estimation du wave set-up. C'est pour cette raison qu'il a été décidé d'utiliser uniquement le code SWAN pour l'estimation du wave set-up par modélisation.

5.3.1. Mise en place

Le modèle a été mis en place pour deux périodes de validation (et donc des topobathymétries différentes) : le 9-10 mars (période 1) et le 22-23 mars (période 2) 2008.

Les données bathymétriques et topographiques utilisées, pour la validation, sont :

- levé bathymétrique du SHOM de février 2008 ;

- le levé topographique du 09/03/08 ;
- le levé topographique du 20/03/08.

Elles permettent de construire un MNT de 10 m x 10 m (Figure 50).

En termes de conditions aux limites, pour la validation, nous utilisons les spectres de vagues observés par 20 m de fond pendant la campagne (Figure 51), ainsi que les niveaux d'eau totaux observés aux différents capteurs au large (marégraphes, ADCP1 et 2).

En termes de paramétrage, les valeurs par défaut sont utilisées (voir fichier paramètre SWAN en Annexe 9). Des tests de sensibilité en particulier à la formulation permettant de calculer le coefficient Gamma de déferlement sont effectués.

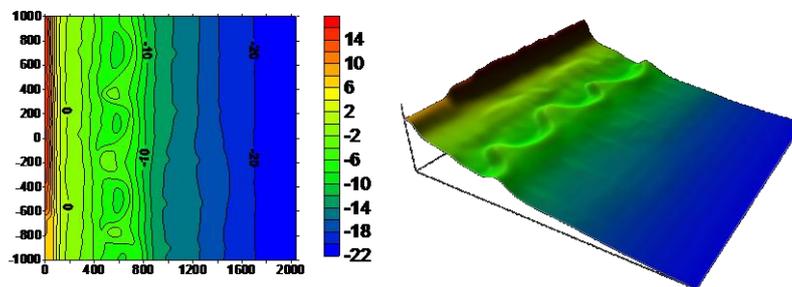


Figure 50 : Bathymétrie de février (référence altimétrique : IGN 69).
L'emprise est la même pour les deux figures.

5.3.2. Validation

Pour chacune des périodes de validation, les résultats de SWAN sont comparés aux mesures effectuées aux capteurs de pression. Ainsi, pour la validation, le set-up issu de SWAN utilisé n'est pas le set-up maximal (*i.e.* le set-up au niveau de la ligne d'eau) mais bien le set-up au niveau des capteurs.

Période 1 : 9-10 mars

La Figure 38 montre le positionnement des différents capteurs de pression pendant cette période, ainsi que la topo-bathymétrie associée. La comparaison est faite avec les mesures effectuées aux capteurs de pression pau1 et pau3. On constate (Figure 52) un assez bon accord le 9 mars au niveau du capteur pau3, tandis que les résultats sont moins satisfaisants pour le capteur pau1, avec des écarts de l'ordre de 10 cm pour un wave set-up atteignant environ 30 cm.

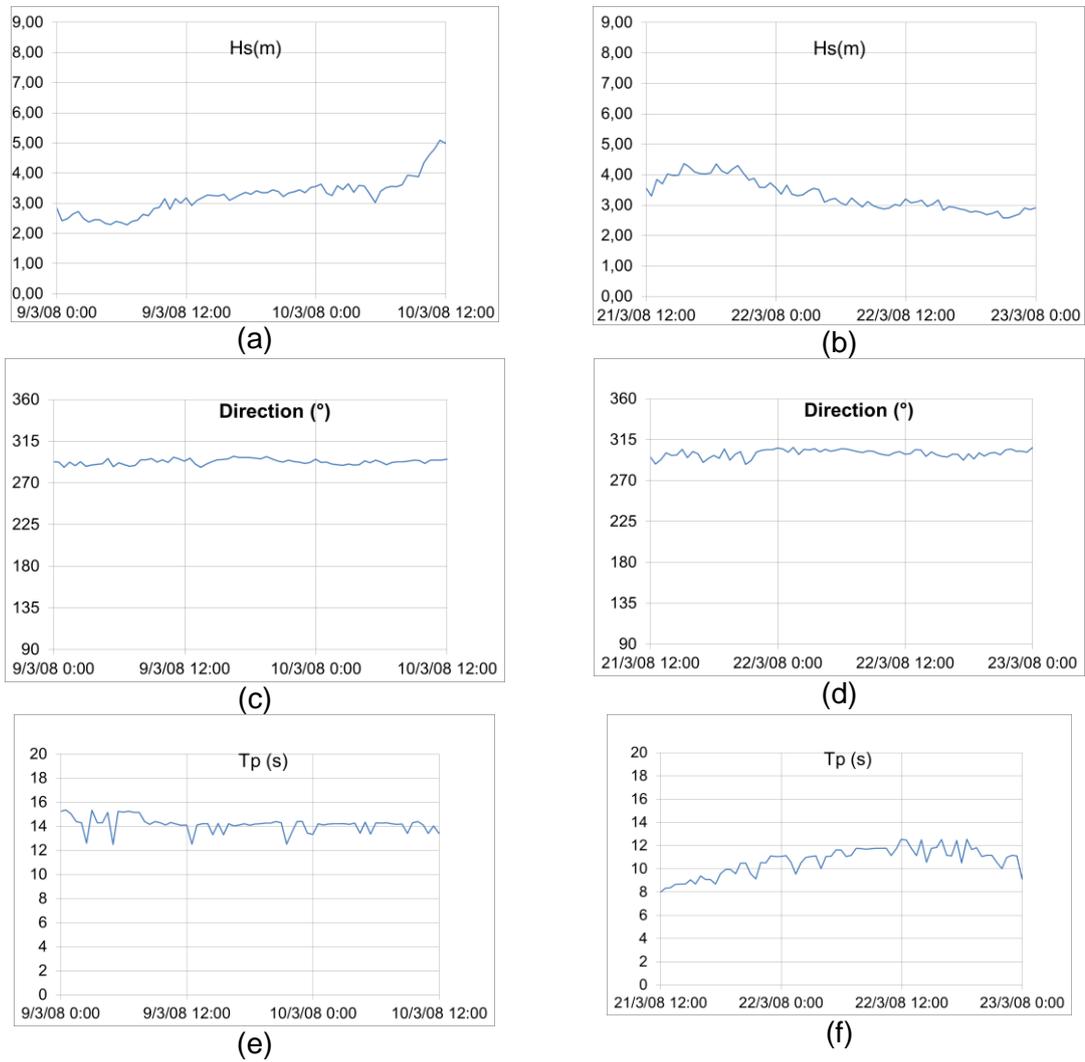


Figure 51 : Caractérisation des vagues au large (observations, 20 m de profondeur) pour les deux périodes de validation. Période 1 : a,c,e. Période 2 : b, d, f.

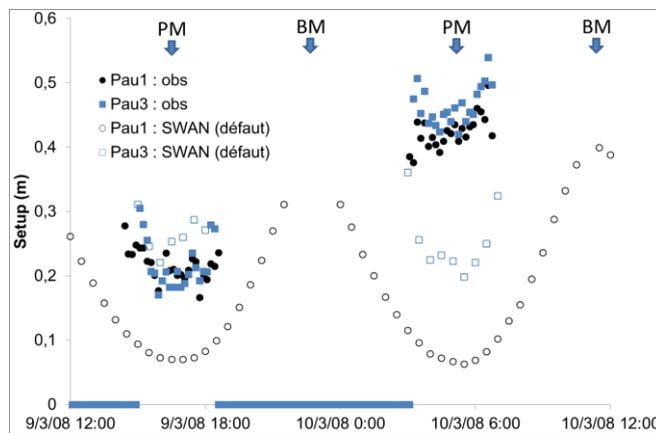


Figure 52 : Set-up mesuré et modélisé pendant la période 1.
 Le trait bleu indique la période pendant laquelle les capteurs Pau1 et Pau3 sont émergés.
 Les instants de pleine et basse mer sont respectivement indiqués par PM et BM.

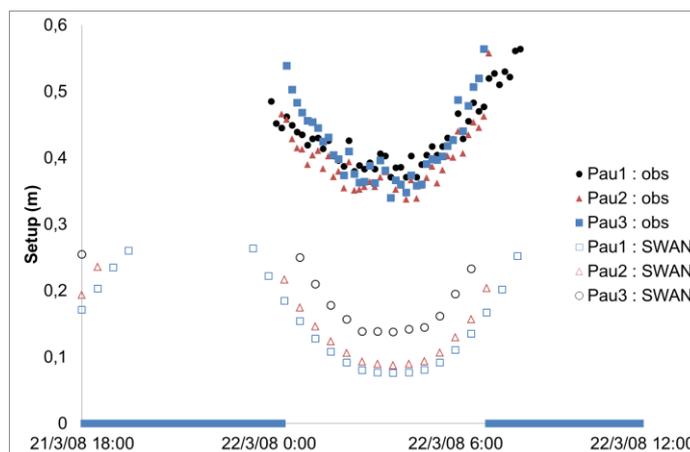


Figure 53 : Set-up mesuré et modélisé pendant la période 2.

Par contre, le 10 mars, l'écart est beaucoup plus fort, alors que les conditions de vagues n'ont pas changé de manière significative. On peut noter que dans cette simulation, la topographie de la zone intertidale dans laquelle sont présents les capteurs est celle du 9 mars, aucun levé topographique n'ayant pu être réalisé les jours suivants, en raison de la tempête Johanna. C'est pourquoi, nous avons tendance à donner plus de crédit à la comparaison des observations et résultats du modèle réalisée sur la période du 9 mars, que celle réalisée pour la période du 10 mars. Enfin, le 9 mars comme le 10 mars, on peut noter que les variations spatiales de set-up (comparaison pau1 et pau3) obtenues avec le modèle SWAN sont plus fortes que celles issues des observations.

Période 2 : 22-23 mars

La Figure 39 montre le positionnement des différents capteurs de pression pendant cette période, ainsi que la topo-bathymétrie associée. La comparaison est faite avec les mesures effectuées aux capteurs de pression pau1, 2 et 3.

La comparaison (Figure 53) montre des écarts significatifs entre observations et modèle, avec un écart de l'ordre de 20 cm, tel que le set-up modélisé est plus faible sur le set-up issu des observations. Toutefois, comme indiqué dans le paragraphe sur les traitements de données, le set-up issu des observations est vraisemblablement sur-estimé de 10 à 20 cm, en raison de données de niveau d'eau au large qui n'ont pas pu être complètement recalées en vertical. Cette incertitude dans les données observées indiquerait alors un écart entre observations et modèle plus proche de quelques centimètres, à la dizaine de centimètres pour un set-up atteignant 30 cm au niveau des capteurs, soit 30 %. Enfin, les variations spatiales de set-up (comparaison pau1 et pau3) obtenues avec le modèle SWAN sont du même ordre de grandeur que celles issues des observations.

Étude de sensibilité

Pour compléter ces travaux, une étude de sensibilité a été effectuée, d'une part à la topo-bathymétrie, d'autre part à la formulation du coefficient de déferlement des vagues (Gamma).

Tout d'abord, deux bathymétries sont testées : celles de février 2008 et celle d'avril 2008. La Figure 54 indique que, pour la période simulée (21-22 mars), le wave set-up est assez peu sensible à la bathymétrie utilisée.

Concernant le paramétrage du déferlement, outre la formulation par défaut basée sur un coefficient Gamma constant (= 0,73 dans cette étude), la formulation de Ruessink *et al.* (2003), implantée dans SWAN version 40.85 (été 2011), mais non documentée dans le manuel, est testée.

Il ressort que le wave set-up est sensible à la formulation choisie, avec un écart de l'ordre de 25 % du set-up modélisé entre la formulation Ruessink *et al.* (2003) et celle par défaut (gamma constant), et ce pour les phases de marée basse (*i.e.* lorsque le niveau d'eau est faible au niveau du capteur). À pleine-mer, les écarts sont plus faibles. Ceci étant, la formulation de Ruessink *et al.* (2003) a tendance à prédire des valeurs de wave set-up plus faibles que celles obtenues avec la configuration par défaut de coefficient constant, pour la suite, la configuration de référence utilisée est celle à coefficient de déferlement constant.

Enfin, toujours pour la configuration SWAN utilisée pour simuler les événements autres que Johanna (paragraphe suivant), c'est la bathymétrie de février 2008 qui est utilisée.

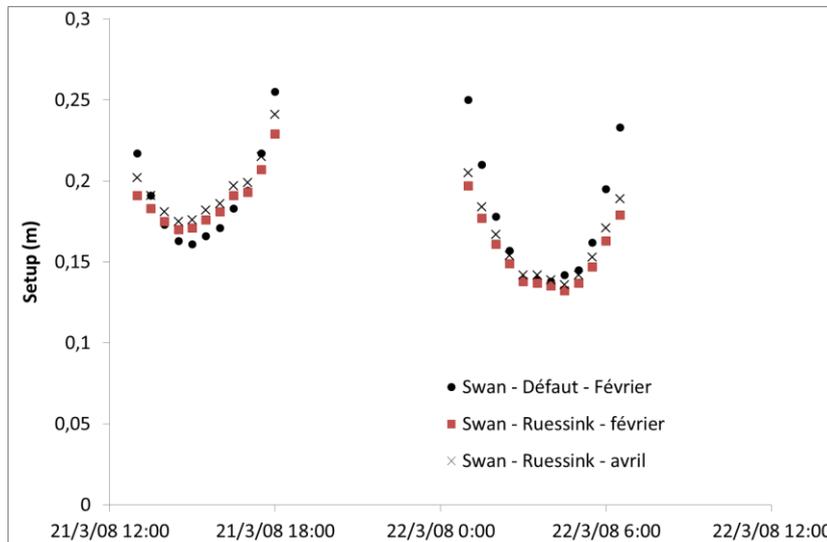


Figure 54 : Wave set-up modélisé pour différentes bathymétries et plusieurs paramétrisations du déferlement, au capteur Pau3, période 2.

5.4. MODÉLISATION : WAVE SET-UP ET SURCOTES EN PÉRIODE DE TEMPÊTE

5.4.1. Introduction

Les conditions aux limites introduites dans le modèle SWAN qui permettent le calcul du wave set-up pour les différents évènements étudiés dans ce projet, comprennent les niveaux d'eau et les conditions de vagues. Les niveaux d'eau introduits aux limites de SWAN sont la somme du signal de marée prédite recomposé à partir de MAS et des constantes harmoniques pour le site du Truc Vert, fournies par le SHOM, et du signal de surcote obtenu à partir du modèle MARS2D. Plus précisément, le signal de surcote a été obtenu en faisant la différence entre les niveaux d'eau obtenus avec le modèle MARS2D dans sa configuration optimale et les niveaux d'eau issus d'une simulation sans forçage météorologique. Cette méthode se justifie car l'étude réalisée sur les interactions marée-surcote montre que dans cette zone les interactions sont négligeables. Les conditions de vagues sont introduites par l'intermédiaire des spectres issus du projet IOWAGA au point Cap Ferret.

Contrairement à la partie précédente qui traitait de la validation de la configuration SWAN implantée par rapport à des mesures fixes (PAU), ici, les résultats de SWAN analysés sont les waves set-up au niveau de la ligne d'eau (limite entre dernier point « mouillé » et premier point « sec »), *i.e.* les wave set-up maximaux le long d'un profil cross-shore de plage, à un instant donné.

Pour chaque évènement, les séries temporelles de niveaux d'eau obtenus avec le modèle MARS2D dans sa configuration optimale, du signal de marée prédite recomposé à partir de MAS, de la hauteur significative de vague, de la surcote

atmosphérique (modélisation MARS2D), de la surcote totale et des wave set-up moyen, minimal et maximal issus de SWAN sont représentées. Ces wave set-up moyen, minimal et maximal sont à comprendre comme une caractérisation de la variabilité spatiale du wave set-up : le wave set-up moyen (resp. min, max) est la moyenne (resp. min, max) du wave set-up dans la direction longshore, à chaque instant.

5.4.2. Évènement Johanna (10 mars 2008)

Pour cet évènement, deux simulations ont été réalisées avec le modèle SWAN, suivant le type de conditions aux limites en niveaux d'eau et vagues. La première simulation utilise des conditions aux limites en niveaux d'eau (ADCP) et vagues (bouée SHOM) observées et la deuxième des conditions aux limites modélisées suivant le protocole décrit en introduction.

Conditions aux limites observées

Pour la tempête Johanna (Figure 55), les résultats obtenus avec SWAN et des conditions aux limites observées montrent une contribution de l'ordre de 75 cm du wave-set up à la surcote totale estimée sur le site du Truc Vert. Le maximum de surcote est atteint à marée basse et dépasse le mètre.

Conditions aux limites modélisées

Les résultats obtenus avec SWAN en utilisant des conditions aux limites modélisées, montrent, de la même manière, une contribution de l'ordre de 75 cm du wave-set up à la surcote totale estimée sur le site du Truc Vert (voir Figure 56). Le maximum de surcote est atteint à marée basse et est de l'ordre de 90 cm. Cette différence entre les deux simulations s'explique par la sous-estimation du signal de surcote atmosphérique par le modèle MARS2D par rapport aux observations.

À ce stade, étant donné la tendance du modèle MARS2D à sous-estimer le signal de surcote atmosphérique, l'objectif pour les évènements Quentin et Xynthia, pour lesquels seules les conditions aux limites modélisées ont été utilisées, est de donner un ordre de grandeur de la contribution relative du wave set-up à la surcote totale à partir de la modélisation.

5.4.3. Évènement Quentin (10 février 2009)

Au cours de la tempête Quentin, la contribution du wave set-up à la surcote totale maximale est de l'ordre de 50 cm, supérieur à la surcote atmosphérique modélisée qui est de 33 cm (Figure 57). Cependant, le modèle ayant tendance à sous-estimer la surcote atmosphérique, la seule conclusion qu'on peut tirer de ce test est que le wave set-up, au Truc Vert, pour l'évènement Quentin, est du même ordre de grandeur de que la surcote atmosphérique.

5.4.4. Évènement Xynthia (28 février 2010)

La contribution du wave set-up au maximum de surcote obtenu au cours de la tempête Xynthia s'élève à 20 cm, à comparer à 60 cm de surcote modélisée (Figure 58). Cependant les pics de wave set-up et de surcote ne sont pas simultanés et le ratio entre wave set-up (45 cm) et surcote (17 cm) modélisée au moment du pic de wave set-up (*i.e.* quelques heures après le pic de surcote) est de 2,5. Ainsi, au moment du pic de surcote total, le wave set-up aurait une contribution plus petite que la surcote atmosphérique, tandis qu'après le pic de surcote total, la contribution du wave set-up serait du même ordre de grandeur que la surcote atmosphérique.

5.4.5. Conclusion

Les résultats obtenus pour les trois évènements de tempête montrent que les maxima de marée prédite (Pleine-Mer), de hauteurs significatives de vagues, de surcote atmosphérique et de wave set-up ne sont pas atteints en même temps dans ces cas. La contribution du wave set-up à la surcote totale varie entre 20 et 90 cm suivant l'évènement considéré. De plus pour ces différents évènements, la surcote atmosphérique est comprise entre 20 et 50 cm. Même si la surcote atmosphérique modélisée a tendance à sous-estimer la surcote atmosphérique observée, on peut conclure que le wave set-up est du même ordre de grandeur que la surcote atmosphérique et donc que la part du wave set-up à la surcote totale est non négligeable.

5.5. IMPLICATIONS

Les travaux réalisés sur l'étude du wave set-up pour le site du Truc Vert, basés sur des données et des travaux de modélisation indiquent que, dans un cadre de prévision des surcotes à la côte, en particulier en domaine où les vagues déferlent, *i.e.* une majeure partie du littoral, il apparaît important de prendre en compte cette composante. Deux stratégies peuvent être envisagées :

- utiliser une formulation de type Stockdon (2006) pour estimer le wave set-up ;
- modéliser les vagues et le wave set-up sur les sites à enjeu, ou sur des profils types du littoral.

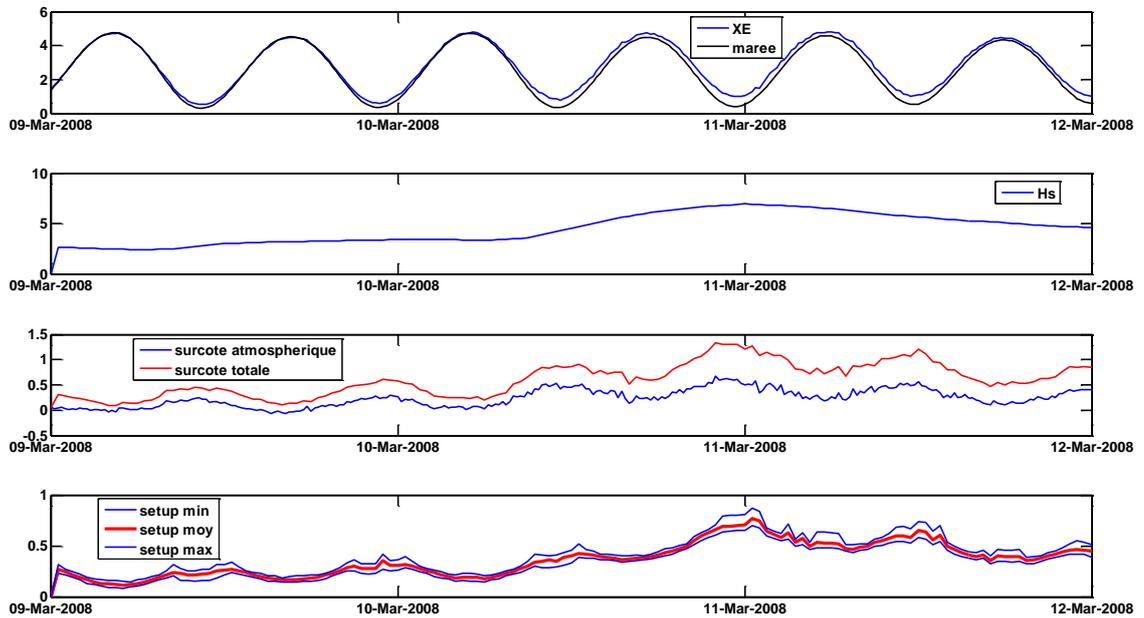


Figure 55 : Profils temporels des niveaux d'eau observés et de marée recomposés à partir de MAS, des hauteurs significatives de vague, des surcotes atmosphériques et des surcotes totales, des wave set-up moyen, minimal et maximal issus de SWAN pour la tempête JOHANNA.

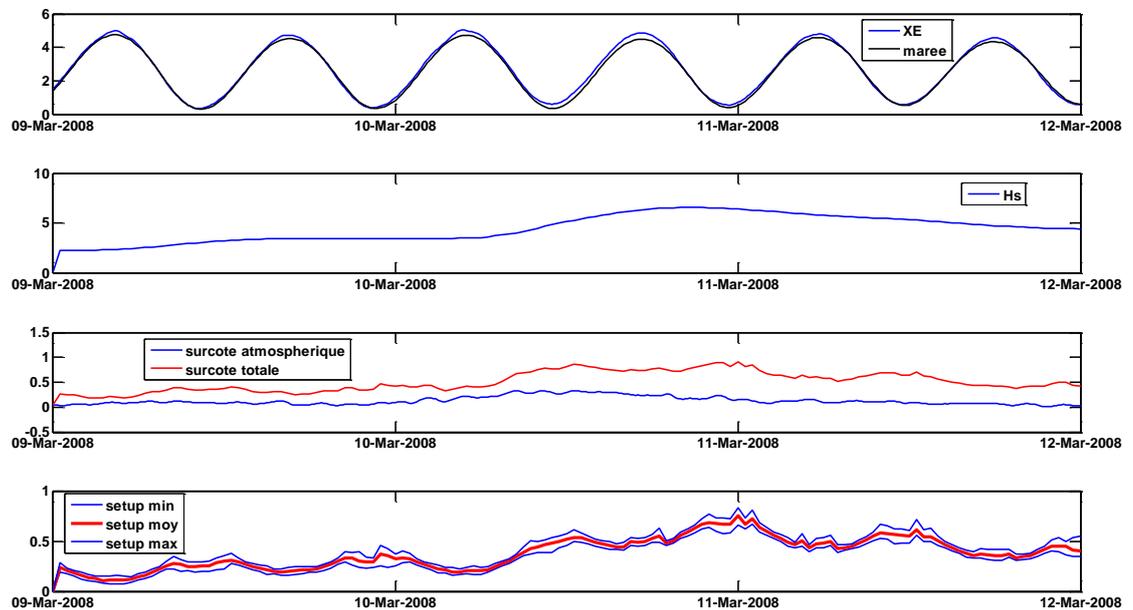


Figure 56 : Profils temporels des niveaux d'eau modélisés et de marée recomposés à partir de MAS, des hauteurs significatives de vague, des surcotes atmosphériques et des surcotes totales, des wave set-up moyen, minimal et maximal issus de SWAN pour la tempête JOHANNA.

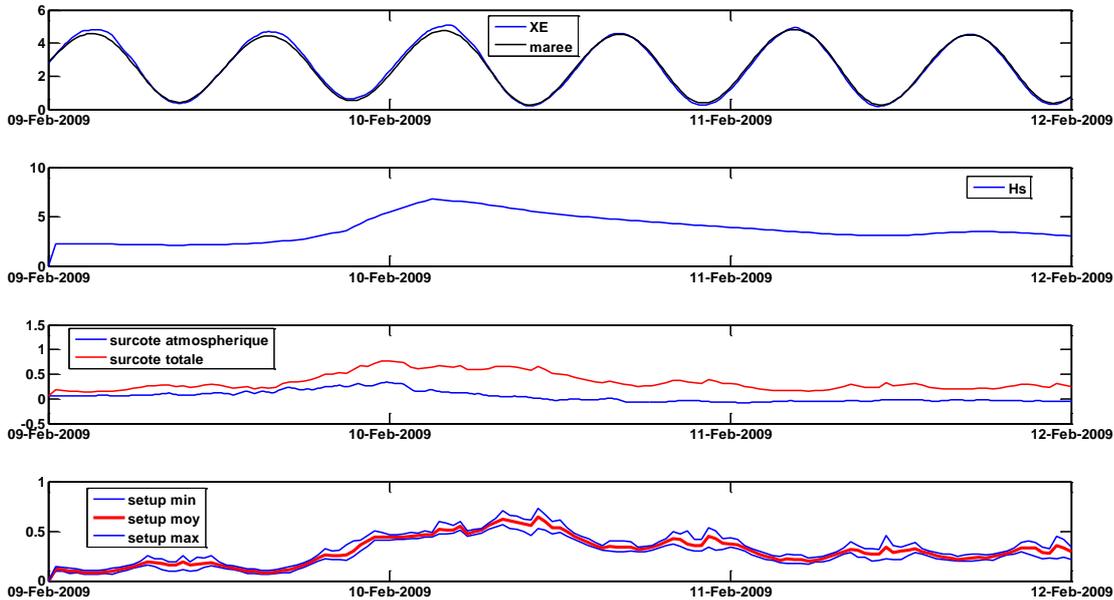


Figure 57 : Profils temporels des niveaux d'eau modélisés et de marée recomposés à partir de MAS, des hauteurs significatives de vague, des surcotes atmosphériques et des surcotes totales, des wave set-up moyen, minimal et maximal issus de SWAN pour la tempête QUENTIN.

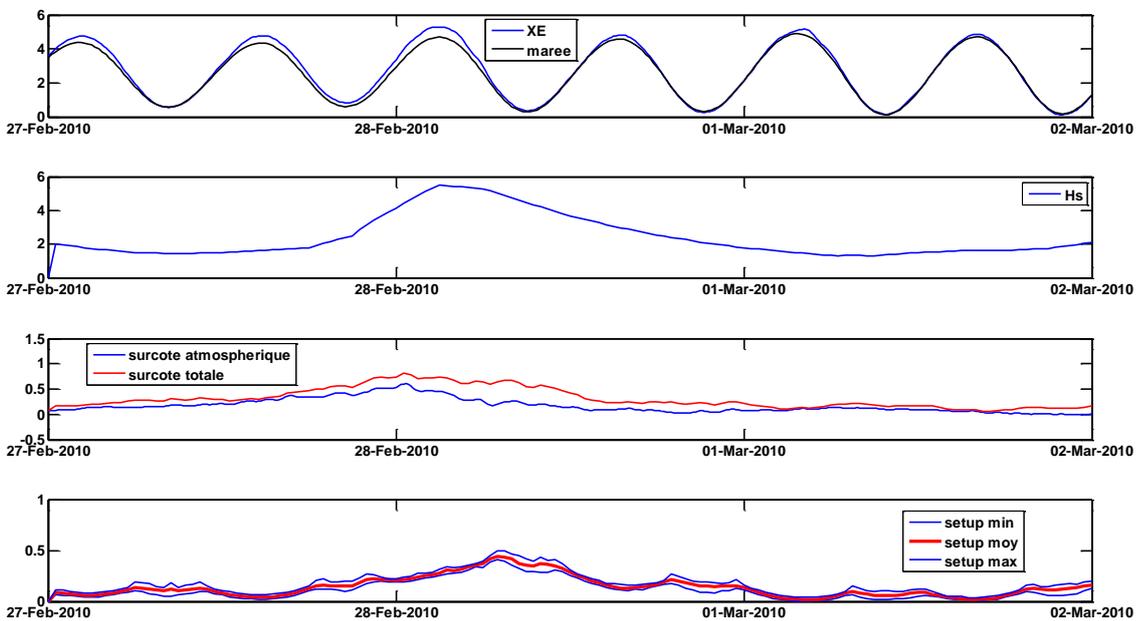


Figure 58 : Profils temporels des niveaux d'eau modélisés et de marée recomposés à partir de MAS, des hauteurs significatives de vague, des surcotes atmosphériques et des surcotes totales, des wave set-up moyen, minimal et maximal issus de SWAN pour la tempête XYNTHIA.

6. Conclusion

Afin d'améliorer la qualité des résultats du système d'informations et de prévisions du projet PREVIMER (www.previmer.org), en particulier en termes de prévision de surcotes, un partenariat de recherche et développements a été mis en place entre l'IFREMER et le BRGM (réf. : Ifremer 09/2 211 160). Il porte sur le développement d'un Système de prévision de surcotes en Manche/Atlantique et Méditerranée, destiné à être utilisé sur la plateforme opérationnelle d'océanographie côtière.

Le présent rapport (délivrable dénommé D4 dans le partenariat de recherche PREVIMER-BRGM) porte sur la modélisation des surcotes en Manche-Gascogne, et plus précisément sur : (1) les processus de génération des surcotes atmosphériques, et en particulier les interactions entre marée et surcote (Chapitre 3), (2) l'étude de sensibilité des résultats du modèle aux formulations de coefficients de traînée et aux données météorologiques et la définition du modèle optimal de surcotes (Chapitre 4), (3) l'estimation de la contribution du *wave set-up* (niveau stationnaire induit par les vagues ayant déferlé) dans le signal de surcote totale (Chapitre 5). Ce travail est effectué pour la zone Manche-Gascogne.

Cette étude s'est appuyée sur une configuration de référence du modèle MARS2D, caractérisée par une couverture spatiale allant jusqu'en Islande, une résolution de 2 km, un coefficient de traînée constant, des conditions météorologiques issues de ARPEGE 6h (quatre analyses par jour de 2003 à mars 2009, puis une analyse et trois prévisions par jour) et des conditions de marée issues de FES2004. La qualité de cette configuration de référence a tout d'abord été étudiée à l'échelle événementielle (quatre événements considérés : novembre 2007, Johanna, Quentin et Xynthia) et pluriannuelle (~ 7 ans), par comparaison aux données traitées dans le rapport précédent (Idier *et al.*, 2010). Ces comparaisons montrent que le modèle sous-estime les surcotes, jusqu'à 1 m pour certains événements (exemple : Dunkerque, novembre 2007).

Cette configuration de référence a été utilisée pour analyser les processus de surcotes atmosphériques, et en particulier les interactions entre marée et surcote, ainsi que les contributions relatives des surcotes induites par le vent et la pression. Les interactions entre marée et surcotes ont été étudiées en comparant la surcote atmosphérique modélisée en prenant en compte la marée, et la surcote modélisée en négligeant la marée. La différence (interaction), suivant les événements considérés atteint quelques centimètres à plusieurs dizaines de centimètres (80 cm dans le détroit du Pas-de-Calais pour la tempête de novembre 2007). Ce terme peut être soit positif, *i.e.* amplifiant la surcote engendrée uniquement par les champs de vent et pression, ou négatif, *i.e.* diminuant cette surcote. Une analyse spatiale des contributions respectives de la pression atmosphérique et du vent permet aussi d'identifier les zones où les termes de pression/vent sont dominants. Les résultats obtenus dans cette analyse de processus permettent de proposer une modélisation optimale des niveaux d'eau, intégrant un modèle de surcote de grande emprise, et des modèles de niveaux d'eau plus régionaux, intégrant les données de marée prédite cstFrance.

Dans la présente étude, l'objectif opérationnel est la définition d'un modèle optimal pour le Système de prévision de surcote. Ainsi, la configuration de référence est améliorée grâce à des tests de sensibilité permettant d'identifier la formulation optimale de coefficient de traînée et les données météorologiques à utiliser. Les tests de sensibilité aux coefficients de traînée (Makin, Moon, Charnock intégrant des conditions de vagues issues du projet IOWAGA) montrent que la formulation de Charnock (intégrant les vagues) permet de reproduire des pics de surcotes plus forts, avec une augmentation de quelques centimètres à dizaines de centimètres pour tous les ports étudiés (Dunkerque, Saint-Malo, Le Conquet, La Rochelle-La Pallice). Les tests de sensibilité aux données météorologiques (ARPEGE 3h - mode prévision 3h et analyse 6h - et AROME - mode prévision 24h) montrent que, l'utilisation de ces données engendre des surcotes plus fortes de quelques centimètres à dizaine de centimètres, se rapprochant ainsi des observations. Globalement, ce sont les simulations réalisées avec en entrée les données ARPEGE 3h qui donnent les meilleurs résultats. La configuration optimale de la modélisation des surcotes en Manche-Gascogne suivante est alors proposée : MARS2D avec un coefficient de traînée de Charnock intégrant les caractéristiques de vagues (issues de IOWAGA) et des conditions météorologiques issues de ARPEGE 3h. Cette configuration optimale, par rapport à la configuration de référence, permet de réduire les écarts entre surcotes observées et modélisées de quelques centimètres à une quarantaine de centimètres pour les fortes surcotes.

Pour compléter cette étude, une analyse de la contribution du wave set-up au signal de surcote total a été réalisée. Le site d'étude retenu est le site du Truc Vert, sur la base des données acquises pendant la campagne ECORS2008. Les données traitées indiquent des surcotes totales atteignant 1 m et une contribution du wave set-up atteignant quasiment 50 % de la surcote totale. Les travaux de modélisation réalisés avec le code SWAN confirment l'importance non négligeable du wave set-up dans le signal de surcote totale pour un site comme celui du Truc Vert, et ce, pour les trois événements considérés (Johanna, Quentin, Xynthia). Deux stratégies d'intégration de cette composante dans un système de prévision ont été proposées.

7. Bibliographie

Bertin X., Bruneau N., Breilh J.F., Fortunato A., Karpytchev M. (2012) - Importance of wave age and resonance in storm surges : the case of Xynthia. *Ocean Modelling*, 42, p. 16-30.

Bruneau N., Bonneton P., Castelle B., and Pedreros R. (2011) - Modeling rip current circulations and vorticity in a high-energy mesotidal-macrotidal environment. *J. Geophys. Res.*, 116, C07026, doi:10.1029/2010JC006693.

Caballero A., Pascual A., Dibarboue G., Espino M. (2008) - Sea level and Eddy Kinetic Energy variability in the Bay of Biscay, inferred from satellite altimeter data. *Journal of Marine Systems*, 72 (1-4), July 2008, 116-134, ISSN 0924-7963, 10.1016/j.jmarsys.2007.03.011.

Charnock H. (1955) - Wind stress on a water surface. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 81, p. 639-640.

Davies A.M., Kwong S.C.M. and Flather R.A. (2001) - The Wind Induced Circulation and the Interaction of Wind Forced and Tidally Driven Currents on the European Shelf. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 53, p. 493-521.

Flather R.A. (2001) - Storm surges, *In*: J.H. Steele, S.A. Thorpe, and K.K. Turekian (Editors), Encyclopedia of Ocean Sciences. *Academic Press*, Sand Diego, p. 2882-2892. doi :10.1006/nwos.2001.0124.

Hall P. and Davies A.M. (2002) - Analysis of time-varying wind-induced currents in the North Channel of the Irish Sea, using empirical orthogonal functions and harmonic decomposition, *Continental Shelf Research*, 22, p. 1269-1300.

Idier D., Y. Krien, R. Pedreros, N. Desramaut, Pineau-Guillou L. et Dumas F. (2010a) - Système de prévision de surcotes en Manche/Atlantique et Méditerranée : Étude bibliographique [D1]. Rapport BRGM/RP-58918-FR, 92 p., 30 fig., 5 tabl., 1 ann.

Idier D., Krien Y., Thiébot J., Pedreros R., avec la collaboration de Dumas F., Lecornu F., Pineau-Guillou L., Ohl P. et Paradis D. (2010b) - Système de prévision de surcotes en Manche/Atlantique et Méditerranée : Sites sélectionnés et collecte-traitement des données [D2]. Rapport BRGM/RP-59039-FR, 133 p., 78 fig., 24 tabl.

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

Makin V.K. (2005) - A note on the drag of the sea surface at hurricane winds. *Boundary-Layer Meteorol.*, 115, p. 169-176.

Moon I.-J., Ginis I., Hara T., Thomas B. (2007) - A Physics-based parameterization of air–sea momentum flux at high wind speeds and its impact on hurricane intensity predictions. *Mon. Wea. Rev.* 135, p. 2869-2878.

Nicolle A., Karpytchev M., Benoit M. (2009) - Amplification of the storm surges in shallow waters of the Pertuis Charentais (Bay of Biscay, France). *Ocean Dynamics*, doi: 10.1007/s10236-009-0219-0.

Paradis P. et Ohi P. (2011) - Validation Arpege : cinq évènements sélectionnés en Atlantique, Rapport Météo-France interne, le 26/07/2011.

Prandle D. and Wolf J. (1978) - The interaction of surge and tide in the North Sea and River Thames. *Geophys. J. R. Astr. Soc.*, 55: 2031216.

Rego J.L. and Li C. (2010) - Nonlinear terms in storm surge predictions: Effect of tide and shelf geometry with case study from Hurricane Rita. *J. Geophys. Res.*, 115, C06020, doi:10.1029/2009JC005285.

Ruessink B.G., Walstra D.J.R. and Southgate H.N. (2003) - Calibration and verification of a parametric wave model on barred beaches. *Coastal Eng.*, 48, p. 139-149.

Saha S et al. (2010) - The NCEP climate forecast system reanalysis. *Bull. Am. Met. Soc.* 91: p. 1015-1057.

Sénéchal N., Ardhuin F., Abadie S., Almar R., Arnaud G., Austin M., Barnoud J.M., Barthelemy E., Berni C. et al. (2008) - ECORS – Truc Vert 2008 : Qualification des modèles de houle et de morphodynamique. X^{èmes} Journées Nationales Génie Côtier-Génie Civil. Sophia-Antipolis. 14 au 16 octobre 2008.

Simon B. (1994) - Statistique des niveaux marins extrêmes le long des côtes de France. Rapport d'étude SHOM n° 001/94.

Stockdon H.F., Holman R.A., Howd P.A. and Sallenger Jr. A.H. (2006) - Empirical parameterization of setup, swash, and runoff. *Coastal Eng.*, 53: p. 573-588.

Zhang W.Z., Hong H.S., Shanga S.P., Chen D.W., Chai F. (2007) - A two-way nested coupled tide-surge model for the Taiwan Strait. *Continental Shelf Research*, 27, p. 1548-1567.

Wolf J. (2009) - Coastal flooding: impacts of coupled wave–surge–tide models. *Nat. Hazards* 49:241-260, DOI 10.1007/s11069-008-9316-5.

Wu J. (1982) - Wind-stress coefficients over sea surface from breeze to hurricane. *J. Geophys. Res.* 87, p. 9704-9706.

Annexe 1

Correction de la bathymétrie

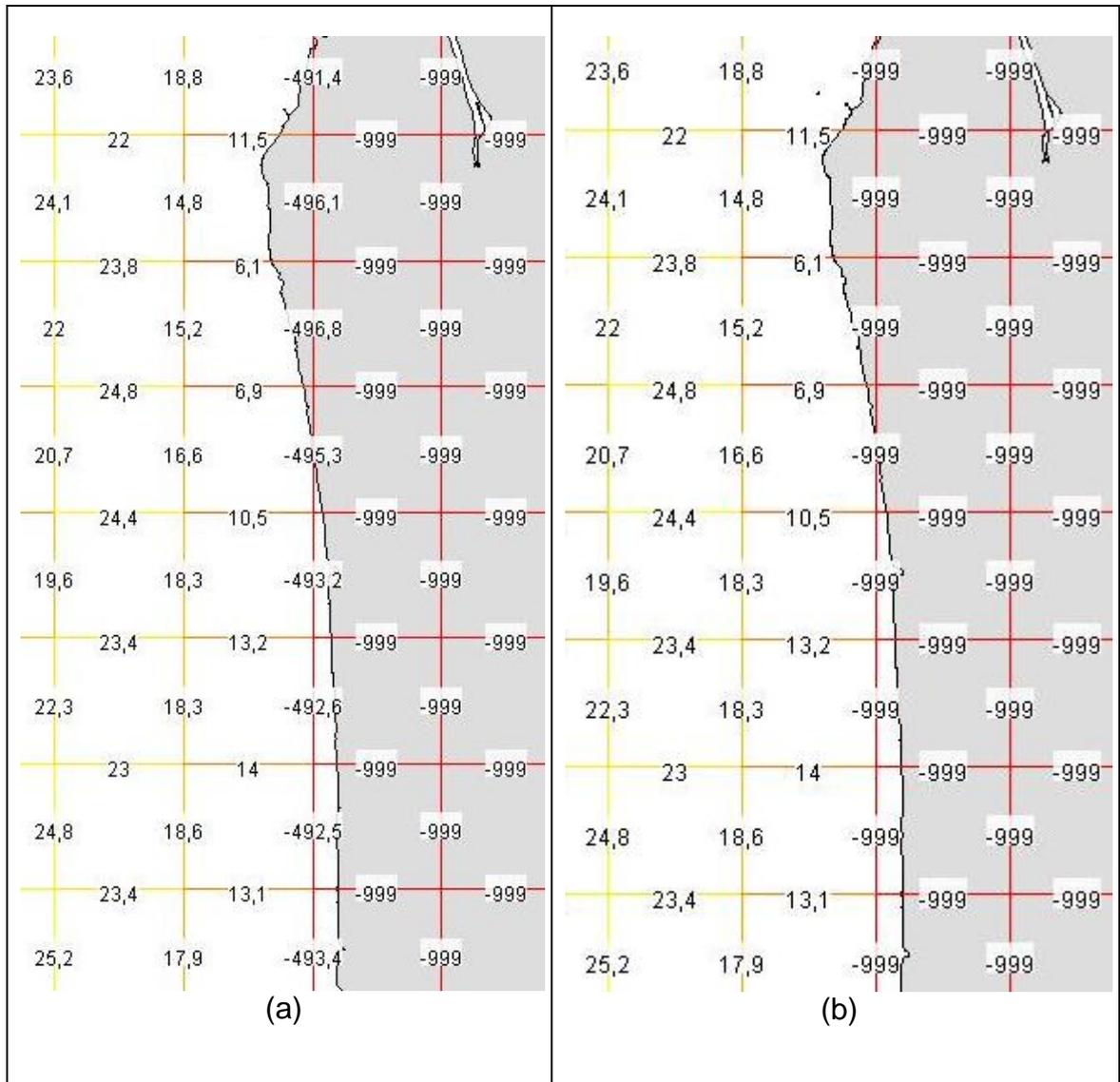


Figure 59 : Bathymétrie de la configuration MARS2D (a) initiale et (b) corrigée au niveau de la côte.

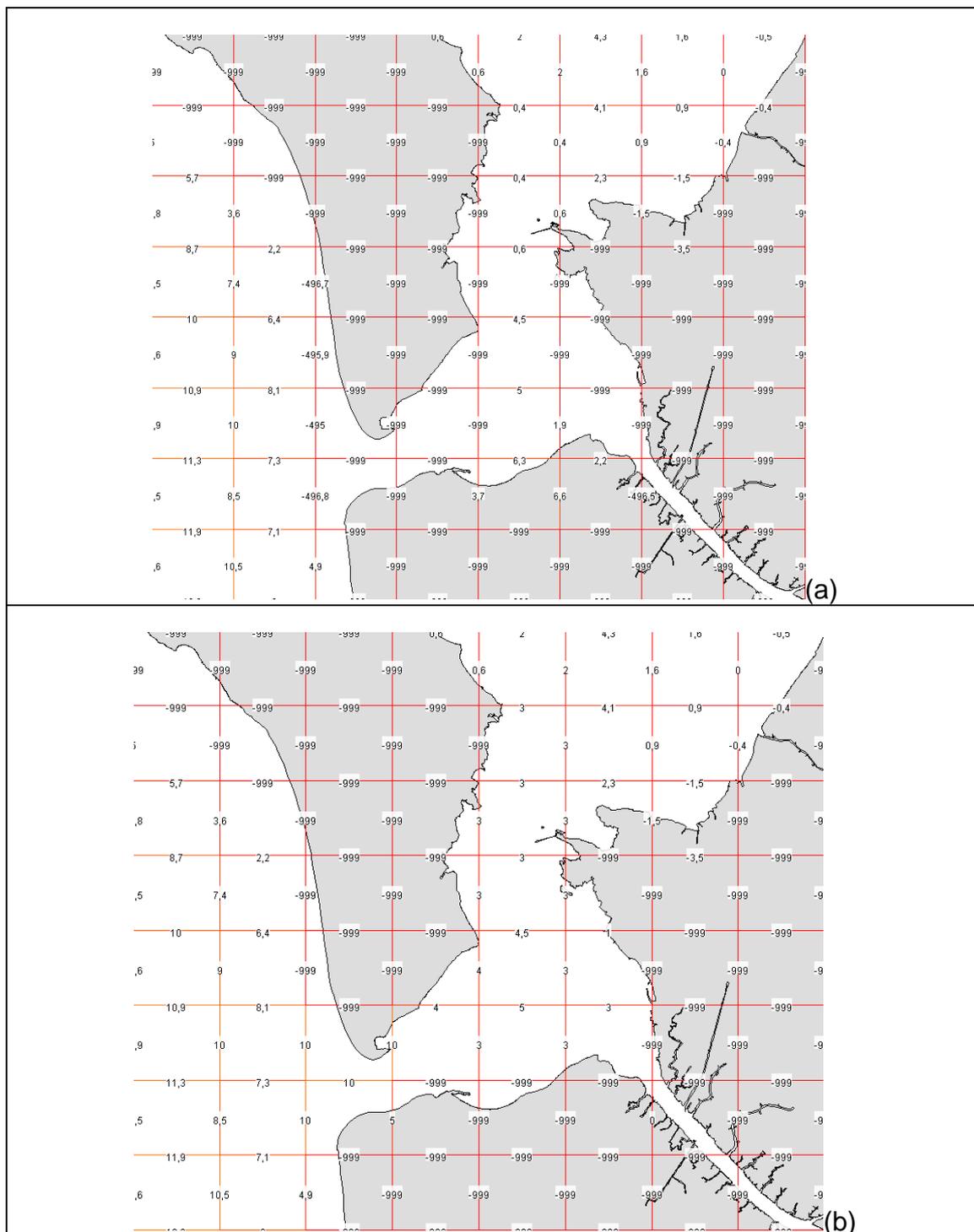


Figure 60 : Bathymétrie de la configuration MARS2D (a) initiale et (b) corrigée au niveau du pertuis de Maumusson.

Annexe 2

Analyse de processus (interaction marée-surcotes)

Cette annexe présente les profils temporels des différentes composantes de la surcote, pour chacun des ports étudiés et pour chaque évènement.

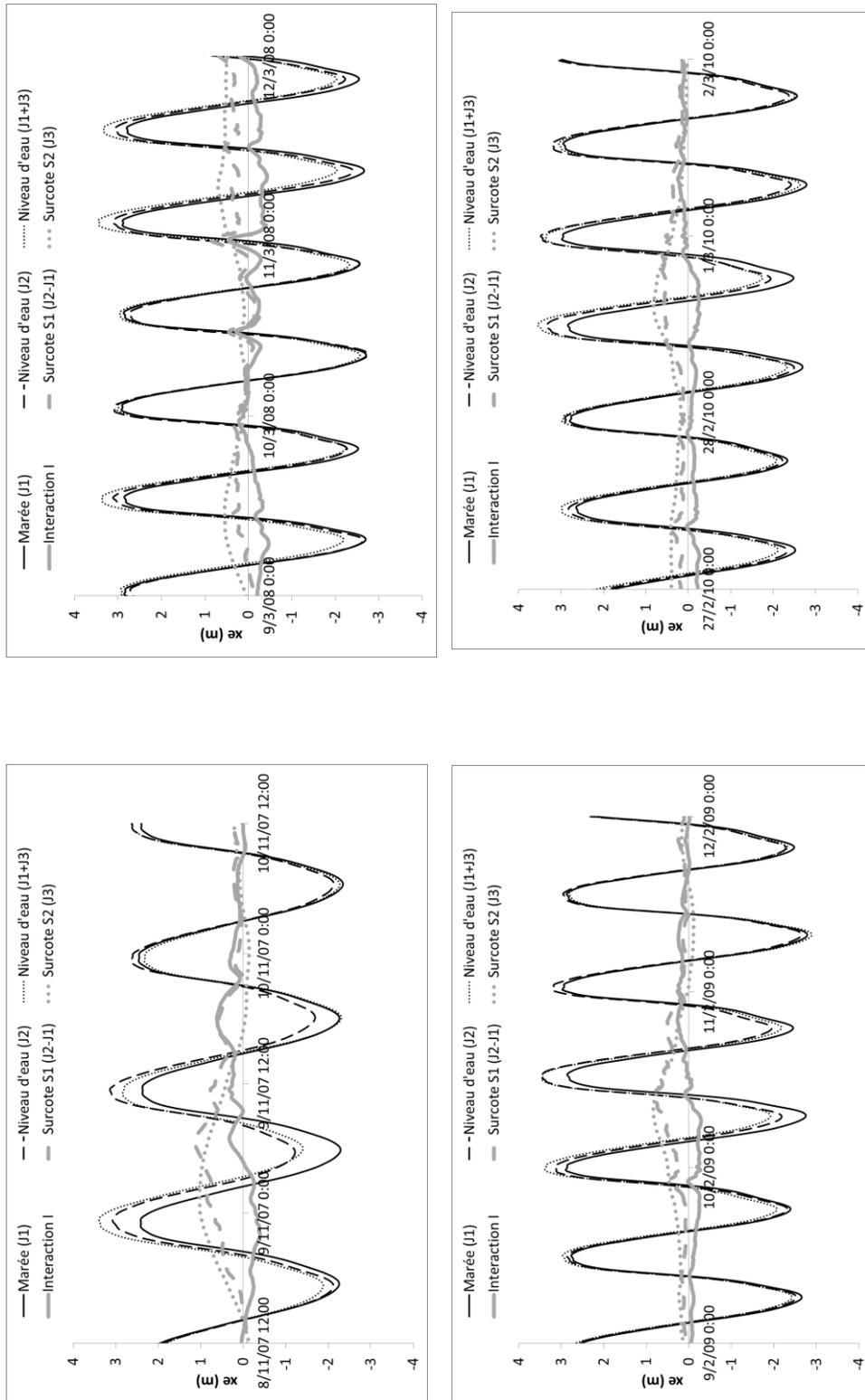


Figure 61 : Profils temporels de niveaux d'eau et surcotes à Dunkerque.

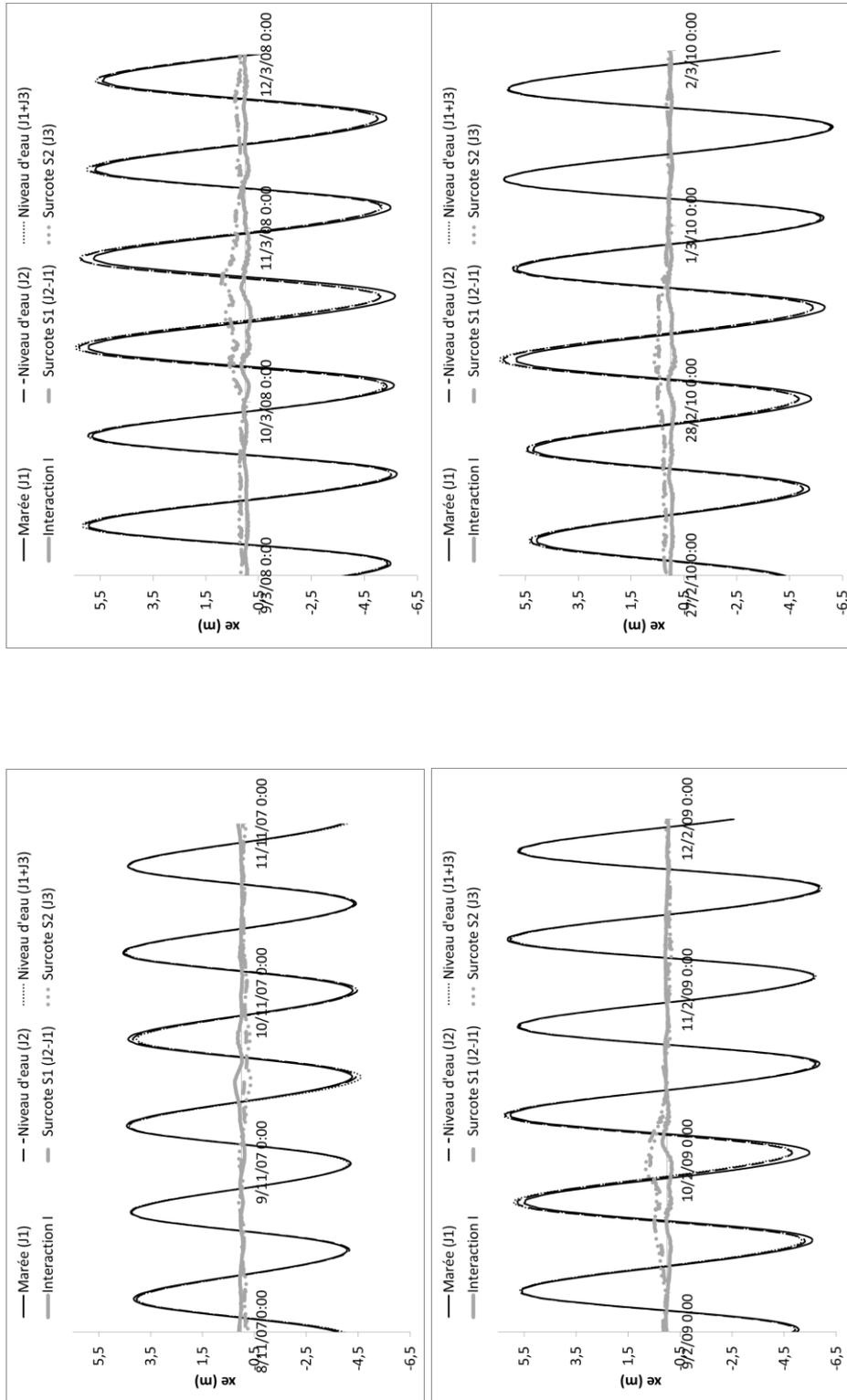


Figure 62 : Profils temporels de niveaux d'eau et surcotes à Saint-Malo.

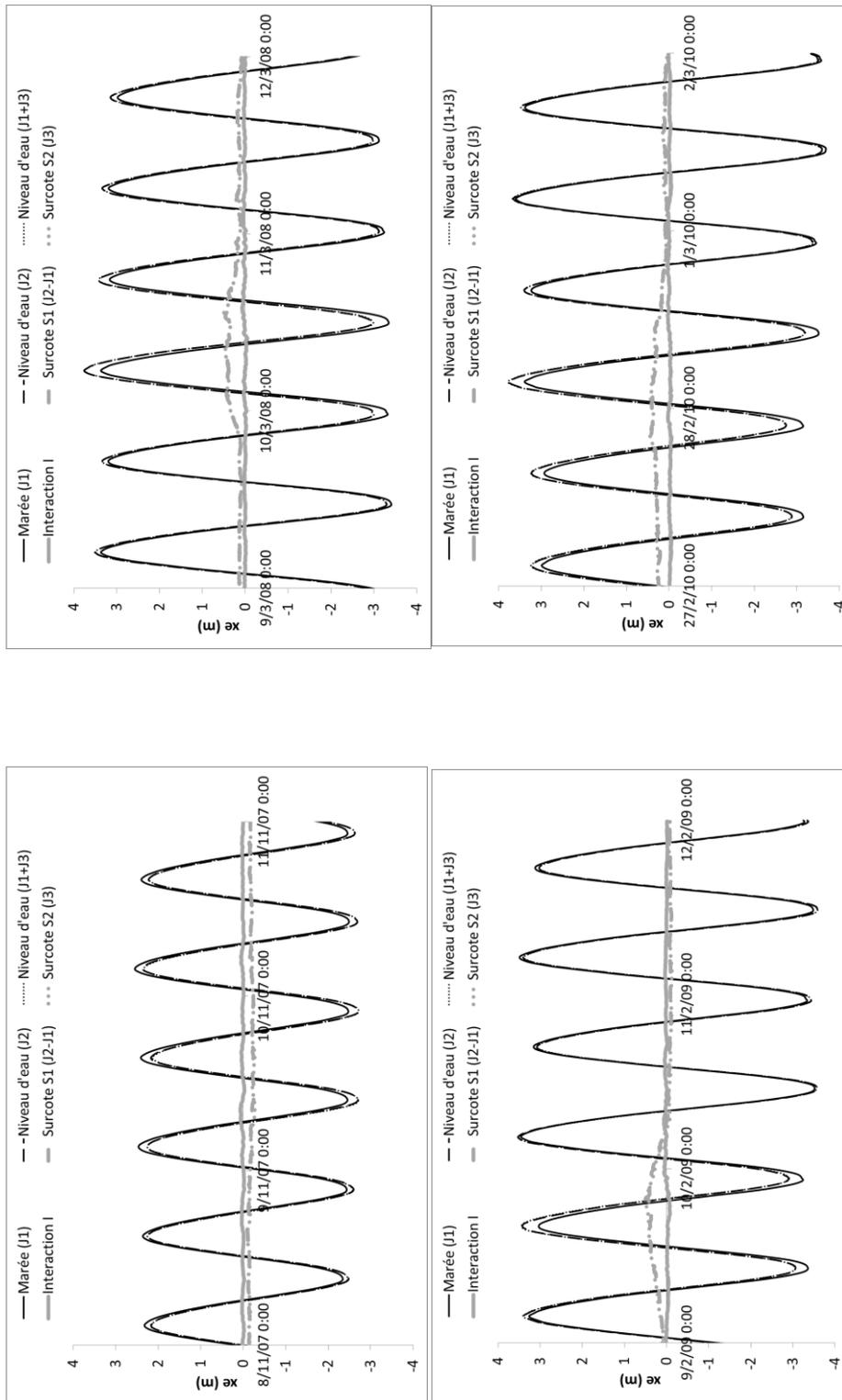


Figure 63 : Profils temporels de niveaux d'eau et surcotes au Conquet.

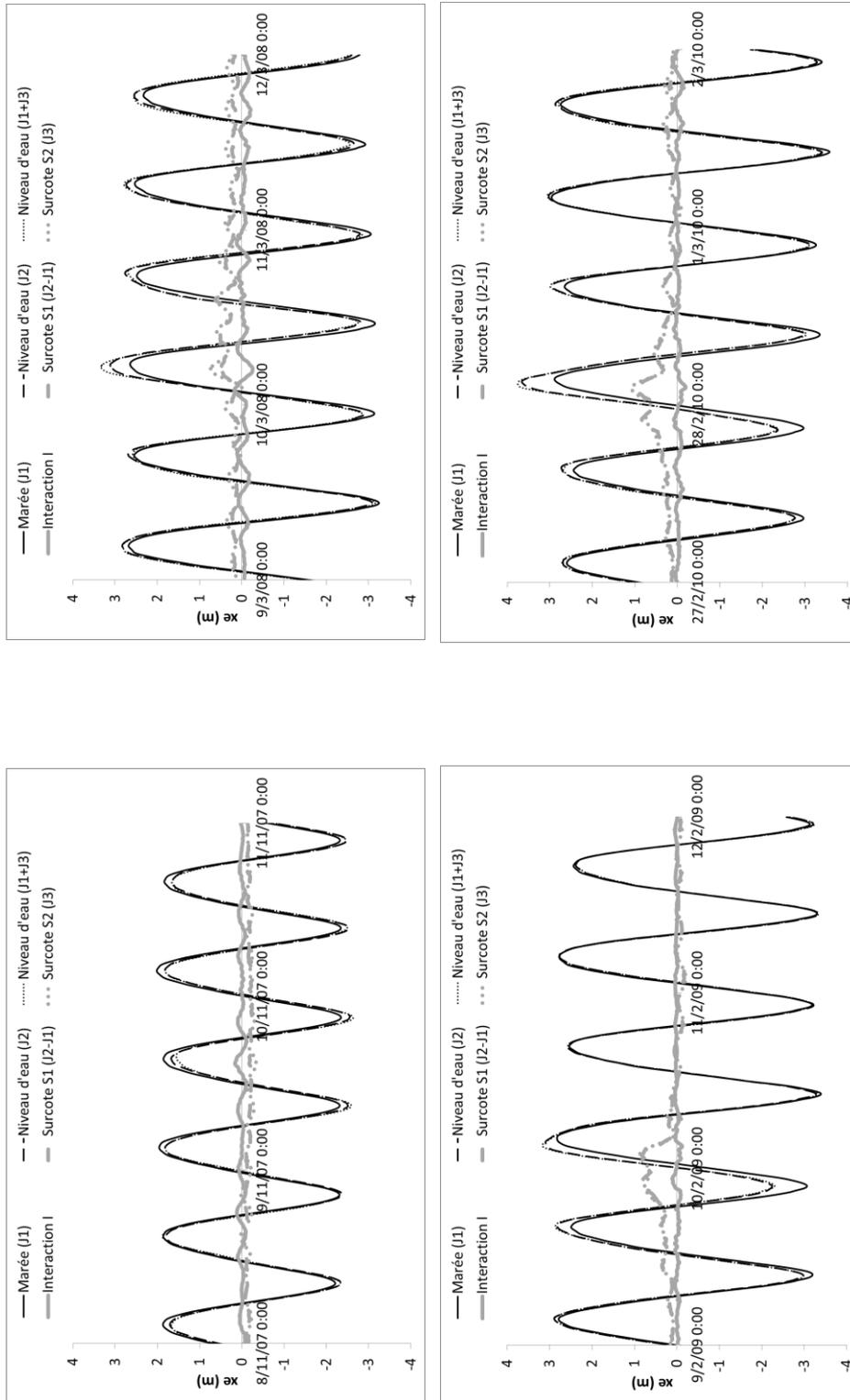


Figure 64 : Profils temporels de niveaux d'eau et surcotes à La Rochelle.

Annexe 3

Formulations testées pour le calcul du coefficient de traînée

Les différentes formulations de coefficient de traînée testées dans ce rapport (Wu, Moon, Makin, Charnock) sont résumées ici.

Wu (1982)

$$C_D = (0.8 + 0.065 \times U_{10m}) \cdot 10^{-3}$$

Moon et al. (2007)

$$C_D = \frac{u_*^2}{u_z^2} = \kappa^2 \left[\ln \frac{z}{z_0} \right]^{-2} \text{ à } z = 10 \text{ m}$$

avec

$$\begin{cases} z_0 = \frac{0.0185}{g} (0.001 \times U_{10m}^2 + 0.028 \times U_{10m})^2 \text{ pour } U_{10m} \leq 12,5 \text{ m.s}^{-1} \\ z_0 = (0.085 \times U_{10m} - 0.58) \times 10^{-3} \text{ pour } U_{10m} > 12,5 \text{ m.s}^{-1} \end{cases} \quad (1)$$

où z_0 la longueur de rugosité, U_{10m} la vitesse du vent à 10 m et g la gravité.

z_0 peut aussi s'exprimer en fonction de la vitesse de friction u^* :

$$\begin{cases} z_0 = \frac{0.0185}{g} \times (u_*)^2 \text{ pour } U_{10m} \leq 12,5 \text{ m.s}^{-1} \\ z_0 = [0.085(-0.56 \times (u_*)^2 + 20.255 \times u_* + 2.458) - 0.58] \times 10^{-3} \text{ pour } U_{10m} > 12,5 \text{ m.s}^{-1} \end{cases} \quad (2)$$

Makin (2005)

$$C_D = \frac{u_*^2}{u_z^2} = \kappa^2 \left[\ln \frac{z}{z_0} \right]^{-2} \text{ à } z = 10 \text{ m}$$

avec

$$z_0 = c_l^{(1-1/\omega)} c_{z_0}^{1/\omega} \frac{u_*^2}{g}$$

où :

- g : accélération de la pesanteur,
- $\omega = \min(1, a_{cr} / \kappa u_*)$, $a_{cr} = 0,64$ m/s,
- $c_i = 10$,
- z : altitude (prise égale à 10 m),
- c_{z0} : coefficient de Charnock (égal à 0,01).

Charnock (1955)

$$C_D = \frac{u_*^2}{u_z^2} = \kappa^2 \left[\ln \frac{z}{z_0} \right]^{-2} \text{ à } z = 10\text{m}$$

avec

$$z_0 = \alpha_c \frac{u_*^2}{g}$$

où :

- u^* : vitesse de friction,
- z_0 : longueur de rugosité,
- α_c : paramètre de Charnock (constante).

$$g = 9,81 \text{ m.s}^{-2}$$

Annexe 4

Coefficients de traînée pour les évènements sélectionnés

Dans cette annexe, les cartes de coefficients de traînée de Moon *et al.* (2007) et Charnock avec en entrée les caractéristiques de vagues issues du projet IOWAGA sont tracées pour les évènements de mars 2008, février 2009 et février 2010.

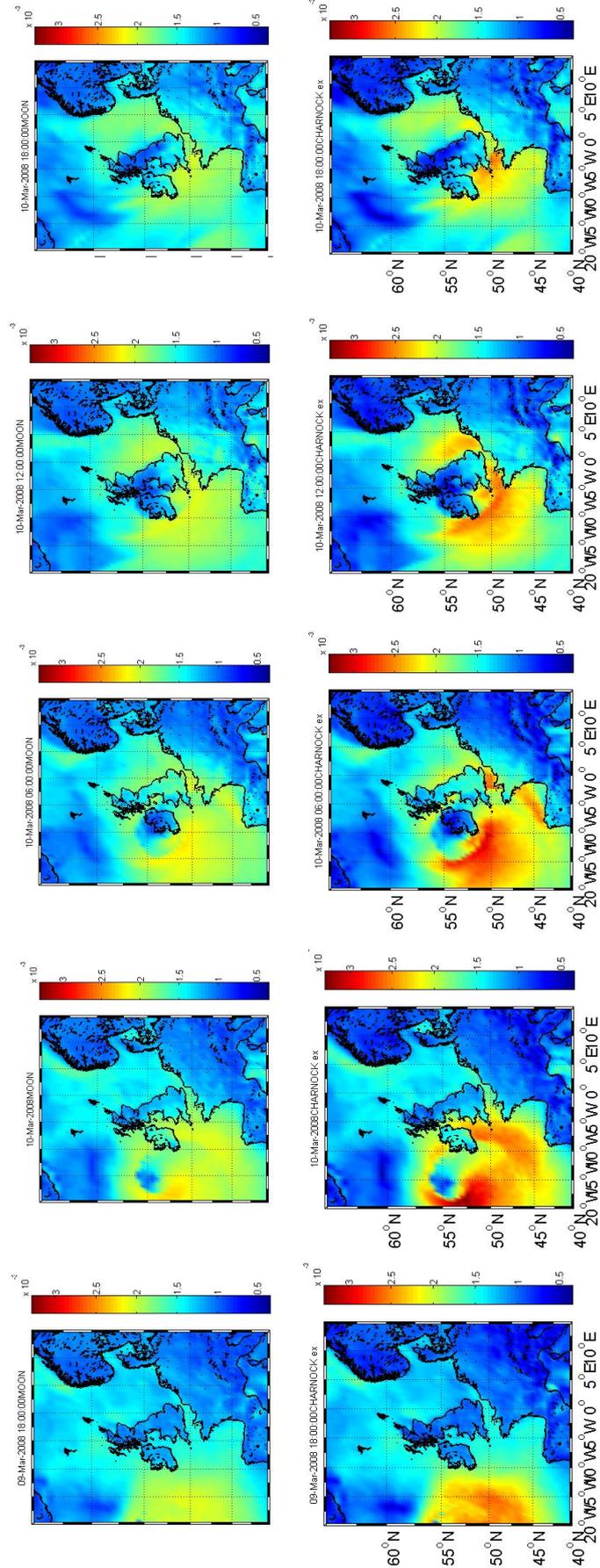


Figure 65 : Cartes des coefficients de traînée issus de la paramétrisation de Moon (en haut) et Charnock (en bas) pour la tempête Johanna (du 09/03/2008-18h au 10/03/2008-18h).

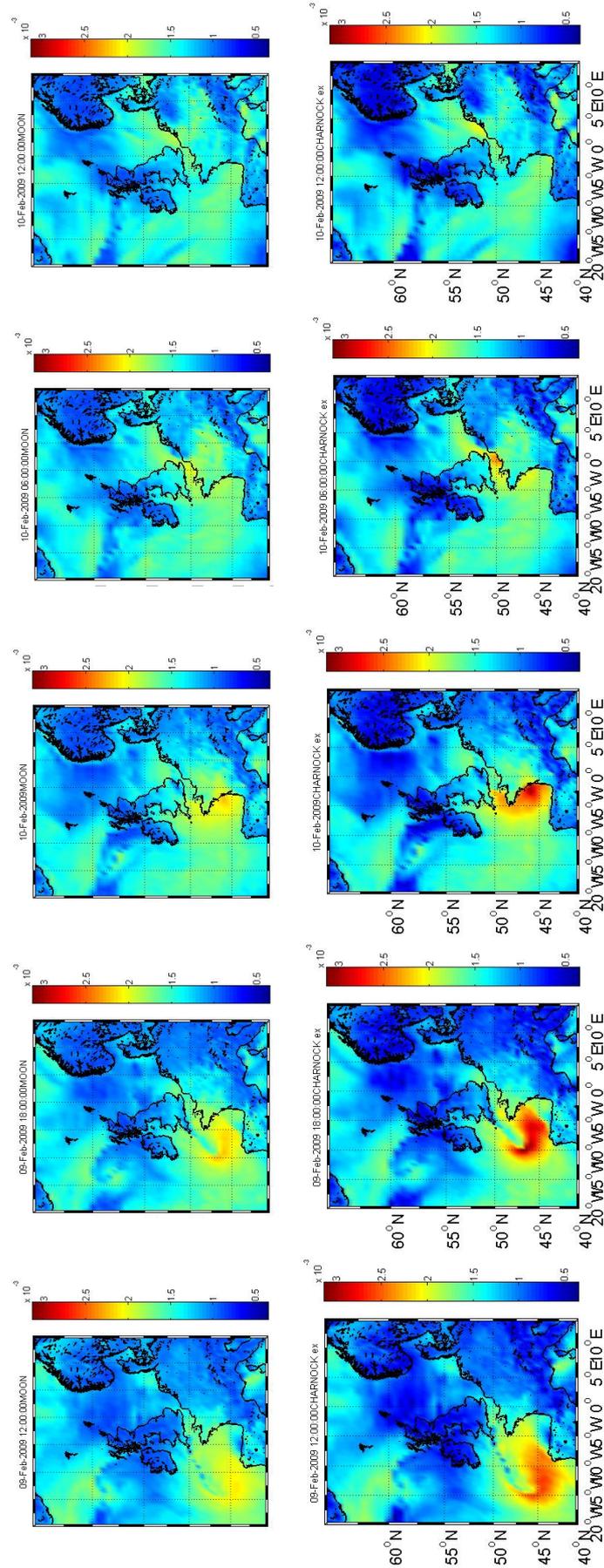


Figure 66 : Cartes des coefficients de traînée issus de la paramétrisation de Moon (en haut) et Charnock (en bas) pour la tempête Quentin (du 09/03/2009-12h au 10/02/2009-12h).

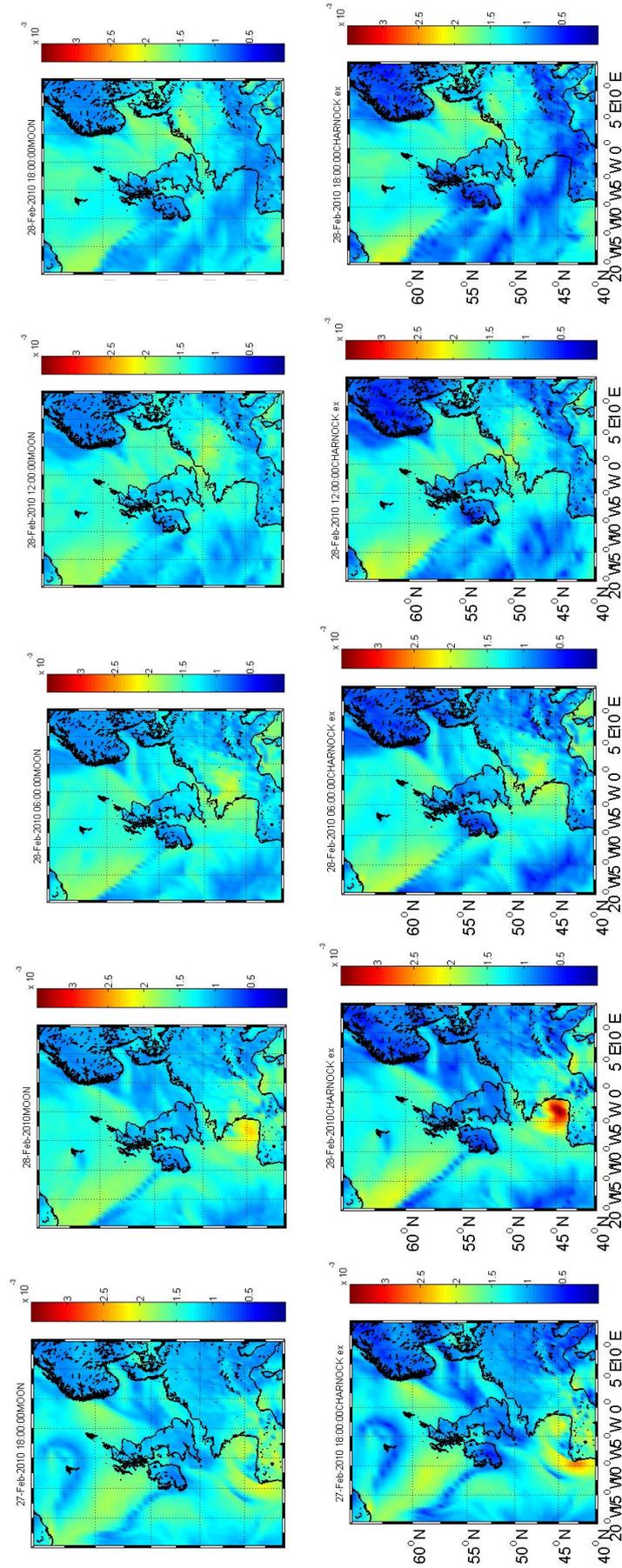


Figure 67 : Cartes des coefficients de traînée issus de la paramétrisation de Moon (en haut) et Charnock (en bas) pour la tempête Xynthia (du 27/02/2010-18h au 28/02/2010-18h).

Annexe 5

Critères de validation événementielle pour les simulations réalisées pour les différents évènements aux quatre ports

Dans cette annexe, les statistiques générales pour les différentes simulations réalisées avec MARS2D dans ce projet pour les quatre évènements (novembre 2007, tempêtes Johanna, Quentin et Xynthia) aux quatre ports d'étude sont présentées sous forme d'histogrammes. Ces simulations ont été réalisées pour l'étude de sensibilité au coefficient de traînée (voir partie 0) et l'étude de sensibilité à la résolution spatio-temporelle des données météorologiques (voir partie 4.1.2.).

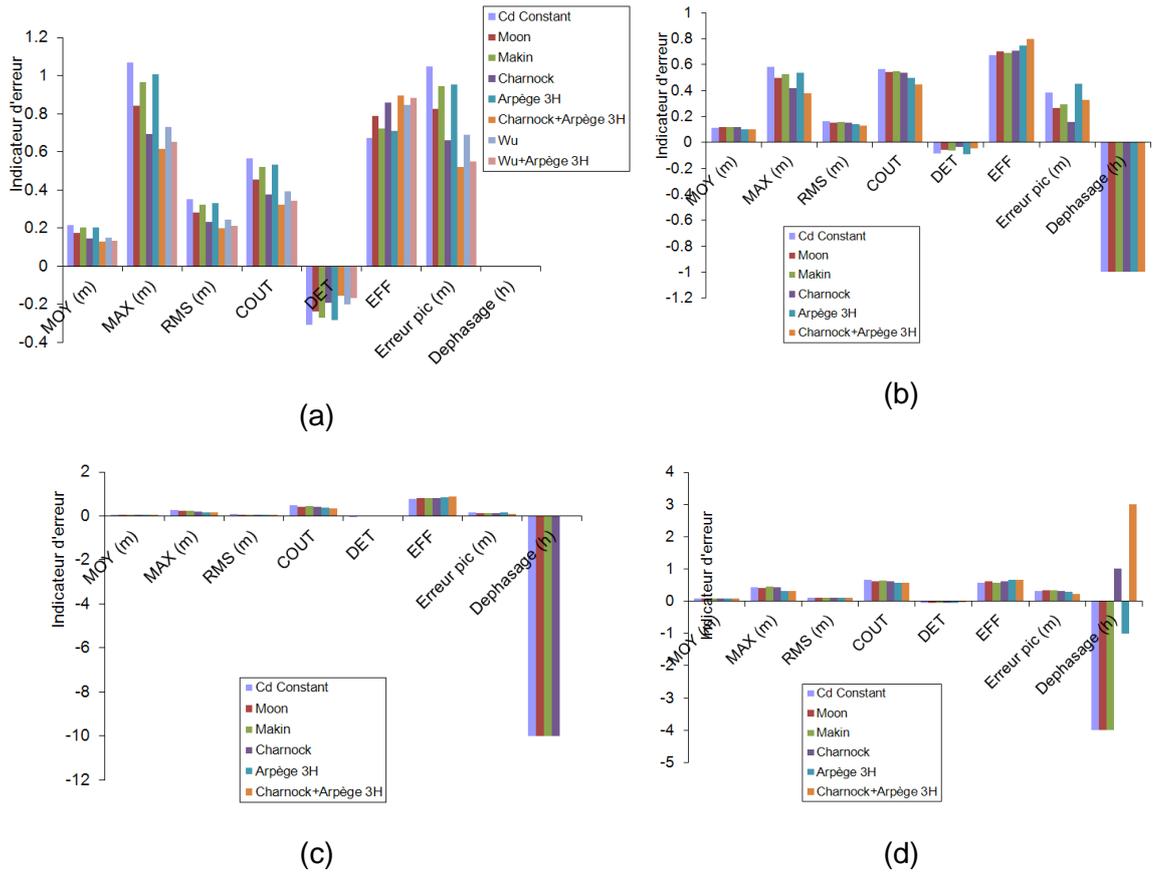


Figure 68 : Critères de validation événementielle pour les différentes configurations MARS2D et pour les événements de novembre 2007 à Dunkerque (a) et Johanna à Saint-Malo (b), au Conquet (c) et à La Rochelle (d).

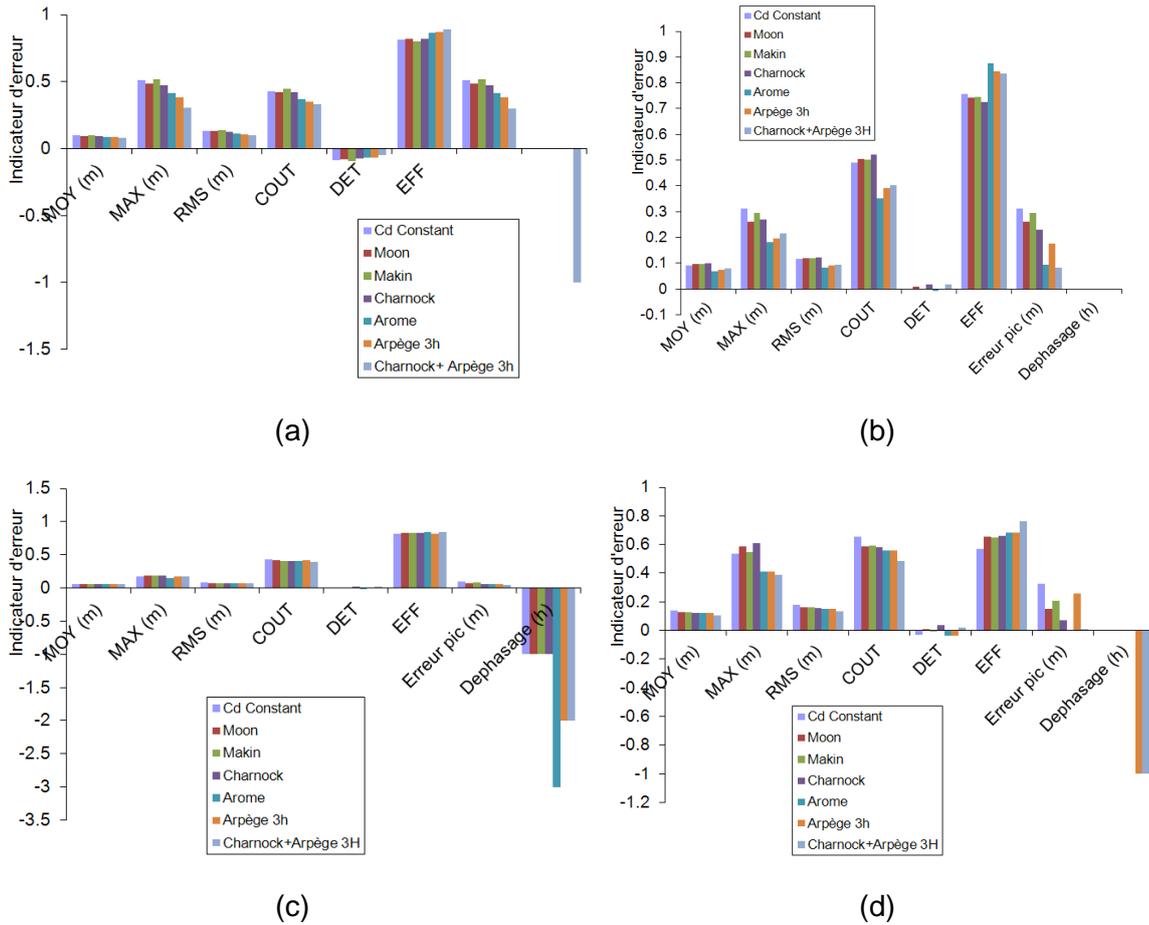
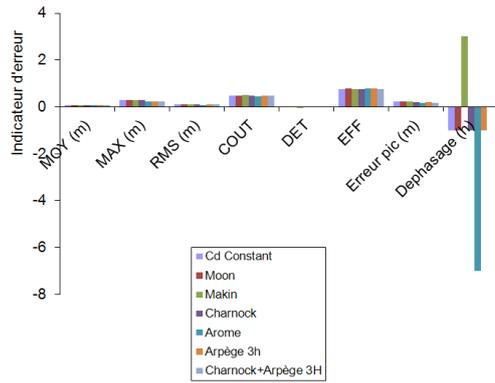
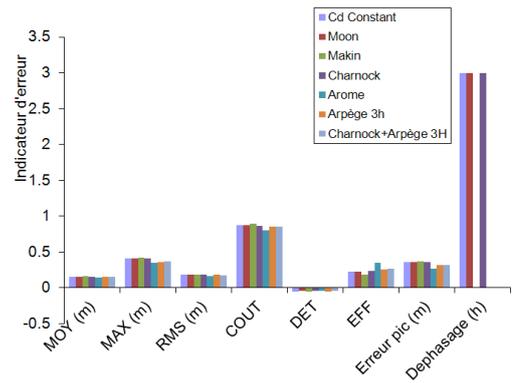


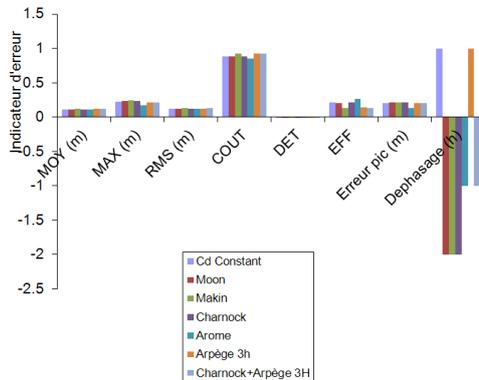
Figure 69 : Critères de validation événementielle pour les différentes configurations MARS2D et pour l'évènement Quentin à Dunkerque (a), à Saint-Malo (b), au Conquet (c) et à La Rochelle (d).



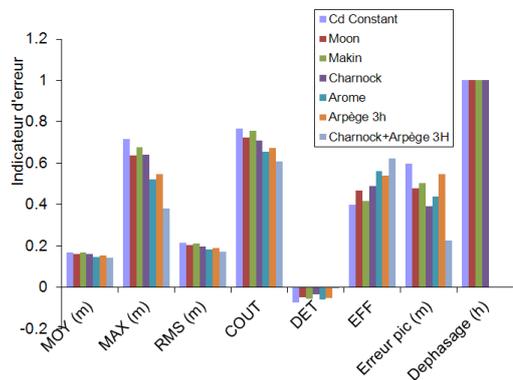
(a)



(b)



(c)



(d)

Figure 70 : Critères de validation événementielle pour les différentes configurations MARS2D et pour l'évènement Xynthia à Dunkerque (a), à Saint-Malo (b), au Conquet (c) et à La Rochelle (d).

Annexe 6

Étude de sensibilité complémentaire : intercomparaison des paramétrisations

Ce test complémentaire permet de comparer les résultats obtenus avec les configurations suivantes : (CD CST, WU, MOON, MAKIN, CHARNOCK + ARPEGE 6H) et (CD CST, WU + ARPEGE 3H).

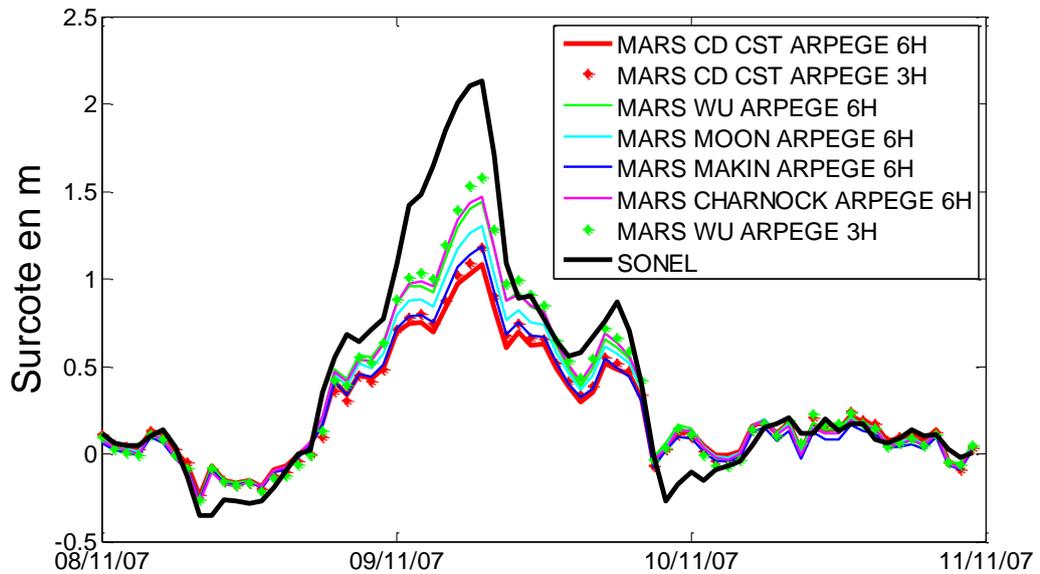


Figure 71 : Séries temporelles des surcotes issues de MARS2D avec différentes formulations de coefficient de traînée et forçages météorologiques, SONEL (noir) pour la tempête de novembre 2007, à Dunkerque.

La combinaison de la formulation de Wu (1982) avec les forçages ARPEGE 3H a permis d'améliorer sensiblement la reproduction du signal de surcote à Dunkerque (Figure 71) et de réduire les erreurs maximales de 8 cm par rapport aux résultats obtenus avec cette même formulation de Wu (1982) et les forçages ARPEGE 6H.

Annexe 7

Étude IFREMER : Comparaison des données ARPEGE/AROME et du diffusionomètre QuikSCAT

Texte rédigé par L. Pineau-Guillou

Comparaison des données Arpege/Arome et du diffusiomètre QuikSCAT

Lucia Pineau

1 Données Arpege et Arome

1.1 Données disponibles

Les données suivantes ont été comparées pour les 4 événements retenus pour l'étude :

- Arpege 6h (archivage de données temps réel),
- Arpege 3h (réanalyse fournie par Météo-France spécifiquement pour l'étude),
- Arome 1h (archivage de données temps réel).

Pour les données antérieures à avril 2009, les données Arpege 6h, fournies par Météo-France, correspondent à 4 analyses par jour. Depuis avril 2009, il s'agit d'une analyse à 0h et 3 prévisions calculées à 0h pour 6h, 12h et 18h.

Les données Arpege 3h sont des analyses à 0h, 6h, 12h et 18h, et des prévisions à 3h, 9h, 15h et 21h calculées lors de l'analyse précédente de 3 heures (par exemple la prévision à 9h est calculé à 6h).

Les données Arome 1h sont disponibles depuis décembre 2008. De 1h à 24h, il s'agit d'une prévision basée sur l'analyse à 0h. L'analyse à 0h n'étant pas archivée dans le « best_estimate » (car absence de données de nébulosité à cette échéance), il ne s'agit donc que de prévisions (y compris à 0h).

Pour chacun des événements, les données disponibles sont récapitulées dans le Tableau 1.

Données météo	Événement 1 09/11/2007	Événement 2 10/03/2008 (Johanna)	Événement 3 10/02/2009 (Quentin)	Événement 4 28/02/2010 (Xynthia)
Arpege 6h	4 analyses / jour	4 analyses / jour	4 analyses / jour	1 analyse à 0h et 3 prévisions / jour
Arpege 3h	Disponible	Disponible	Disponible	Disponible
Arome 1h	Non disponible	Non disponible	Disponible	Disponible

Tableau 1 : Données météo disponibles pendant les 4 événements sélectionnés

1.2 Comparaison des données

Les données ont été comparées pour chaque événement pendant 5 jours : 2 jours avant et 2 jours après l'événement. Les comparaisons ont été faites pour l'intensité et la direction du vent, et pour la pression atmosphérique.

1.2.1 Intensité du vent

Comparaison Arpege 6h – Arpege 3h

Les comparaisons pour les événements 1 et 2 sont présentées Figure 1. Pour ces deux événements, les données Arome ne sont pas disponibles. Les valeurs Arpege 6h et Arpege 3h sont identiques toutes les 6h. Le sous échantillonnage des données Arpege 6h par rapport aux données Arpege 3h entraîne des écarts globalement inférieurs à 1 m/s. Cependant, certains pics sont sous-estimés, comme par exemple le pic de la tempête de mars 2008, qui dépasse 25 m/s au Conquet avec Arpege 3h, alors qu'il est inférieur à 20 m/s avec Arpege 6h. La sous-estimation du pic peut donc atteindre **environ 6 m/s**.

Les comparaisons pour les événements 3 et 4 sont présentées Figure 2. Certains pics correspondent entre Arpege 6h et 3h, comme par exemple la tempête de février 2009, à La Rochelle. Mais parfois, les écarts entre Arpege 6h et Arpege 3h peuvent devenir assez importants ; par exemple lors de la tempête Xynthia, le pic dépasse 26 m/s à La Rochelle avec Arpege 3h, alors qu'il n'est que de 18 m/s avec Arpege 6h. La sous-estimation du pic atteint ici **environ 8 m/s**.

Pour l'événement 4, les données Arpege 6h sont 1 analyse et 3 prévisions, ce qui explique les écarts toutes les 6h entre Arpege 6h et Arpege 3h (ce qui n'était pas le cas pour les événements 1, 2 et 3). Ces écarts sont en moyenne faibles (< 0.4 m/s en moyenne selon les ports, avec un écart-type maximum de 0.7 m/s), mais l'écart maximal peut dépasser 2 m/s (2,6 m/s à Dunkerque).

Comparaison Arpege 3h – Arome 1h

Les écarts moyens et maximums ont été calculés toutes les 3h sur les 5 jours de comparaison, pour les événements 3 et 4.

Les écarts moyens sont synthétisés Tableau 2. Pour les 4 ports, ils restent **inférieurs à 1,6 m/s** avec un écart-type inférieur à 2,2 m/s (ces valeurs maximales sont atteintes à Saint-Malo pour l'événement 3).

Les écarts maximums sont synthétisés dans le Tableau 3, ils varient **de 4 à 8 m/s**. L'écart maximum au Conquet pour l'événement 3, correspond à un pic à 10 m/s en fin de journée le 11/02/2009 qui n'apparaît pas avec Arpege (Figure 2).

Événement	Port	Ecart moyen (m/s)	Ecart type (m/s)
Événement 3 du 8/2/2009 au 11/2/2009	La Rochelle	- 0,2 m/s	1,6 m/s
	Le Conquet	0,5 m/s	2 m/s
	Saint-Malo	-1,6 m/s	2,2 m/s
	Dunkerque	0,5 m/s	1,4 m/s
Événement 4 du 26/2/2010 au 2/3/2010	La Rochelle	0,2 m/s	2,1 m/s
	Le Conquet	0,8 m/s	1,5 m/s
	Saint-Malo	-1,2 m/s	1,8 m/s
	Dunkerque	0,7 m/s	1,5 m/s

Tableau 2 : Ecart moyen entre Arpege 3h et Arome 1h pour les événements 3 et 4

Événement	Port	Ecart max. (m/s)	Arpege 3h (m/s)	Arome 1h (m/s)	Ecart max. (%)
Événement 3 du 8/2/2009 au 11/2/2009	La Rochelle	6,4 m/s	23,7 m/s	17,3 m/s	37%
	Le Conquet	-6,8 m/s	3,4 m/s	10,2 m/s	198%
	Saint-Malo	-7,1 m/s	4,1 m/s	11,2 m/s	172%
	Dunkerque	4,2 m/s	6,2 m/s	2,6 m/s	162%
Événement 4 du 26/2/2010 au 2/3/2010	La Rochelle	8,2 m/s	13,2 m/s	5,0 m/s	164%
	Le Conquet	4,3 m/s	13,0 m/s	8,7 m/s	50%
	Saint-Malo	-7,2 m/s	4,8 m/s	12,0 m/s	151%
	Dunkerque	4,8 m/s	15,0 m/s	10,2 m/s	47%

Tableau 3 : Ecart maximum entre Arpege 3h et Arome 1h pour les événements 3 et 4

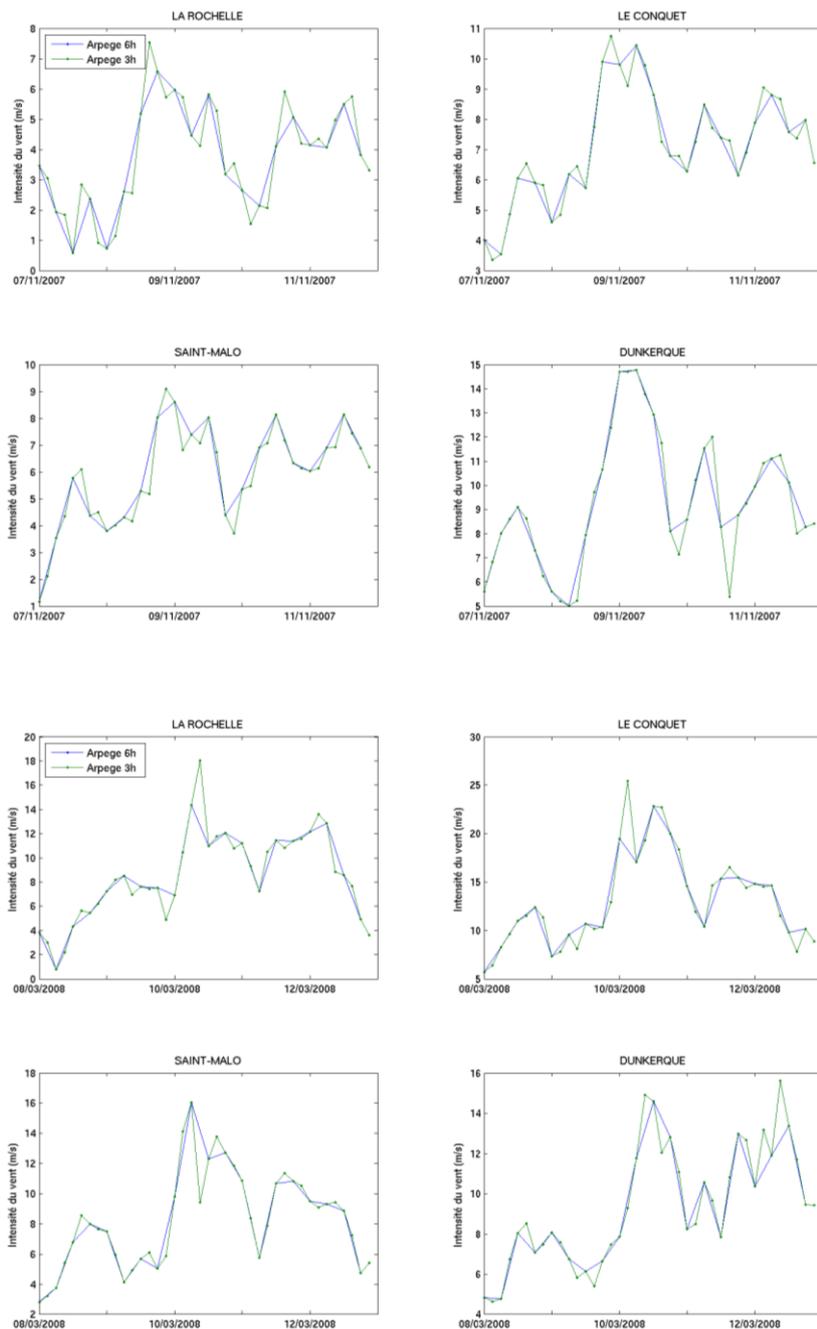


Figure 1 : Intensité du vent pendant les événements 1 et 2 (9/11/2007 et 10/03/2008)

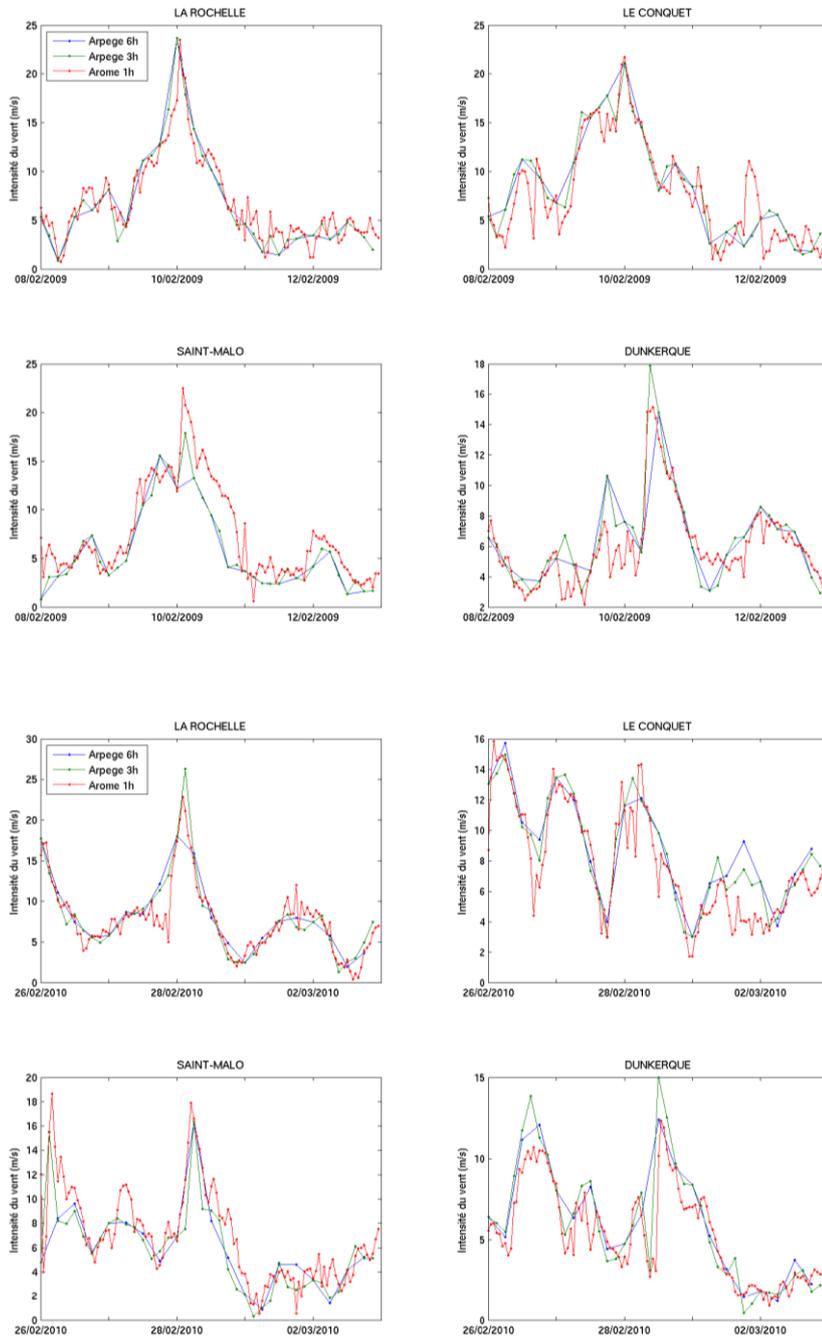


Figure 2 : Intensité du vent pendant les événements 3 et 4 (10/02/2009 et 28/02/2010)

1.2.2 Direction du vent

Les comparaisons pour les événements 1 et 2 sont présentées Figure 3, et Figure 4 pour les événements 3 et 4. Le sous échantillonnage des données Arpege 6h par rapport aux données Arpege 3h entraîne des différences globalement **de l'ordre de 10°**. Il n'existe pas d'écarts très importants.

Les écarts entre Arpege 3h et Arome 1h sont globalement de l'ordre de 10°, mais peuvent être par moment bien plus importants. Par exemple, pour l'événement 3 à St-Malo, le 11/02/2009 à 9h, la direction est supérieure à 340° pour Arome 1h, alors qu'elle dépasse à peine 240° pour Arpege 3h. La différence peut donc **atteindre 100°**. Pour l'événement 4 à St-Malo, le 1/03/2010 à 3h, la direction dépasse 240° pour Arome 1h alors qu'elle n'est que de 90° pour Arpege 3h, soit une différence de l'ordre de 50°.

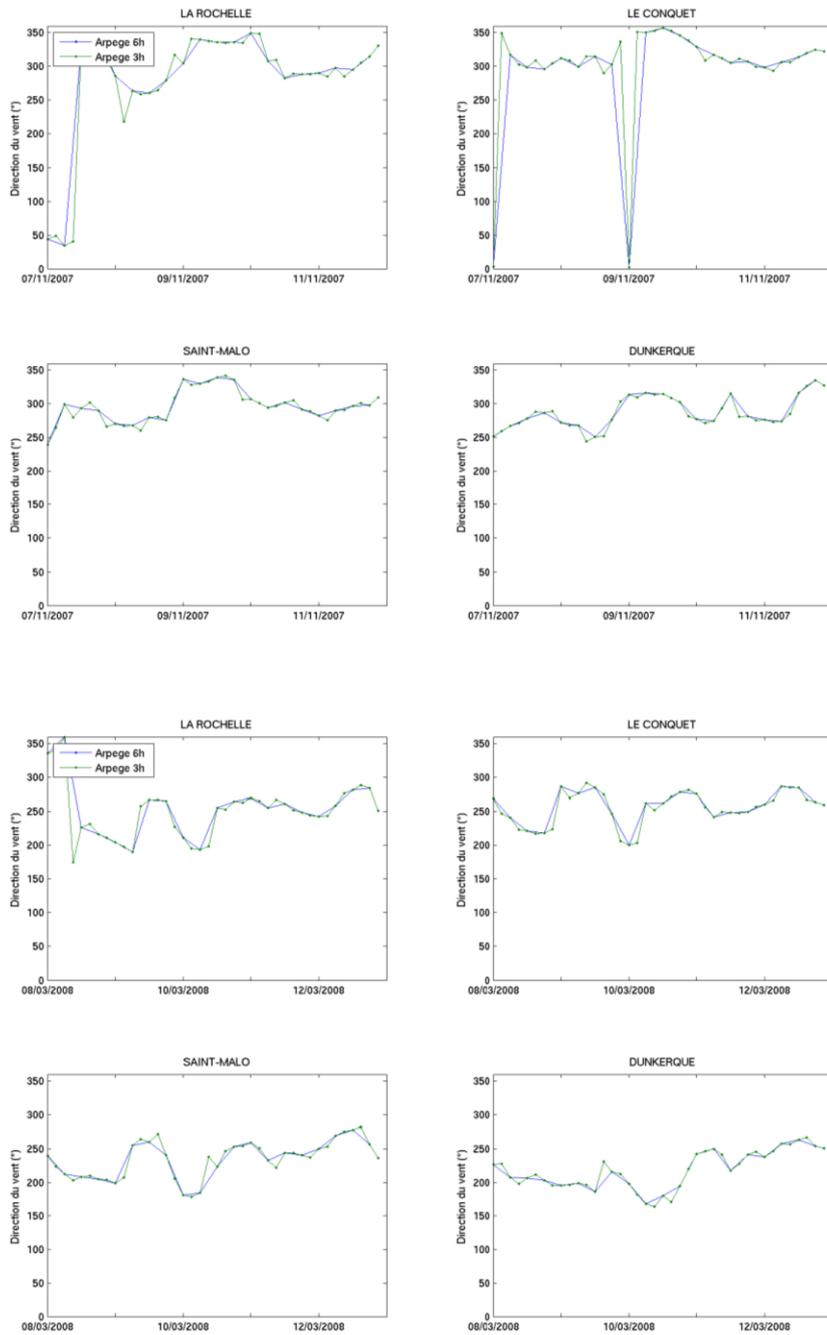


Figure 3 : Direction du vent pendant les événements 1 et 2 (9/11/2007 et 10/03/2008)

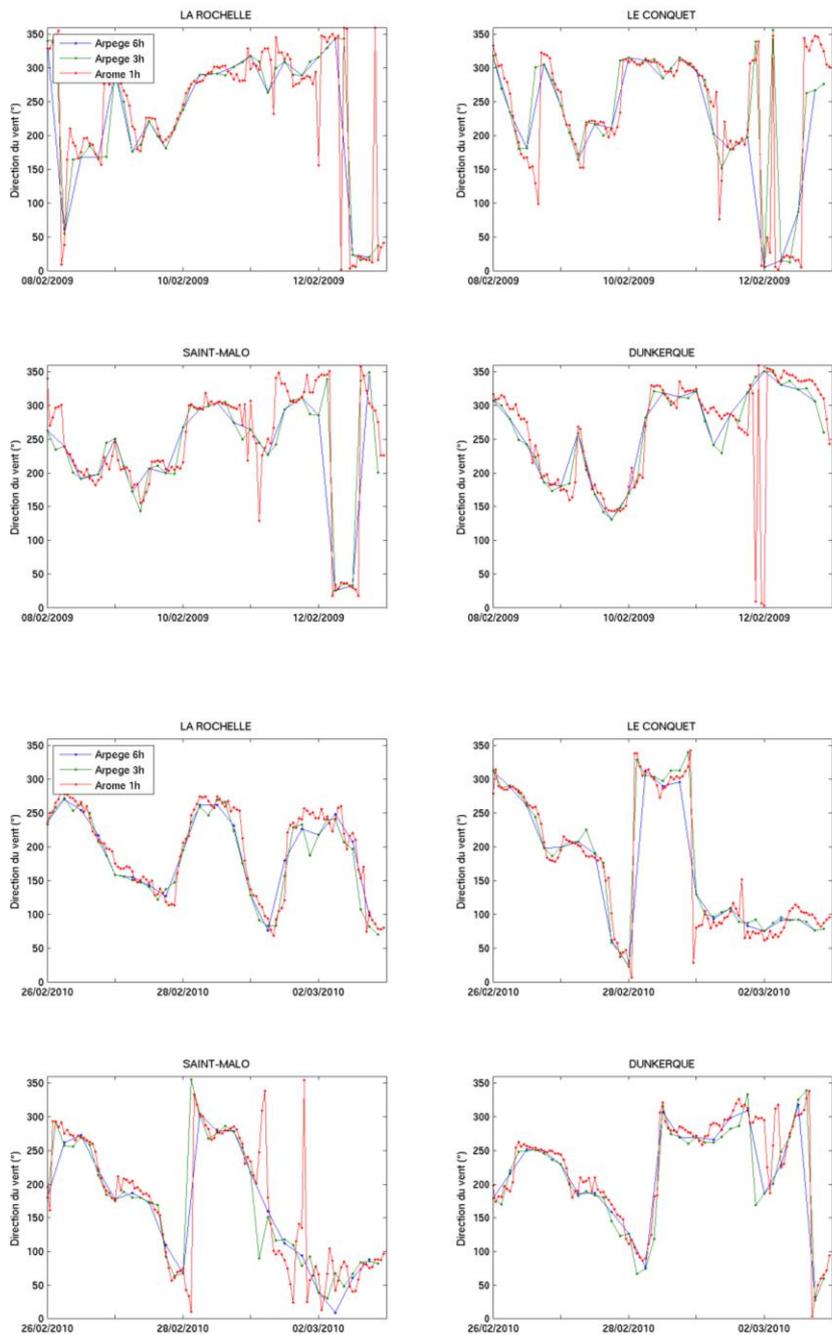


Figure 4 : Direction du vent pendant les événements 3 et 4 (10/02/2009 et 28/02/2010)

1.2.3 Pression atmosphérique

Les comparaisons pour les événements 1 et 2 sont présentées Figure 5, et Figure 6 pour les événements 3 et 4. Le sous échantillonnage des données Arpege 6h par rapport aux données Arpege 3h entraîne des différences faibles, globalement **inférieures à 1hPa**. L'écart peut être parfois plus important, comme par exemple pendant l'événement 4 (Xynthia), le minimum de pression atmosphérique est de 975 hPa pour Arpege 6h alors qu'il est de 971 hPa pour Arpege 3h soit une différence de **4 hPa**.

Les données Arome 1h sont globalement proche de Arpege (écarts inférieurs à 1 hPa), mais les pics peuvent parfois différer comme par exemple pour l'événement 4 (Xynthia) au Conquet où Arpege 6h et 3h présentent un minimum de 980 hPa alors que Arome descend à 973 hPa, soit un écart de **7 hPa**.

On note également qu'Arome enregistre une légère chute de pression lors de l'événement 3 le 11/02/2009 en fin de journée (Figure 6), la pression diminue d'environ 5hPa, mais cet événement n'apparaît pas pour Arpege 6h et 3h. Cette différence avait déjà été observée précédemment, avec un pic de vent en fin de journée le 11/02/2009 qui n'apparaissait pas avec Arpege.

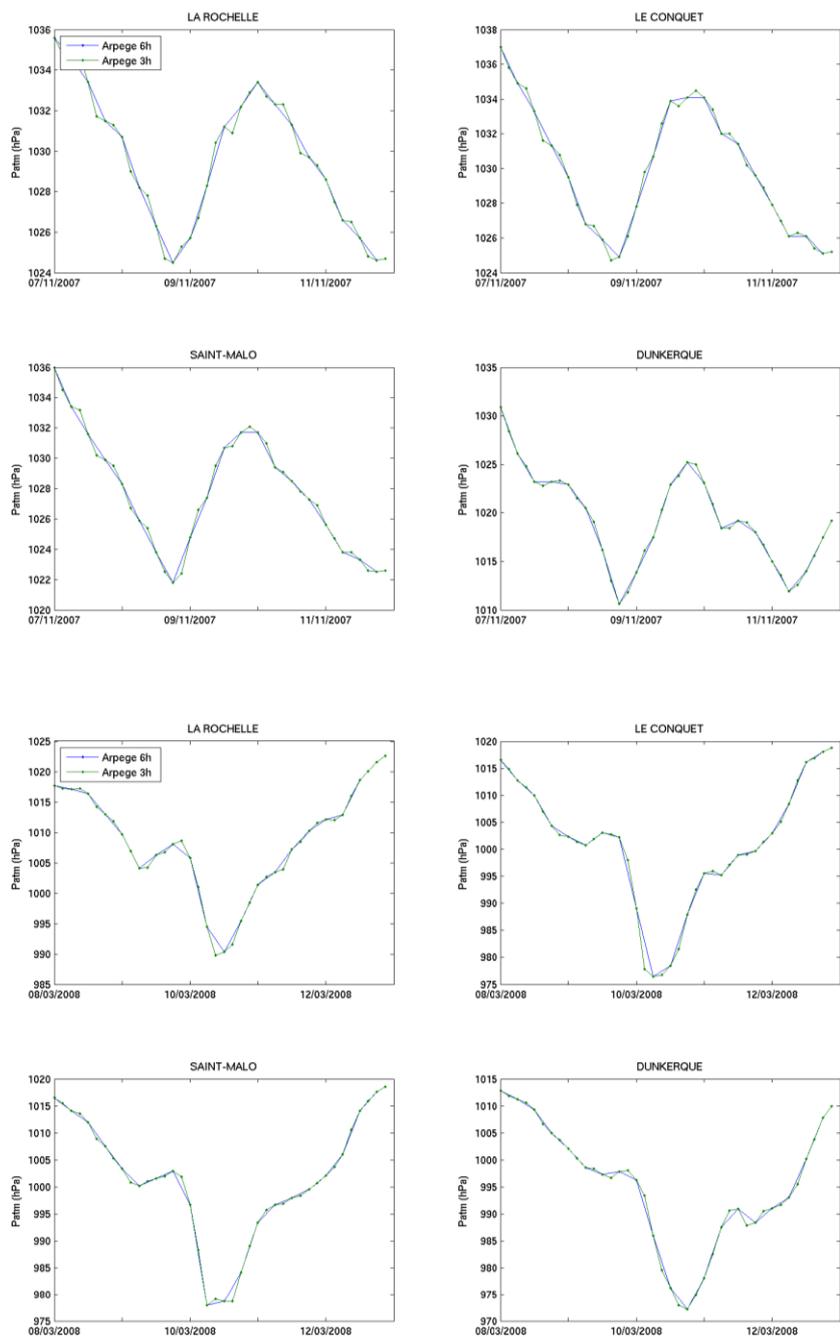


Figure 5 : Pression atmosphérique pendant les événements 1 et 2 (9/11/2007 et 10/03/2008)

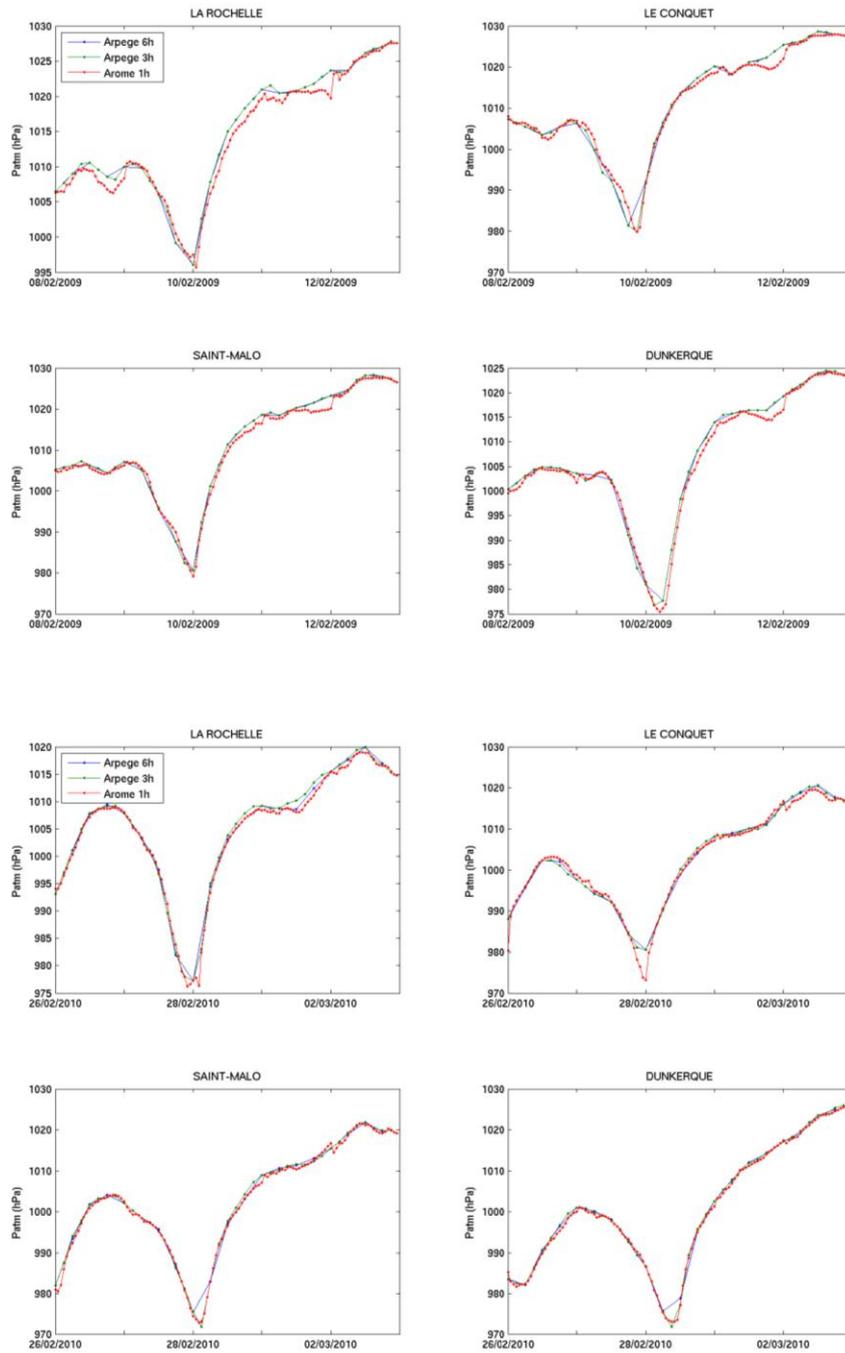


Figure 6 : Pression atmosphérique pendant les événements 3 et 4 (10/02/2009 et 28/02/2010)

2 Données QUIKSCAT

2.1 Données disponibles

QuikSCAT (Quick SCATterometer) est un satellite lancé par la NASA le 19 juin 1999, embarquant le diffusionmètre SeaWinds qui mesure les vents de surface océaniques. La mission s'est terminée le 23 novembre 2009, la tempête de Xynthia en 2010 n'a donc pas pu être analysée. Les données QuikSCAT sont traitées par la NASA puis distribuées à la Communauté Scientifique par le JPL (Jet Propulsion Laboratory).

La précision officielle du diffusionmètre est de 2 m/s, mais généralement elle est plutôt de 1 m/s à l'échelle globale. Le vent est mesuré 10 m au dessus du niveau de la mer mais il s'agit d'un vent neutre, alors que les vents modélisés (ARPEGE, AROME) correspondent à des vents réels. La différence 10 m au dessus de la surface entre vent réel et vent neutre est en moyenne de 20 cm/s.

Les données de vent sont disponibles deux fois par jour, sur une grille mondiale de 12,5 km. Selon l'emprise choisie pour la visualisation des données, le temps entre le début et la fin des mesures varie. Plus l'emprise est grande, plus la période de mesure est importante (Figure 7). Le choix a été de visualiser les données sur la grande emprise, pour permettre de visualiser les dépressions qui passent au dessus de 52°.

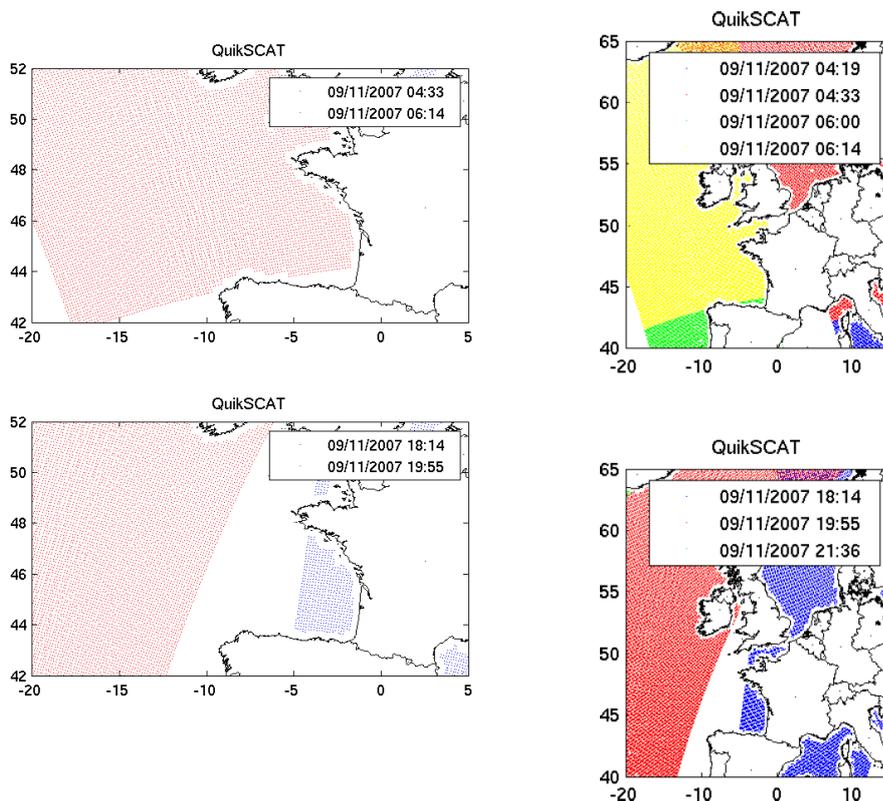


Figure 7 : Mesures Quikscat disponibles lors de l'événement 1 sur une grille de petite emprise et de grande emprise

Pour les événements 1 à 3, les mesures QuikSCAT disponibles sont présentées Figure 8. Les périodes de mesure sont comprises généralement entre 3 et 4h. Pour comparer ces données à ARPEGE 3H et AROME 1H, on considère l'heure de la mesure comme la moyenne de l'heure de début et l'heure de fin de mesure, arrondie à l'heure la plus proche. Il faut donc rester prudent pour l'interprétation des visualisations car une donnée affichée à 5h, peut en fait avoir lieu de 4h19 à 6h14 (par exemple). Dans tous les cas, la période de mesures reste inférieure à 4h.

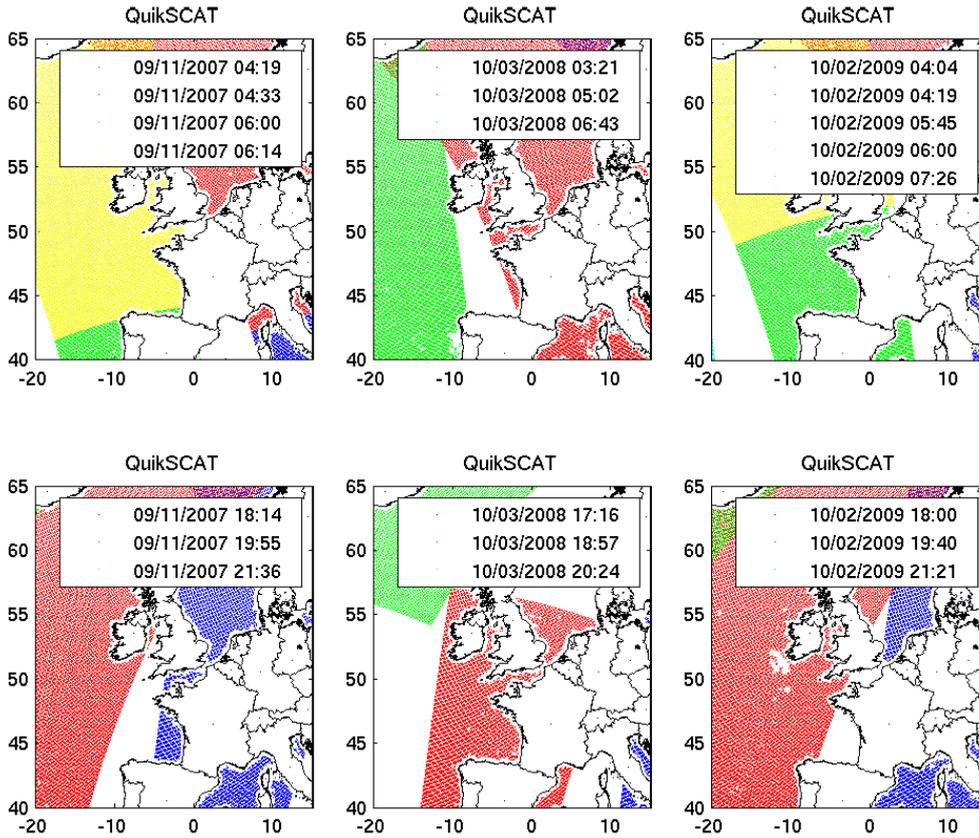


Figure 8 : Mesures QuikSCAT disponibles lors des événements 1, 2 et 3

Les cartes de décalage horaire entre l'instant de la modélisation ARPEGE ou AROME et l'instant de la mesure QuikSCAT sont présentées Figure 9 pour les événements 1 et 2, et Figure 10 pour l'événement 3.

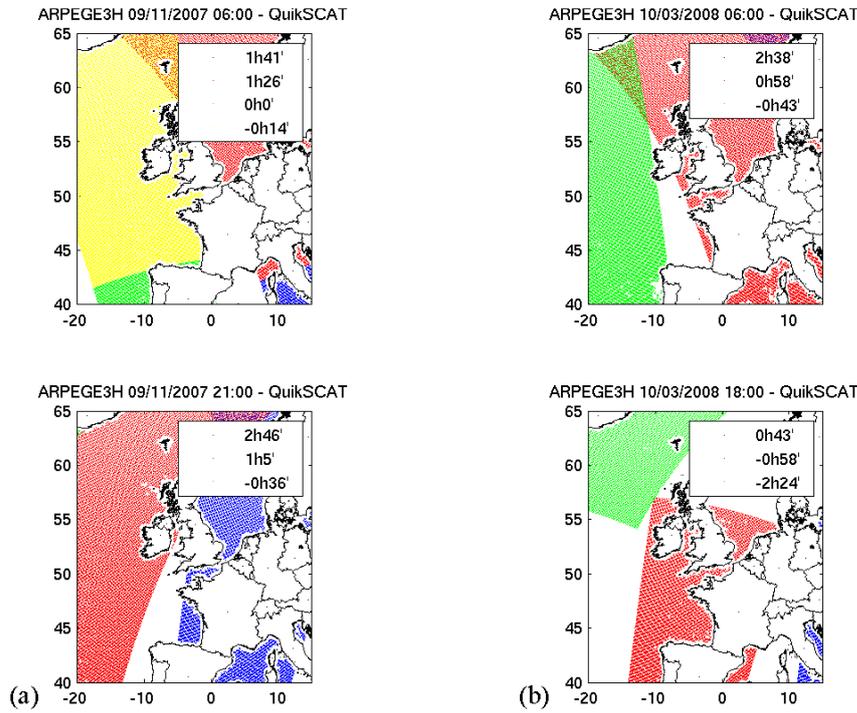


Figure 9 : Décalage horaire l'instant du modèle ARPEGE 3H et l'instant de la mesure QuikSCAT (a) pour l'événement 1 (b) pour l'événement 2

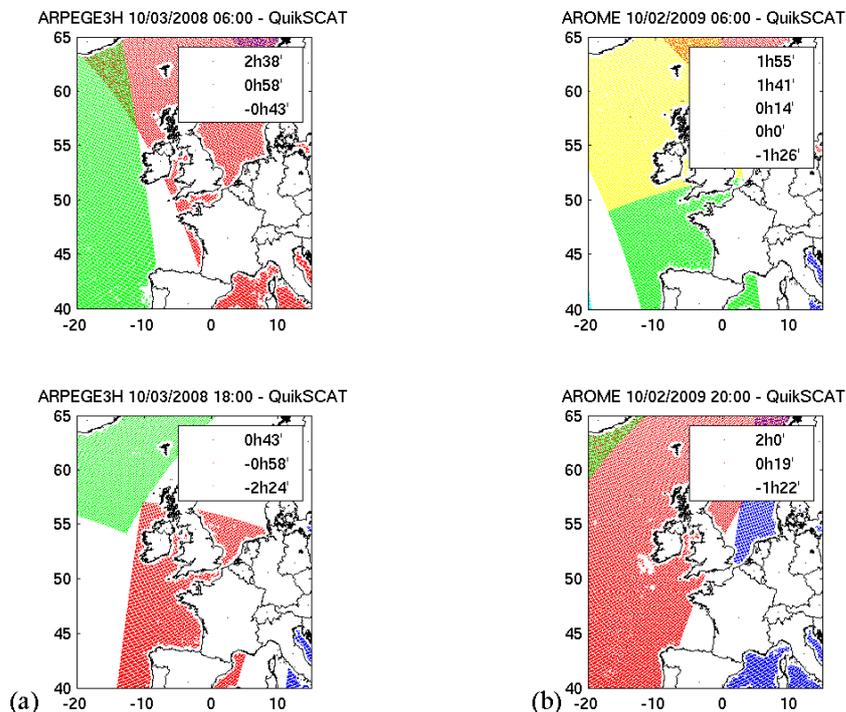


Figure 10 : Décalage horaire pour l'événement 3 entre (a) l'instant du modèle ARPEGE 3H et l'instant de la mesure QuikSCAT (b) l'instant du modèle AROME et l'instant de la mesure QuikSCAT

2.2 Comparaison de Quikscat et Arpege/Arome

Les comparaisons QuikSCAT et Arpege lors des événements 1, 2 et 3 sont présentées Figure 11, Figure 12 et Figure 13, les comparaisons QuikSCAT et Arome pour l'événement 3 sont présentées Figure 14. On retrouve bien des structures similaires, mais cette comparaison met en avant la meilleure résolution spatiale de QuikSCAT par rapport aux modèles Arpege et Arome.

Pour la tempête du 9/11/2007, à 6h Arpege 3h a tendance à sous estimer les vents en Mer du Nord, au niveau de la dépression. Au cœur de la dépression, les écarts dépassent 5 m/s. A 21h, Arpege 3h a également tendance à sous-estimer les vents en Mer du Nord, et au cœur de la tempête en Méditerranée.

Pour la tempête du 10/03/2008, à 6h Arpege 3h a également plutôt tendance à sous-estimer les vents au cœur de la tempête. A 18h, les données sont plutôt concordantes.

Pour la tempête du 10/02/2009, les données sont plutôt concordantes, avec Arpege et Arome.

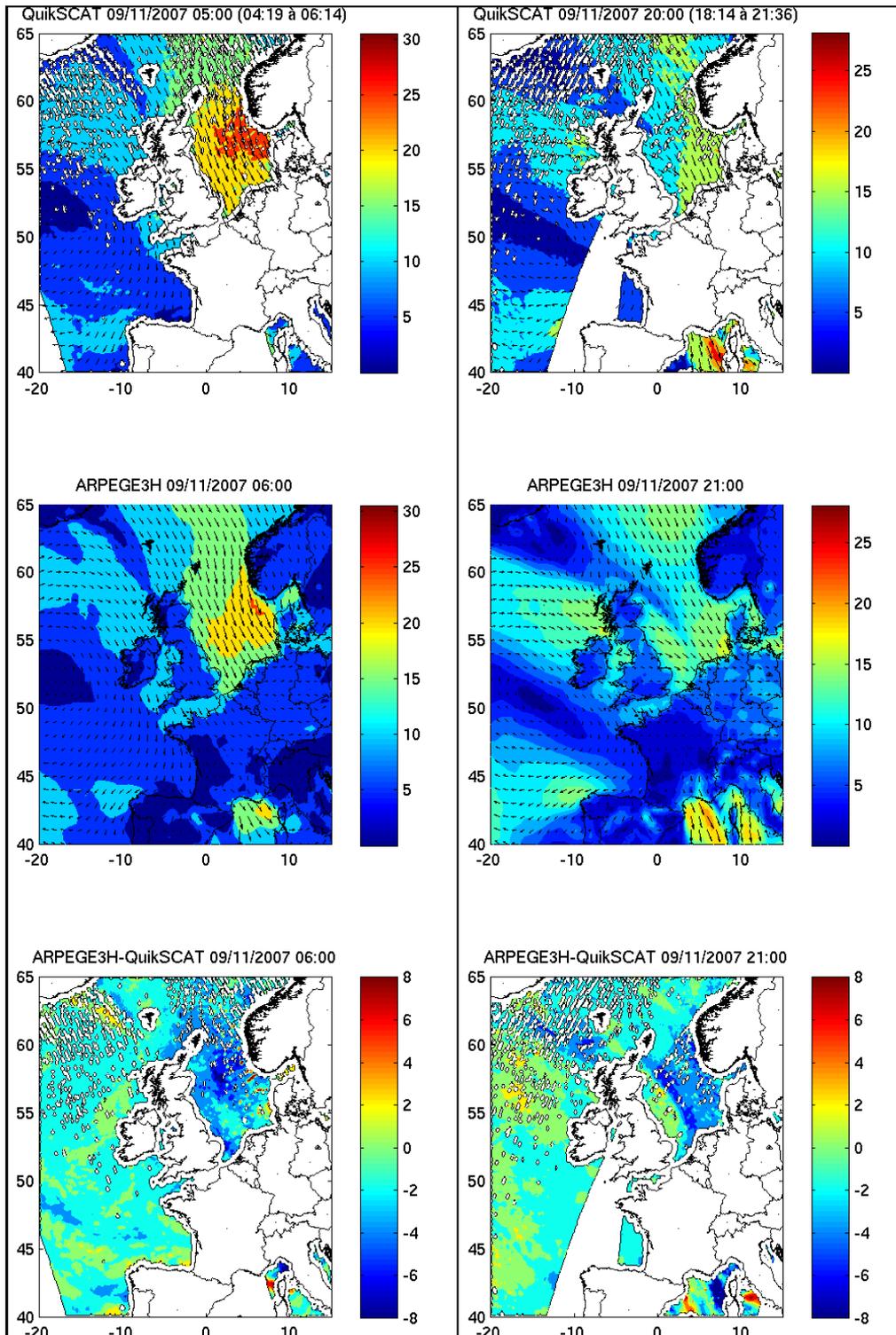


Figure 11 : Comparaison des vents (m/s) QuikSCAT et Arpege 3h lors de l'événement 1

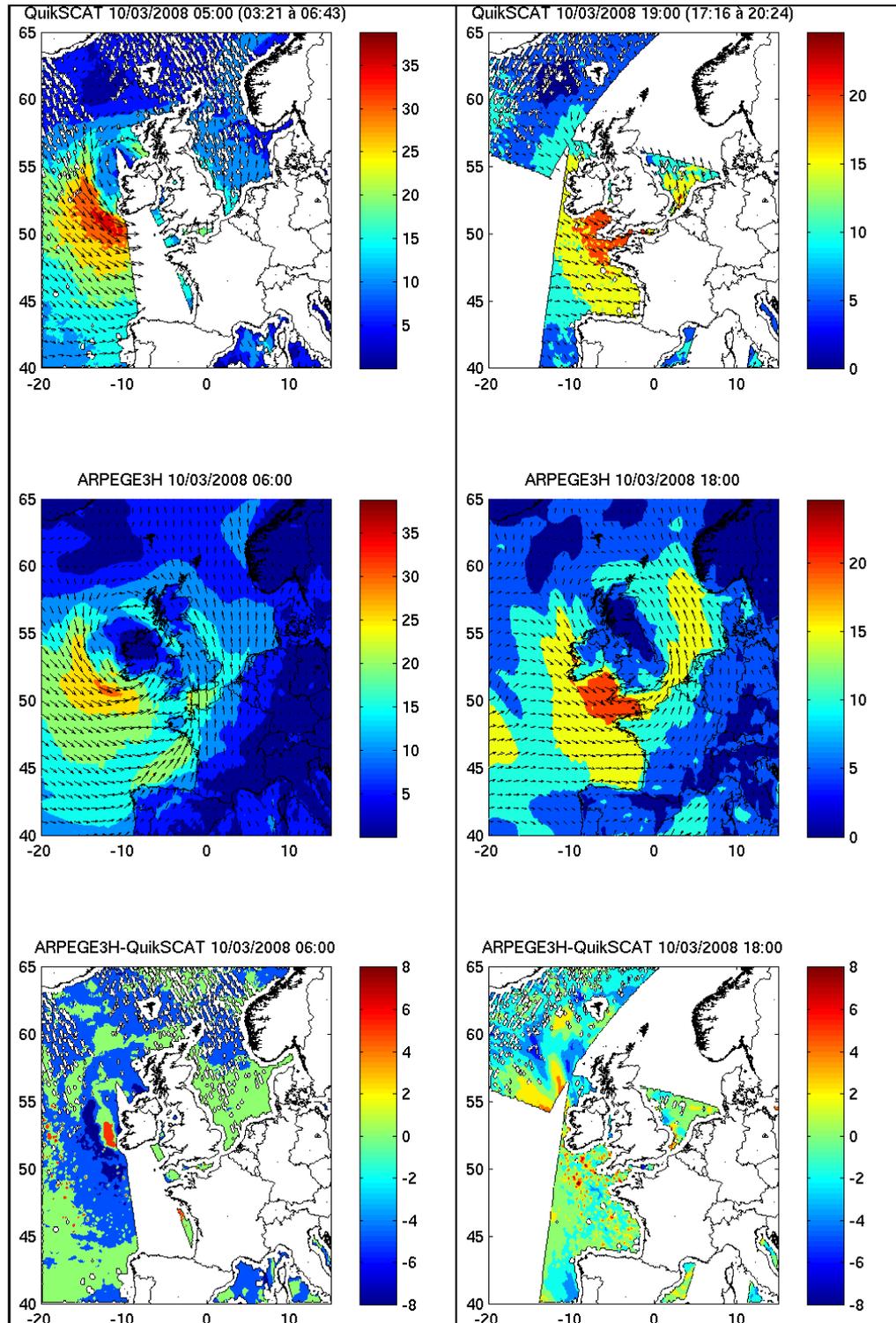


Figure 12 : Comparaison des vents (m/s) QuikSCAT et Arpege 3h lors de l'événement 2

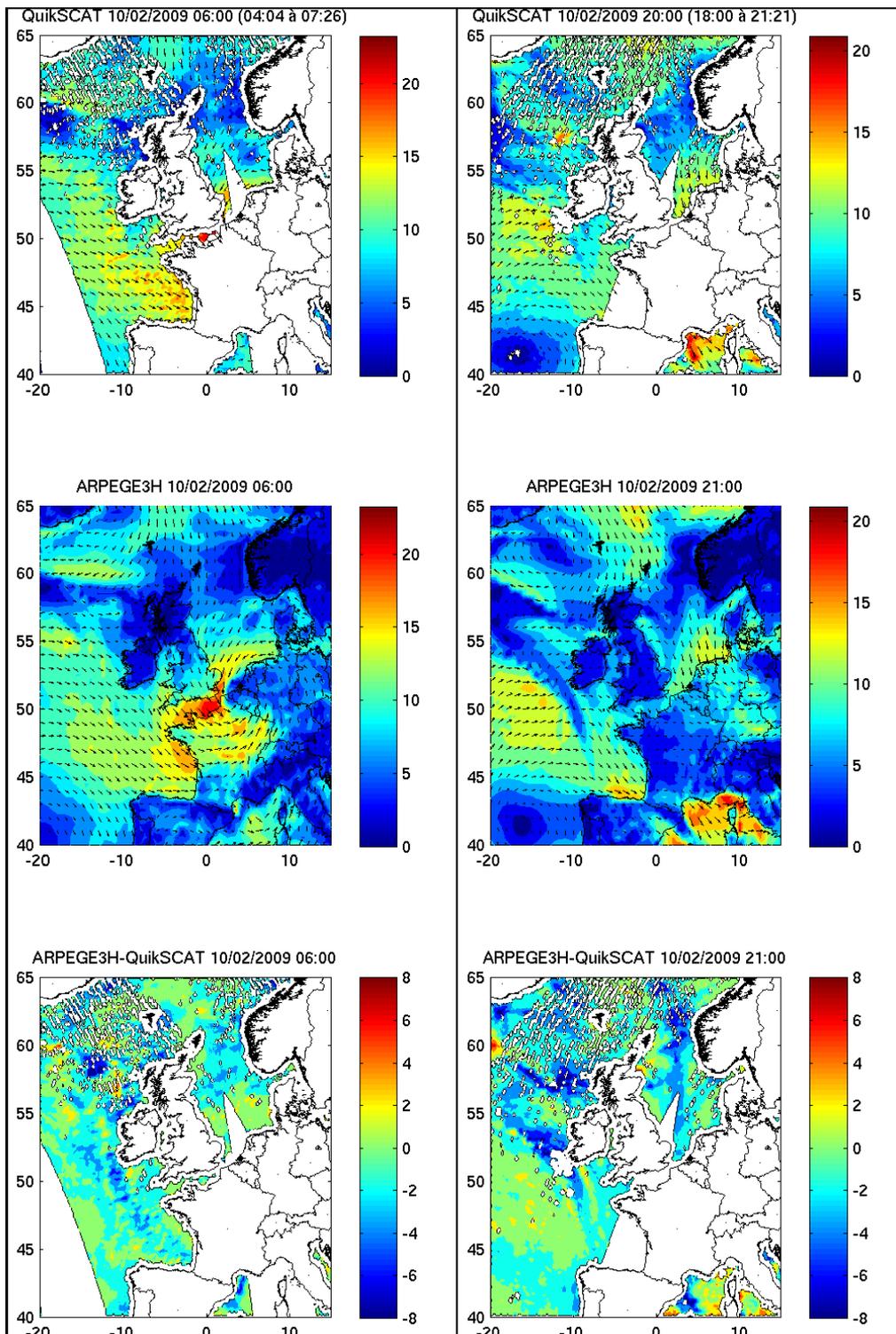


Figure 13 : Comparaison des vents (m/s) QuikSCAT et Arpege 3h lors de l'événement 3

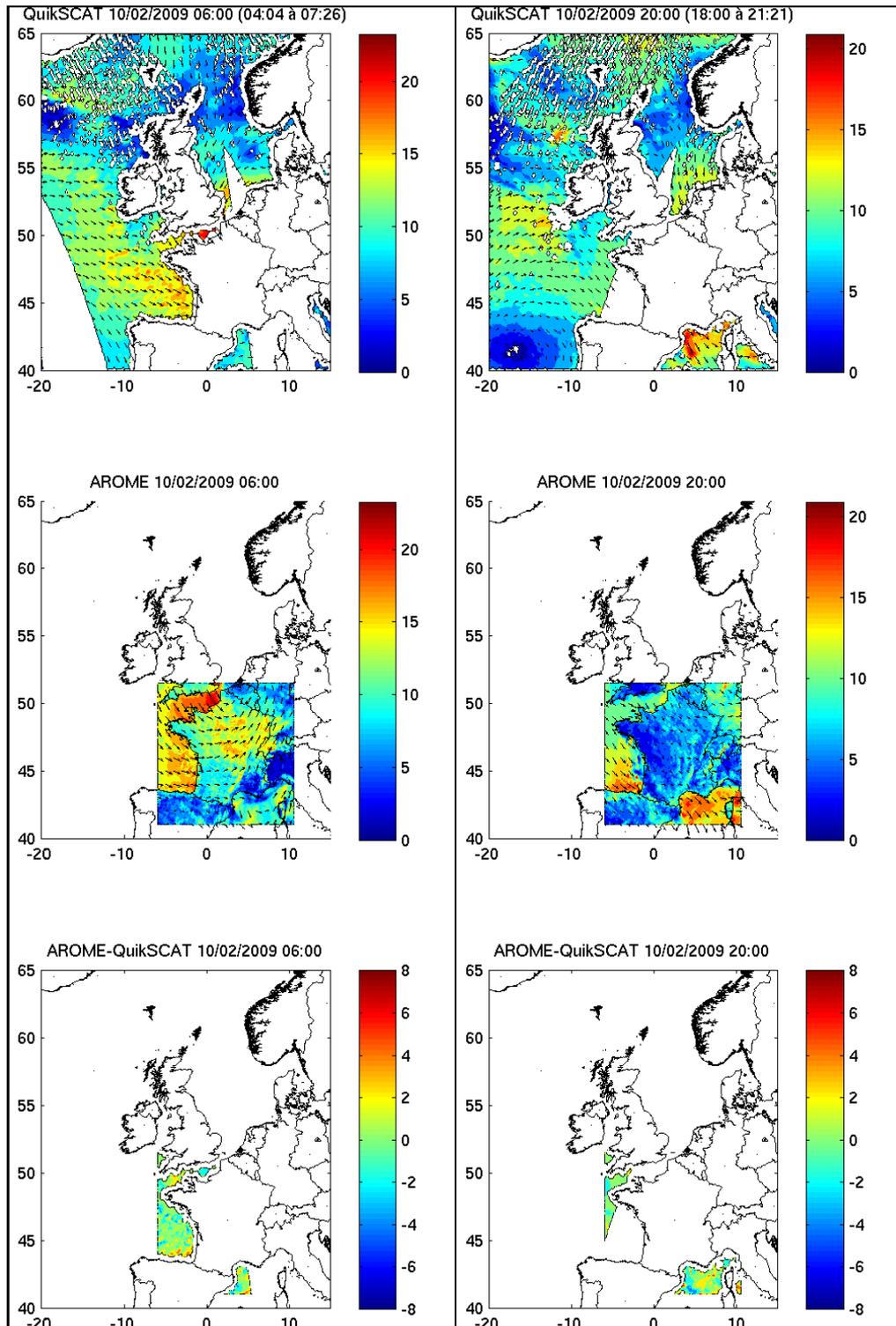


Figure 14 : Comparaison des vents (m/s) QuikSCAT et Arome 1h lors de l'événement 3

Annexe 8

Inter-comparaison des données météorologiques ARPEGE (6h et 3h) et AROME et des surcotes modélisées

Afin de mieux comprendre les résultats de surcotes obtenus à partir des différents forçages météorologiques utilisés dans ce projet, une inter-comparaison locale des forçages météorologiques ARPEGE 6H, ARPEGE 3H et AROME a été réalisée et une partie des résultats sont résumés dans le Tableau 11. Dans ce tableau, on s'est uniquement intéressé aux pics de vent et de surcotes et aux minima de pression. Des notes ont été attribuées, par événements météorologiques et par ports suivant l'intensité du vent, de la pression et des surcotes, les uns par rapport aux autres.

Les conditions météorologiques sont classées de 1 à 3 telles que la valeur 1 (resp. 3) est favorable à une forte (resp. faible) surcote (*i.e.* pression atmosphérique faible, vent fort). Ainsi, concernant la pression, une note de 1 à 3 est attribuée pour les forçages suivant les minima de pressions croissantes. Pour les vents, une note de 1 à 3 est attribuée suivant les valeurs maximales des pics de vent décroissants. Le forçage présentant le pic de vent le plus fort se verra alors attribué une note de 1.

Le même type de notation est affecté aux valeurs maximales des pics de surcotes : 1 pour les plus fortes surcotes et 3 pour les plus faibles.

Si les pics de vent ou surcotes ou les minima de pression sont équivalents quel que soit le type de forçage météorologique considéré, le signe « ~ » est utilisé dans le tableau.

On peut noter que pour les événements reproduits simultanément avec ARPEGE 6H, ARPEGE 3H et AROME, AROME donne les pics de surcotes les plus élevés. Par contre, pour l'ensemble des événements, c'est plutôt ARPEGE 3H qui donne les pics de surcotes les plus élevés.

L'analyse du Tableau 11 montre qu'on ne peut pas déduire de corrélation locale claire entre vents, pression et surcotes. En effet, les hiérarchisations des vents, pression et surcote sont concordantes (indiqué en bleu) pour un peu moins de la moitié des événements et ports.

Évènements	Ports d'étude	ARPEGE 6H			ARPEGE 3H			AROME		
		pression	vent	surcote	pression	vent	surcote	pression	Vent	surcote
Évènement 1 Évènement 2 : JOHANNA	Dunkerque	1~	1~	2	1~	1~	1			
	Saint-Malo	2	1~	1	1	1	2			
	Le Conquet	2	2	2	1	1	1			
Évènement 3 : QUENTIN	La Rochelle	2	2	2	1	1	1			
	Dunkerque	2	3	3	3	1	1	1	2	2
	Saint-Malo	2~	3	3	2~	2	2	1	1	1
	Le Conquet	3	2~	3	2	2	1	1	1	2
Évènement 4 : XYNTHIA	La Rochelle	3	1~	2	2	1~	1	1	1~	3
	Dunkerque	3	2~	3	1	1	2	2	2~	1
	Saint-Malo	3	2~	3	1	2~	2	2	1	1
	Le Conquet	3	3	3	2	2	2	1	1	1
	La Rochelle	3	3	3	2	1	2	1	2	1

Tableau 11 : Synthèse de l'étude d'inter-comparaison des forçages météorologiques ARPEGE 6H, ARPEGE 3H et AROME concernant les pics de vent et de surcotes et les minima de pression, par ports et par événements de tempête.
Le bleu indique une concordance complète entre données météorologiques locales modélisées et surcotes modélisées.

Annexe 9

SWAN : fichier de paramètres


```
$*****HEADING*****  
$  
PROJ 'Couplage' '01'  
$  
$ CALCUL DE LA HOULE POUR UNE PLAGE EN CROISSANTS  
$  
$  
$*****MODEL INPUT*****  
$  
SET level 0. depmin 0.05 CARTesian  
MODE DYNAMIC TWODimensional  
$  
CGRID REGULAR 0. 0. 0. 10040. 2040. 1004 204 CIRCLE 72 0.05 0.5  
$  
INPGRID BOTTOM 0. 0. 0. 1004 204 10. 10.  
READINP BOTTOM -1. './bathy_fevrier_ZH_finale.bot' 4 0 FREE  
$  
INPgrid WLEV REGular 0 0 0 1 1 10040 2040 NONSTATIONARY 20080309.0000 0.5 HR 20080312.0000  
READinp WLEV 1. './Ton_Fichier_Niveau_eau_30min.txt' 4 FREE  
$  
BOUNDspec SIDE S CCW CONstant FILE './ww3_mesures_Johanna_2008_3_9.dirspec'  
$  
GEN3  
FRICTION MADSEN 0.05  
BREaking CONstant 1. 0.73  
SETUP  
OFF QUADruplet  
OFF WCAPping  
$  
PROP BSBT  
NUM ACCUR npnts=95.0 NONSTAT mxitns=20  
$  
$***** OUTPUT REQUESTS *****  
$  
FRAME 'tab' 2000. 0. 0. 6040. 2040. 604 204  
TABLE 'tab' HEADer 'Ton_nom_a_toi_sortie.dat' TIME HSIGN RTP TM01 DIR PDIR QB DEPTH WLEN &  
SETUP FORCE XP YP UBOT DSPR FSPR OUTPUT 20080309.0000 0.5 HR  
$  
TEST 0,0  
COMPute NONSTAT 20080309.0000 0.5 HR 20080312.0000  
$  
STOP  
$
```



Centre scientifique et technique
Direction Prévention et Risques
3, avenue Claude-Guillemin

BP 36009 – 45060 Orléans Cedex 2 – France – Tél. : 02 38 64 34 34