

Projet PJ0303 : Océanographie Côtière Opérationnelle
Action A030304P : CPER-PREVIMER volet 3 - Outils de validation et développement
de produits avancés
Département Océanographie et Dynamique des Ecosystèmes
Unité Dynamiques de l'Environnement Côtier
Laboratoire Physique Hydrodynamique et Sédimentaire

Lucia Pineau Guillou

Juin 2013 – ODE/DYNECO/PHYSED/2013-02 version 1.0



PREVIMER

Validation des atlas de
composantes harmoniques de
hauteurs et courants de marée

Historique du document

| <i>Version</i> | <i>Date</i> | <i>Auteurs</i> | <i>Commentaires</i> |
|----------------|-------------|----------------------|----------------------|
| 1.0 | 22/03/2013 | Lucia Pineau-Guillou | Création du document |
| 1.1 | | | |

| | | |
|--------------------------------------|--------------------------|--|
| <i>Auteur :</i> L. Pineau-Guillou | <i>Date :</i> 22/03/2013 | <i>Visa :</i>  |
| <i>Vérifié par :</i> F. Dumas | <i>Date :</i> 18/04/2013 | <i>Visa :</i>  |
| <i>Approuvé par :</i> F. Lecornu | <i>Date :</i> 12/06/2013 | <i>Visa :</i>  |

© Ifremer

Hormis les cas expressément prévus par le Code de la Propriété Intellectuelle au titre de l'article L.122-5 2° d'une part et de l'article L.122-5 3° d'autre part, « toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droits ou ayants cause est illicite (article L.122-4) » et qu'une telle représentation ou reproduction constitue un délit de contrefaçon sanctionné par deux ans d'emprisonnement et 150 000 euros d'amende. L'Ifremer se réserve le droit à réparation de tout préjudice subi.

© Ifremer

All rights reserved. No part of this work covered by the copyrights herein may be reproduced or copied in any form or by any means – electronic, graphic or mechanical, including photocopying, recording, taping or information and retrieval systems- without written permission.

sommaire

| | |
|---|-----------|
| 1. INTRODUCTION | 4 |
| 2. METHODOLOGIE | 5 |
| 2.1. EMPRISE DES MODELES | 5 |
| 2.2. FORÇAGES..... | 6 |
| 2.3. ANALYSE HARMONIQUE | 6 |
| 2.4. TEMPS DE CALCUL | 8 |
| 3. VALIDATION DES ATLAS..... | 9 |
| 3.1. PREDICTIONS DE HAUTEURS..... | 9 |
| 3.2. COMPARAISON DES PREDICTIONS AVEC SHOMAR | 12 |
| 3.3. CALCUL DES SURCOTES | 14 |
| 3.4. VITESSES PREDITES..... | 14 |
| 3.5. COMPOSANTES HARMONIQUES..... | 18 |
| 4. ATLAS DE COMPOSANTES HARMONIQUES | 21 |
| 4.1. ATLAS DISPONIBLES..... | 21 |
| 4.2. ATLAS DU FINISTERE | 25 |
| 4.3. COHERENCE ENTRE LES ATLAS..... | 26 |
| 5. CONCLUSION..... | 31 |
| 6. BIBLIOGRAPHIE | 32 |

1. Introduction

Le système PREVIMER (Lecornu, De Roeck, 2009) 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 françaises. Il fournit en particulier les prévisions de courants, niveaux d'eau et surcotes/décotes, calculés à partir du modèle MARS, développé par l'Ifremer (Lazure & Dumas 2008), utilisé en version 2D.

Ce rapport présente la mise en place et la validation des atlas de composantes harmoniques de marée et courants de marée, issus de l'analyse des rejeux de la chaîne opérationnelle MARS-2D de PREVIMER. Dans une première partie, la méthodologie est détaillée, les analyses ont été effectuées à partir de la Tidal ToolBox (version 2.2.3), développée par le LEGOS (Allain 2013), dans le cadre de PREVIMER. Dans une deuxième partie, la validation des atlas est présentée, avec en particulier la comparaison des prédictions issues des atlas et celles issues de SHOMAR, le logiciel de prédiction officielle du SHOM (Simon 2007).



2. Méthodologie

2.1. Emprise des modèles

Les niveaux d'eau et courants ont été calculés à partir du modèle hydrodynamique MARS, utilisé en version 2D basée sur les équations de Saint-Venant. La validation des modèles 2D est détaillée dans le rapport de validation (Pineau-Guillou 2013 ; Muller et al. 2013).

L'emprise des modèles 2D (et donc des atlas) est présentée Figure 1. Il s'agit de modèles emboîtés. Leur résolution est de :

- 2 km pour le rang 0 couvrant l'Atlantique Nord Est (ATLNE),
- 700 m pour le rang 1, couvrant la Manche et le Golfe de Gascogne (MANGA),
- 250 m pour les 5 modèles de rang 2 : Manche Est (MANE), Manche Ouest (MANW), Finistère (FINIS), Sud Bretagne (SUDBZH) et Aquitaine (AQUI).

La résolution temporelle des sorties est de 1h pour les rangs 0 et 1, 15 minutes pour les rangs 2.

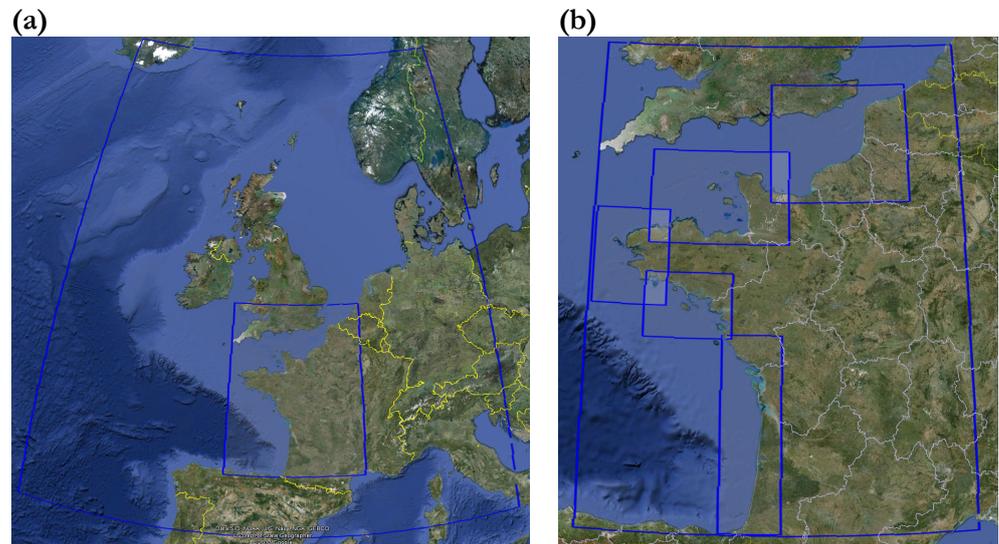


Figure 1. Extension des modèles 2D : rang 0 (Atlantique Nord Est), rang 1 (Manche Gascogne) et 5 rangs 2 (Manche Est, Manche Ouest, Finistère, Sud Bretagne, Aquitaine).

2.2. Forçages

Concernant les forçages en hauteurs aux limites des modèles :

- Le rang 0 est forcé par le modèle de marée FES (2004), développé par le LEGOS (Lyard et al. 2006), qui contient 14 ondes (Mm, Mf, Mtm, MSqm, Q₁, O₁, P₁, K₁, 2N₂, N₂, M₂, S₂, K₂ et M₄).
- Le rang 1 est forcé par le rang 0.
- Les rangs 2 sont forcés en marée par le modèle de marée cstFRANCE, développé par le SHOM (Le Roy & Simon 2003), qui contient 115 ondes. A cette hauteur de marée, est ajoutée la surcote issue du rang 1.

Les rangs 0 et 1 servent donc uniquement à calculer la surcote pour les rangs 2. En effet, la surcote sur les côtes de France provient souvent de tempêtes ayant lieu en Mer du Nord ou au Nord de la Grande-Bretagne, il est donc important d'avoir un domaine suffisamment grand pour modéliser ce paramètre correctement.

Les forçages météorologiques sont fournis par Météo-France, il s'agit d'Arpege (Courtier et al. 1991, 1994) et Arome (Seity et al. 2011).

Le modèle Arpege a une résolution temporelle de 6h et spatiale de 0.5°. Les données antérieures à avril 2009 correspondent à 4 analyses par jour. Depuis avril 2009, il s'agit d'une analyse à 0h et 3 prévisions à 6h, 12h et 18h.

Le modèle Arpege est disponible en haute résolution depuis novembre 2011, avec une résolution temporelle de 1h et spatiale de 0.1°. Les données antérieures à août 2012 correspondent à 1 analyse à 0h suivie de 23 prévisions. Depuis août 2012, il s'agit de 4 analyses à 0, 6, 12 et 18h complétées par des prévisions intermédiaires.

Le modèle Arome a une résolution temporelle de 1h et spatiale de 0.025°, il est disponible 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).

Les rejeux de ces modèles ont été effectués sur la période 2006-2013.

2.3. Analyse harmonique

Une analyse harmonique a été effectuée avec *comodo-detidor* de la Tidal ToolBox sur les rejeux 2008-2009 (simulations archivées au Centre de Données en Océanographie Côtière).

Les ondes Mtm, et MSqm sont présentes dans FES 2004, mais pas dans cstFRANCE. Elles sont d'amplitude très faibles, et n'ont pas été calculées. Les 38 composantes harmoniques suivantes ont été calculées :

- Longues périodes : Z₀, Mm et Mf



- Diurnes : Q_1 , O_1 , P_1 , K_1 , M_1 , J_1 , OO_1 , RO_1 , Pi_1 , $2Q_1$, Phi_1 , Sig_1 , Tta_1 , Psi_1 , Ki_1 , MP_1 et KQ_1
- Semi-diurnes : $2N_2$, N_2 , M_2 , S_2 , K_2 , Nu_2 , L_2 , T_2 , Mu_2 , E_2 , La_2 , KJ_2 et R_2
- Quart-diurnes : M_4 , MS_4 , MK_4 et MN_4
- Sixième-diurne : M_6

Ce choix correspond aux longues périodes imposées à la limite du modèle (2 ondes), aux ondes astronomiques diurnes et semi-diurnes disponibles dans la Tidal ToolBox (17 diurnes et 13 semi-diurnes) et aux ondes principales d'interaction (5 ondes). L'onde Z_0 correspond au niveau moyen pour l'analyse des hauteurs, et courant moyen pour l'analyse des courants.

La méthodologie de calcul des ondes diffère selon les modèles.

Analyse harmonique des rangs 0 et 1

Pour les rangs 0 et 1, 17 ondes ont été calculées par analyse harmonique : le niveau moyen Z_0 , les ondes de FES 2004 présentes aux limites (Mm , Mf , Q_1 , O_1 , P_1 , K_1 , $2N_2$, N_2 , M_2 , S_2 , K_2 et M_4) et les ondes d'interaction (MS_4 , MK_4 , MN_4 et M_6). Ces quatre ondes d'interaction (ou de petits fonds) ne sont pas présentes aux limites mais sont générées par interaction dans le modèle. Les 21 autres ondes astronomiques (M_1 , J_1 , OO_1 , RO_1 , Pi_1 , $2Q_1$, Phi_1 , Sig_1 , Tta_1 , Psi_1 , Ki_1 , MP_1 et KQ_1 , Nu_2 , L_2 , T_2 , Mu_2 , E_2 , La_2 , KJ_2 et R_2) n'étant pas aux limites du modèle, elles sont nulles dans le modèle, elles ont donc été calculées par admittance pour les hauteurs de marée (elles n'ont pas été calculées pour les courants). La méthode d'admittance permet d'estimer une onde en fonction des rapports d'amplitude dans le potentiel générateur de la marée. Elle permet donc d'estimer la partie « astronomique » d'une onde. Cependant, à certaines fréquences de la marée, se superposent des ondes astronomiques avec des ondes d'interaction ; par exemple à la fréquence de Mu_2 , on retrouve l'onde d'interaction $2MS_2$ (interaction entre M_2 et S_2). La méthode d'admittance ne permet pas de calculer cette contribution « d'interaction », mais uniquement la partie « astronomique ». Pour estimer cette contribution « d'interaction », il faudrait faire une analyse harmonique du modèle à cette fréquence (puisque Mu_2 n'est pas introduit aux limites), mais c'est alors la partie « astronomique » qui ne serait pas calculée.

Malgré cette restriction, la validation des données montre que l'ajout de composantes calculées par admittance améliore la précision des prédictions. Les comparaisons à Dunkerque ont montré que l'erreur quadratique moyenne (RMS) entre la prédiction issue du modèle de marée Atlantique Nord Est et SHOMAR (logiciel du SHOM) variait de 24 cm avec 13 ondes à 22 cm avec 35 ondes.

Analyse harmonique des rangs 2

Pour les rangs 2, toutes les ondes sont présentes aux limites du modèle cstFRANCE. Une analyse harmonique a donc été faite avec les 38 ondes, que ce soit pour la marée ou les courants.



Remarque importante : pour les modèles de rang 2 (Manche Est, Manche Ouest, Finistère, Sud Bretagne et Aquitaine), les composantes harmoniques de courants de marée ne sont pas valides aux limites des modèles (bande d'environ 5 à 10% de la taille du modèle). En effet, seules les hauteurs sont imposées aux limites du modèle (cstFRANCE ne fournissant que les constantes harmoniques de hauteurs), ce qui génère des incohérences aux limites du modèle pour les courants.

La validation a montré qu'il était préférable de garder la composante Z_0 pour les prédictions de courants, mais pas pour la marée.

Finalement, pour les atlas de hauteurs de marée, 37 composantes harmoniques sont disponibles. Pour les atlas de courants de marée, 17 composantes harmoniques sont disponibles pour les modèles de rangs 0 et 1 (Atlantique Nord Est et Manche Gascogne) et 38 composantes harmoniques pour les modèles de rang 2 (Manche Est, Manche Ouest, Finistère, Sud Bretagne et Aquitaine). La liste des composantes harmoniques disponibles est synthétisée dans le Tableau 8 page 21.

2.4. Temps de calcul

Les temps de calculs sont raisonnables : environ 1h20 sur 2 CPU d'un PC standard pour analyser 2 ans d'une variable (H, U ou V) du modèle Atlantique Nord Est (résolution temporelle 1h, 1,6 millions de points). Pour les rangs 2, les temps de calcul sont plus longs (de l'ordre de 4h) car la résolution temporelle est plus importante (15 mn au lieu d'1h).

3. Validation des atlas

3.1. Prédications de hauteurs

La validation a été effectuée en 18 marégraphes permanents du Réseau d'Observation du Niveau de la Mer (RONIM) du SHOM. Les prédictions de référence ont été effectuées grâce au logiciel SHOMAR du SHOM.

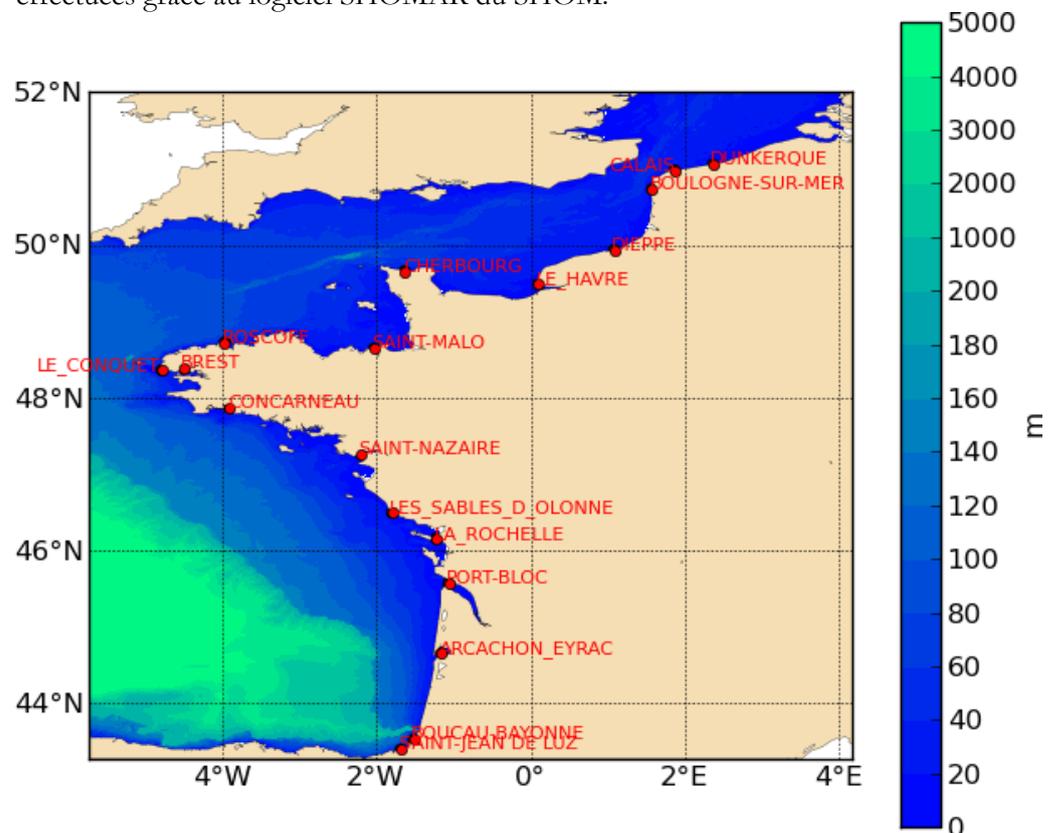


Figure 1 : Points de validation des prédictions de hauteurs et bathymétrie

Les hauteurs prédites à partir des atlas ont été calculées grâce à *predictor* de la Tidal ToolBox, en janvier 2009. En chacun des 18 ports, et pour chaque rang (0, 1 et 2), les hauteurs prédites ont été comparées à celles modélisées. L'exemple de Dunkerque pour le rang 2 est présenté Figure 2. On note une surcote importante le 24 janvier 2009, lors de la tempête Klaus. Les figures pour les rangs 2 des 18 ports sont présentées en annexe 1.

Les différences entre la prédiction et le modèle incluent la surcote météorologique, mais également l'erreur de prédiction ; en effet, la qualité de la prédiction dépend de nombreux facteurs, en particulier la durée de l'analyse (plus la durée analysée est longue, meilleure sera la prédiction). Les erreurs quadratiques moyennes (RMS) et les biais ont été calculés (Tableau 1 et Figure 3). L'erreur RMS est en moyenne de 25 cm pour le rang 0, et 20 cm pour le rang 2. Les 5 cm d'écart viennent de l'amélioration

des prédictions entre les rangs 0 et 2. Les 20 cm correspondent à l'ordre de grandeur des surcotes moyennes.

C'est à Saint-Malo que l'erreur RMS est la plus importante (Figure 3), ceci n'est pas surprenant car c'est le port où l'amplitude de la marée est la plus importante. L'amélioration de cette erreur entre le rang 0 et 1 (55 à 29 cm) est probablement due à l'amélioration de la résolution.

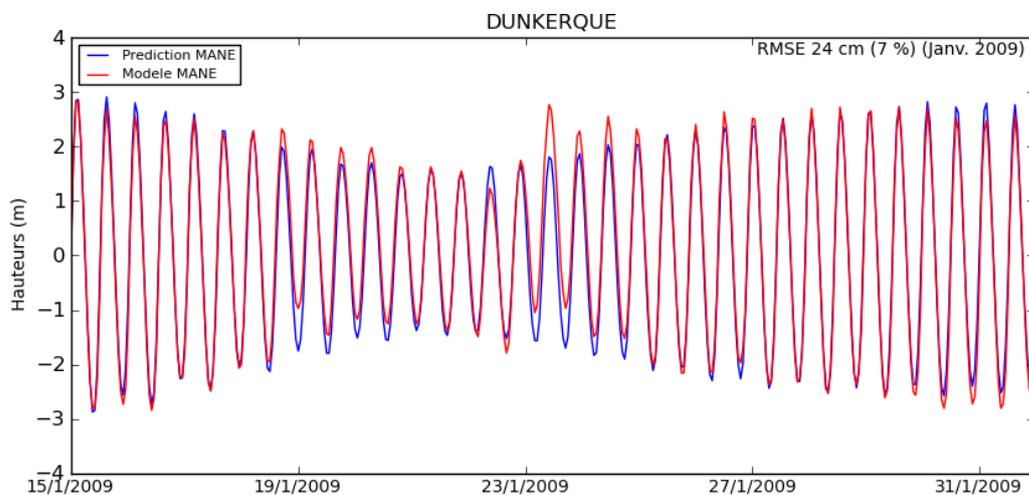


Figure 2 : Comparaison des prédictions issues de l'atlas Manche Est (MANE) et des hauteurs issues du modèle Manche Est (MANE) à Dunkerque en janvier 2009

| Points | Erreur RMS (m) | | | Biais (m) | | | Nom du Rang 2 |
|---------------------|----------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|---------------|
| | Rang 0 | Rang 1 | Rang 2 | Rang 0 | Rang 1 | Rang 2 | |
| | | | | | | | MANE |
| Dunkerque | 0.28 | 0.28 | 0.24 | 0.04 | 0.04 | 0.04 | MANE |
| Calais | 0.27 | 0.28 | 0.24 | 0.01 | 0.02 | 0.03 | MANE |
| Boulogne-sur-Mer | 0.30 | 0.31 | 0.27 | 0.05 | 0.05 | 0.06 | MANE |
| Dieppe | 0.29 | 0.29 | 0.24 | 0.05 | 0.05 | 0.06 | MANE |
| Le Havre | 0.29 | 0.29 | 0.25 | 0.06 | 0.06 | 0.07 | MANE |
| Cherbourg | 0.20 | 0.21 | 0.20 | 0.03 | 0.05 | 0.07 | MANW |
| Saint-Malo | 0.55 | 0.29 | 0.25 | 0.03 | 0.03 | 0.05 | MANW |
| Roscoff | 0.21 | 0.21 | 0.18 | 0.04 | 0.06 | 0.09 | MANW |
| Le Conquet | 0.18 | 0.19 | 0.15 | 0.03 | -0.02 | 0.03 | FINI |
| Brest | 0.20 | 0.19 | 0.18 | 0.05 | 0.06 | 0.10 | FINI |
| Concarneau | 0.17 | 0.17 | 0.16 | 0.05 | 0.05 | 0.07 | |
| Saint-Nazaire | 0.36 | 0.21 | 0.20 | 0.07 | 0.07 | 0.06 | SUDB |
| Les Sables d'Olonne | 0.18 | 0.18 | 0.17 | 0.04 | 0.04 | 0.07 | AQUI |
| La Rochelle-Pallice | 0.20 | 0.20 | 0.20 | 0.04 | 0.05 | 0.07 | AQUI |
| Port-Bloc | 0.18 | 0.17 | 0.17 | 0.03 | 0.02 | 0.05 | AQUI |
| Arcachon | 0.34 | 0.35 | 0.27 | 0.25 | 0.28 | 0.21 | AQUI |
| Boucau-Bayonne | 0.13 | 0.13 | 0.13 | 0.02 | 0.02 | 0.06 | AQUI |
| Saint-Jean de Luz | 0.12 | 0.13 | 0.12 | 0.02 | 0.02 | 0.05 | AQUI |
| Moyenne | 0.25 | 0.23 | 0.20 | 0.05 | 0.05 | 0.07 | |

Tableau 1 : Erreurs quadratiques moyennes et biais entre le modèle et la prédiction issue des atlas

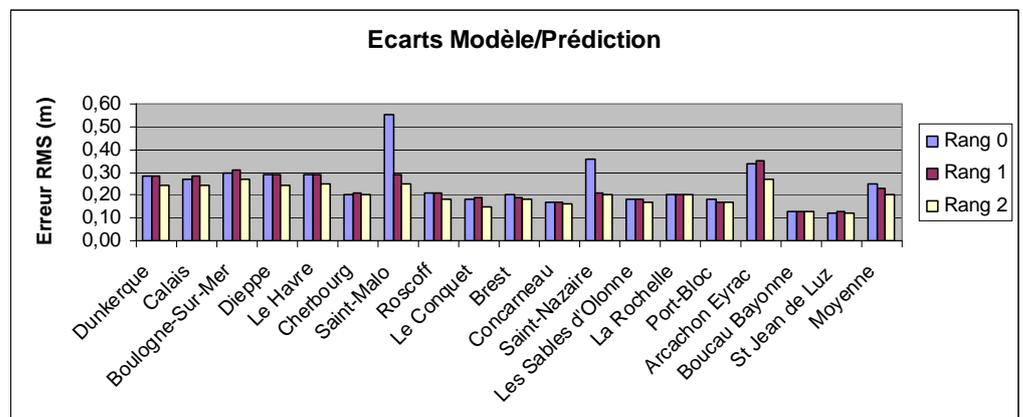


Figure 3 : Erreurs quadratiques moyennes des écarts entre le modèle et la prédiction issue des atlas, pour chaque rang

3.2. Comparaison des prédictions avec SHOMAR

En chacun des 18 ports, et pour chaque rang (0, 1 et 2), les hauteurs prédites à partir des atlas ont été comparées aux prédictions SHOMAR (logiciel officiel de prédiction de marée du SHOM). Un exemple à Dunkerque pour le rang 2 est présenté Figure 4. Les erreurs quadratiques moyennes (RMS) et les biais ont été calculés (Tableau 2 et Figure 5).

Les écarts montrent une amélioration des prédictions des rangs 2 par rapport aux rangs 0 et 1 : la moyenne des erreurs RMS passe de 23 cm pour le rang 0, à 20 cm pour le rang 1 et 12 cm pour les rangs 2. Cette amélioration importante vient surtout du forçage aux limites ouvertes des rangs 2 par cstFRANCE, le modèle de marée du SHOM, mais également de l'amélioration de la résolution entre le rang 0 (2 km) et les rangs 2 (250 m). L'amélioration est particulièrement nette à Saint-Malo, avec une erreur RMS qui passe de 58 cm à 19 cm entre les rangs 0 et 2, elle est également très visible à Saint-Nazaire. On note qu'en certains ports, l'amélioration est notable entre le rang 0 et 1 (Saint-Malo, Port-Bloc), ce qui est certainement dû à l'amélioration de la résolution spatiale (2km à 700 m), le forçage de marée étant identique (FES).

C'est à Arcachon que les résultats sont les moins satisfaisants (24 cm d'erreur RMS au rang 2), la marée n'est pas bien représentée dans le bassin, probablement à cause d'une bathymétrie insuffisamment précise. Cette zone est délicate, souvent difficile à modéliser sans une bathymétrie précise.

Il n'est pas recommandé d'utiliser les atlas de marée (ATLNE, MANGA et AQU) pour le bassin d'Arcachon.

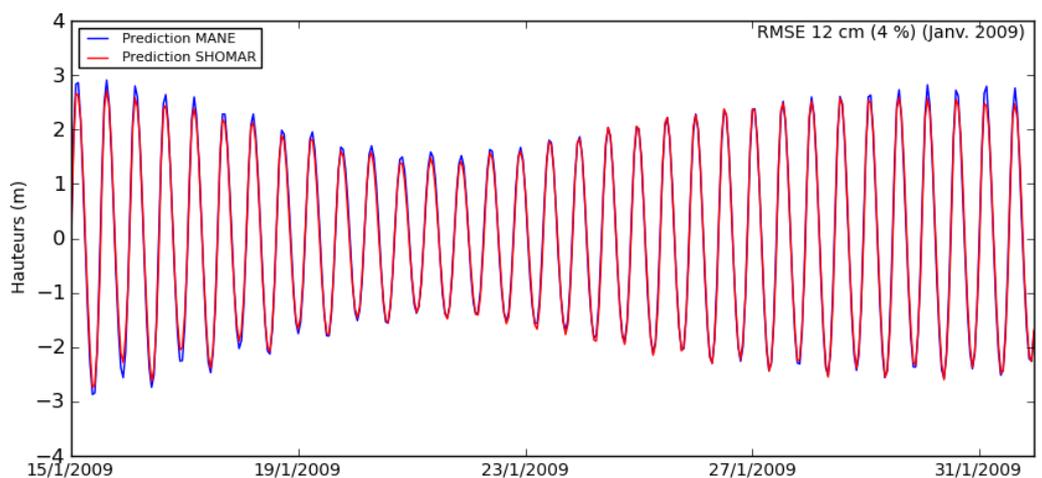


Figure 4 : Comparaison des prédictions issues de l'atlas Manche Est (MANE) et des prédictions SHOMAR à Dunkerque en janvier 2009

| Points | Erreur RMS (m) | | | Biais (m) | | | Nom du Rang 2 |
|---------------------|----------------|-------------|-------------|--------------|--------------|--------------|---------------|
| | Rang 0 | Rang 1 | Rang 2 | Rang 0 | Rang 1 | Rang 2 | |
| Dunkerque | 0.21 | 0.19 | 0.12 | -0.01 | -0.01 | -0.01 | MANE |
| Calais | 0.22 | 0.21 | 0.14 | -0.04 | -0.04 | -0.04 | MANE |
| Boulogne-sur-Mer | 0.22 | 0.22 | 0.18 | -0.03 | -0.03 | -0.03 | MANE |
| Dieppe | 0.24 | 0.25 | 0.14 | -0.01 | -0.01 | -0.01 | MANE |
| Le Havre | 0.25 | 0.24 | 0.17 | -0.03 | -0.03 | -0.03 | MANE |
| Cherbourg | 0.11 | 0.10 | 0.07 | -0.01 | -0.01 | -0.01 | MANW |
| Saint-Malo | 0.58 | 0.33 | 0.19 | 0.03 | 0.03 | 0.02 | MANW |
| Roscoff | 0.15 | 0.16 | 0.09 | -0.02 | -0.02 | -0.02 | MANW |
| Le Conquet | 0.12 | 0.10 | 0.10 | -0.01 | -0.01 | -0.01 | FINI |
| Brest | 0.24 | 0.15 | 0.12 | -0.02 | -0.02 | -0.02 | FINI |
| Concarneau | 0.14 | 0.13 | 0.09 | -0.03 | -0.03 | -0.03 | SUDB |
| Saint-Nazaire | 0.31 | 0.16 | 0.08 | -0.02 | -0.02 | -0.02 | SUDB |
| Les Sables d'Olonne | 0.18 | 0.18 | 0.08 | -0.01 | -0.01 | -0.01 | AQUI |
| La Rochelle-Pallice | 0.21 | 0.24 | 0.09 | -0.00 | -0.00 | -0.00 | AQUI |
| Port-Bloc | 0.39 | 0.20 | 0.16 | -0.03 | -0.03 | -0.04 | AQUI |
| Arcachon | 0.36 | 0.38 | 0.24 | -0.01 | -0.01 | -0.01 | AQUI |
| Boucau-Bayonne | 0.19 | 0.19 | 0.10 | -0.03 | -0.03 | -0.04 | AQUI |
| Saint-Jean de Luz | 0.11 | 0.11 | 0.06 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | AQUI |
| Moyenne | 0.23 | 0.20 | 0.12 | -0.02 | -0.02 | -0.02 | |

Tableau 2 : Erreurs quadratiques moyennes et biais entre la prédiction issue des atlas et la prédiction SHOMAR

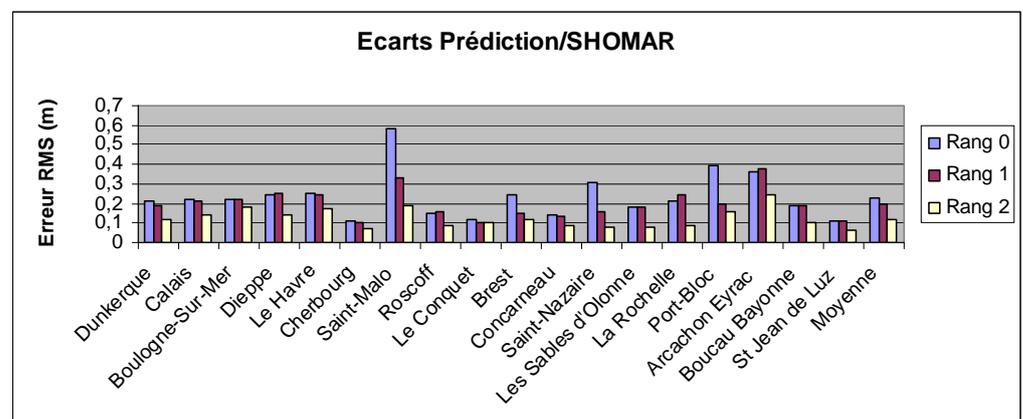


Figure 5 : Erreurs quadratiques moyennes des écarts entre la prédiction issue des atlas et la prédiction SHOMAR, pour chaque rang

3.3. Calcul des surcotes

Les surcotes peuvent être calculées de deux manières différentes : soit en retranchant à la simulation avec météo la prédiction, soit en retranchant à la simulation avec météo la simulation sans météo (Figure 6). On observe des oscillations plus importantes dans le premier cas (en retranchant la prédiction), dont l'amplitude peut dépasser 10 cm. Ceci est probablement dû à des erreurs de prédictions, faites avec un nombre insuffisant de composantes ou des composantes mal déterminées.

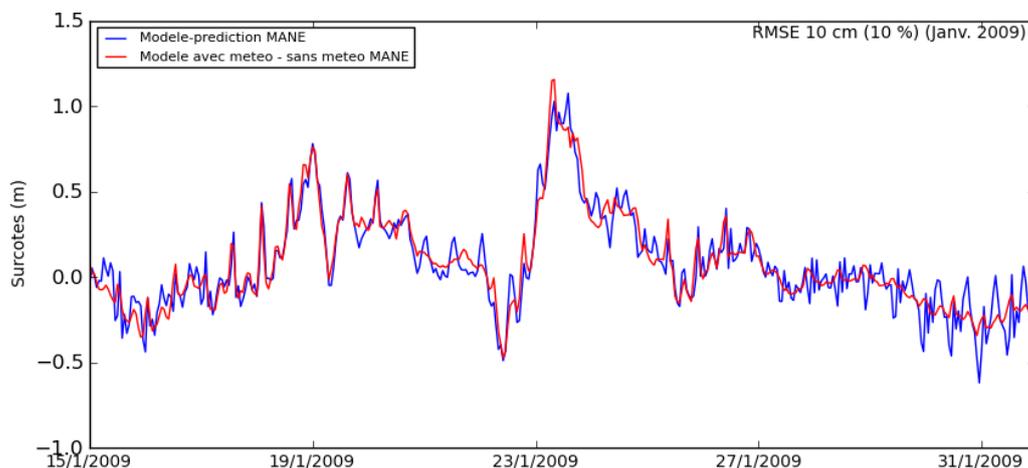


Figure 6 : Comparaison des surcotes calculées en retranchant au modèle la prédiction (courbe bleue) ou en retranchant au modèle avec météo le modèle sans météo (courbe rouge) à Dunkerque en janvier 2009

3.4. Vitesses prédites

La validation a été effectuée en 4 points : en Manche, dans le Raz Blanchard, dans le Raz de Sein et dans le Golfe de Gascogne.

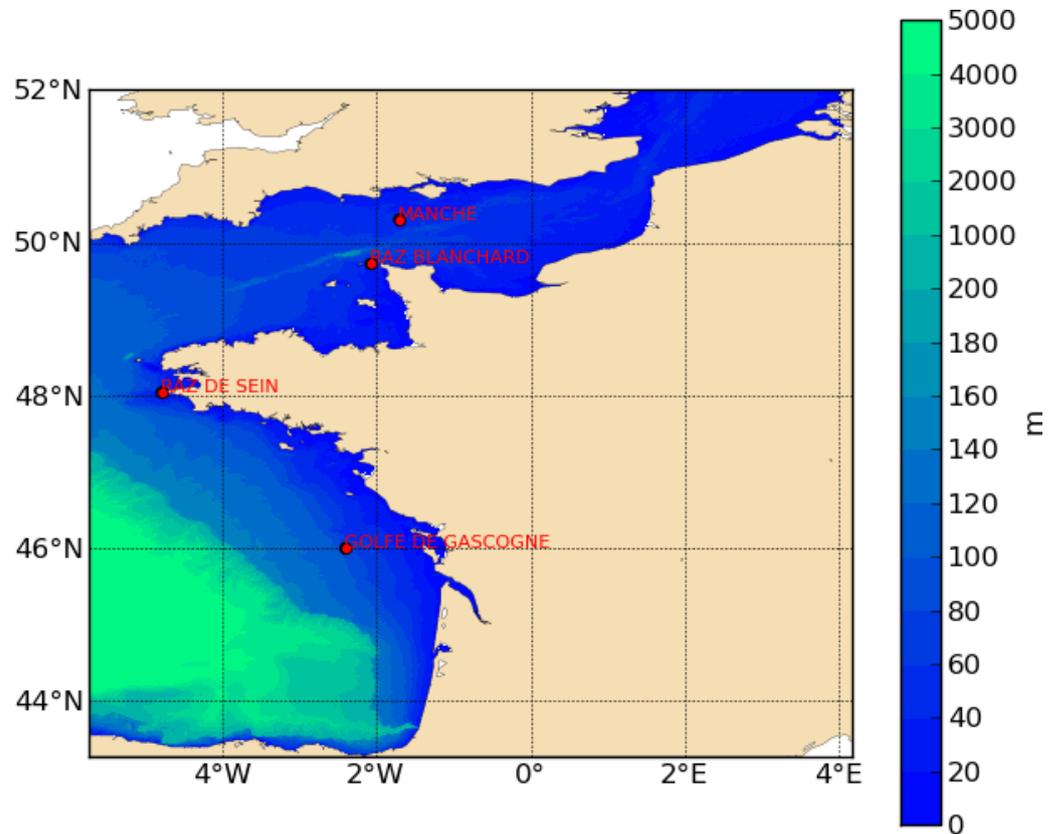


Figure 7 : Points de validation des prédictions de vitesses et bathymétrie

Les vitesses prédites à partir de l'atlas Atlantique Nord Est (ATLNE) ont été calculées grâce à *predictor* de la Tidal ToolBox, en janvier 2009. Pour ces 4 points, pour le rang 0, les vitesses U et V prédites ont été comparées à celles modélisées (Figure 8 et Figure 9). Le décrochement entre la vitesse V prédite et modélisée qui apparaît au niveau du Raz Blanchard aux environs du 24 janvier 2009 (Figure 9) est la signature de la tempête Klaus. Les erreurs quadratiques moyennes et les biais des écarts entre les vitesses U et V modélisées et prédites ont été calculés (Tableau 3 et Tableau 4). Ces comparaisons montrent que les prédictions sont assez proches du modèle, on retrouve bien le signal. Les erreurs RMS sont en moyenne pour U et V de 6 et 9 cm/s, ce qui représente respectivement environ 8% et 7% du signal.

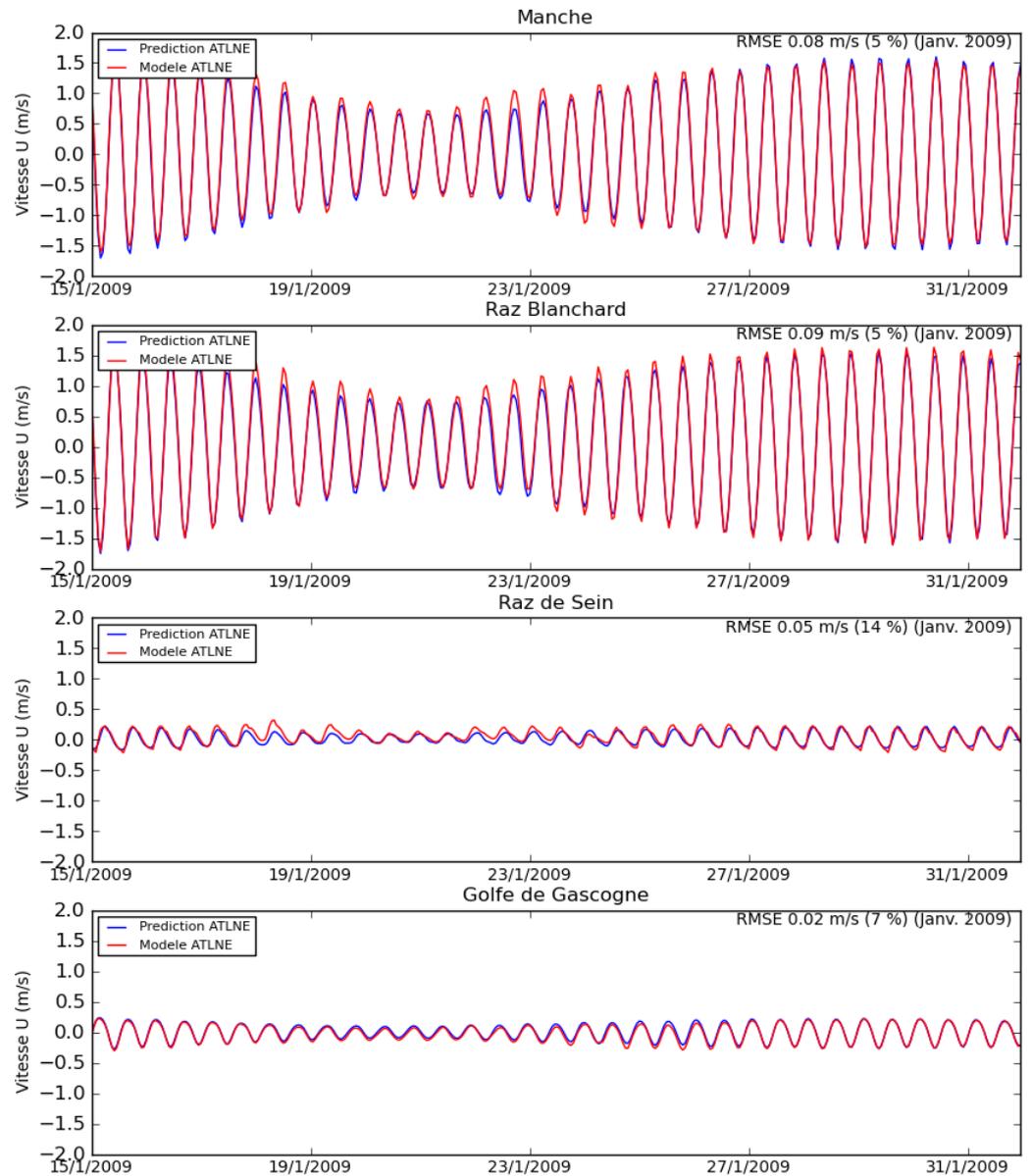


Figure 8 : Comparaison des prédictions de vitesse U issues de l'atlas Atlantique Nord Est (ATLNE) et des vitesses issues du modèle Atlantique Nord Est (ATLNE) aux 4 points de validation en janvier 2009

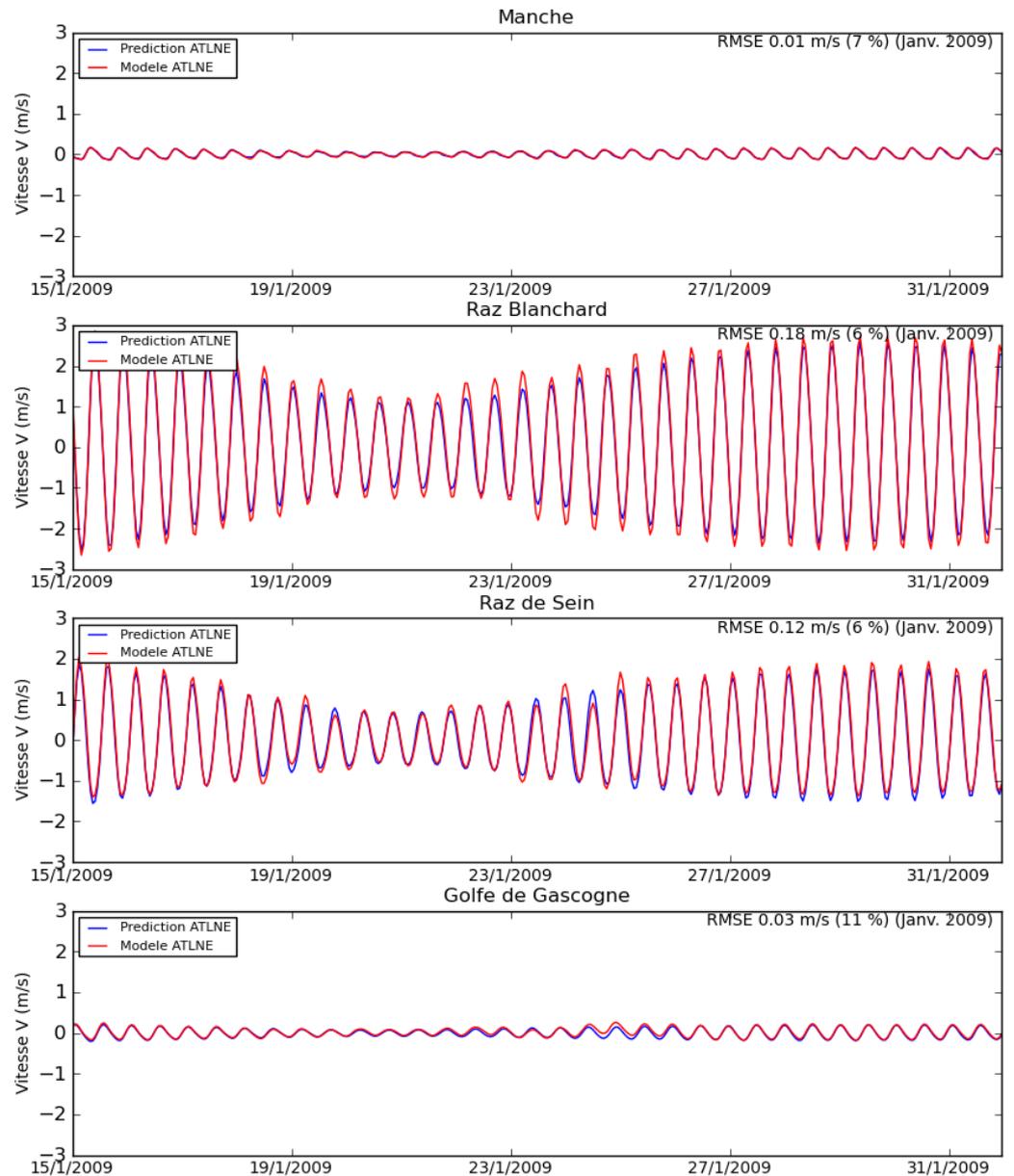


Figure 9 : Comparaison des prédictions de vitesse V issues de l'atlas Atlantique Nord Est (ATLNE) et des vitesses issues du modèle Atlantique Nord Est (ATLNE) aux 4 points de validation en janvier 2009

| Points | Erreur RMS (m/s) | Erreur RMS (%) | Biais (m) |
|-------------------|------------------|----------------|-------------|
| Manche | 0.08 | 5% | 0.01 |
| Raz Blanchard | 0.09 | 5% | 0.03 |
| Raz de Sein | 0.05 | 14% | 0.02 |
| Golfe de Gascogne | 0.02 | 7% | -0.01 |
| Moyenne | 0.06 | 8% | 0.01 |

Tableau 3 : Erreurs quadratiques moyennes et biais entre le modèle et la prédiction de vitesse U (issue de l'analyse du modèle avec la Tidal ToolBox)

| Points | Erreur RMS (m/s) | Erreur RMS (%) | Biais (m) |
|-------------------|------------------|----------------|-------------|
| Manche | 0.01 | 7% | 0.00 |
| Raz Blanchard | 0.18 | 6% | -0.01 |
| Raz de Sein | 0.12 | 6% | 0.06 |
| Golfe de Gascogne | 0.03 | 11% | 0.02 |
| Moyenne | 0.09 | 7% | 0.02 |

Tableau 4 : Erreurs quadratiques moyennes et biais entre le modèle Atlantique Nord Est et la prédiction de vitesse V (issue de l'atlas Atlantique Nord Est)

3.5. Composantes harmoniques

Pour chaque port, les principales composantes harmoniques issues de chaque modèle (rang 0, rang 1 et rang 2) ont été comparées (Mm, Mf, Q₁, O₁, P₁, K₁, 2N₂, N₂, Mu₂, N₂, M₂, L₂, S₂, K₂, MN₄, M₄, MS₄, MK₄, M₆) avec celles issues des mesures. Les composantes harmoniques des mesures sont issues de l'analyse harmonique avec *mas* (logiciel d'analyse harmonique du SHOM) des hauteurs des marégraphes numériques (collectées sur REFMAR), pour s'assurer de la qualité des données (par rapport aux données plus anciennes).

L'exemple de Dunkerque est présenté Figure 10. Les amplitudes et phases des principales composantes harmoniques à Dunkerque pour les rangs 0, 1 et 2 et pour la mesure sont présentées Tableau 5. Les écarts par rapport aux mesures en amplitude (en %) et en phases (en °) sont présentées Tableau 6. Les écarts par rapport aux mesures en % sont faibles pour des grandes amplitudes (1% pour M₂), mais augmentent rapidement pour les faibles amplitudes. Les résultats des rangs 0 et 1 sont du même ordre de grandeur, même si le rang 1 est légèrement meilleur. En revanche, le rang 2 apporte une nette amélioration : l'erreur quadratique moyenne des écarts par rapport aux mesures passe de 20° à 4° entre les rangs 0 et 2 pour la phase. Comme pour les hauteurs, ceci est dû à l'amélioration du forçage de la marée aux limites du rang 2 (cstFRANCE) et à l'amélioration de la résolution spatiale.

Les figures des principales composantes harmoniques issues de l'analyse des rangs 0 (ATLNE), 1 (MANGA) et 2 (MANE) et issues de l'analyse des mesures pour chacun des 18 ports sont présentées en annexe 2.



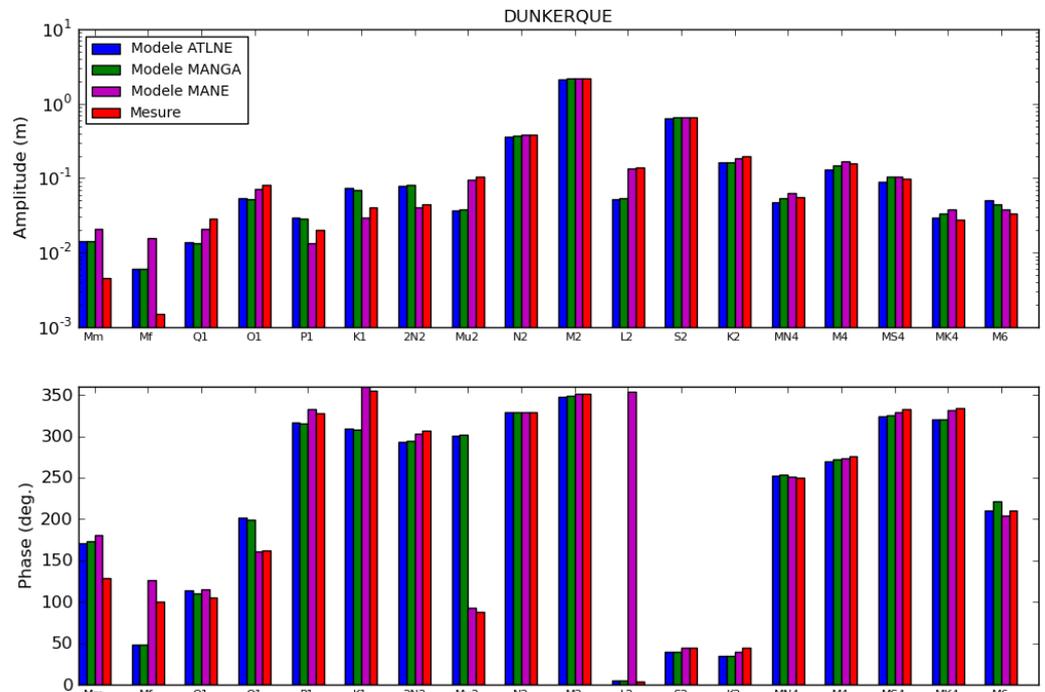


Figure 10 : Principales composantes harmoniques issues de l'analyse des rangs 0 (ATLNE), 1 (MANGA) et 2 (MANE) et issues de l'analyse des mesures

| Onde | Amplitude (cm) | | | | Phase (°) | | | |
|------------|----------------|--------|--------|--------|-----------|--------|--------|--------|
| | Rang 0 | Rang 1 | Rang 2 | Mesure | Rang 0 | Rang 1 | Rang 2 | Mesure |
| Q1 | 1.4 | 1.3 | 1.3 | 2.9 | 113 | 110 | 115 | 106 |
| O1 | 5.4 | 5.2 | 5.2 | 8.2 | 202 | 200 | 161 | 162 |
| P1 | 3.0 | 2.9 | 2.9 | 2.0 | 317 | 316 | 333 | 328 |
| K1 | 7.3 | 7.0 | 7.0 | 4.1 | 309 | 308 | 360 | 356 |
| 2N2 | 7.9 | 8.0 | 8.0 | 4.5 | 294 | 294 | 303 | 307 |
| N2 | 36.3 | 37.1 | 37.1 | 37.8 | 329 | 329 | 329 | 329 |
| M2 | 213.6 | 217.2 | 217.2 | 216.1 | 348 | 349 | 351 | 352 |
| S2 | 64.5 | 65.6 | 65.6 | 65.8 | 40 | 40 | 44 | 45 |
| K2 | 16.3 | 16.5 | 16.5 | 19.5 | 34 | 34 | 39 | 44 |
| M4 | 13.0 | 14.7 | 14.7 | 15.8 | 270 | 272 | 274 | 275 |
| Erreur RMS | Non pertinent | | | / | 20 | 20 | 4 | / |

Tableau 5 : Amplitude et phase des principales composantes harmoniques à Dunkerque pour les rangs 0, 1 et 2 et pour la mesure. Erreur quadratique moyenne des écarts par rapport aux mesures pour chaque rang.

| Onde | Ecart entre l'amplitude modélisée et mesurée (%) | | | | Ecart entre la phase modélisée et mesurée (°) | | | |
|------------------------|--|--------|--------|----------|---|--------|--------|--------|
| | Rang 0 | Rang 1 | Rang 2 | Mesure | Rang 0 | Rang 1 | Rang 2 | Mesure |
| Q ₁ | 52% | 55% | 55% | 2.9 cm | 7° | 4° | 9° | 106° |
| O ₁ | 34% | 37% | 37% | 8.2 cm | 40° | 38° | -1° | 162° |
| P ₁ | 50% | 45% | 45% | 2.0 cm | -11° | -12° | 5° | 328° |
| K ₁ | 78% | 71% | 71% | 4.1 cm | -47° | -48° | 4° | 356° |
| 2N ₂ | 76% | 78% | 78% | 4.5 cm | -13° | -13° | -4° | 307° |
| N ₂ | 4% | 2% | 2% | 37.8 cm | 0° | 0° | 0° | 329° |
| M ₂ | 1% | 1% | 1% | 216.1 cm | -4° | -3° | -1° | 352° |
| S ₂ | 2% | 0% | 0% | 65.8 cm | -5° | -5° | -1° | 45° |
| K ₂ | 16% | 15% | 15% | 19.5 cm | -10° | -10° | -5° | 44° |
| M ₄ | 18% | 7% | 7% | 15.8 cm | -5° | -3° | -1° | 275° |
| Moyenne absolue | 33 % | 31% | 31% | / | 14.2° | 13.6° | 3.1° | / |

Tableau 6 : Ecart par rapport à la mesure des amplitudes (en %) et des phases (en degrés) des principales composantes harmoniques à Dunkerque pour les rangs 0, 1 et 2.

4. Atlas de composantes harmoniques

4.1. Atlas disponibles

Les atlas de composantes harmoniques sont des fichiers au format NetCDF contenant l'amplitude et la phase de chacune des composantes harmoniques. La phase est fournie en Temps Universel. Les composantes harmoniques disponibles pour chaque atlas de marée et courants de marée sont récapitulées Tableau 7 et Tableau 8.

| Nom de l'atlas | Extension géographique | Composantes harmoniques de marée |
|----------------|------------------------|--|
| ATLNE | Atlantique Nord Est | 37 composantes harmoniques : Mm, Mf, Q ₁ , O ₁ , P ₁ , K ₁ , M ₁ , J ₁ , OO ₁ , Ro ₁ , Pi ₁ , 2Q ₁ , Phi ₁ , Sig ₁ , Tta ₁ , Psi ₁ , Ki ₁ , MP ₁ , KQ ₁ , 2N ₂ , N ₂ , M ₂ , S ₂ , K ₂ , NU ₂ , L ₂ , T ₂ , Mu ₂ , E ₂ , La ₂ , KJ ₂ , R ₂ , M ₄ , MS ₄ , MK ₄ , MN ₄ et M ₆ |
| MANGA | Manche Gascogne | |
| MANE | Manche Est | |
| MANW | Manche Ouest | |
| FINIS | Finistère | |
| SUDBZH | Sud Bretagne | |
| AQUI | Aquitaine | |

Tableau 7 : Récapitulatif des atlas de composantes harmoniques de hauteurs de marée disponibles

| Nom de l'atlas | Extension géographique | Composantes harmoniques de courants de marée (U et V) |
|----------------|------------------------|---|
| ATLNE | Atlantique Nord Est | 17 composantes harmoniques : Z ₀ , Mm, Mf, Q ₁ , O ₁ , P ₁ , K ₁ , 2N ₂ , N ₂ , M ₂ , S ₂ , K ₂ et M ₄) et les ondes d'interaction MS ₄ , MK ₄ , MN ₄ .et M ₆ . |
| MANGA | Manche Gascogne | |
| MANE | Manche Est | 38 composantes harmoniques : Z ₀ , Mm, Mf, Q ₁ , O ₁ , P ₁ , K ₁ , M ₁ , J ₁ , OO ₁ , Ro ₁ , Pi ₁ , 2Q ₁ , Phi ₁ , Sig ₁ , Tta ₁ , Psi ₁ , Ki ₁ , MP ₁ , KQ ₁ , 2N ₂ , N ₂ , M ₂ , S ₂ , K ₂ , NU ₂ , L ₂ , T ₂ , Mu ₂ , E ₂ , La ₂ , KJ ₂ , R ₂ , M ₄ , MS ₄ , MK ₄ , MN ₄ et M ₆ |
| MANW | Manche Ouest | |
| FINIS | Finistère | |
| SUDBZH | Sud Bretagne | |
| AQUI | Aquitaine | |

Tableau 8 : Récapitulatif des atlas de composantes harmoniques de courants de marée disponibles

Les amplitudes et phases de M_2 et K_1 pour l'atlas Atlantique Nord Est (ATLNE) sont présentées à titre d'exemple Figure 11 et Figure 12. Les amplitudes et phases des principales composantes harmoniques de cet atlas ATLNE sont présentées en annexe 3.



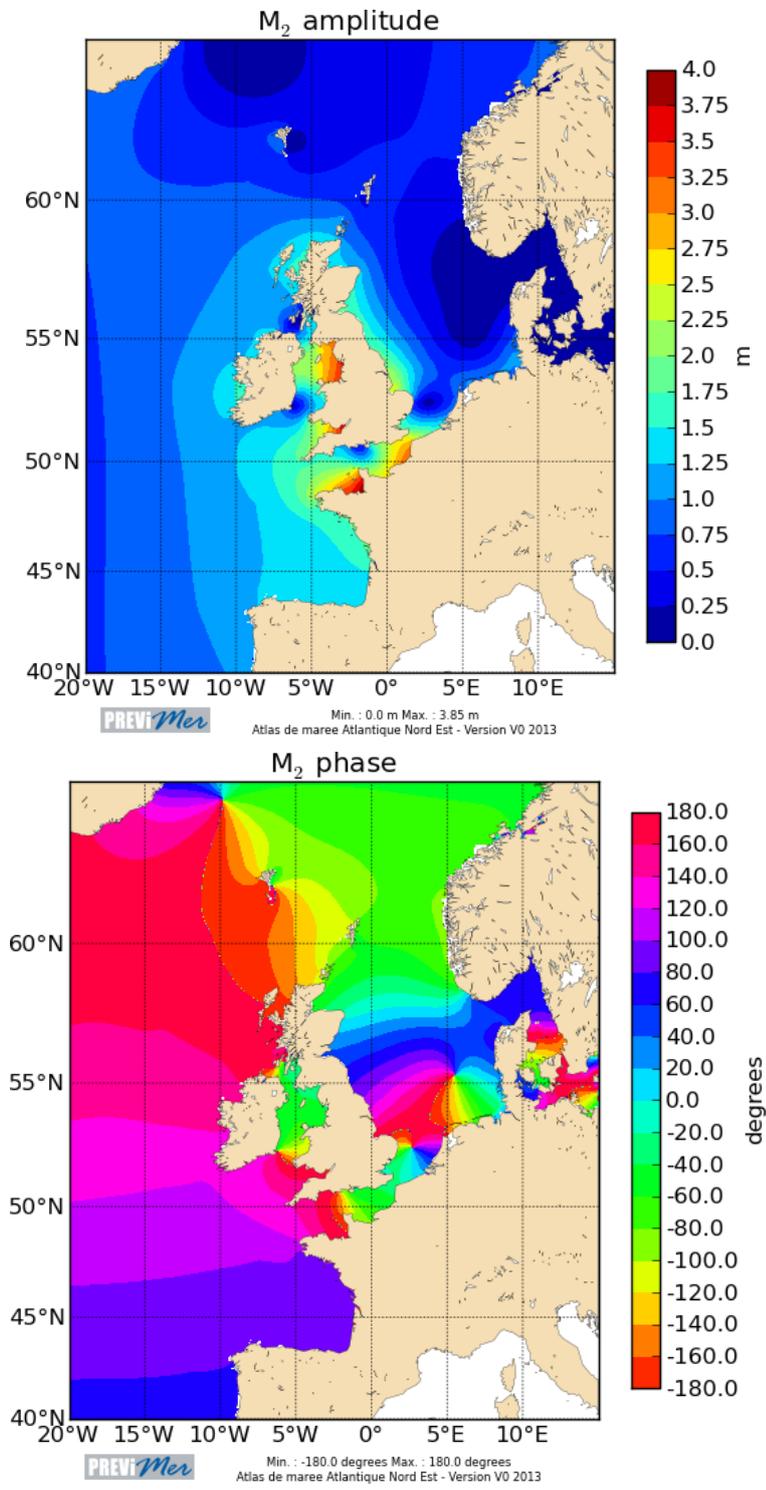


Figure 11 : Amplitude et phase de M₂ issue de l'Atlas Atlantique Nord Est

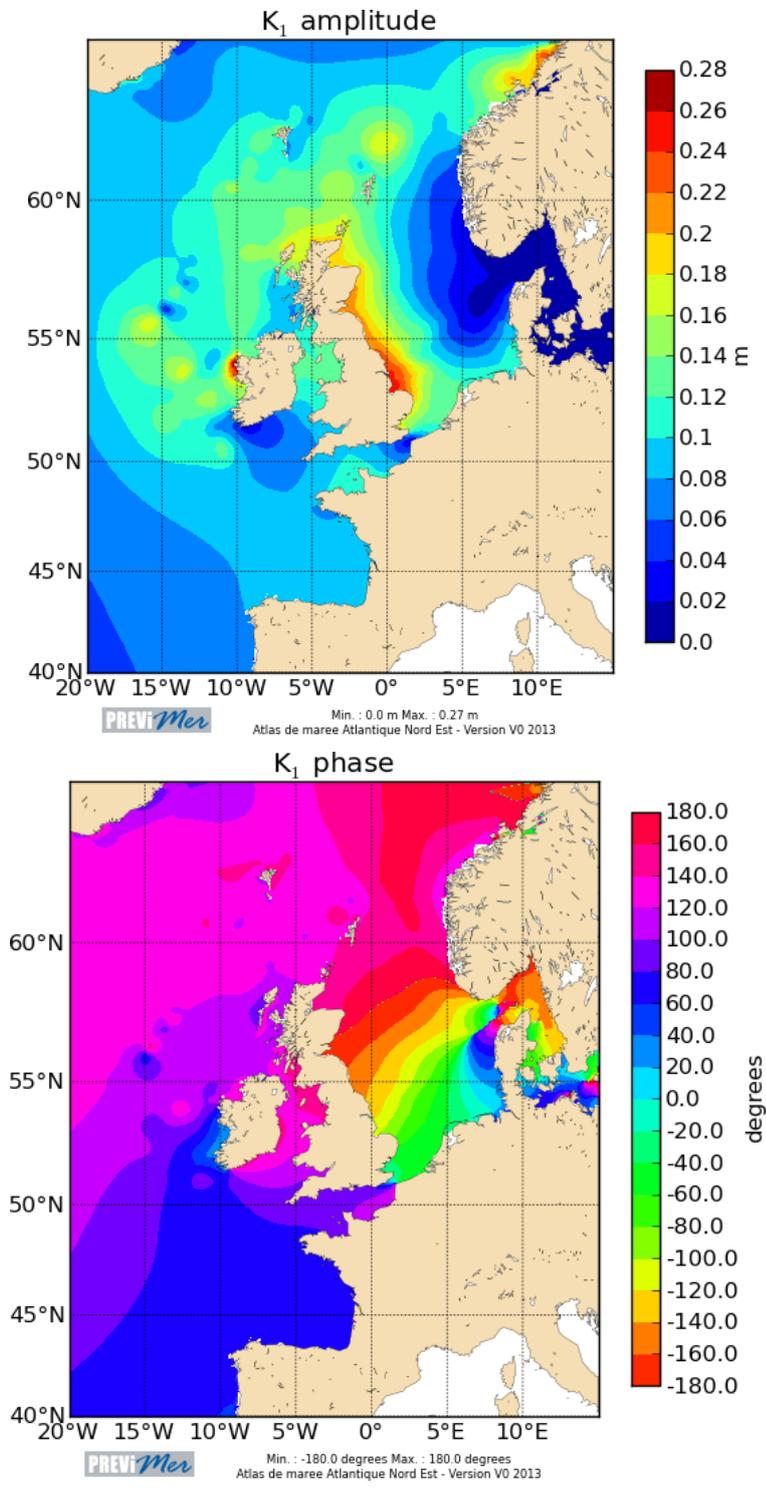


Figure 12 : Amplitude et phase de K₁ issue de l'atlas Atlantique Nord Est

4.2. Atlas du Finistère

L'amplitude et la phase de M_2 issue de l'atlas Finistère est présentée Figure 13.

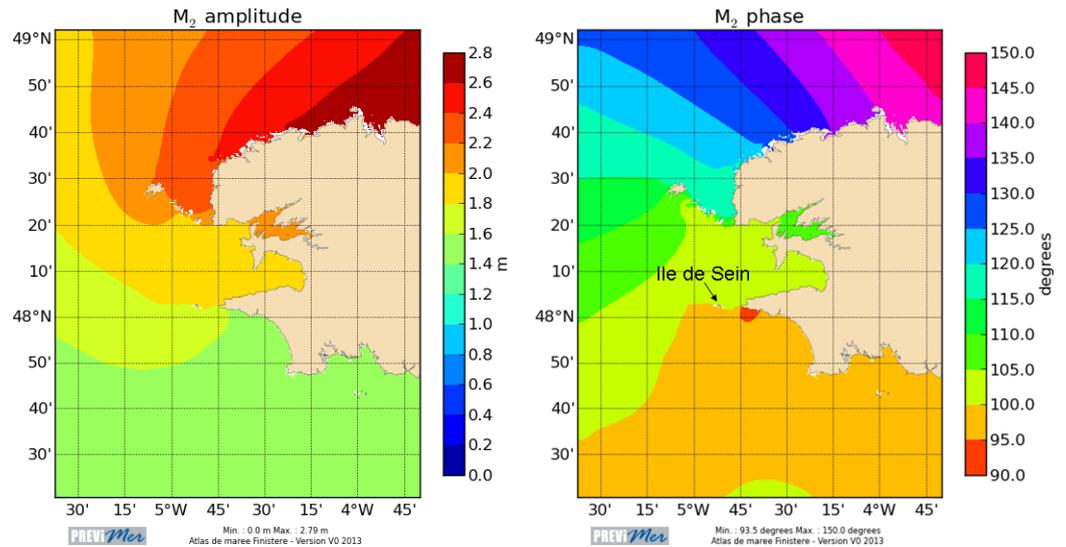


Figure 13 : Amplitude et phase de M_2 issue de l'atlas Finistère

On retrouve très clairement sur cet atlas la variation de la phase de M_2 au niveau des îles. Par exemple au niveau de l'île de Sein, la phase est de l'ordre de 103° au Nord, et 96° au Sud, soit un déphasage de 7° de part et d'autre de l'île. D'après les mesures effectuées par le SHOM, la phase mesurée est de 104° au nord de l'île et 97° au Sud. Ces valeurs sont très proches (1° d'écart seulement) et on retrouve bien le même déphasage de 7° . Sachant que la vitesse angulaire de M_2 est de $28.9841^\circ/\text{h}$, ce déphasage correspond à un décalage de pleine mer de l'ordre de 15 minutes entre le Nord et le Sud de cette très petite île de seulement 2 km de long et 30 à 500 m de large. Les hauts fonds dans cette zone (chaussée de Sein) sont probablement à l'origine de ce déphasage.

Les amplitudes et phases du modèle de marée cstFRANCE sur la même zone est présentée Figure 14. L'aspect moins lisse des isolignes est probablement lié à l'ajustement aux mesures.

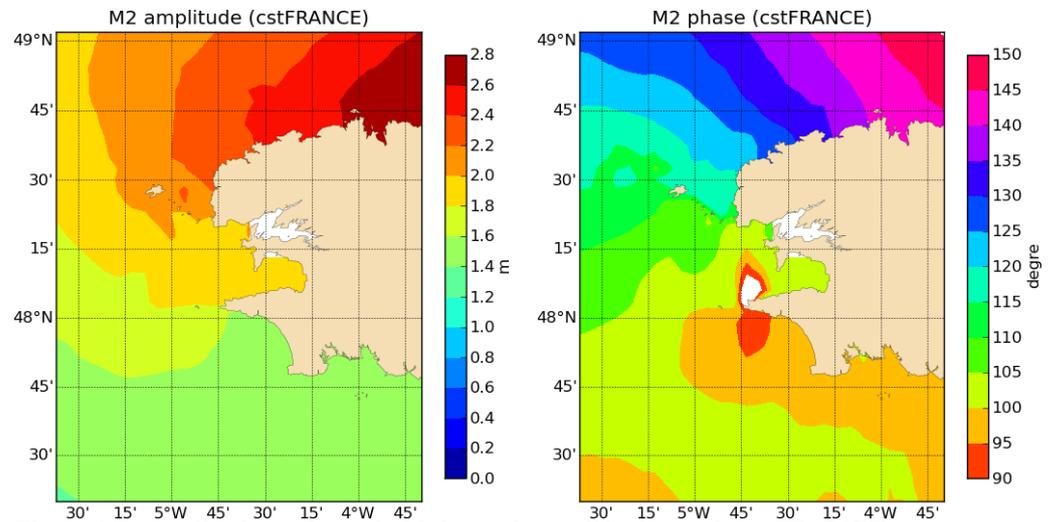


Figure 14 : Amplitude et phase de M_2 issue du modèle de marée cstFRANCE

Les amplitudes et phases du modèle de marée FES sur la même zone est présentée Figure 15. Ce modèle ne montre pas ces variations importantes de marée au niveau des îles, ce qui est normal car il s'agit d'un modèle global dont la résolution ne permet pas de résoudre la marée à cette échelle (résolution de la grille native de FES de l'ordre de 3 km).

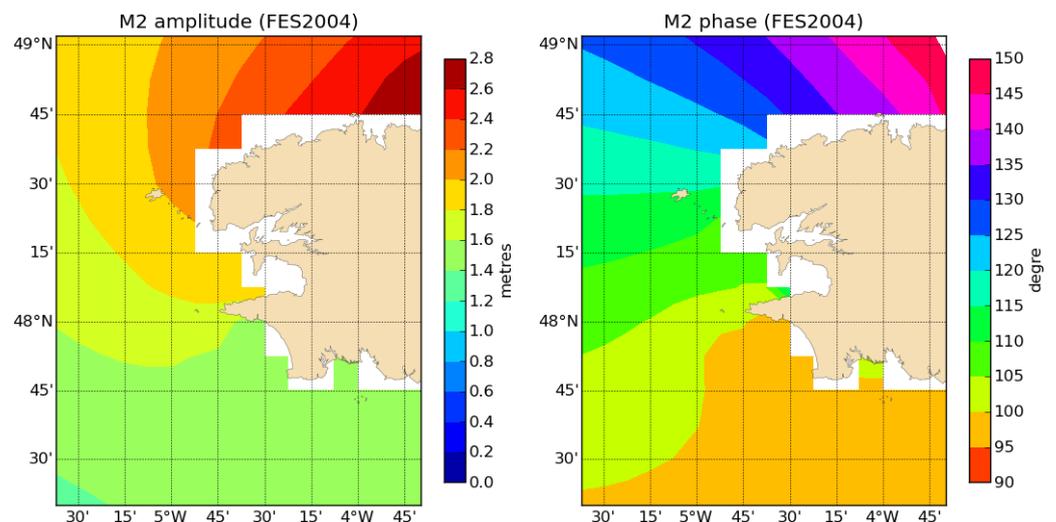


Figure 15 : Amplitude et phase de M_2 issue du modèle de marée global FES 2004

4.3. Cohérence entre les atlas

Pour évaluer la cohérence entre les atlas de rangs 0 et 1, l'amplitude et la phase de l'onde M_2 issue de l'atlas de rang 1 (MANGA) ont été superposées à celles issues de l'atlas de rang 0 (ATLNE) (Figure 16). La continuité aux limites de l'atlas MANGA,

que ce soit pour l'amplitude ou pour la phase, montre que ces deux atlas sont bien cohérents.

De même, pour évaluer la cohérence entre les atlas de rangs 1 et 2, l'amplitude et la phase de l'onde M_2 issue des atlas de rang 2 ont été superposées à celles issues de l'atlas de rang 1 (MANGA) (Figure 17). La même visualisation a été effectuée pour l'onde K_1 (Figure 18). Les rangs 2 sont plutôt continus entre eux, par contre on observe des discontinuités entre les rangs 2 et le rang 1, dues principalement aux différents forçages de marée.

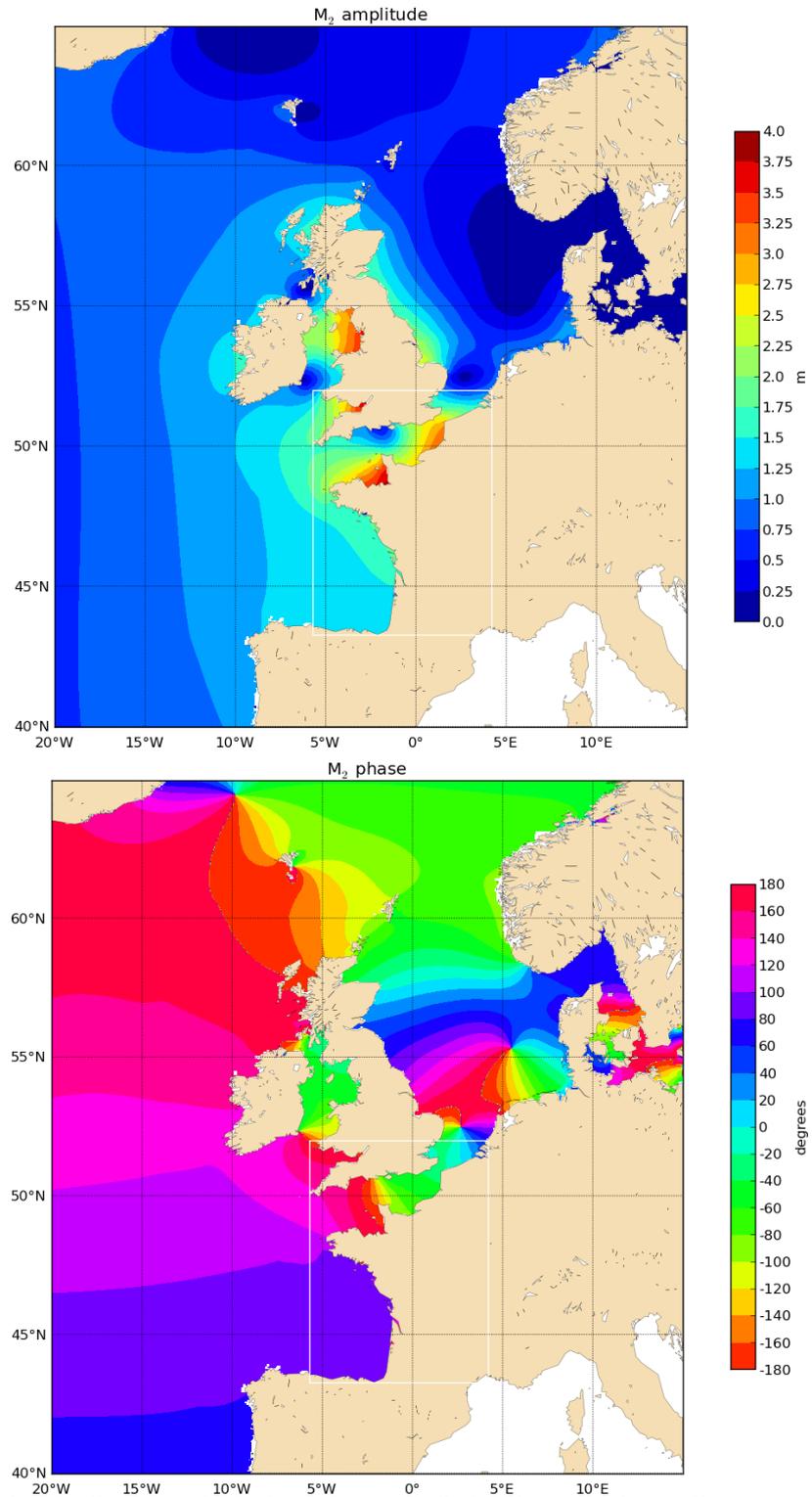


Figure 16 : Amplitude et phase de M_2 issues de l'atlas de rang 1 (MANGA, rectangle blanc) superposées à celles issues de l'atlas de rang 0 (ATLNE)

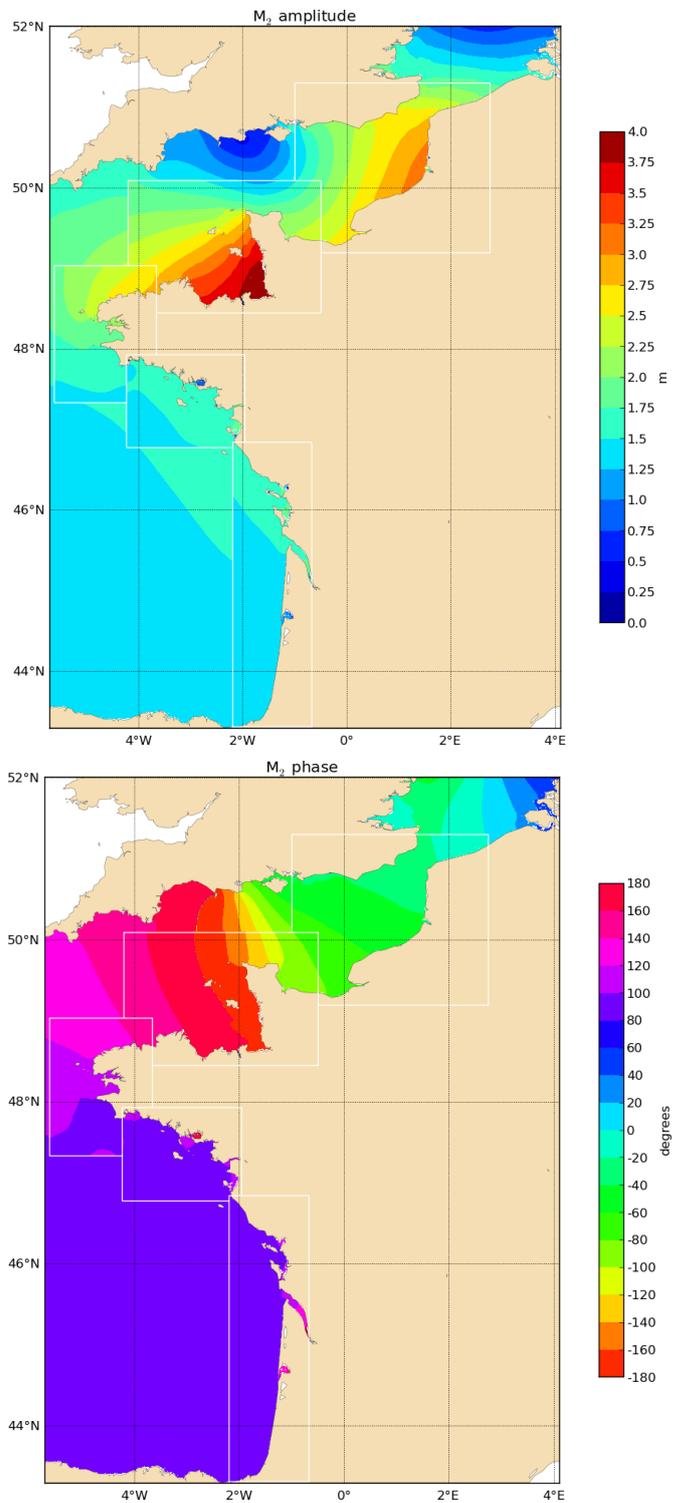


Figure 17 : Amplitude et phase de M_2 issues des atlas de rang 2 (rectangles blancs) superposées à celles issues de l'atlas de rang 1 (MANGA)

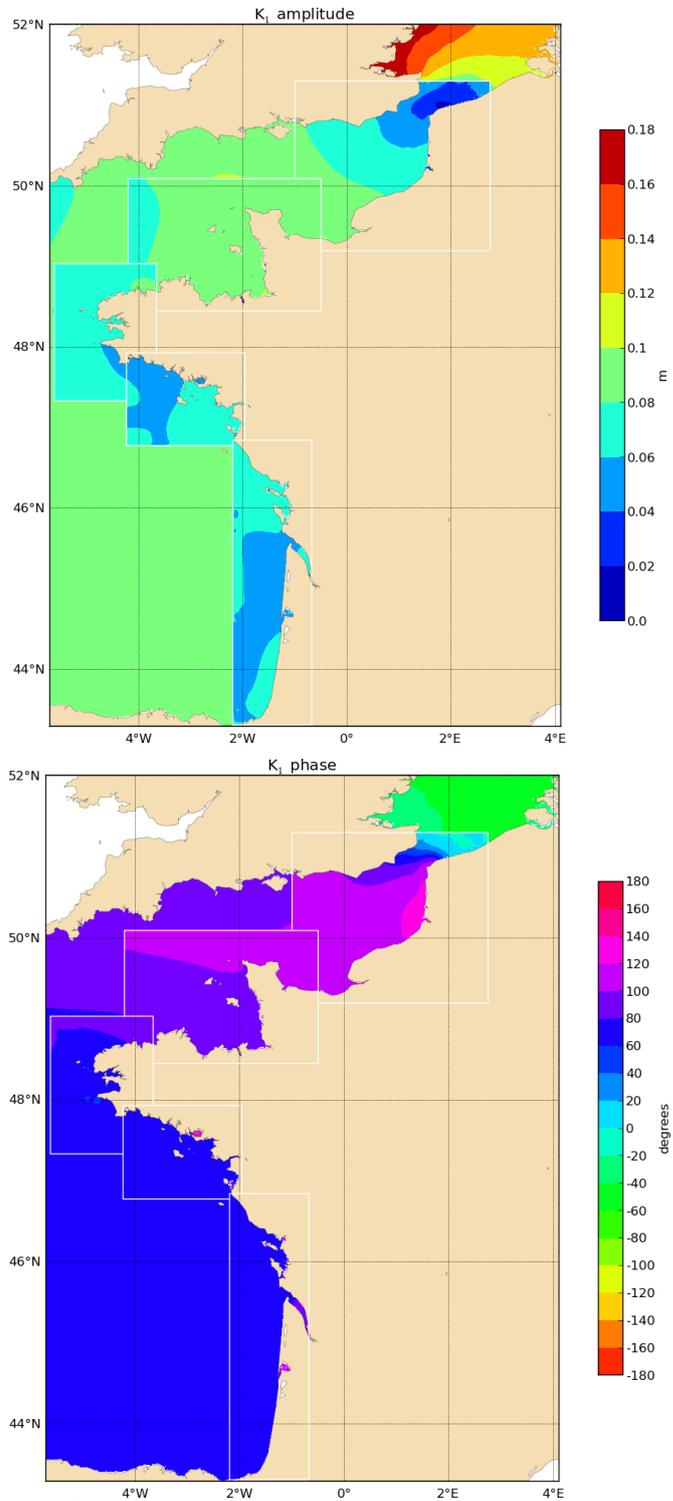


Figure 18 : Amplitude et phase de K_1 issues des atlas de rang 2 (rectangles blancs) superposées à celles issues de l'atlas de rang 1 (MANGA)

5. Conclusion

L'analyse des rejeux des modèles MARS-2D de l'Ifremer avec la Tidal ToolBox, développée par le LEGOS, a permis de mettre en place des atlas de composantes harmoniques de marée et courants de marée sur l'ensemble des côtes de Manche et d'Atlantique.

Les atlas disponibles couvrent l'Atlantique Nord Est (rang 0 à 2 km de résolution spatiale), la Manche et le Golfe de Gascogne (rang 1 à 700 m), et les 5 zones côtières Manche Est, Manche Ouest, Finistère, Sud Bretagne et Aquitaine (rangs 2 à 250 m). La validation des atlas de marée a été réalisée en 18 ports. Les écarts entre les prédictions issues de ces atlas et celles issues de SHOMAR présentent des erreurs RMS en moyenne de 23 cm pour le modèle couvrant l'Atlantique Nord Est, 20 cm pour celui couvrant la Manche et le Golfe de Gascogne et **12 cm pour les cinq atlas côtiers**. Certaines zones restent cependant mal modélisées, comme le bassin d'Arcachon, où l'erreur RMS est importante (24 cm).

L'amélioration de la résolution spatiale des atlas côtiers, combinée à l'introduction du modèle de marée du SHOM cstFRANCE aux limites, permet d'améliorer la marée de manière significative (erreur quadratique moyenne divisée par 2 par rapport aux modèles de rang 0 et 1). Elle permet également une meilleure représentation de la marée, comme par exemple les variations importantes de phase au niveau de l'île de Sein dans le modèle Finistère (7° de variations de part et d'autre de l'île).

En perspective, concernant la validation, on pourra envisager un travail plus fin sur les courants, avec en particulier le tracé d'ellipses de courants (option de la Tidal ToolBox). On pourra également compléter le calcul des erreurs RMS par celui des déphasages. Concernant les atlas, une nouvelle analyse avec la Tidal ToolBox 2.2.4 (disponible au 26.03.2013) au lieu de 2.2.3, devrait permettre d'améliorer les composantes diurnes calculées par admittance. Enfin, il est envisageable de calculer plus de composantes harmoniques pour les rangs 2 (jusqu'à 115), puisque le forçage de marée contient lui-même 115 composantes harmoniques.

Accès aux données

Les atlas de marée et courants de marée (version V0 de février 2013) sont archivés au Centre de Données en Océanographie Côtière Opérationnelle (CDOCO), à l'Ifremer. Ils sont accessibles en adressant le formulaire d'accès aux données numériques à PREVIMER : http://www.previmer.org/produits/acces_aux_donnees.

Remerciements

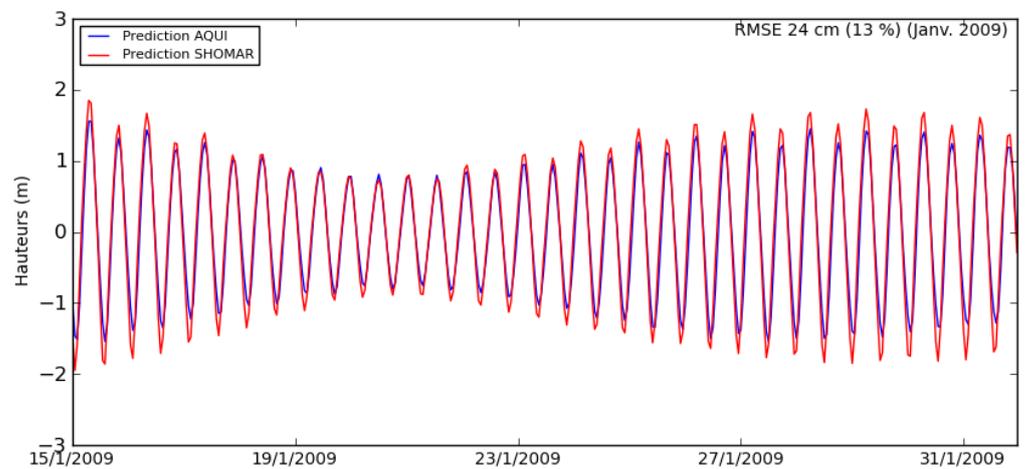
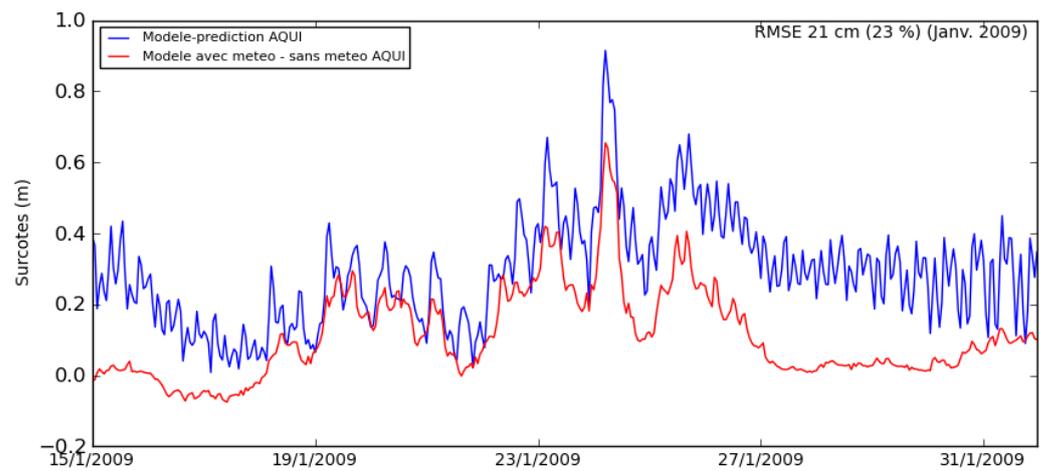
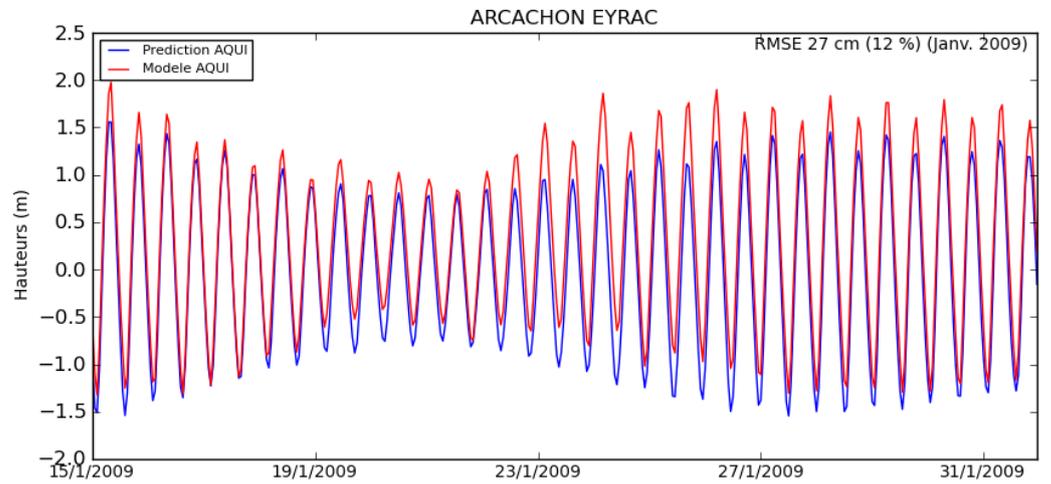
Les hauteurs mesurées au niveau des marégraphes côtiers ont été obtenues grâce au site REFMAR (<http://refmar.shom.fr/>) du SHOM. Les forçages météorologiques ont été fournis par Météo-France dans le cadre de PREVIMER. La Tidal ToolBox a été développée par le LEGOS et cofinancée par l'Ifremer (projet PREVIMER).

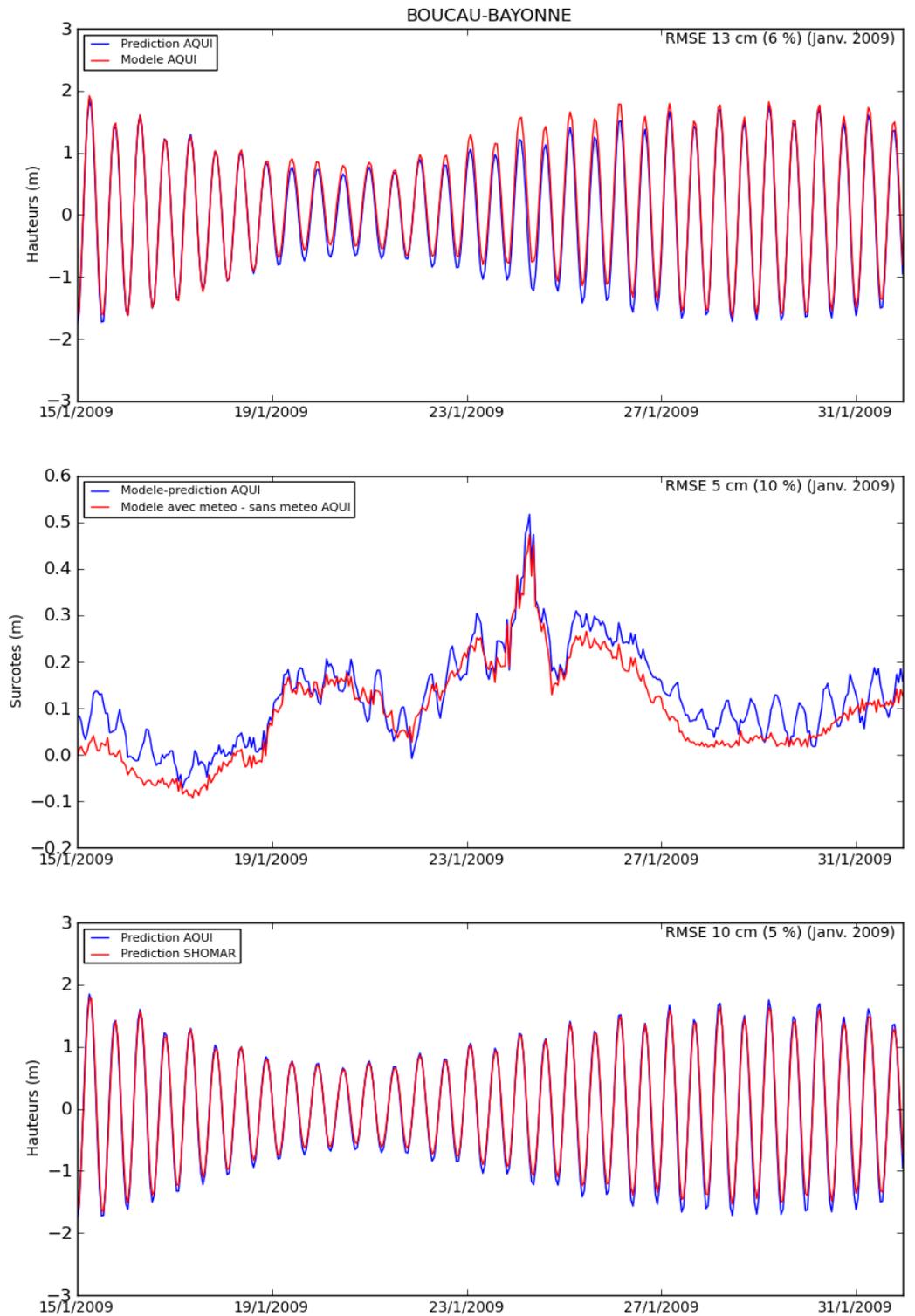
6. Bibliographie

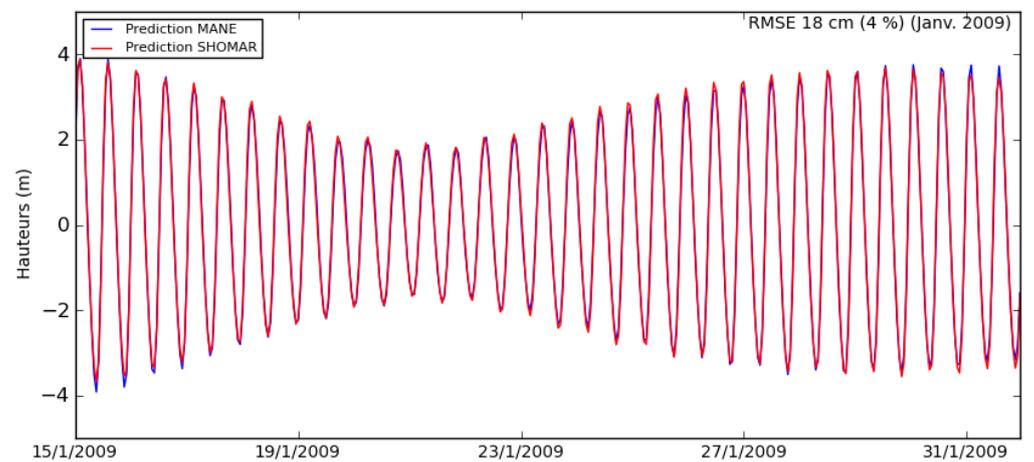
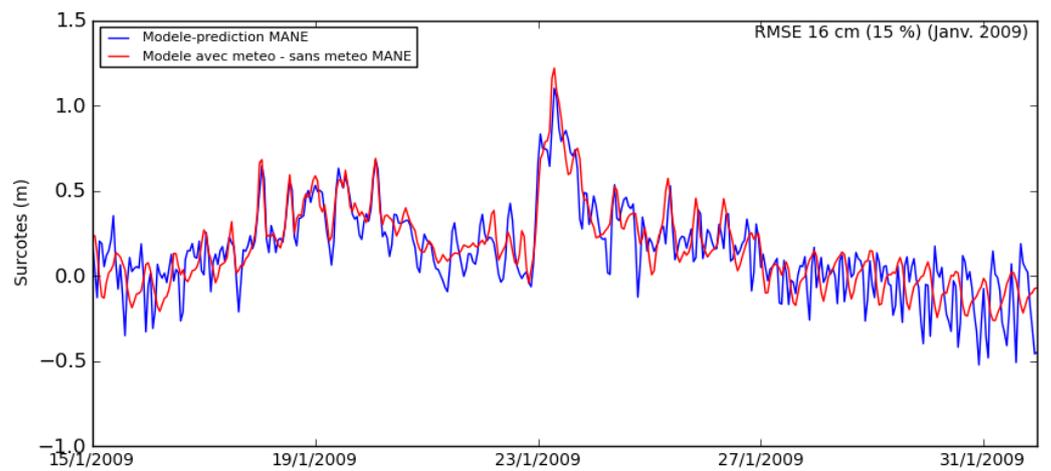
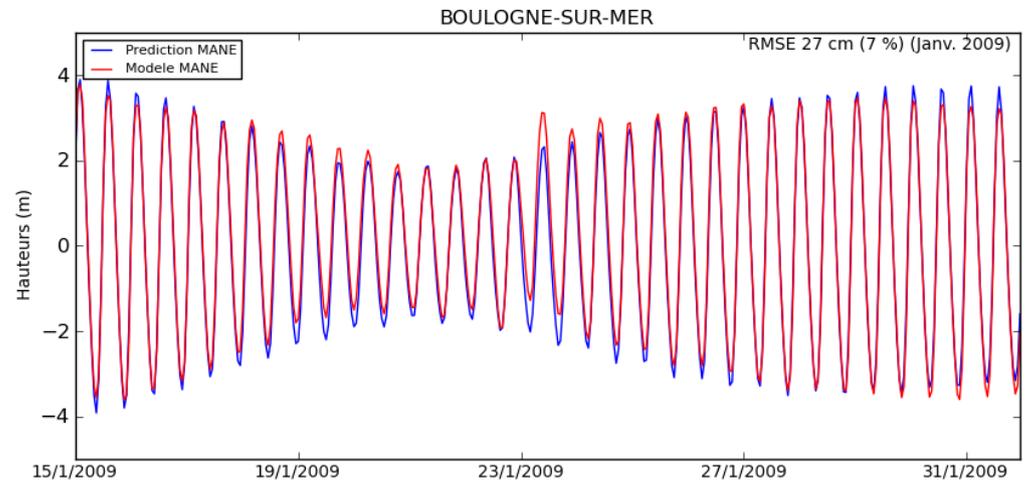
- Allain D. (2013) TUGOm Tidal ToolBox. Documentation de la Tidal ToolBox, 15pp.
- Courtier, P., C. Freydier, J.-F. Geleyn, F. Rabier and M. Rochas (1991) The ARPEGE project at Météo-France. In ECMWF 1991 Seminar Proceedings: Numerical methods in atmospheric models; ECMWF, 9 - 13 September 1991, Vol. II, 193-231.
- Courtier P, Thepaut J, Hollingsworth A (1994) A strategy for operational implementation of 4D-VAR, using an incremental approach. *Q J R Meteorol Soc* 120:1367–1387
- Lecornu F., De Roeck Y. H. (2009) PREVIMER - Observations & Prévisions Côtières. *Houille Blanche—revue internationale de l'eau* 2009;1:60-63.
- Le Roy R., Simon B. (2003) Réalisation et validation d'un modèle de marée en Manche et dans le Golfe de Gascogne. Application à la réalisation d'un nouveau programme de réduction des sondages bathymétriques. Rapport SHOM n°002/03.
- Seity Y, Brousseau P, Malardel S, Hello G, Bénard P, Bouttier F, Lac C, Masson V (2011) The AROME-France convective scale operational model. *Mon Wea Rev* 139:976–991.
- Lazure P., Dumas F. (2008) An external-internal mode coupling for a 3D hydrodynamical model for applications at regional scale (MARS). *Advances In Water Resources*, 31(2), 233-250. <http://dx.doi.org/10.1016/j.advwatres.2007.06.010>
- Lyard, F., Lefèvre, F., Letellier, T., Francis, O. (2006) Modelling the global ocean tides: modern insights from FES 2004. *Ocean Dynamics* 56 (5-6), 394-415.
- Muller H., Pineau-Guillou L., Idier D. (2012) Storm surge modeling strategy along the French (Atlantic and English Channel) coast. *Jonsmod 2013 proceedings Ocean Dynamics* (under review).
- Pineau-Guillou L. (2013), Validation des modèles hydrodynamique 2D des côtes de la Manche et de l'Atlantique. Rapport Ifremer (en cours de rédaction).
- Simon (2007) La marée océanique côtière. Oceanographic Institute Editions, Paris, 433pp.

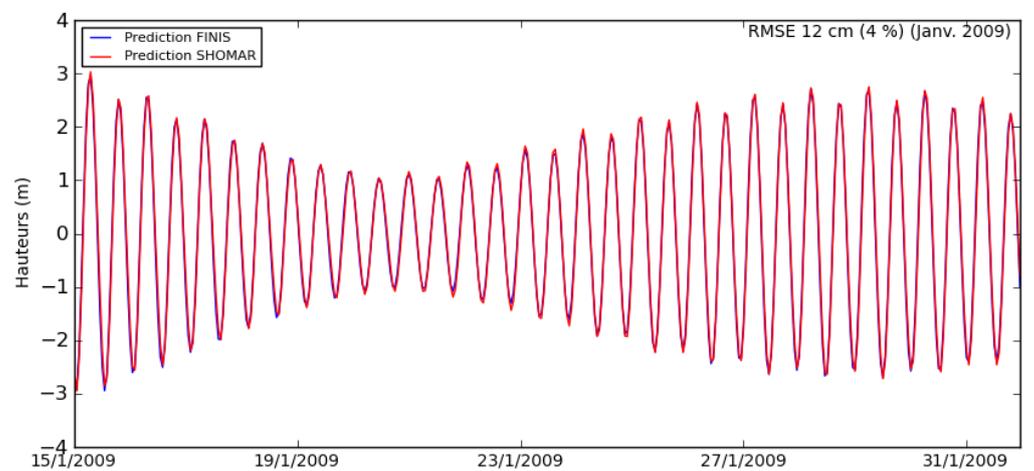
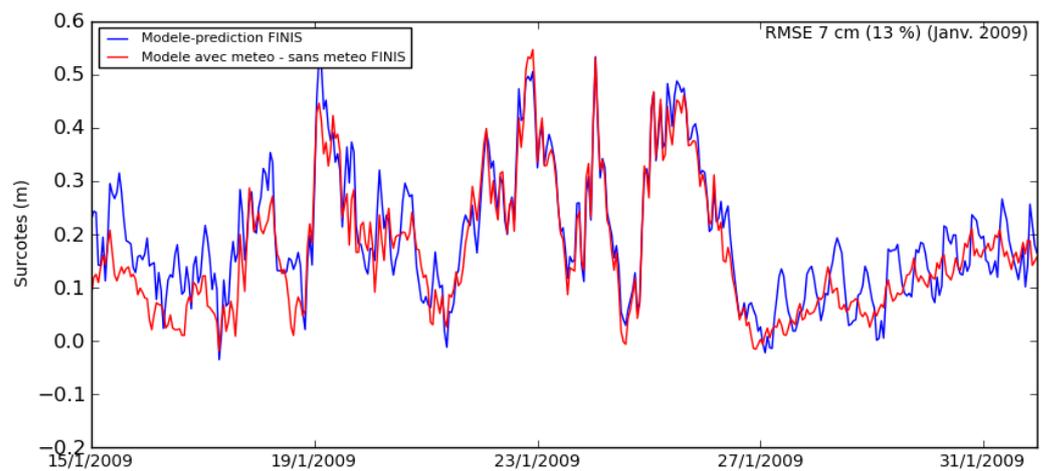
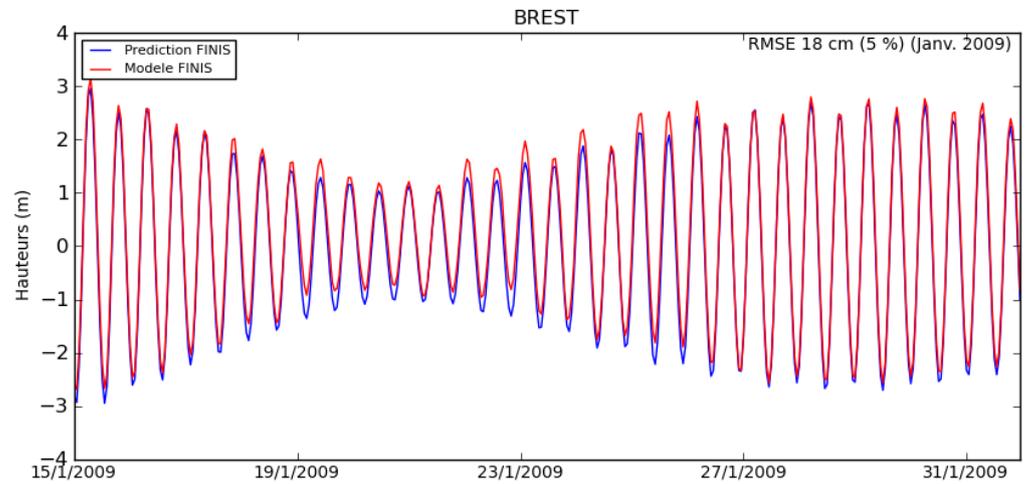
Annexe 1 : Hauteurs d'eau issues des rangs 2 en chacun des 18 points de validation

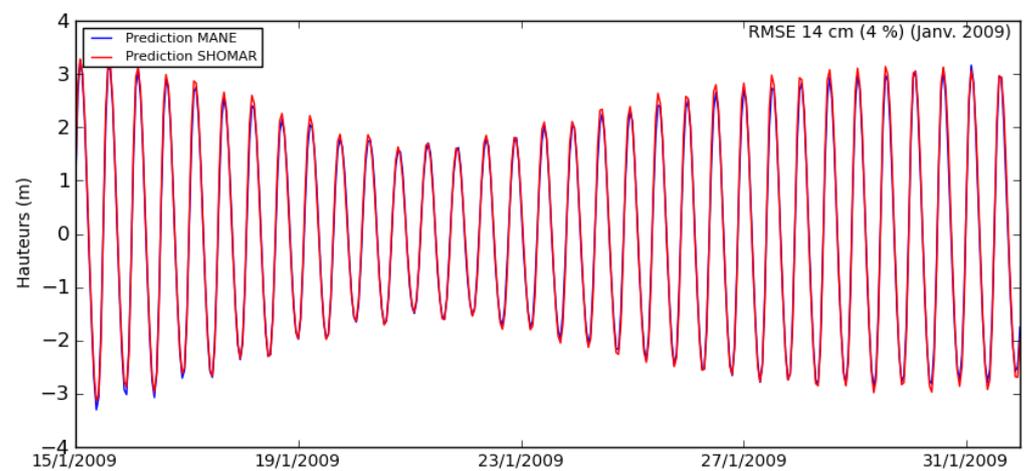
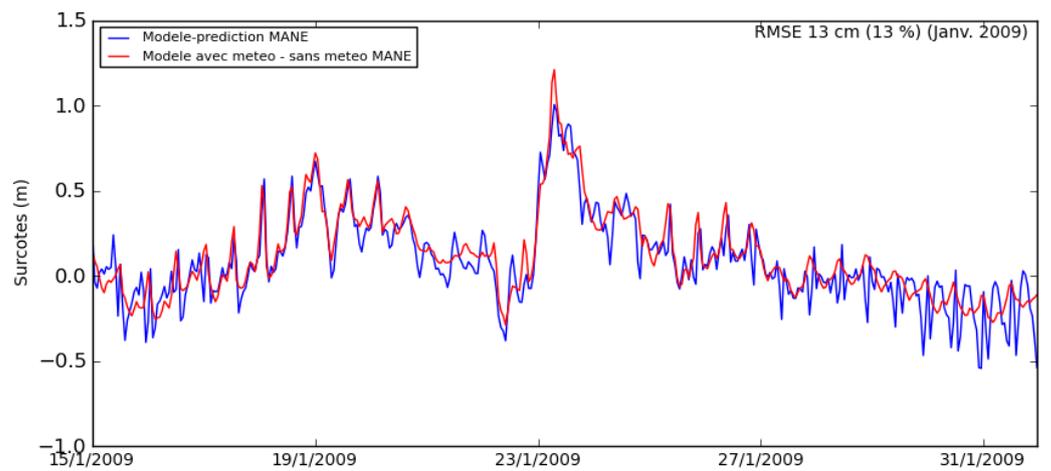
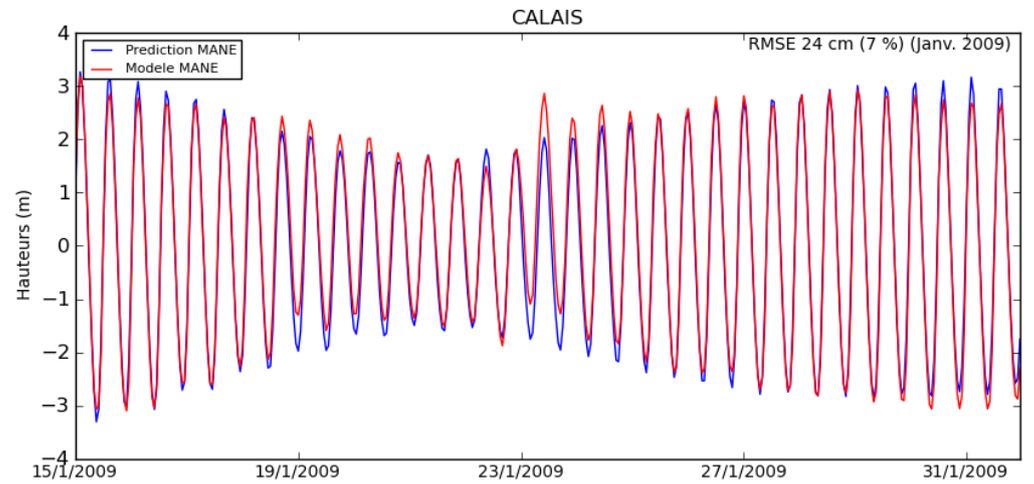


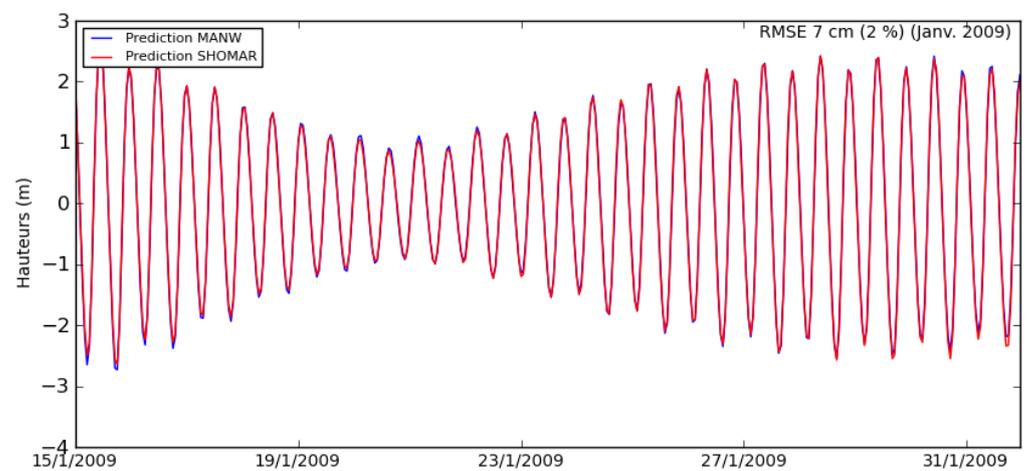
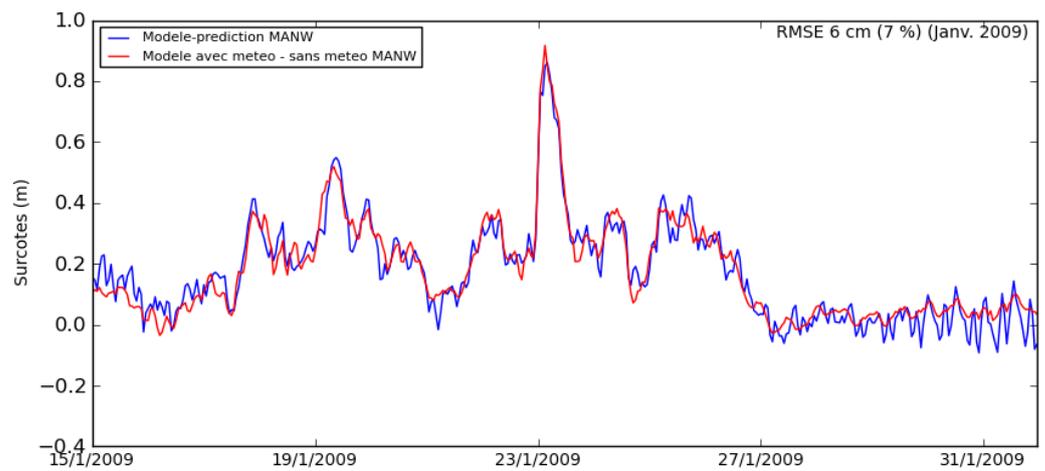
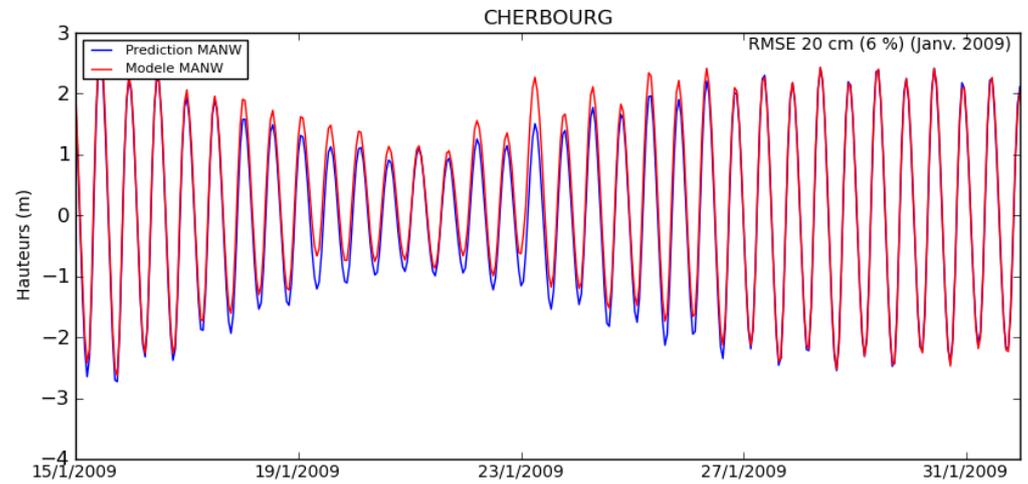


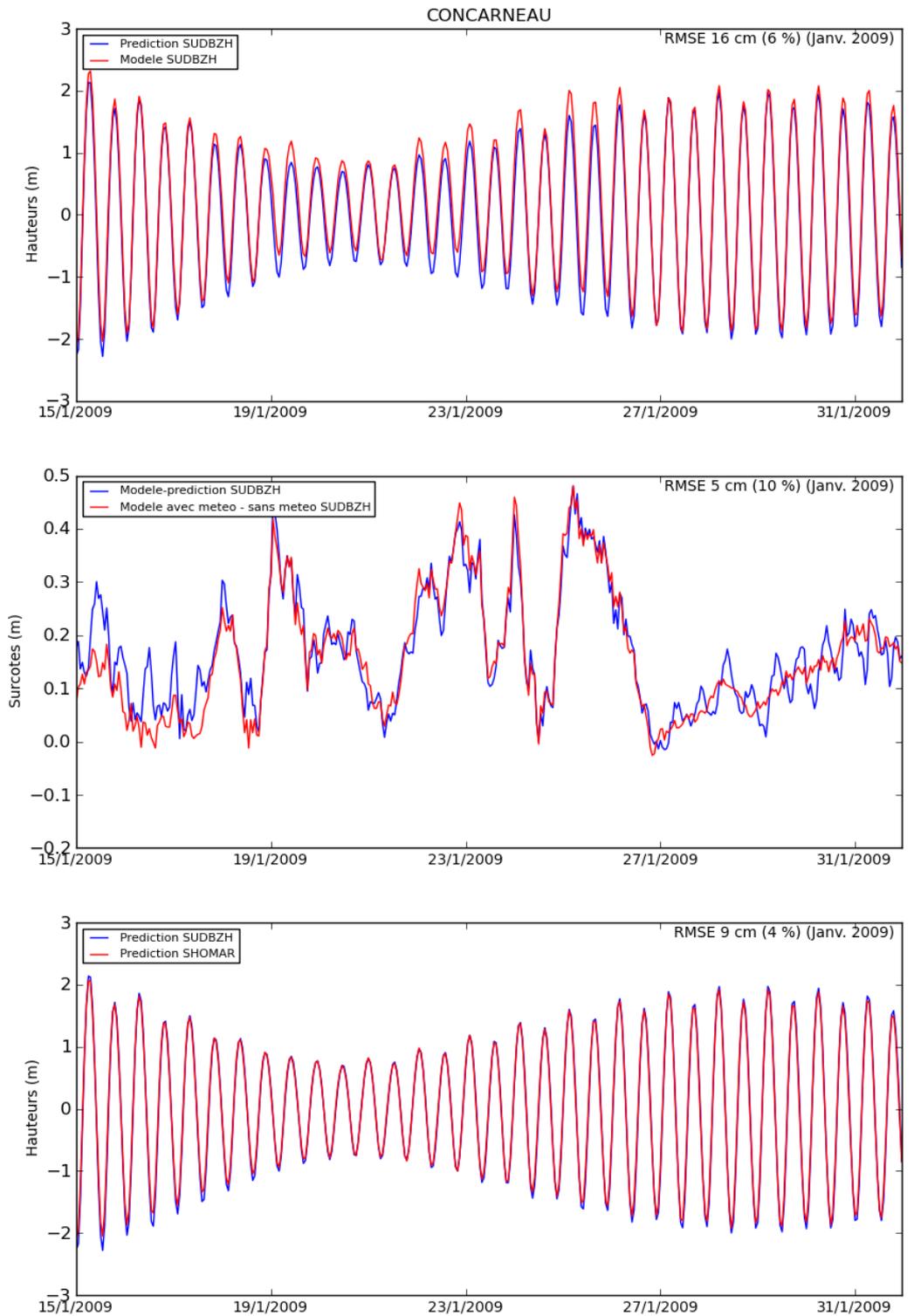


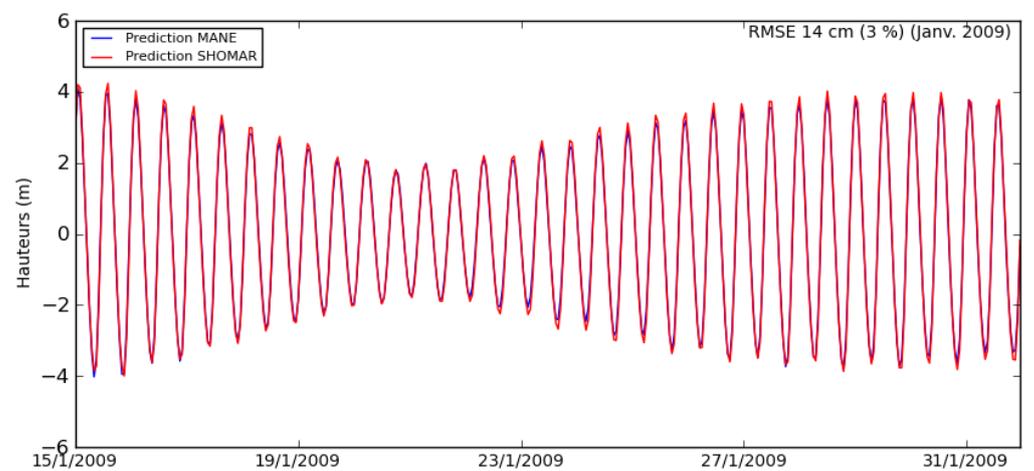
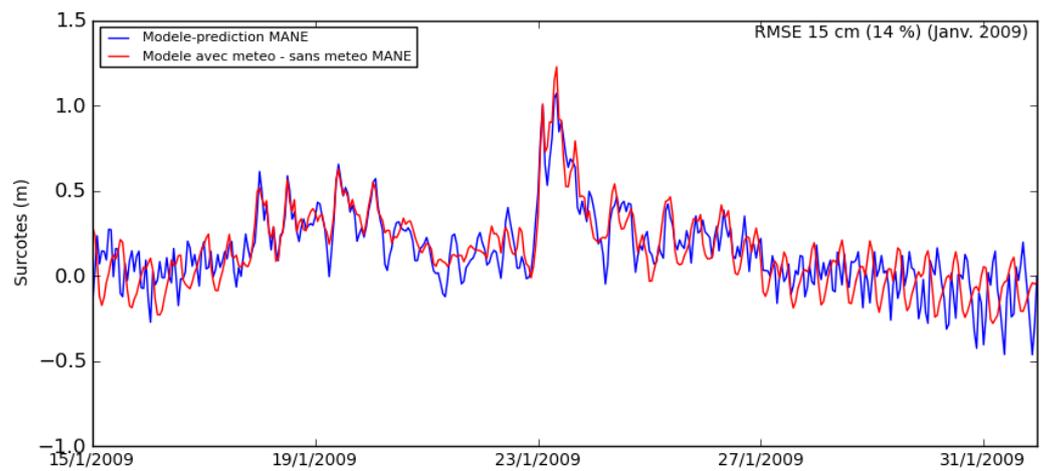
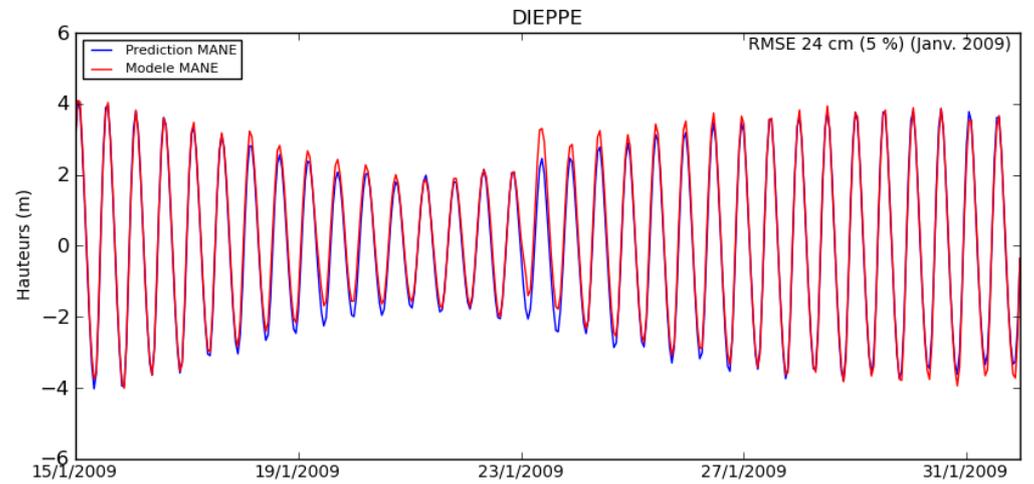


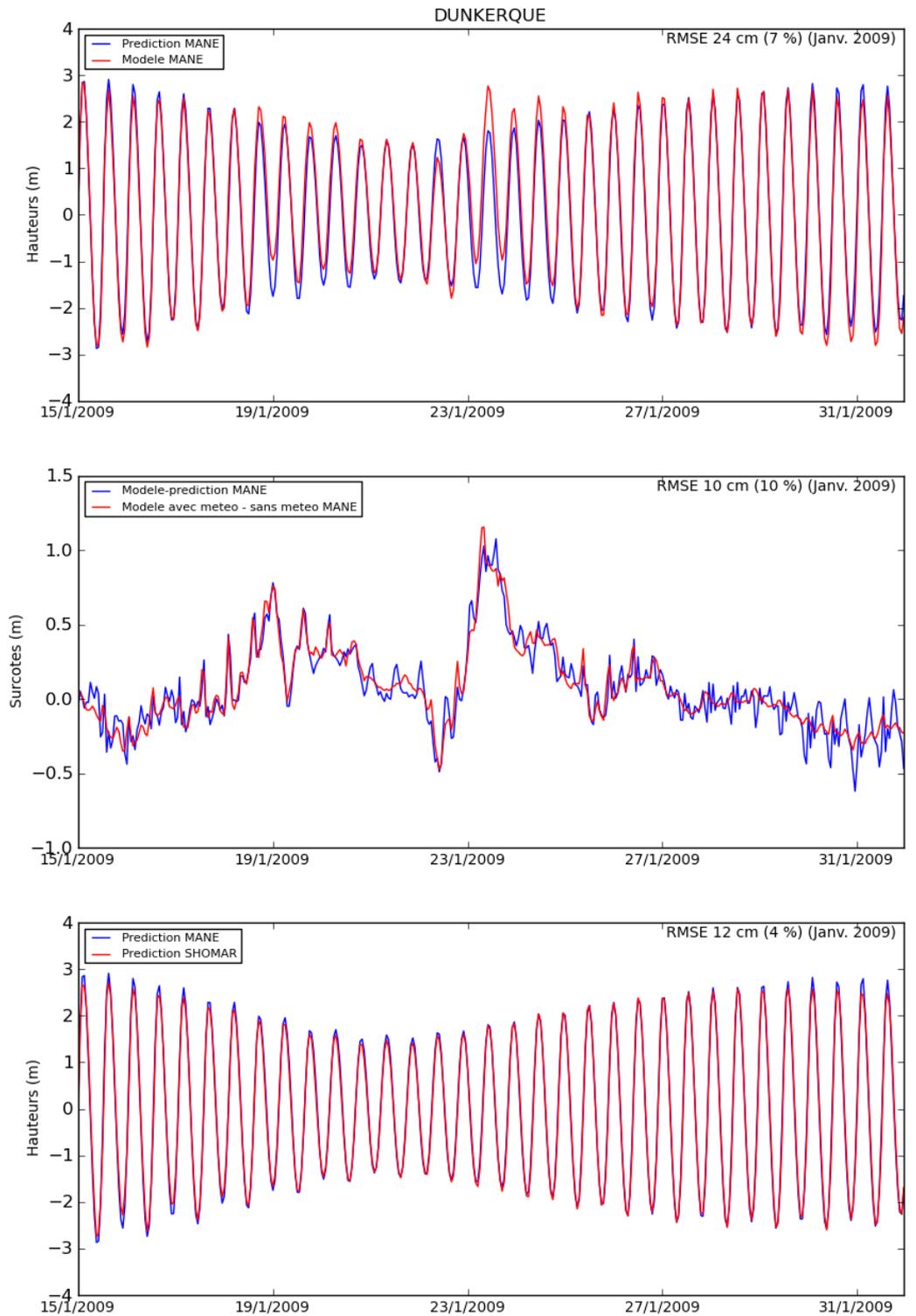


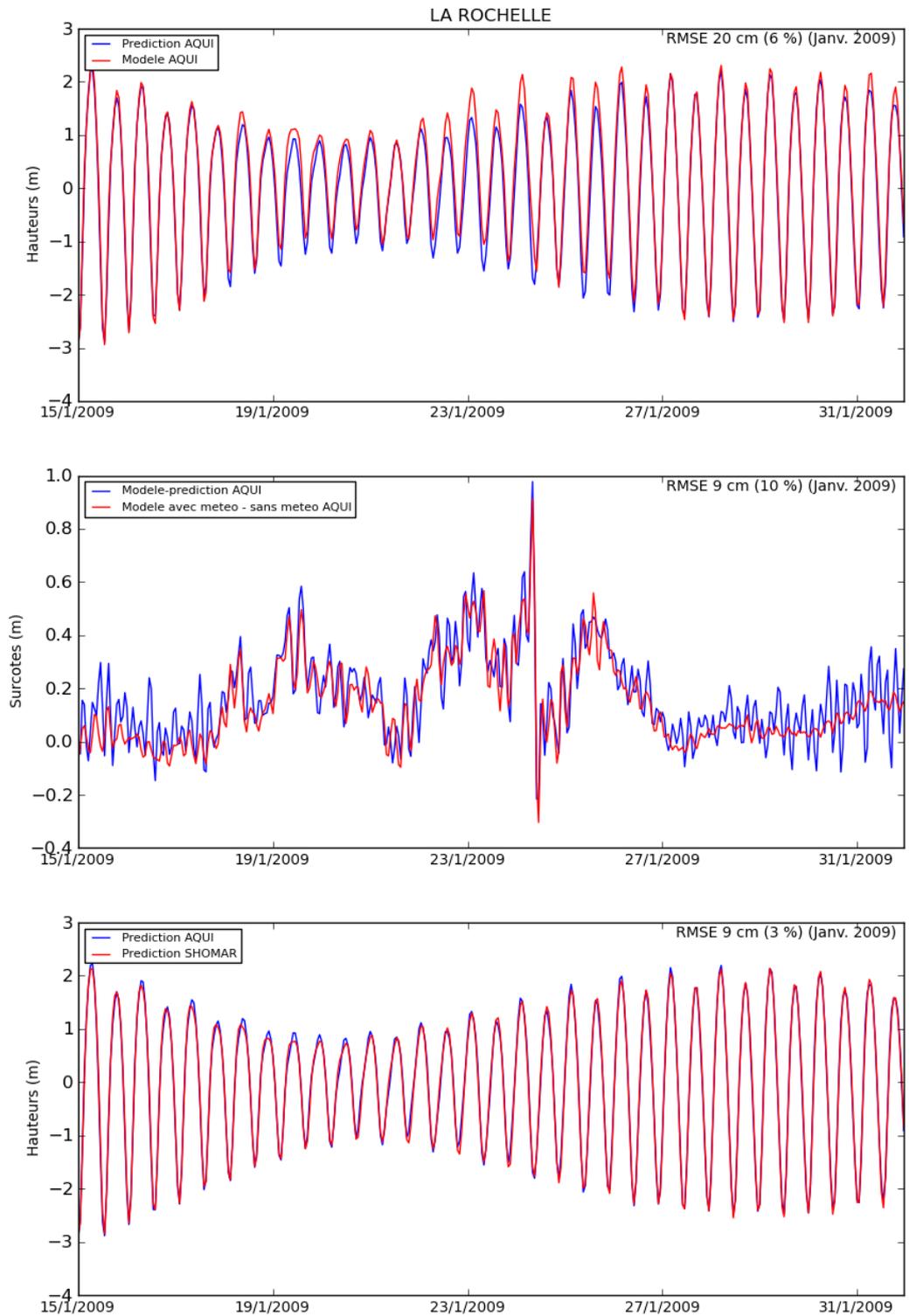


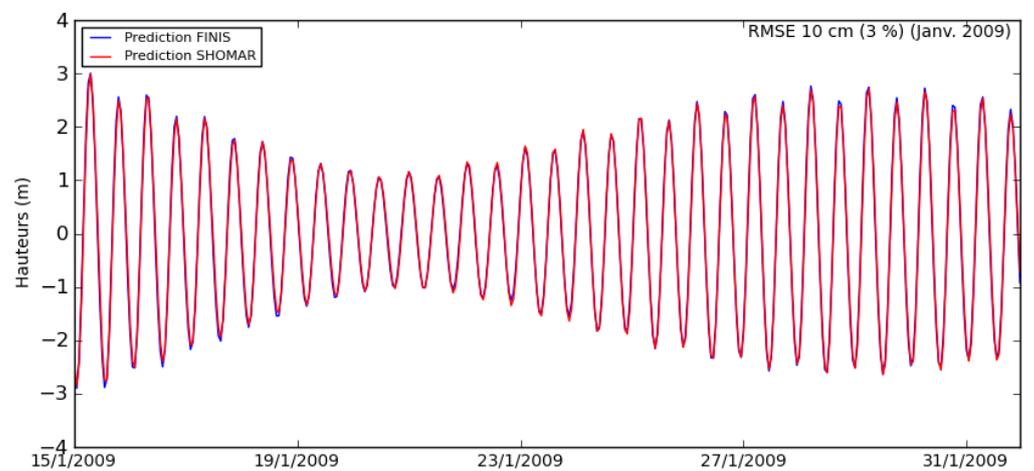
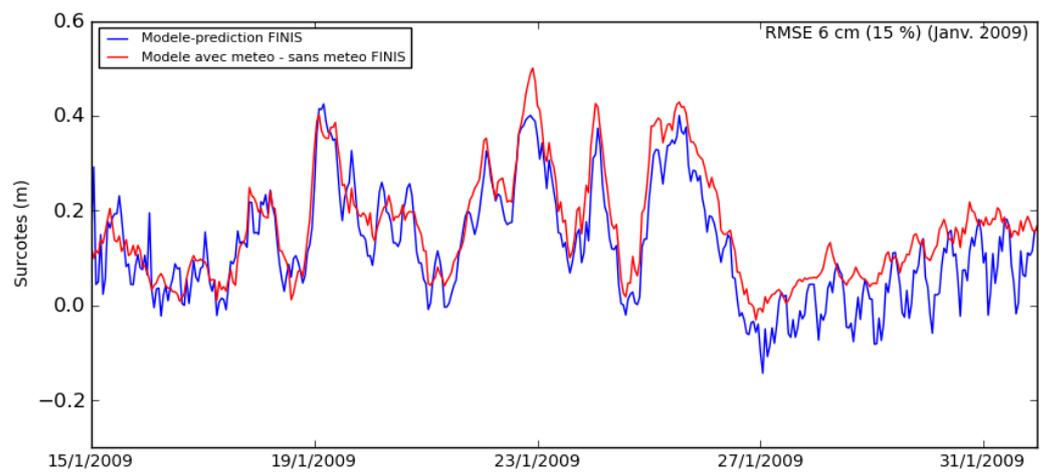
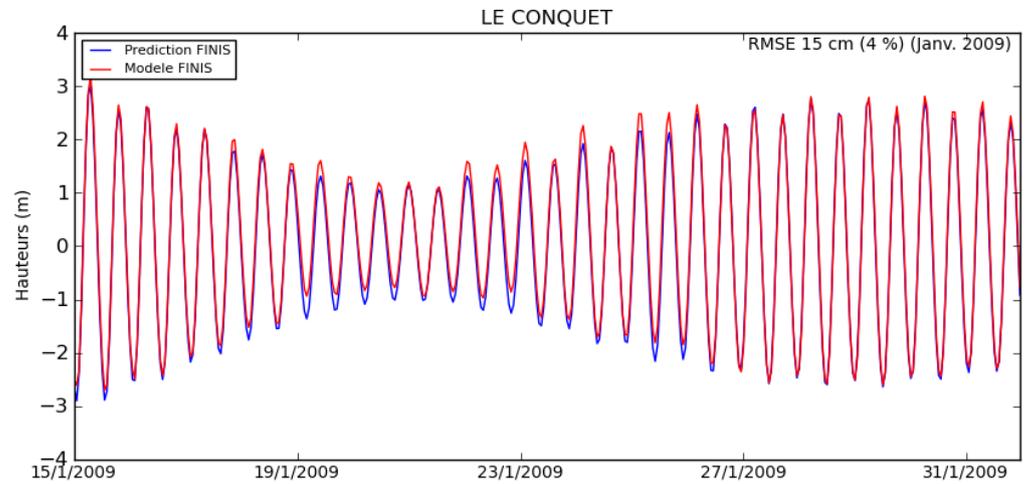


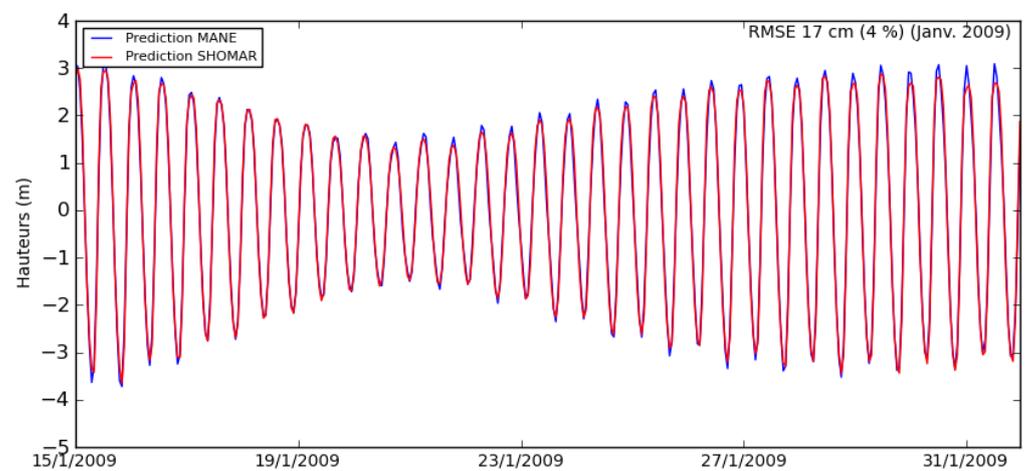
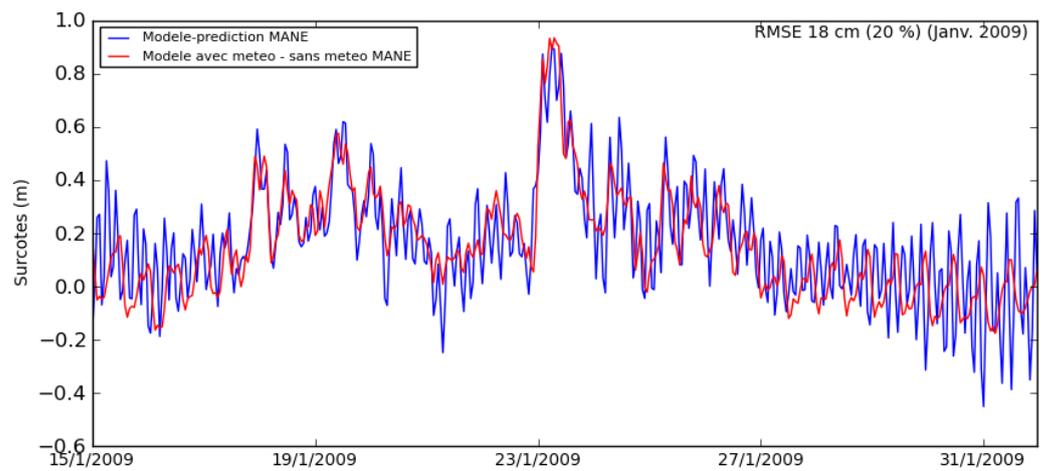
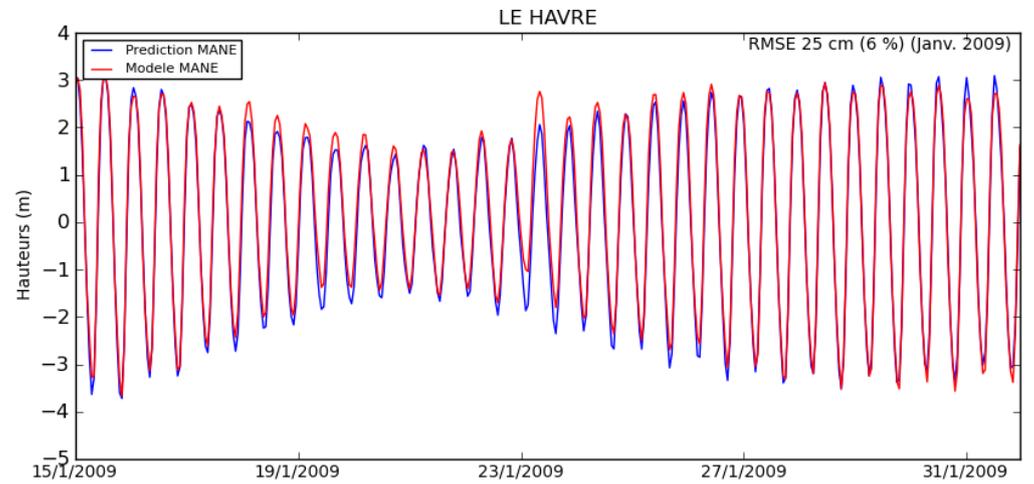


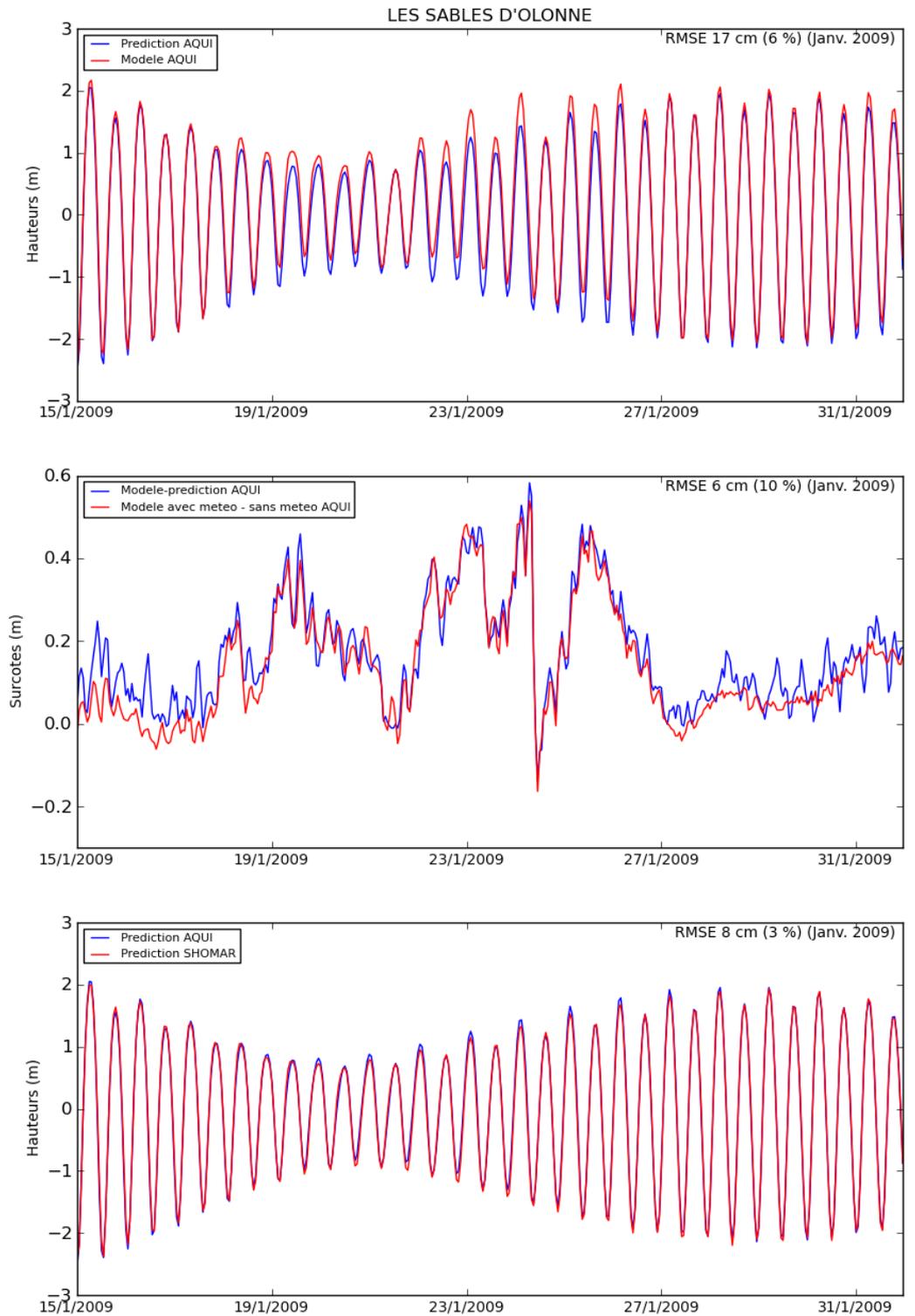


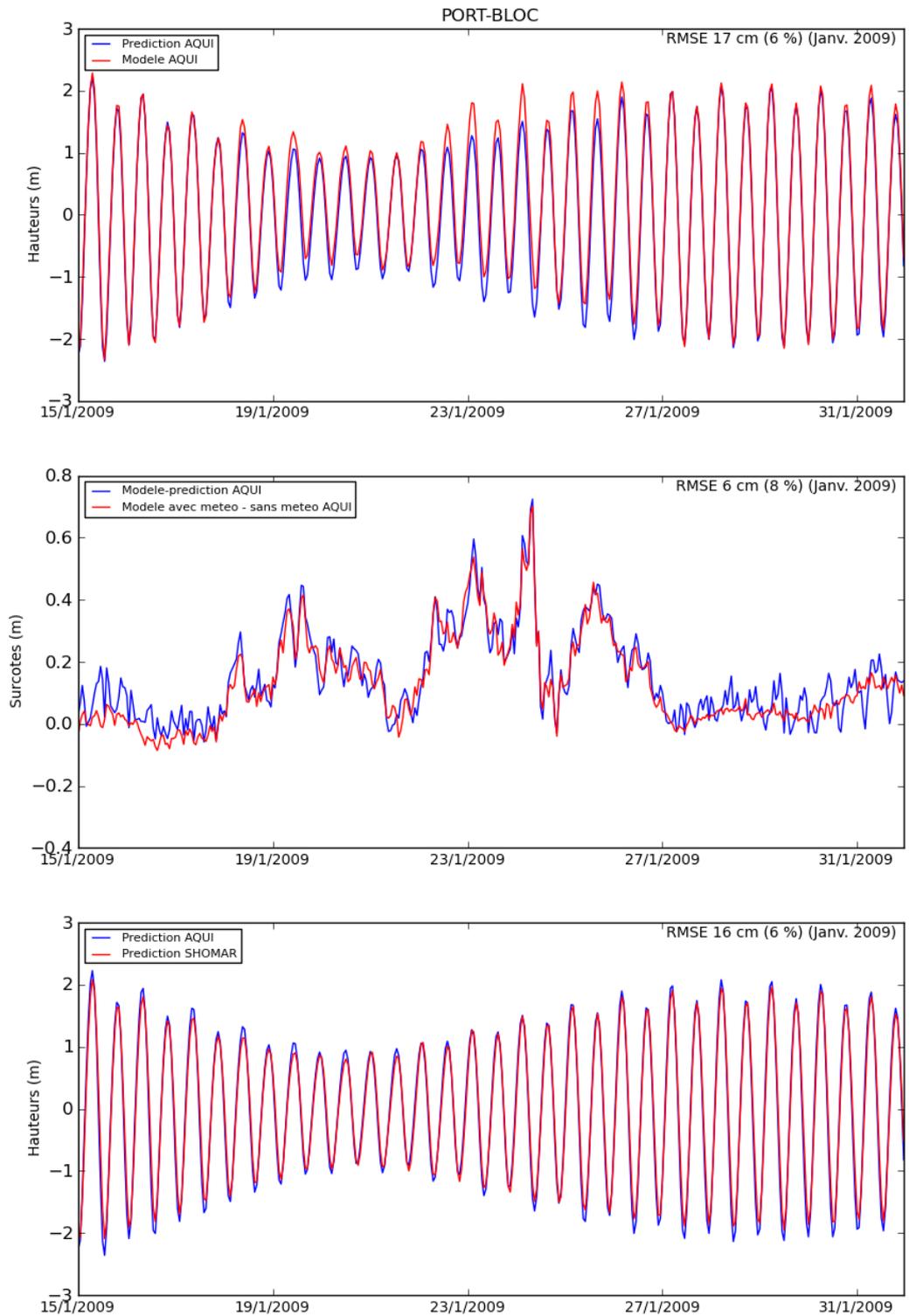


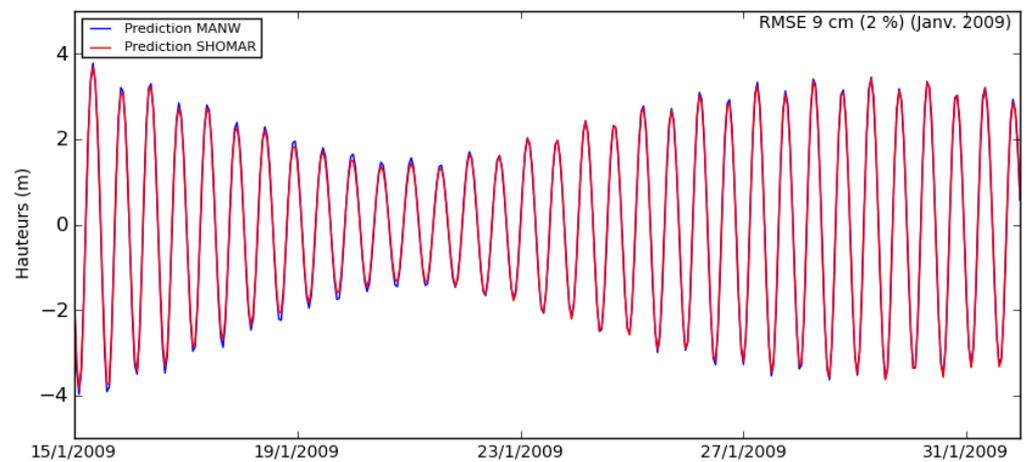
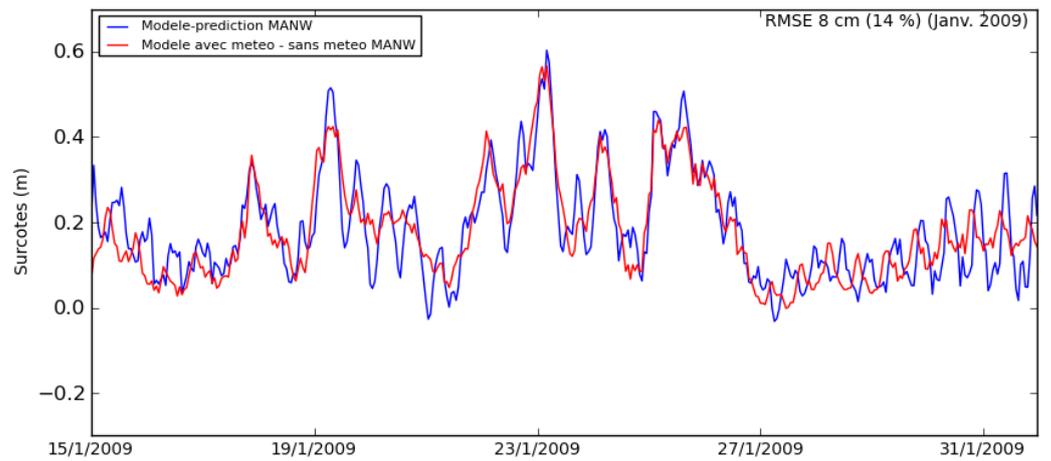
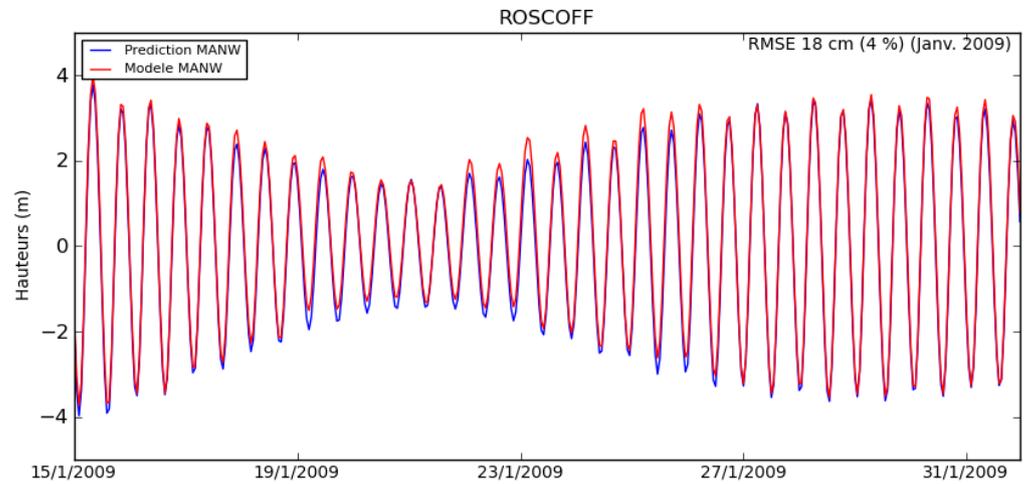


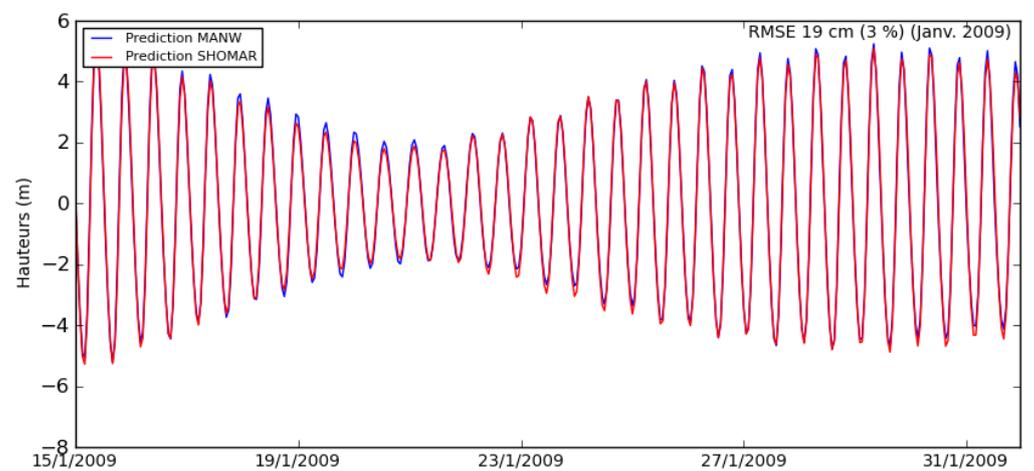
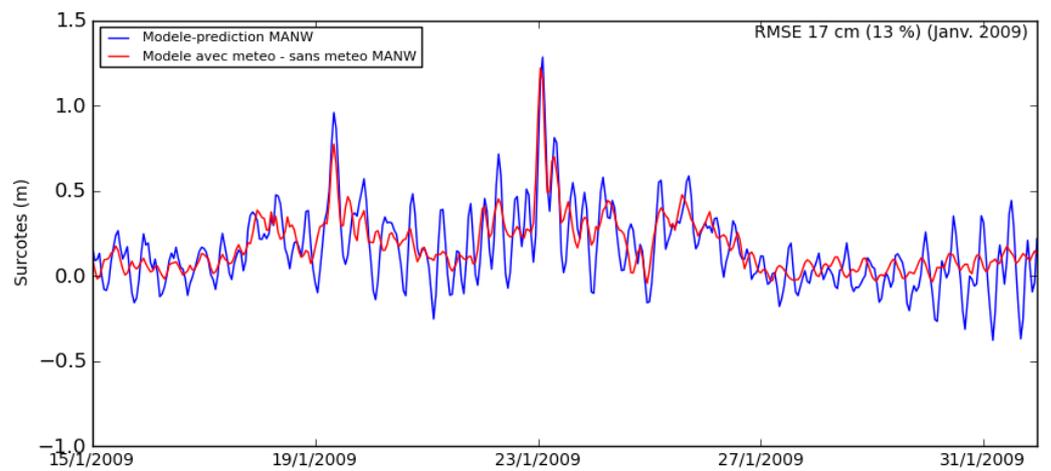
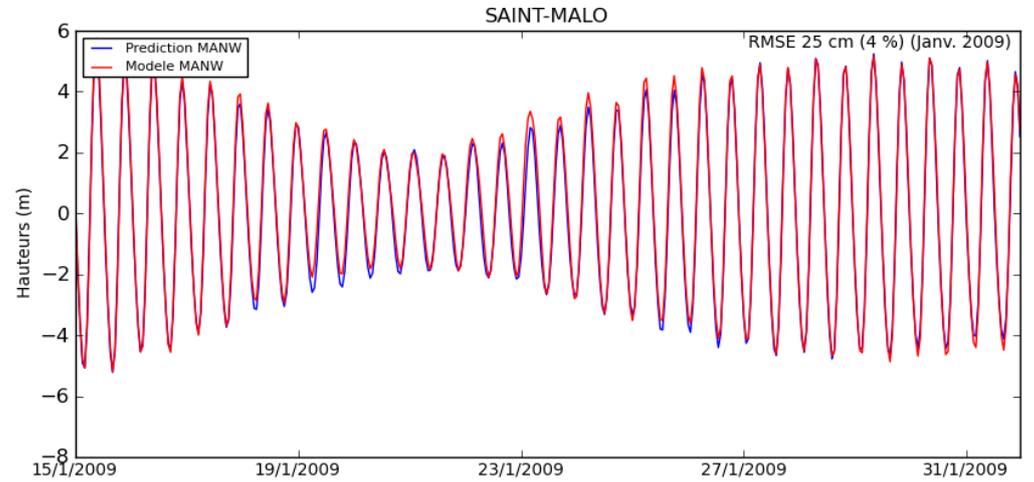


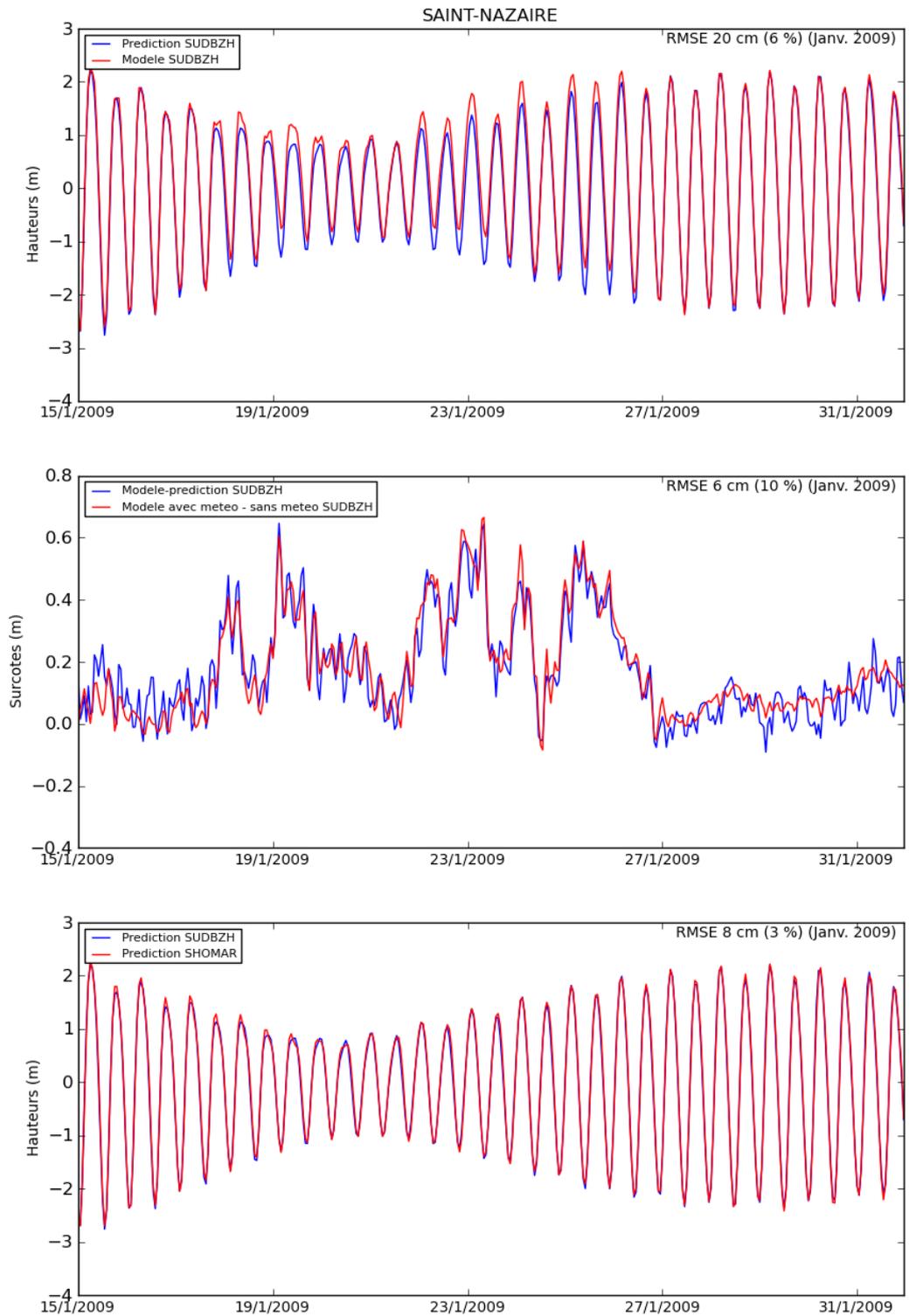


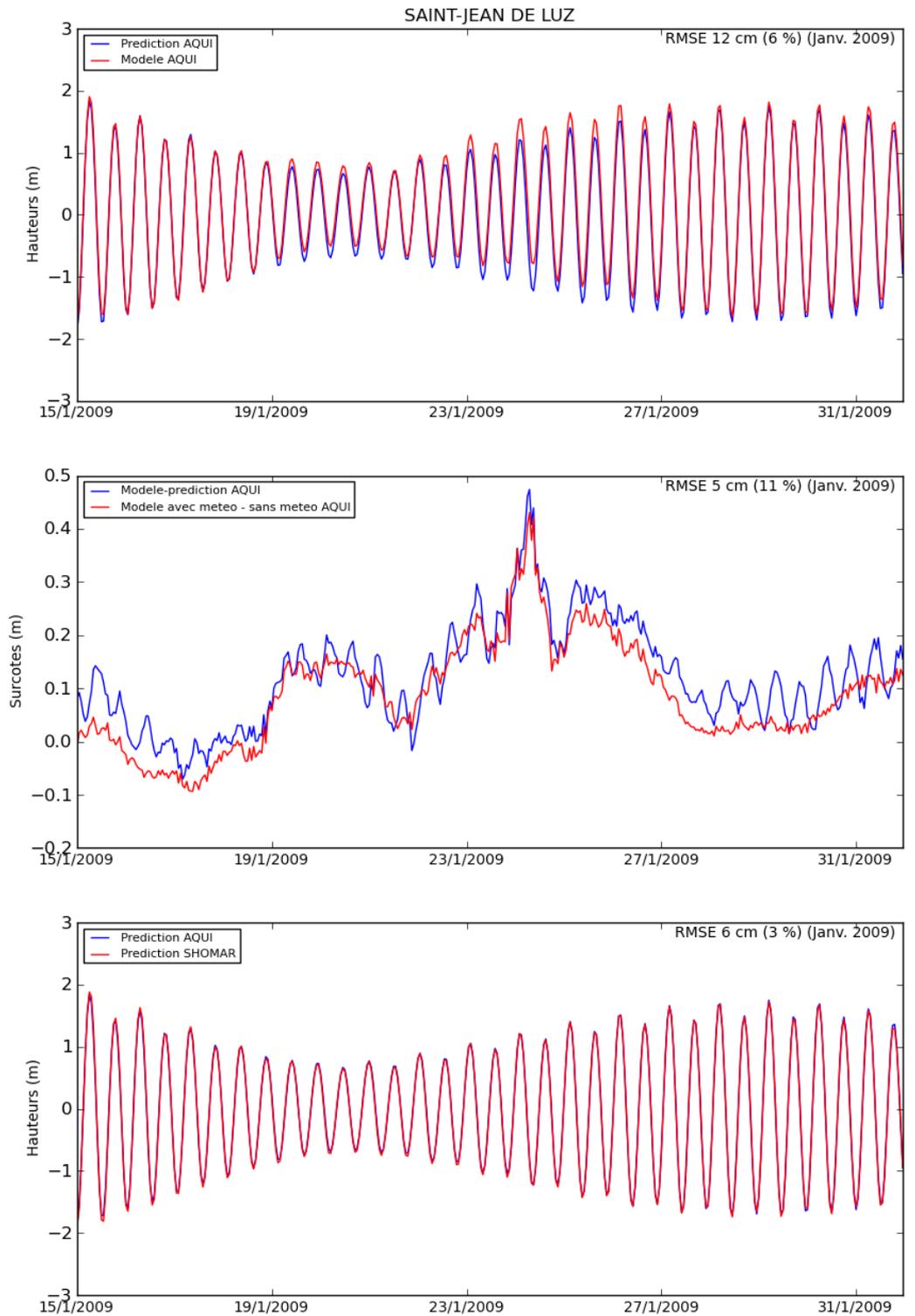






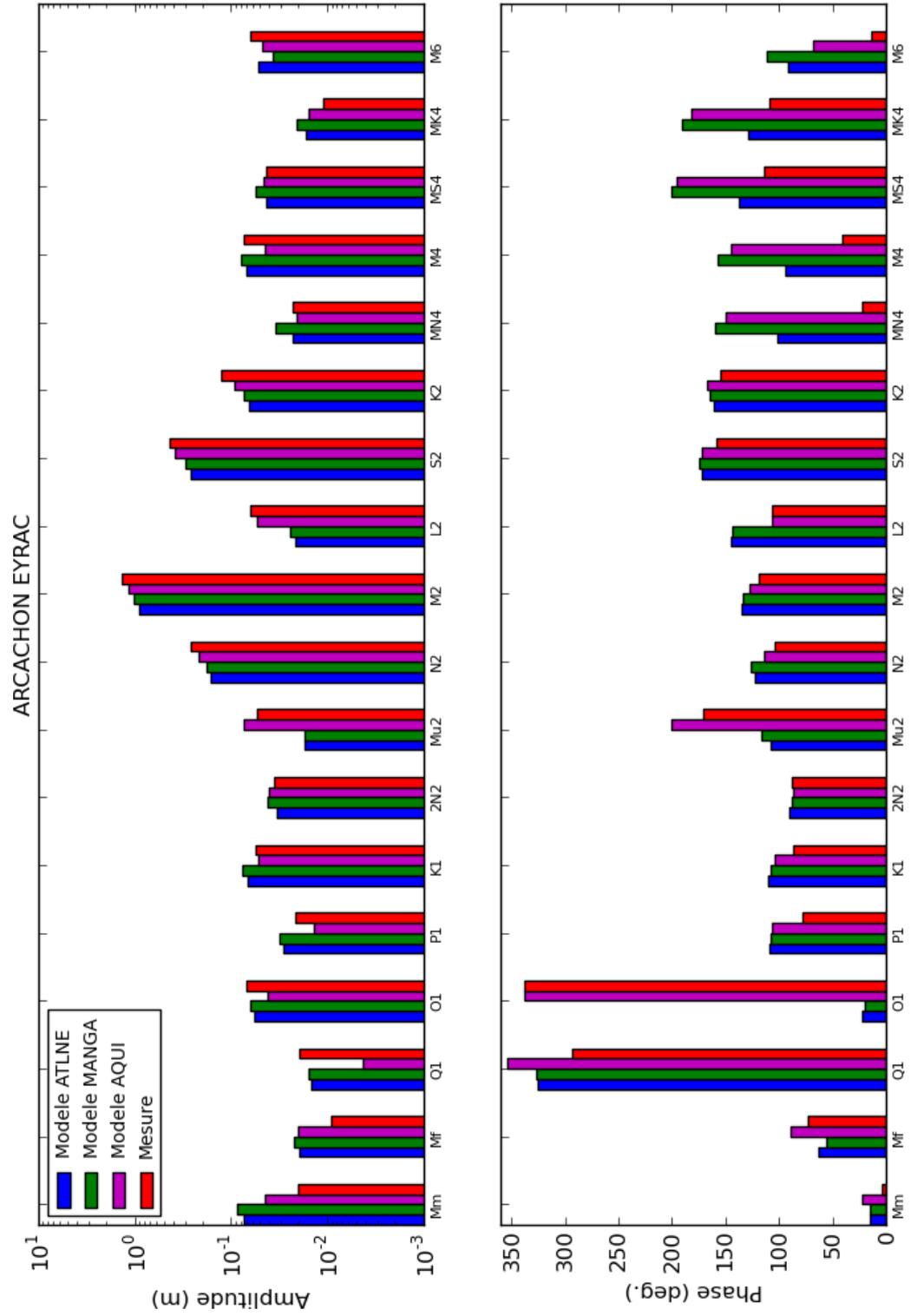


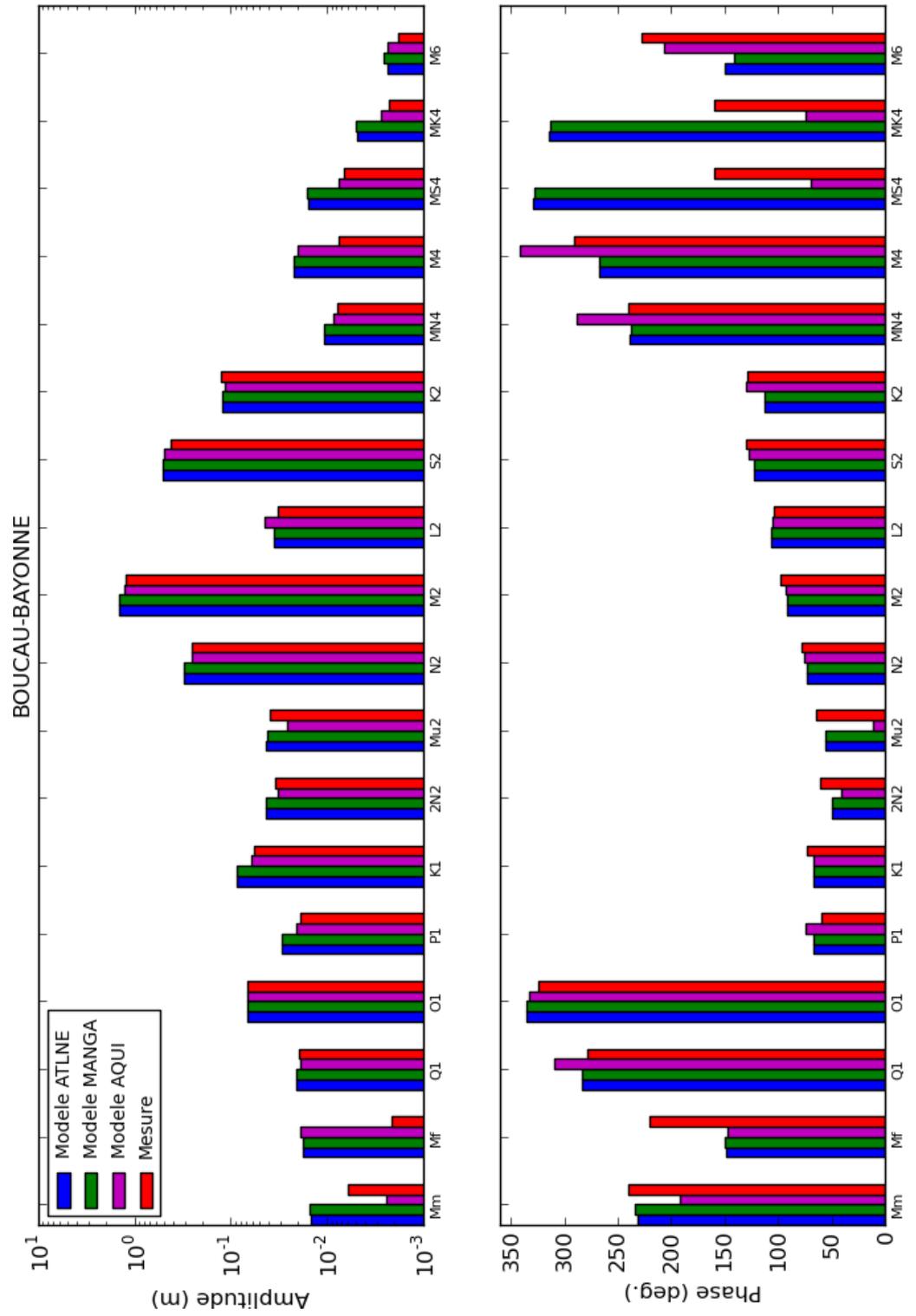


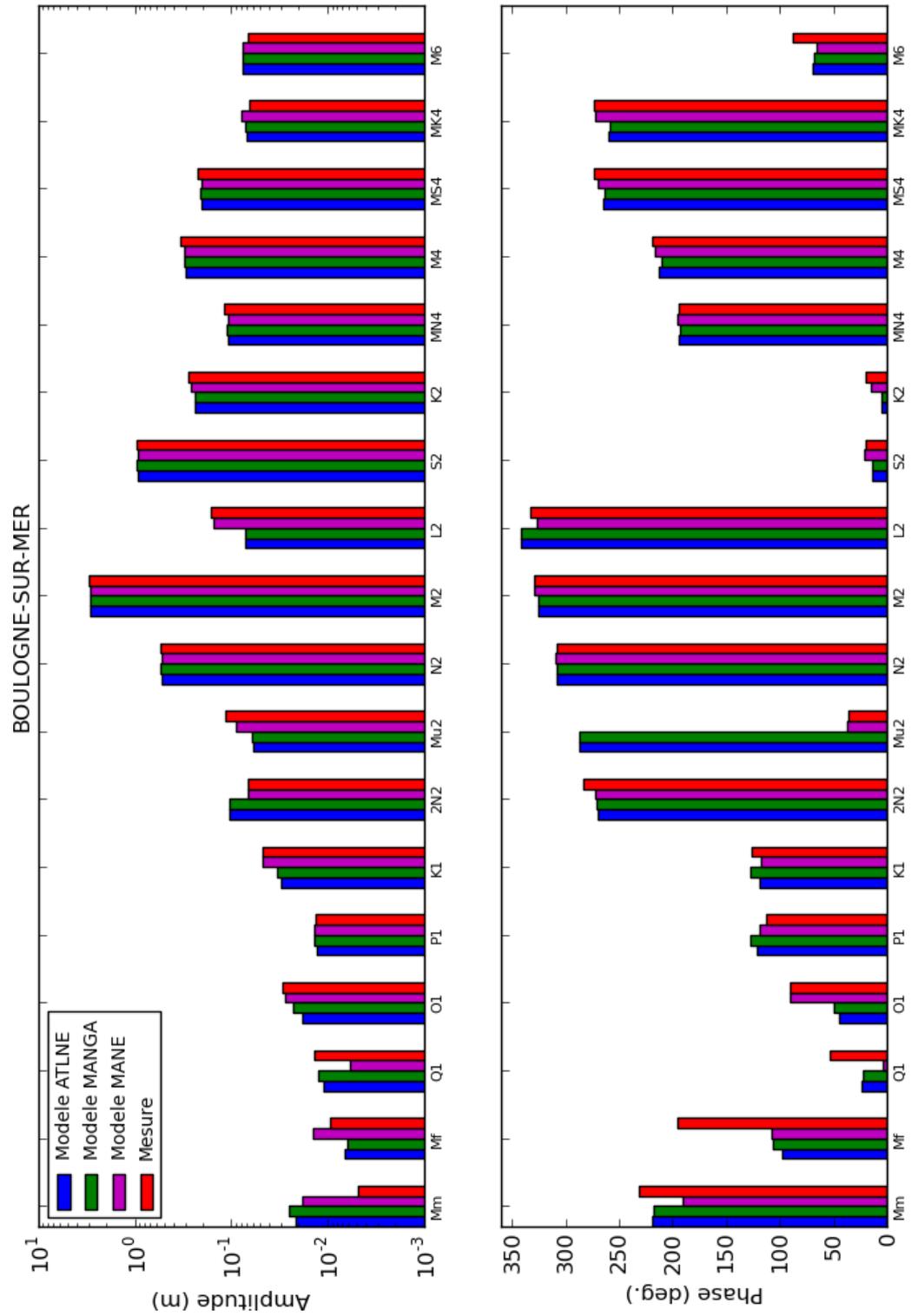


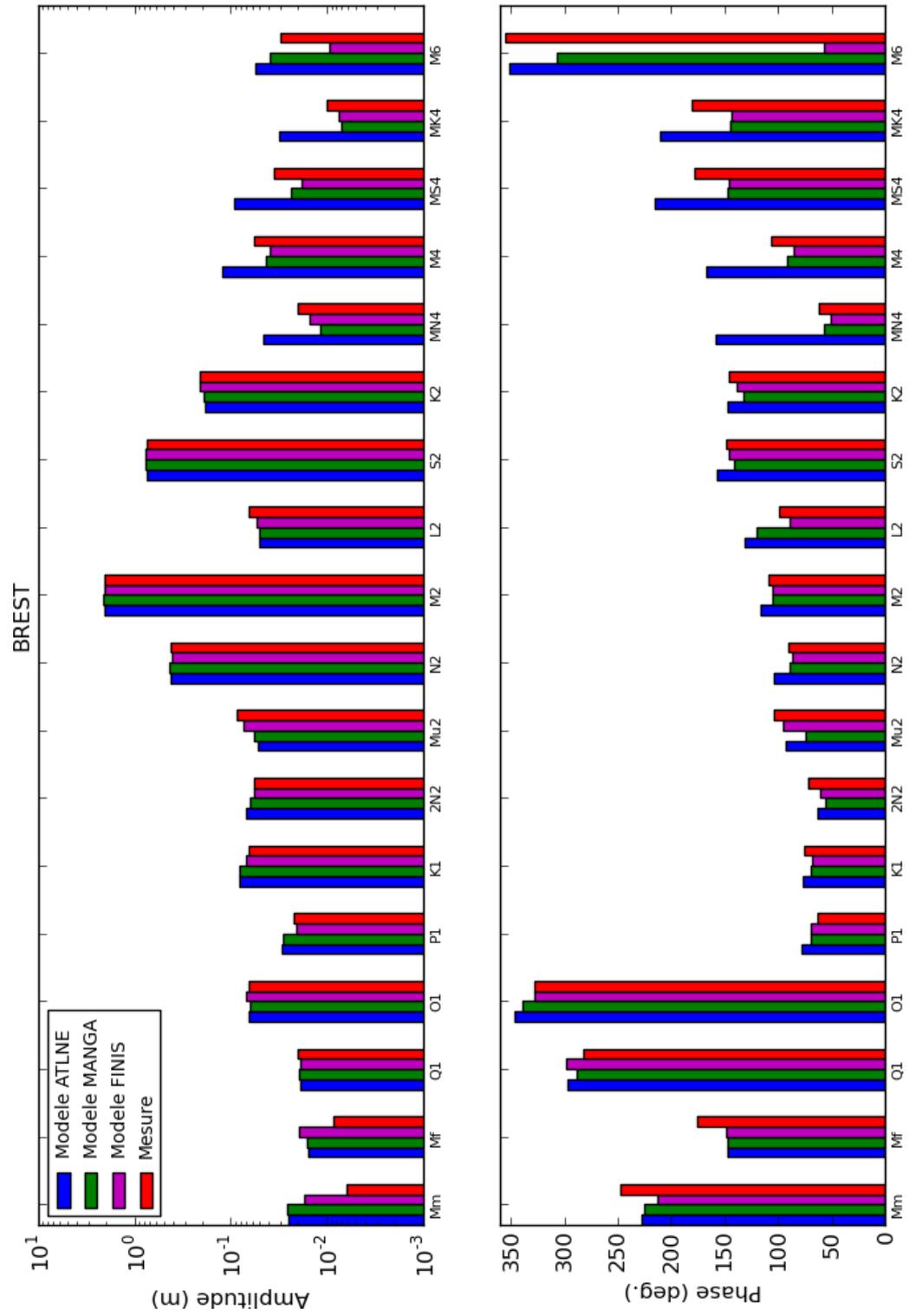
Annexe 2 : Principales composantes harmoniques en chacun des 18 points de validation

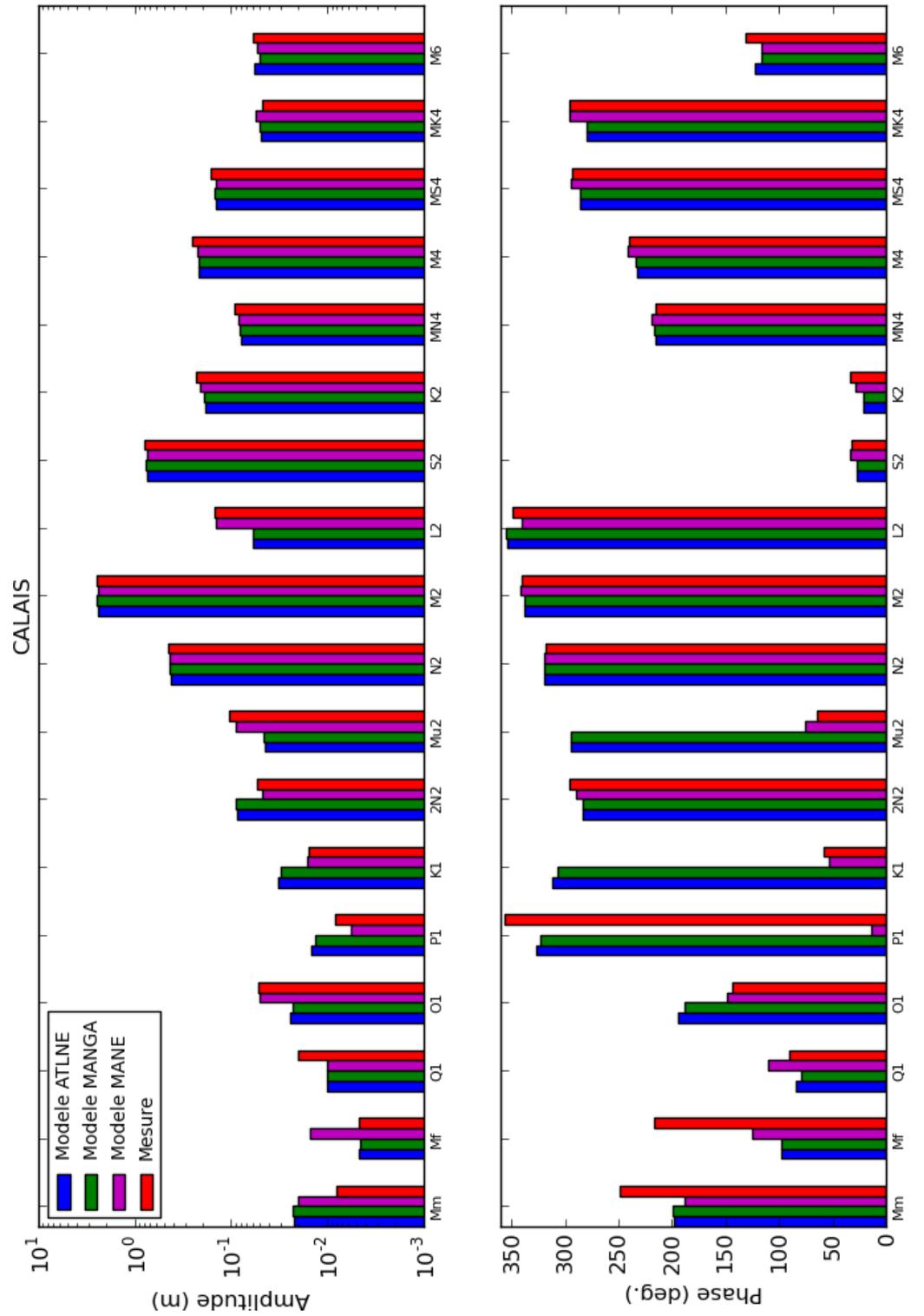


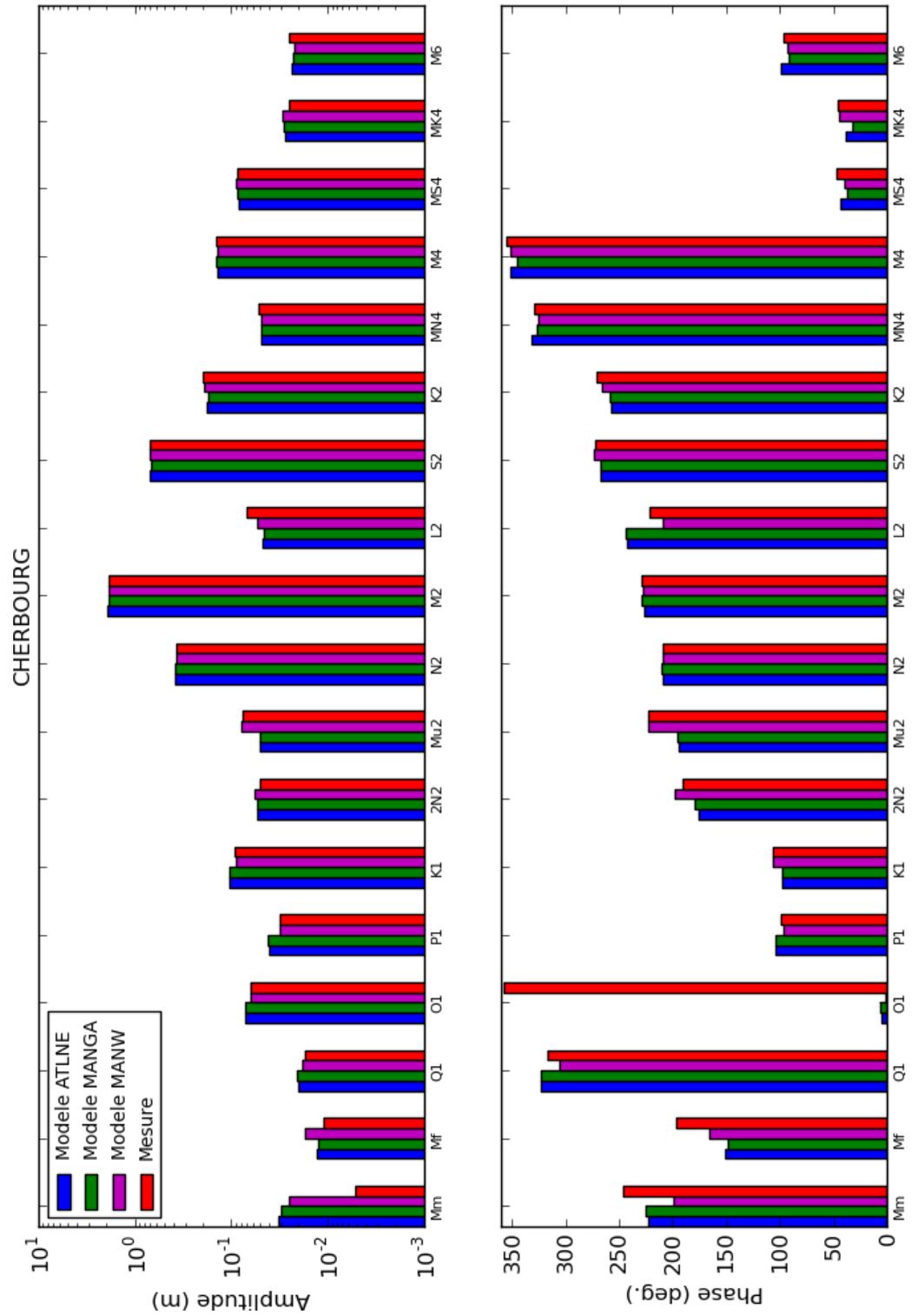


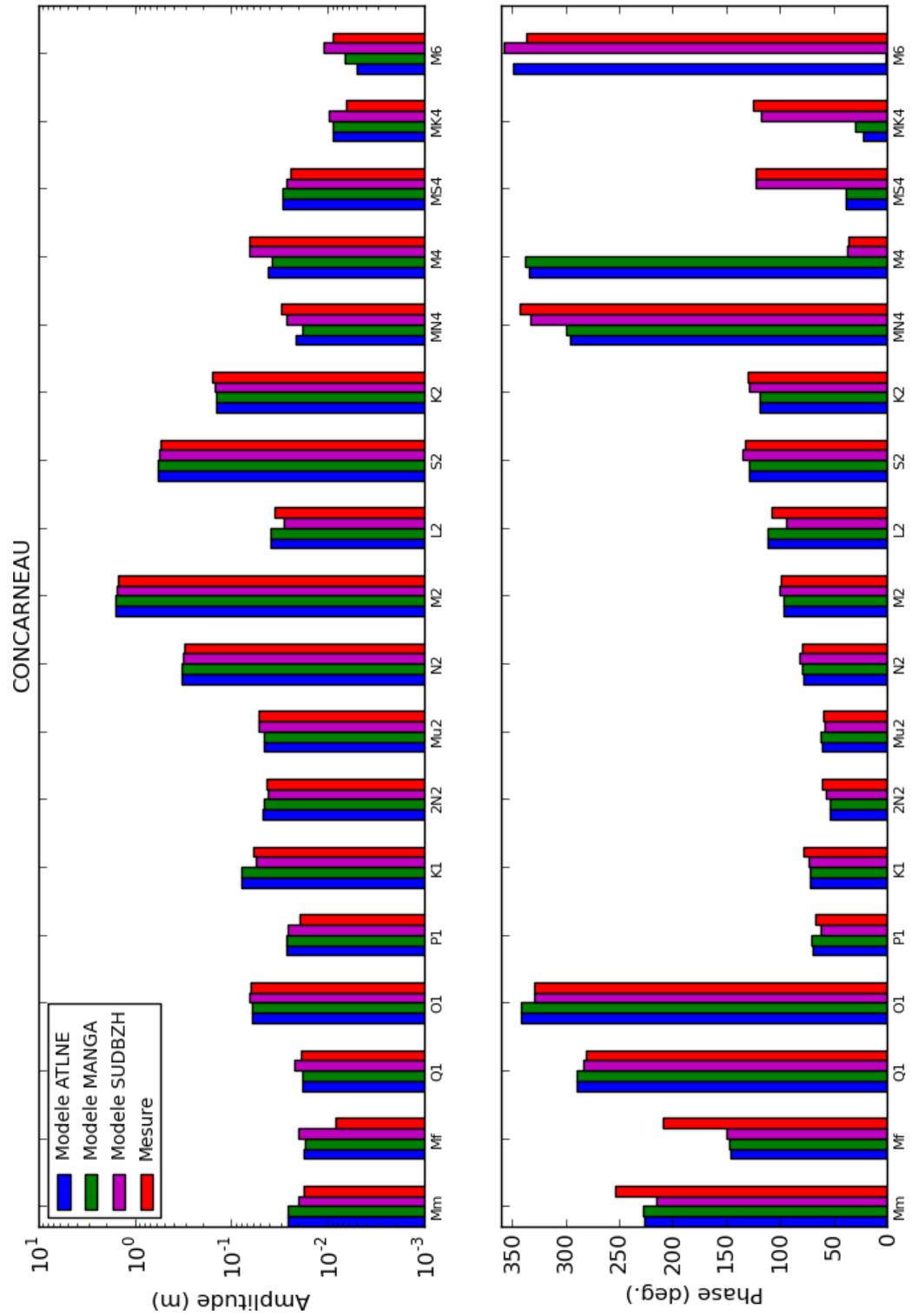


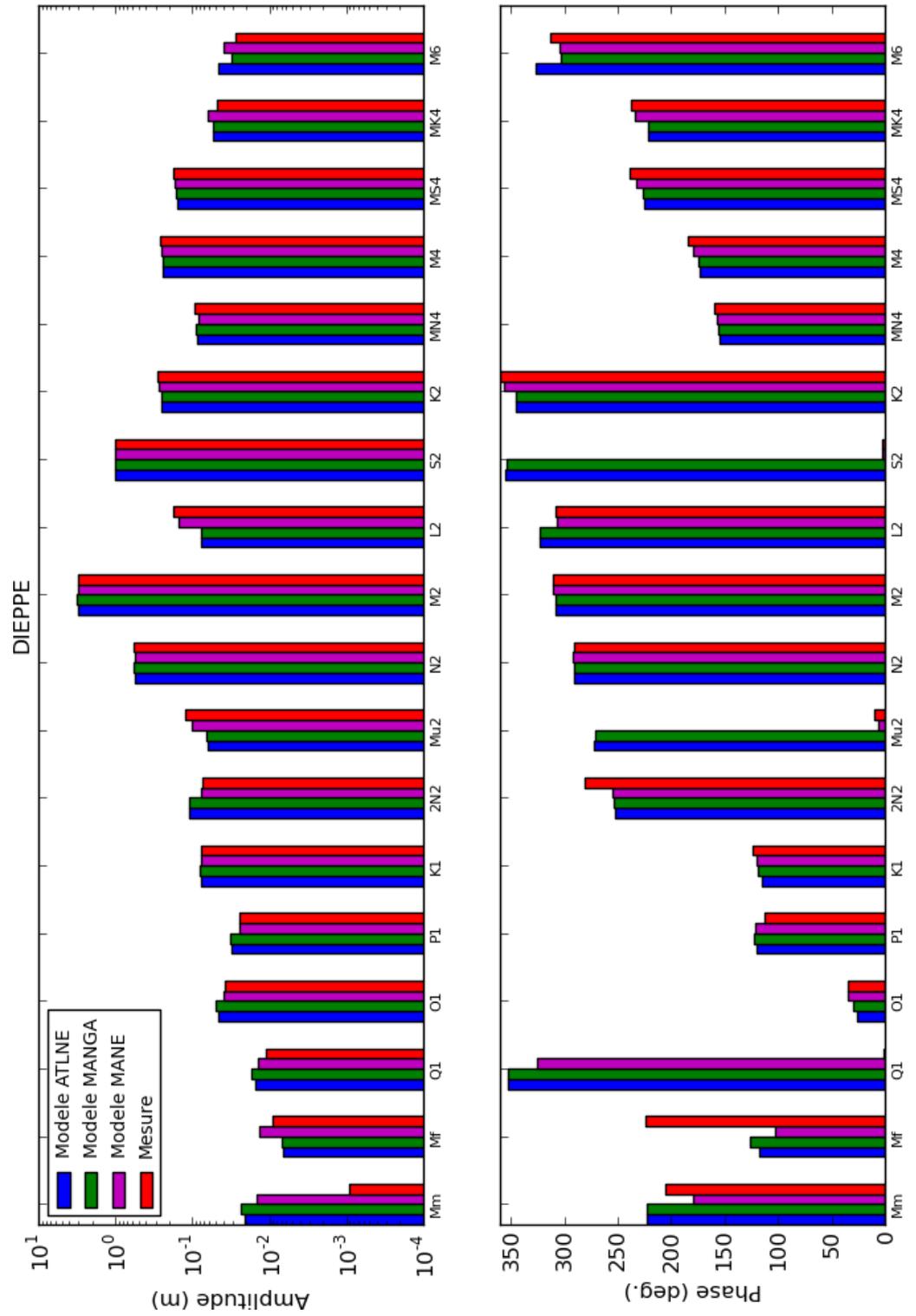


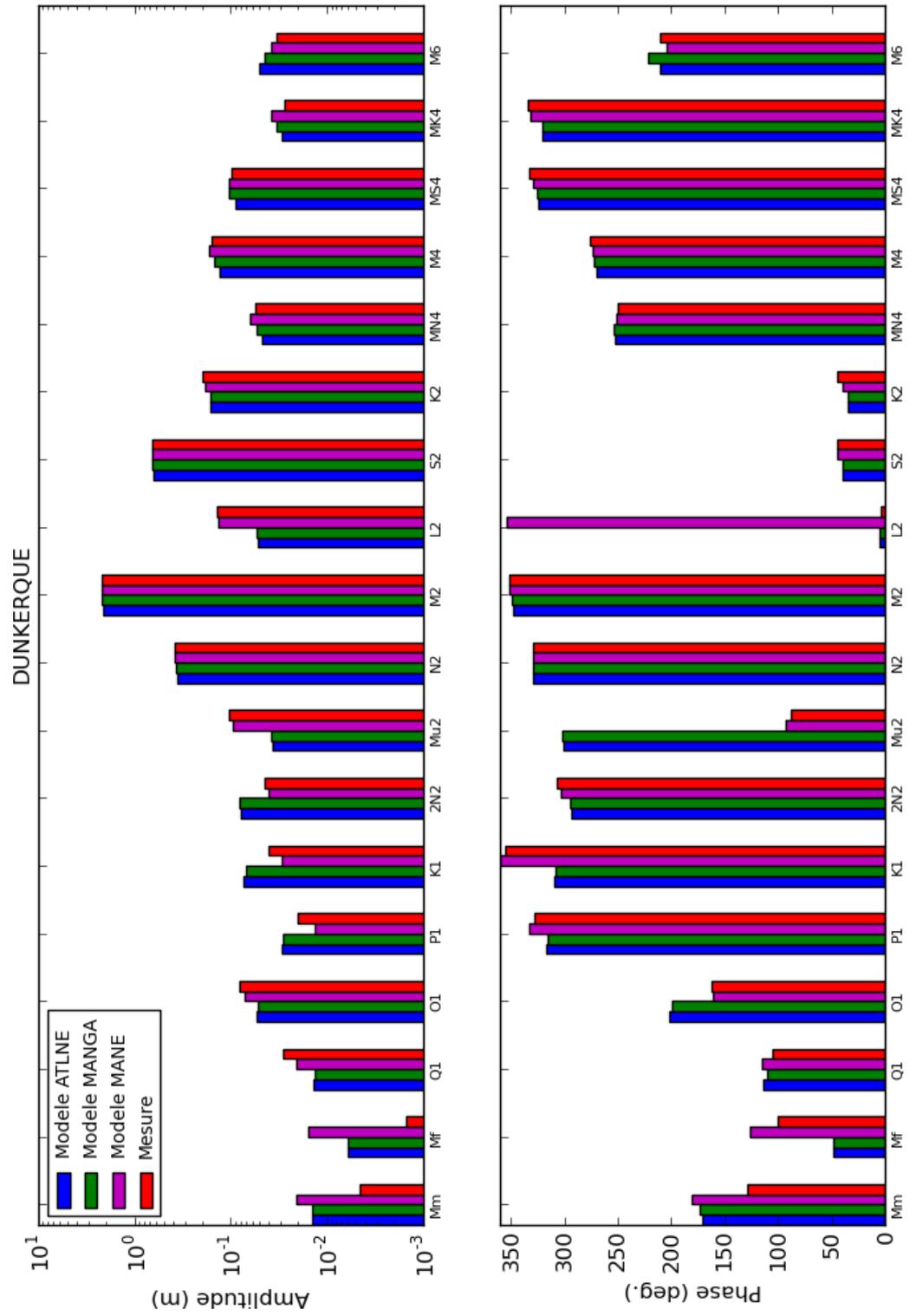


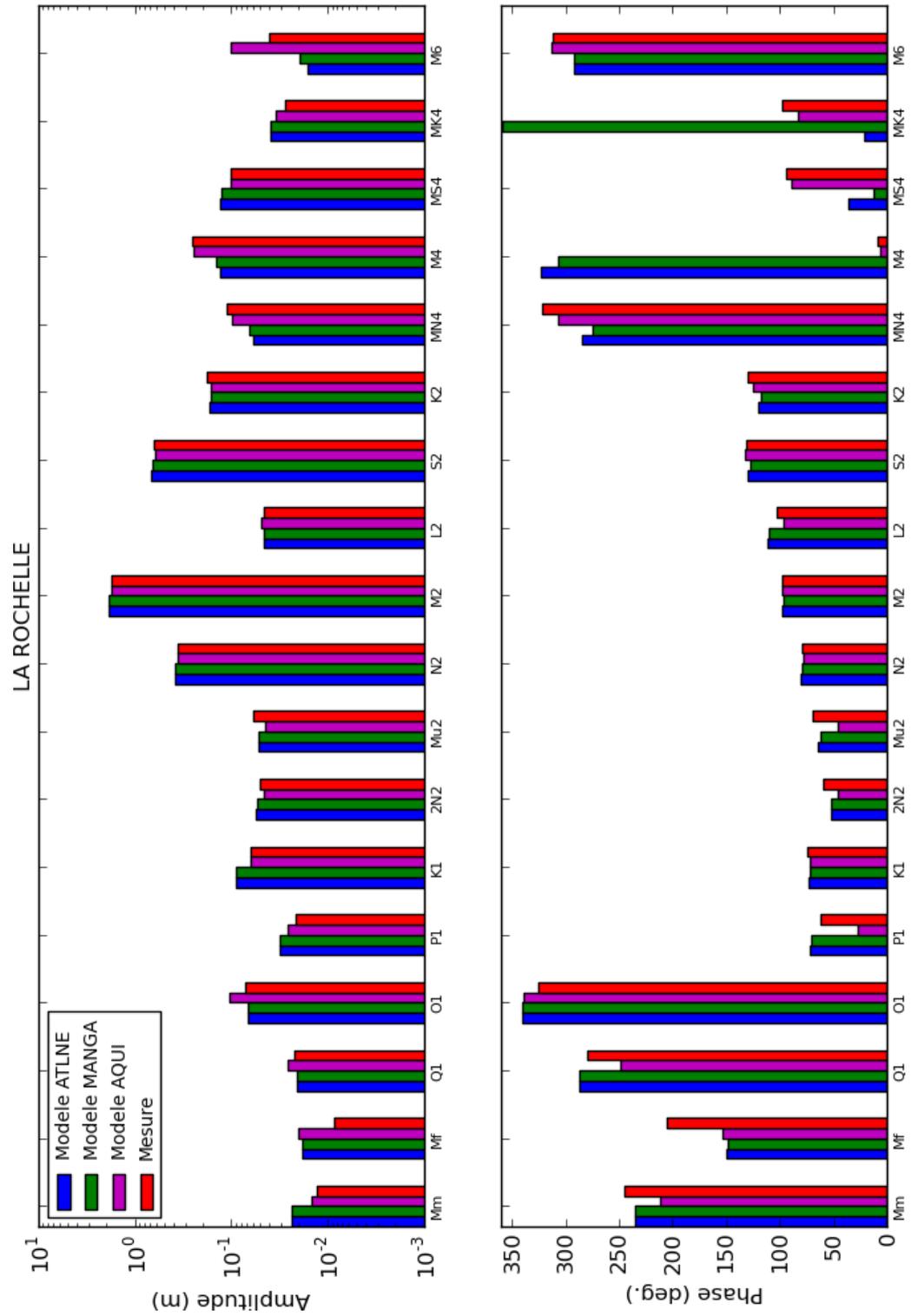


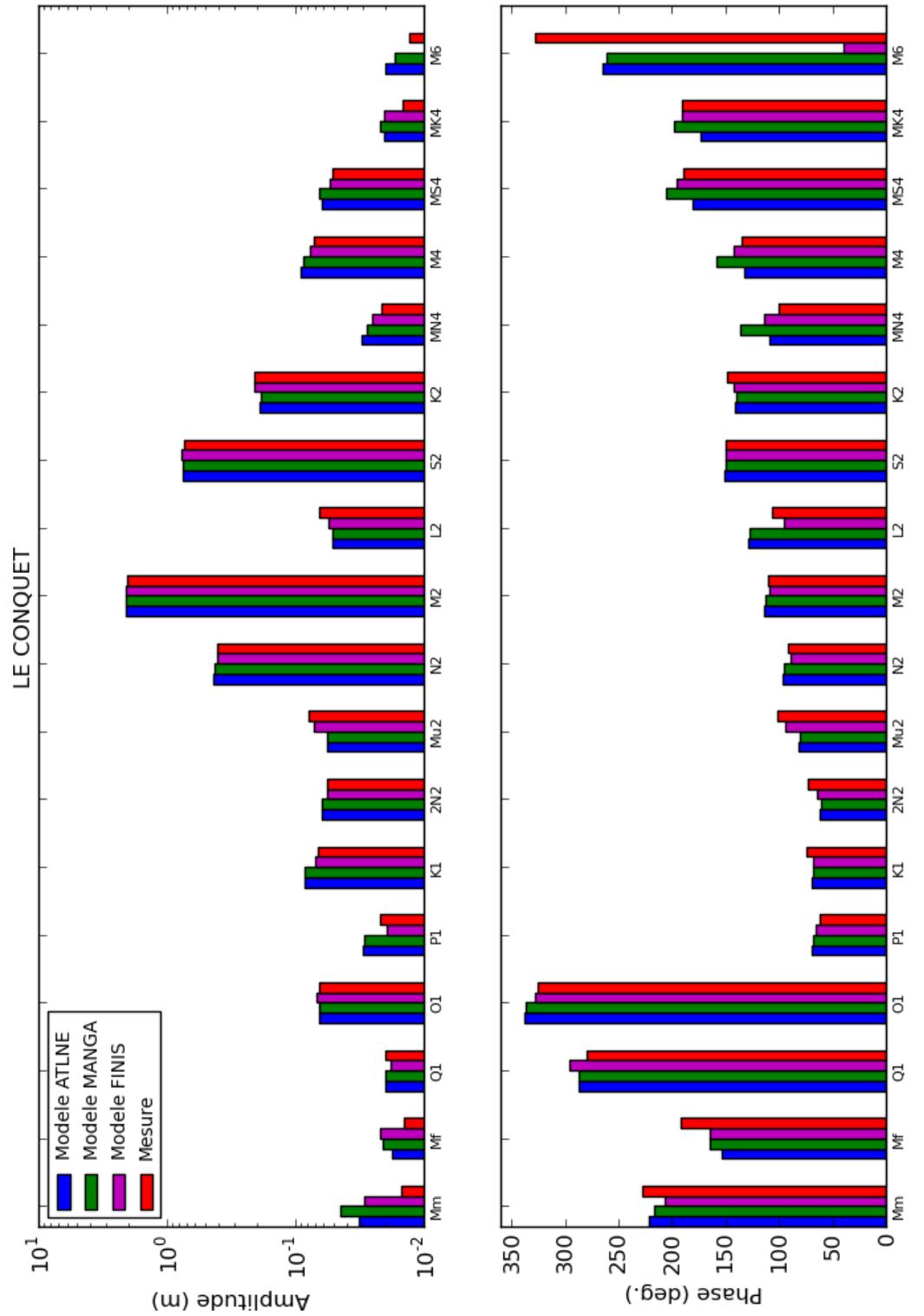


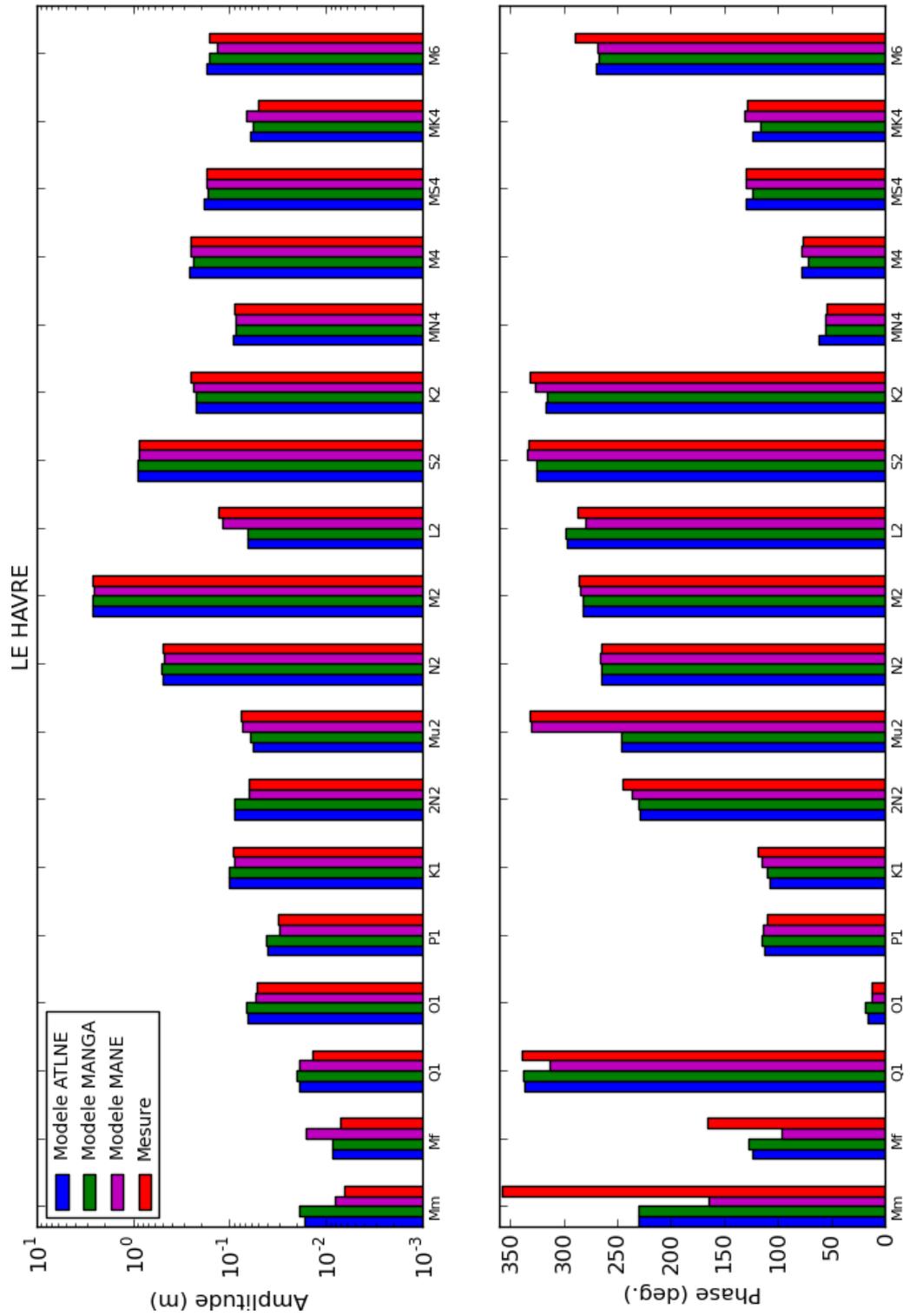


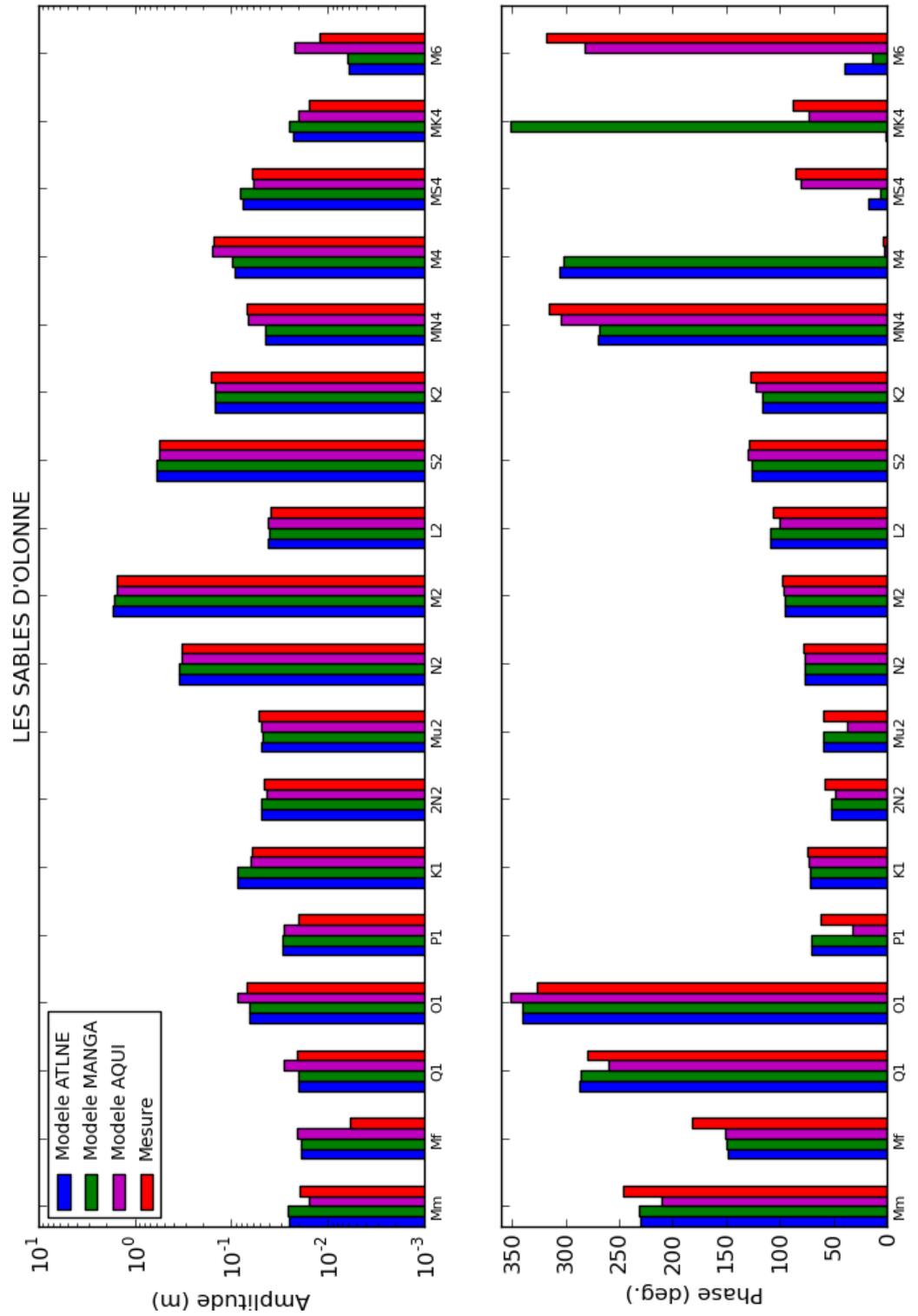


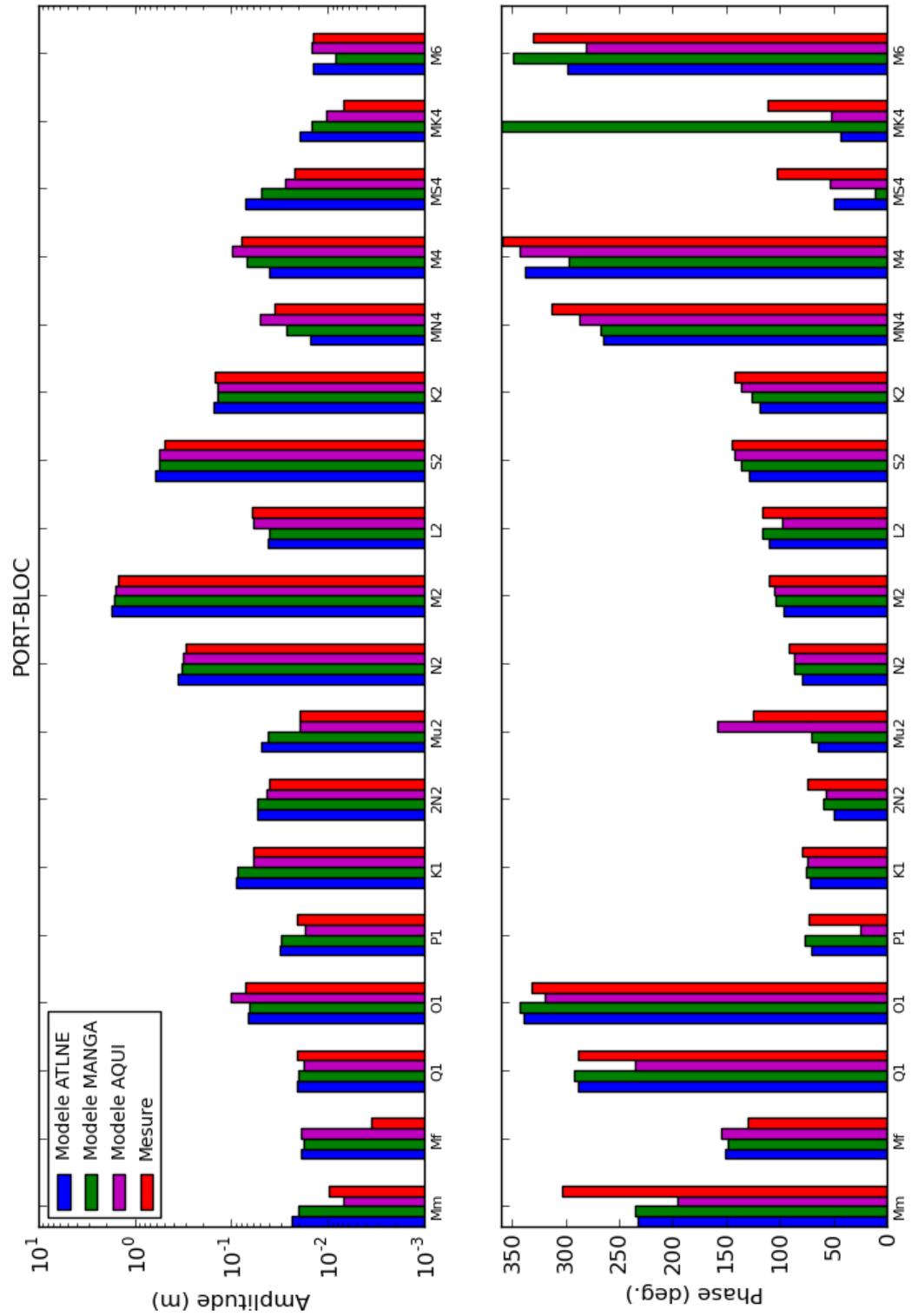


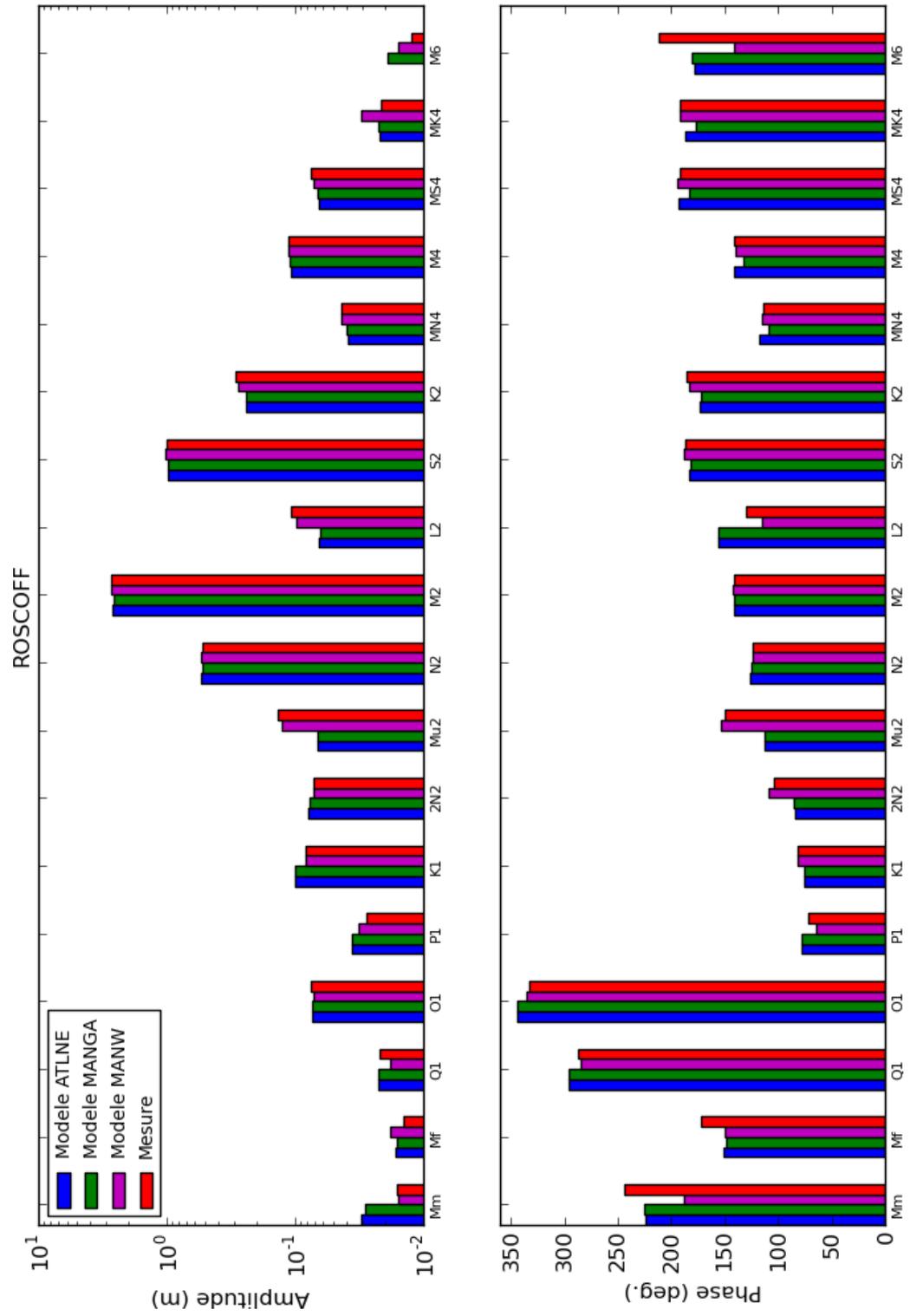


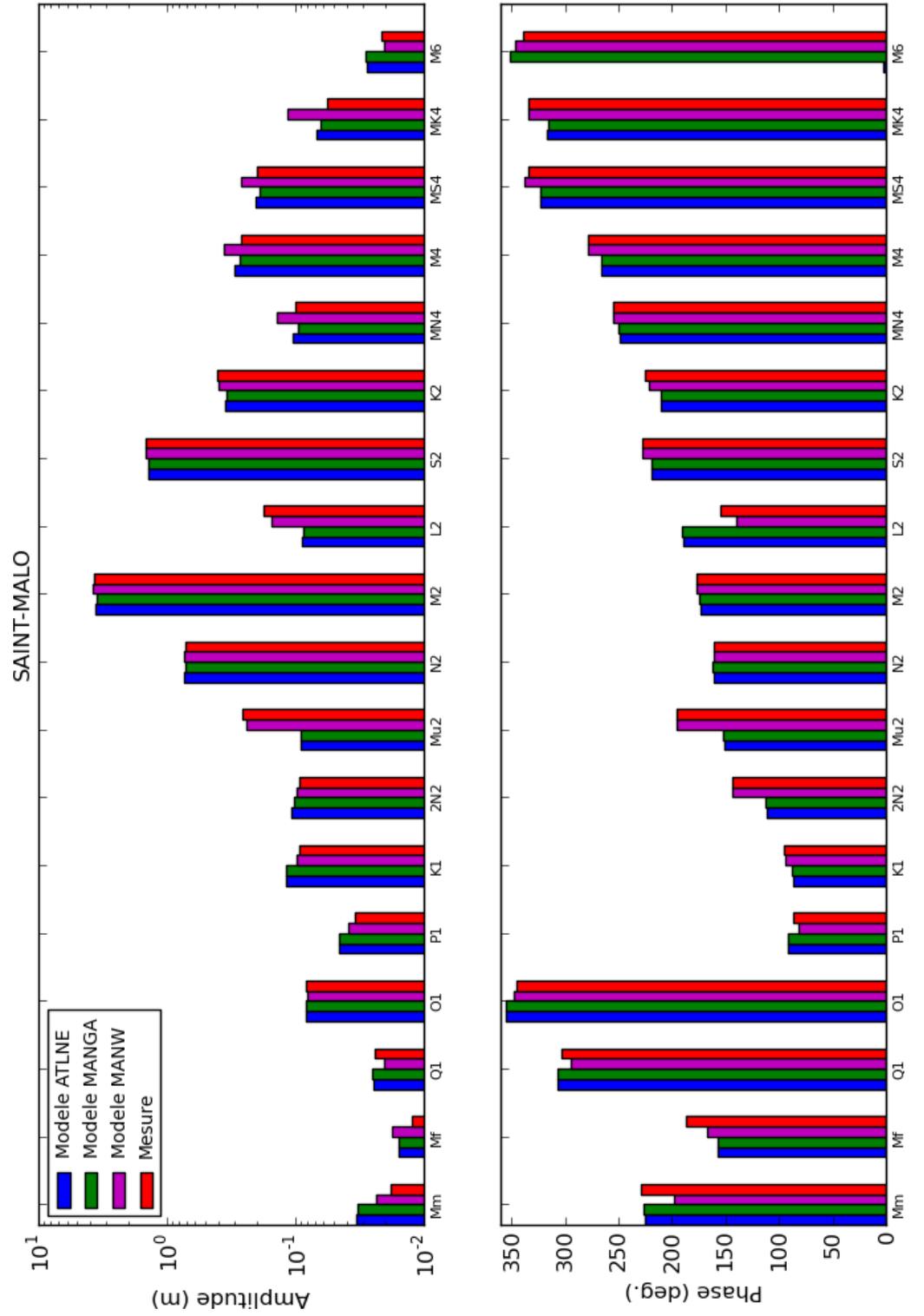


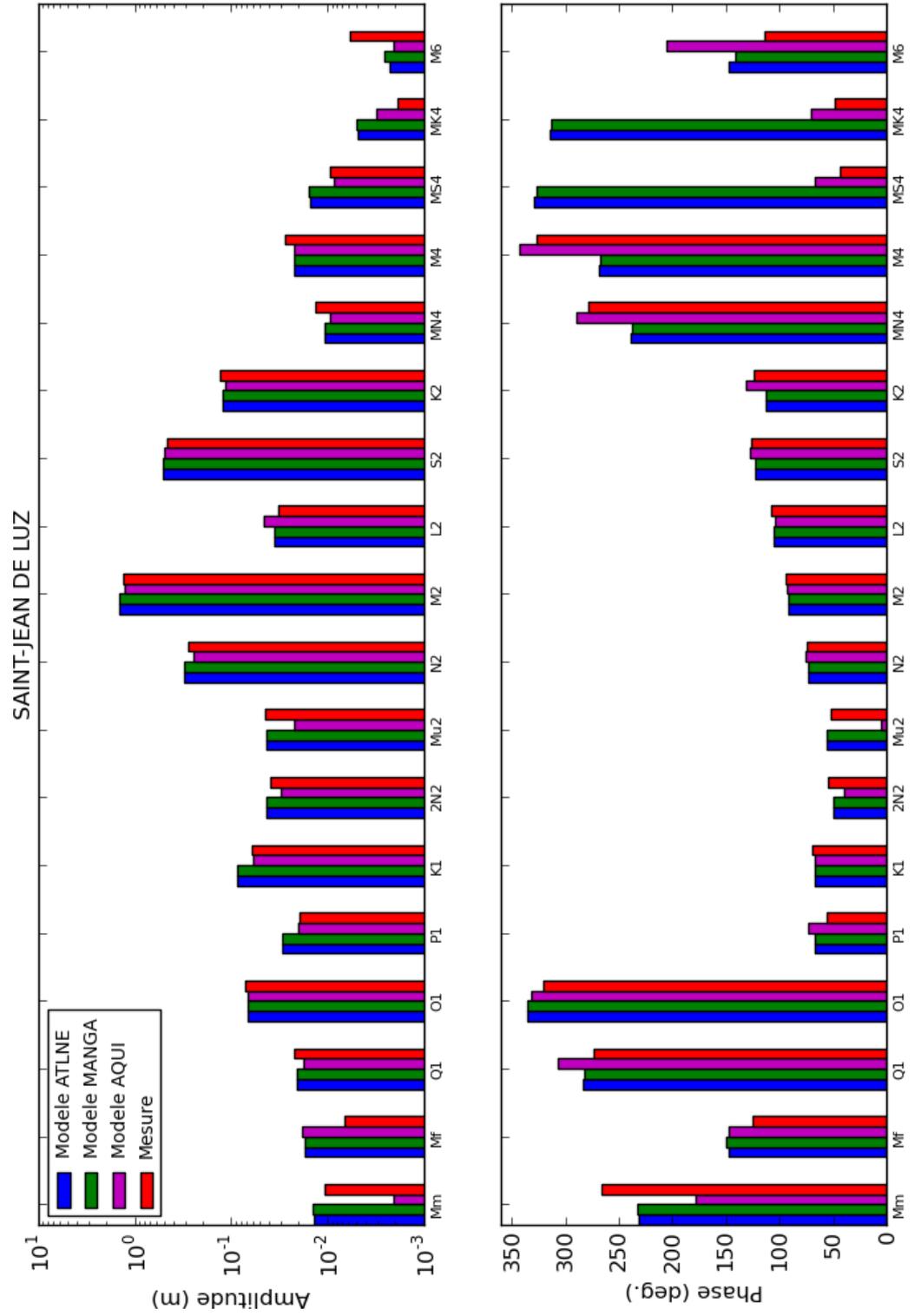


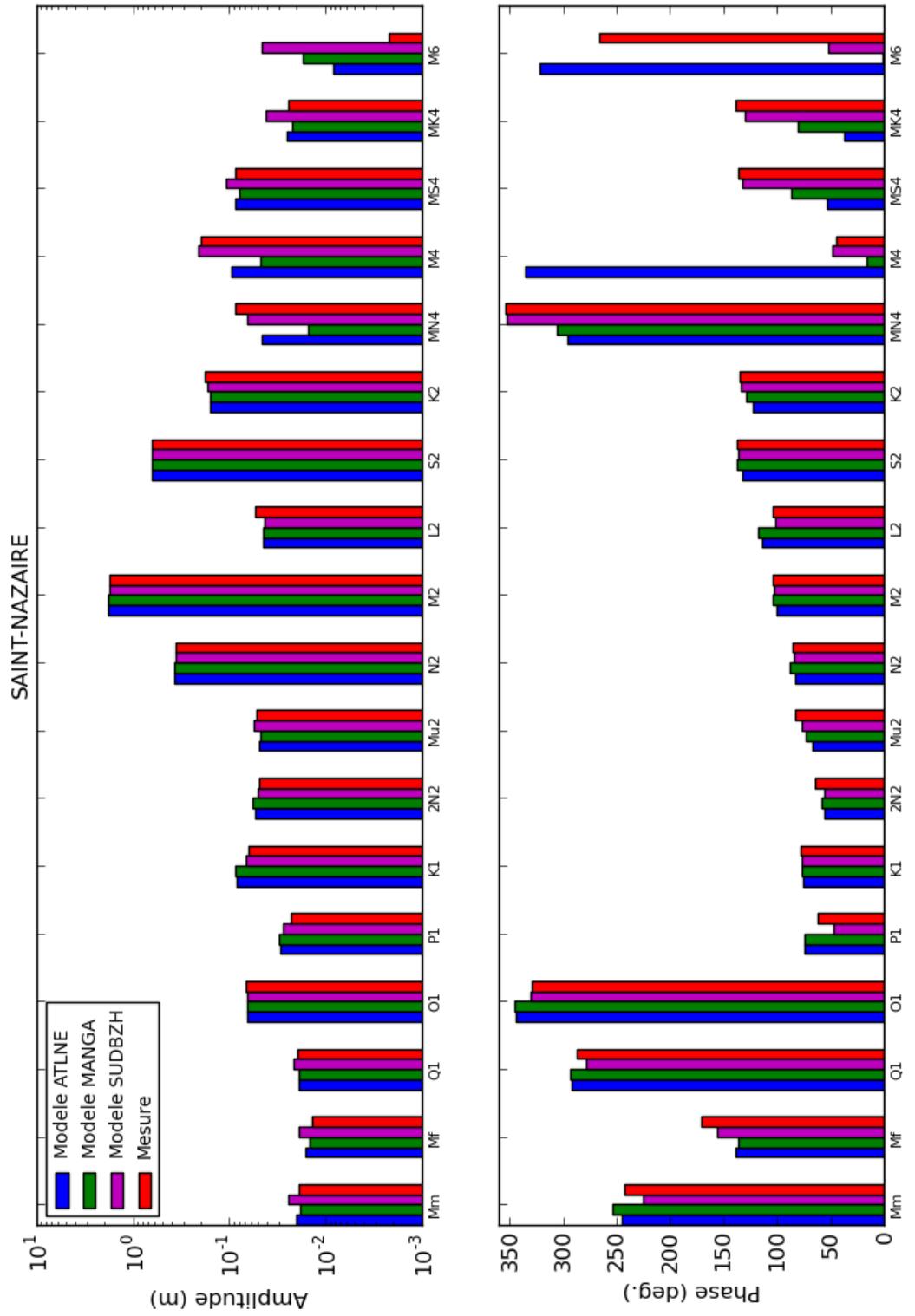






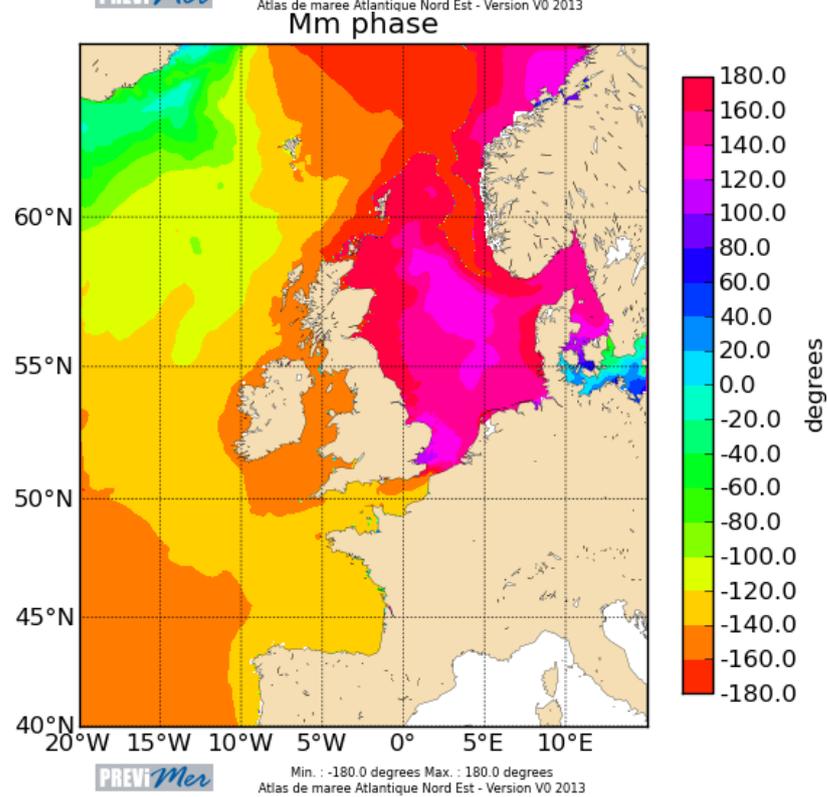
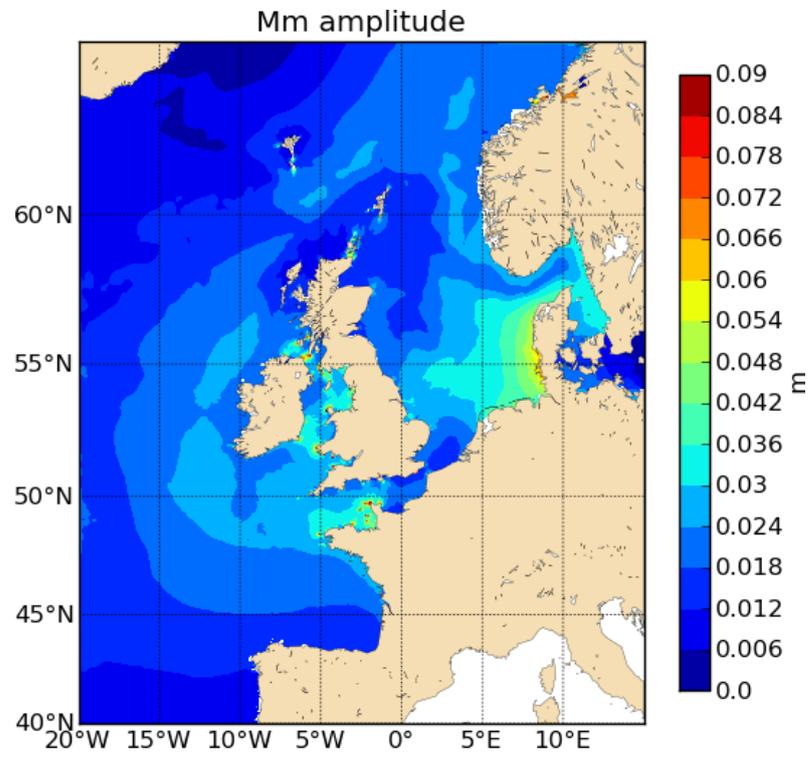


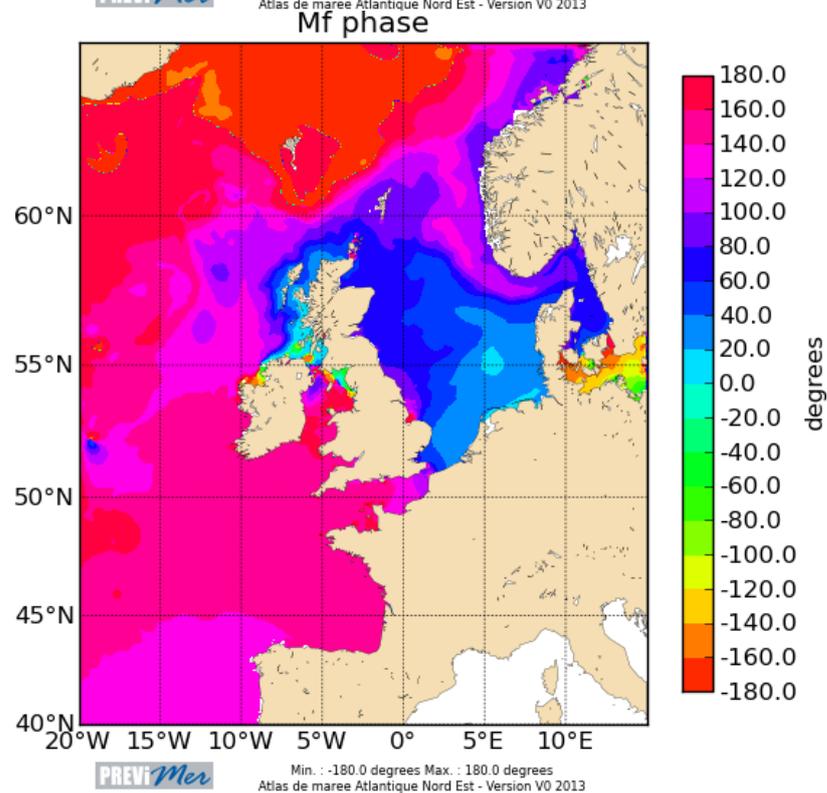
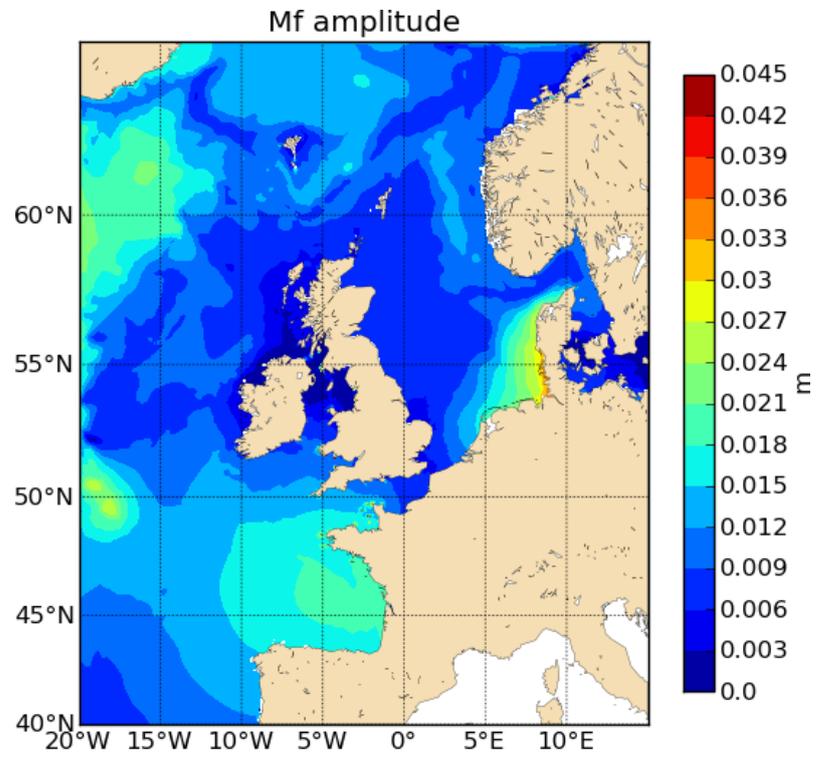


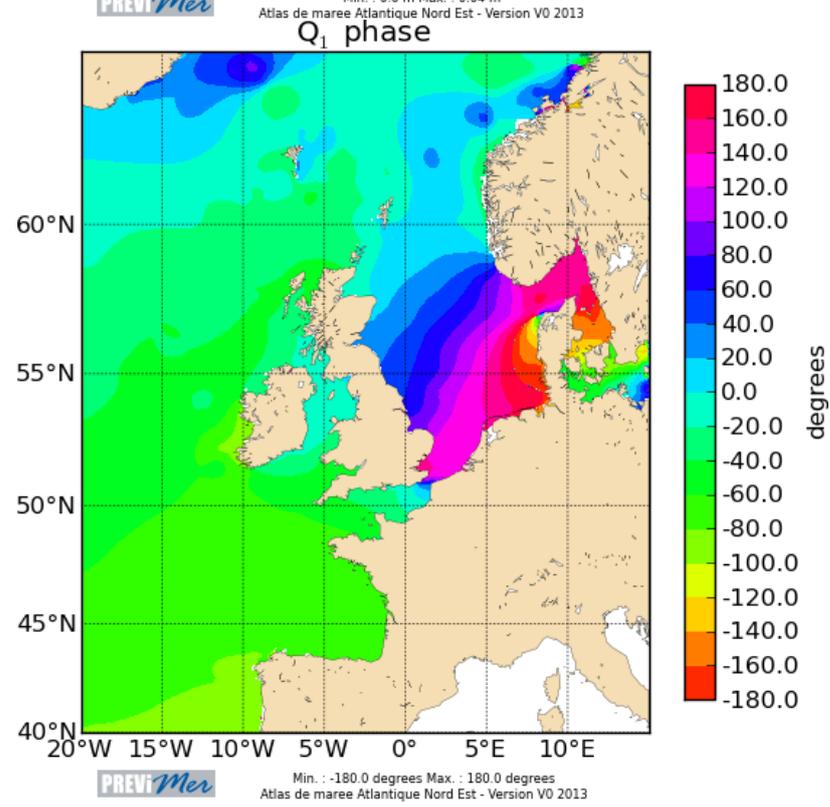
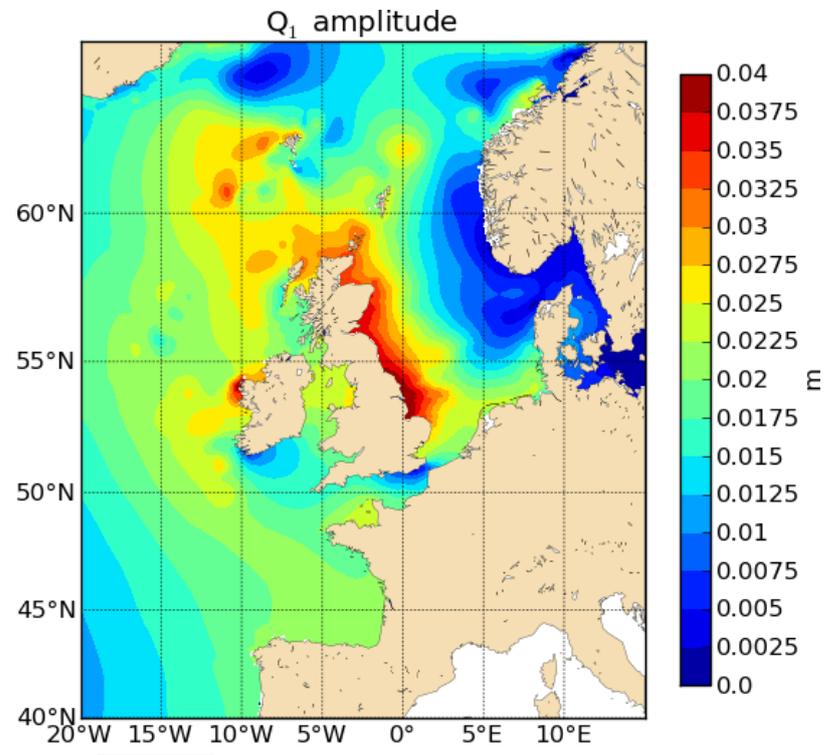


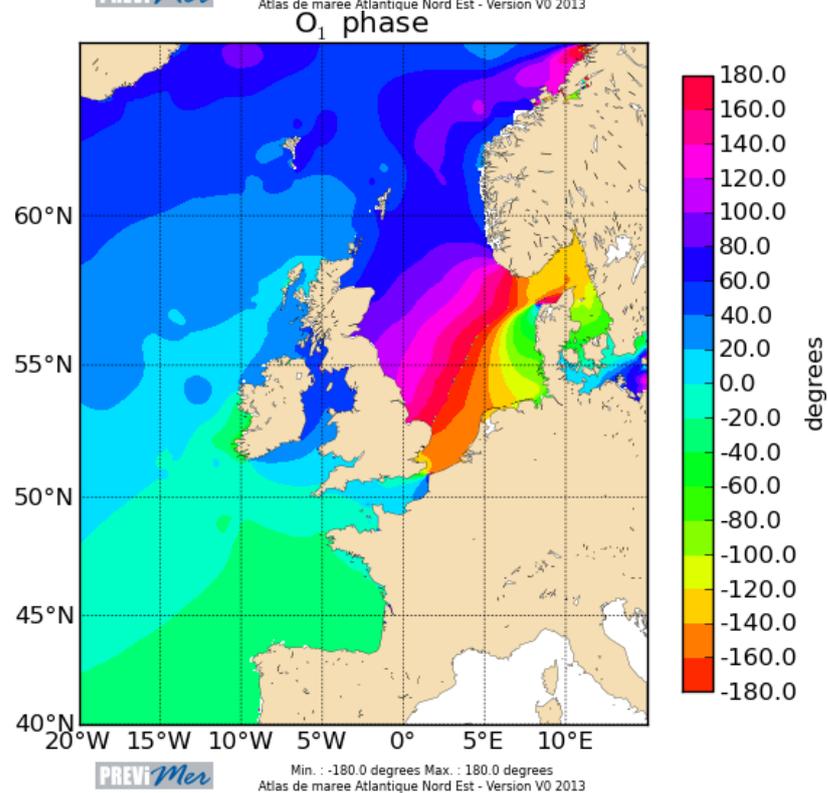
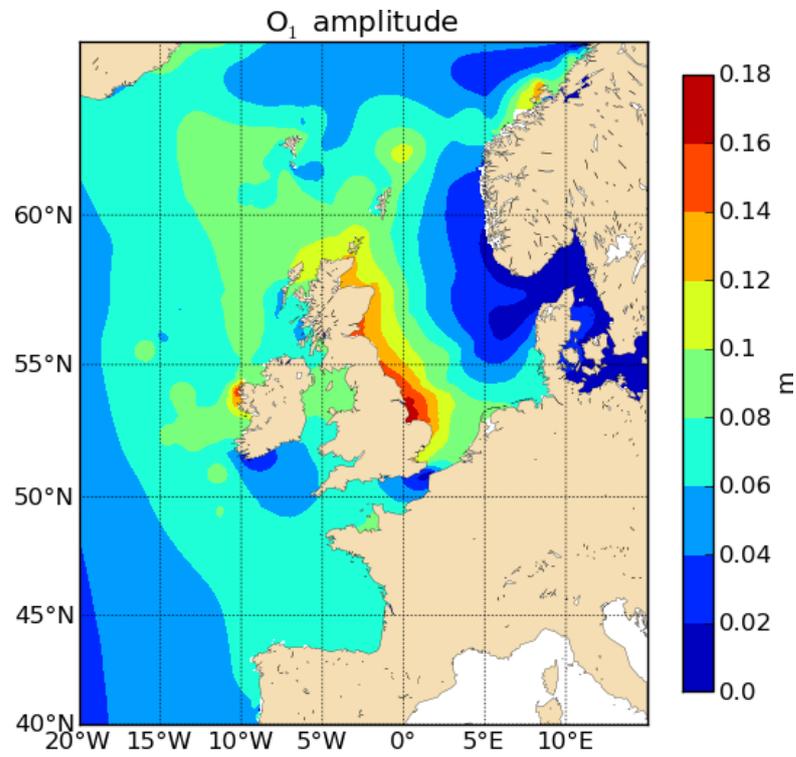
Annexe 3 : Principales composantes harmoniques de l'atlas Atlantique Nord Est

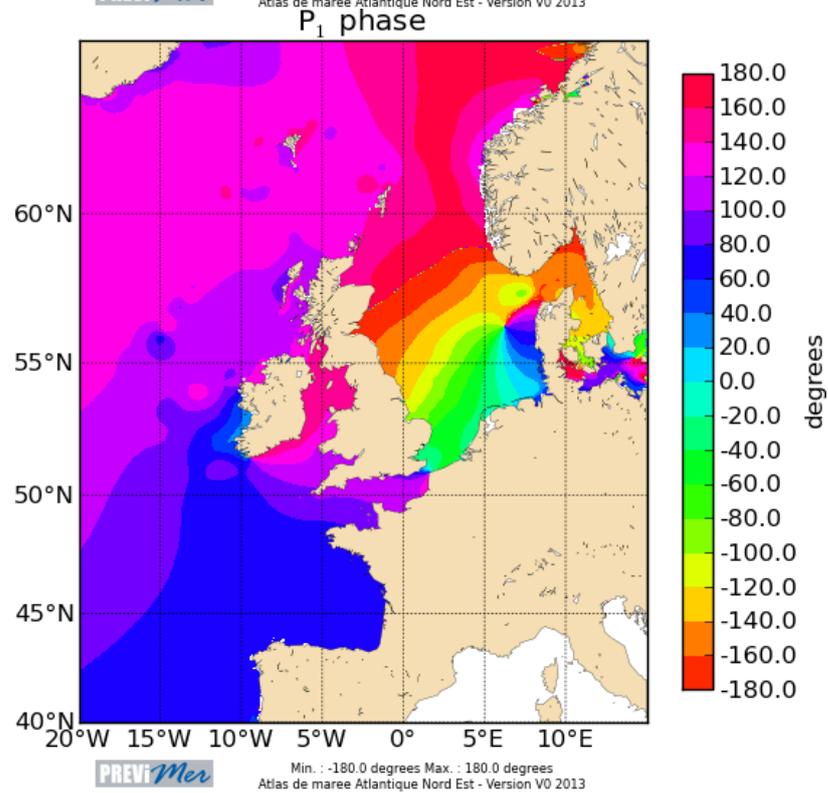
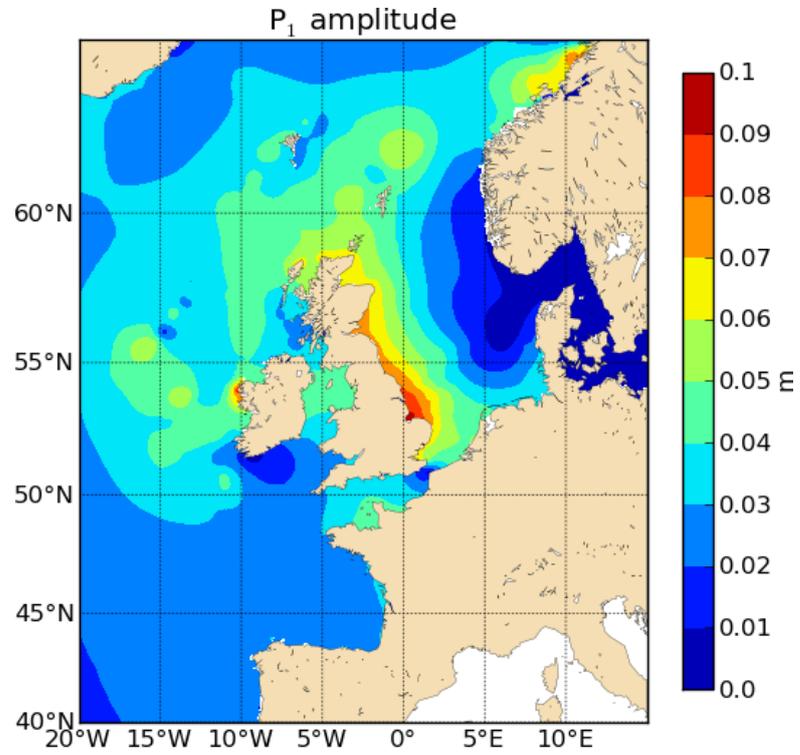


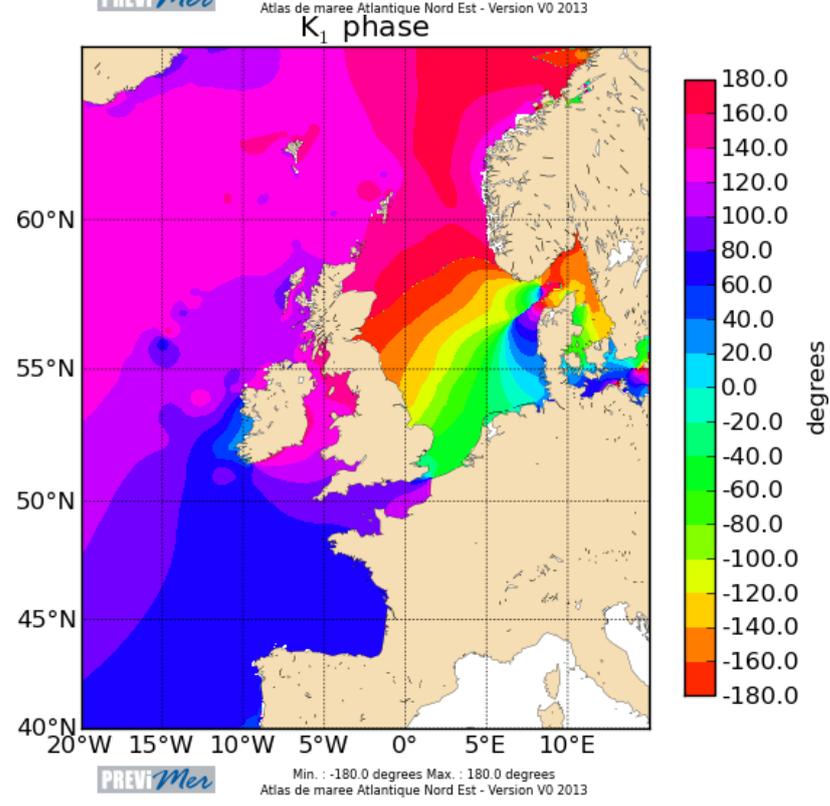
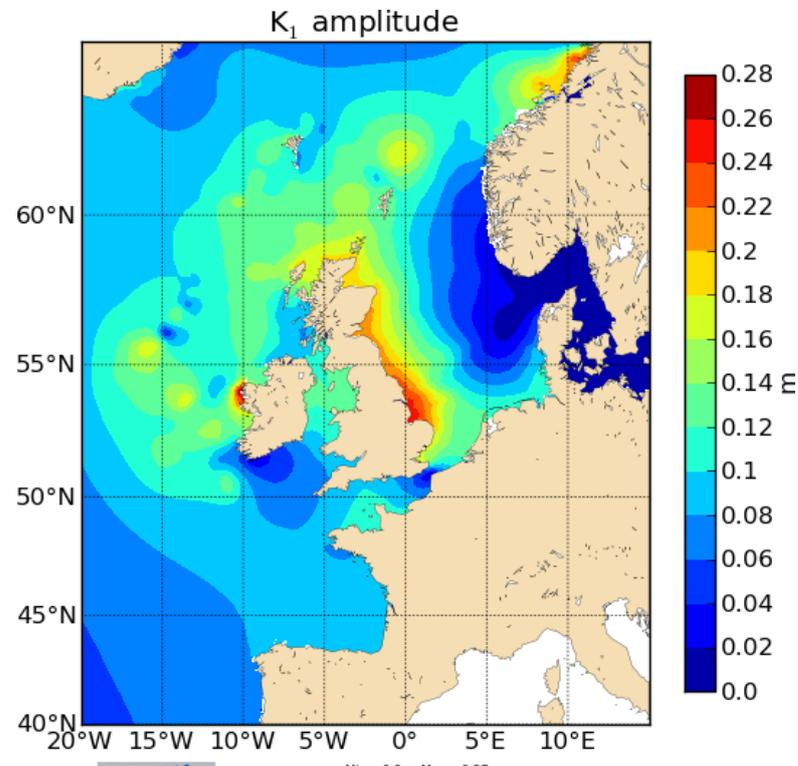


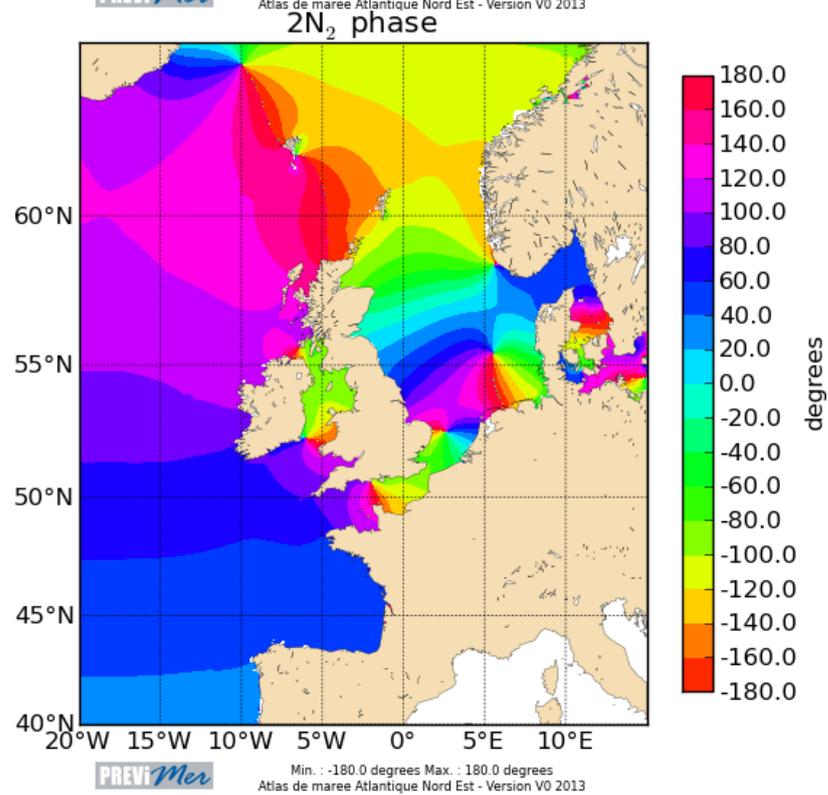
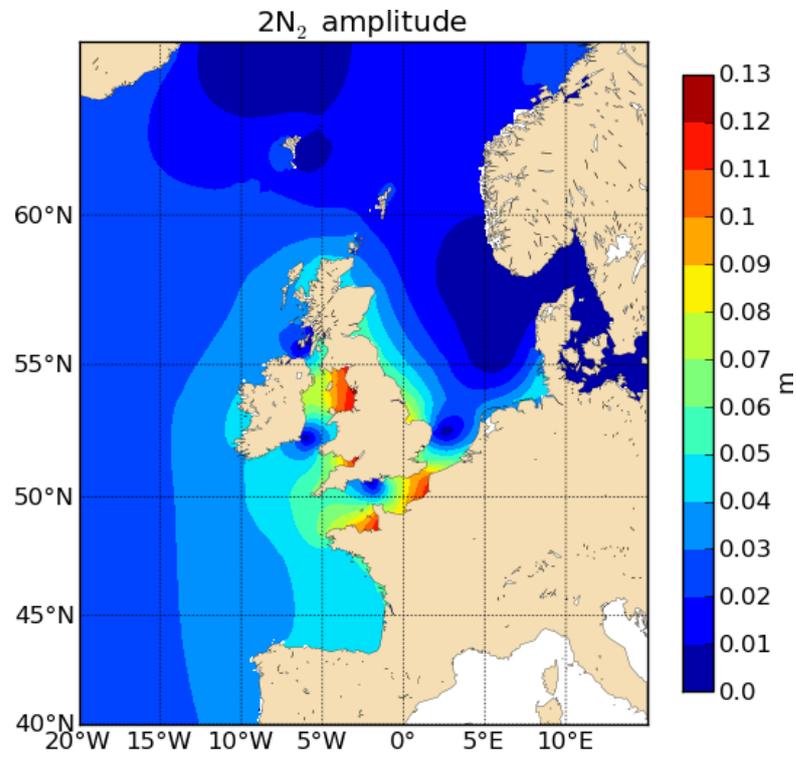


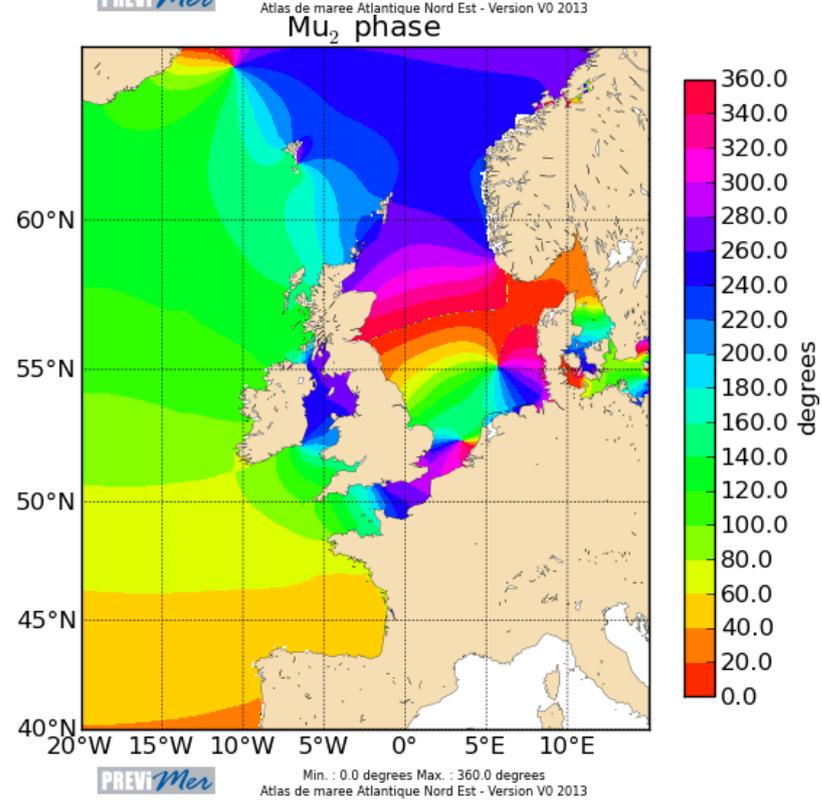
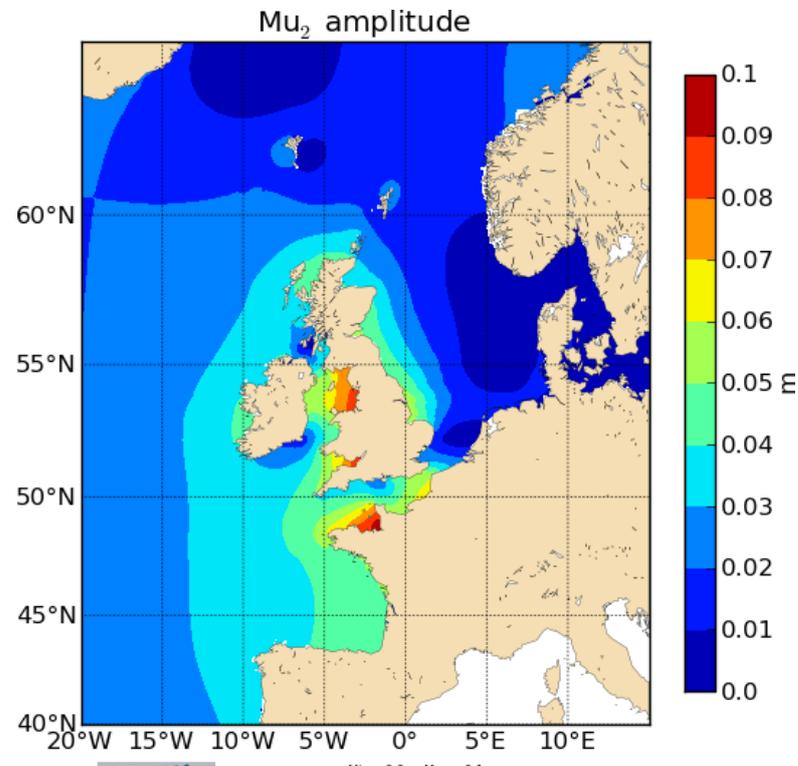


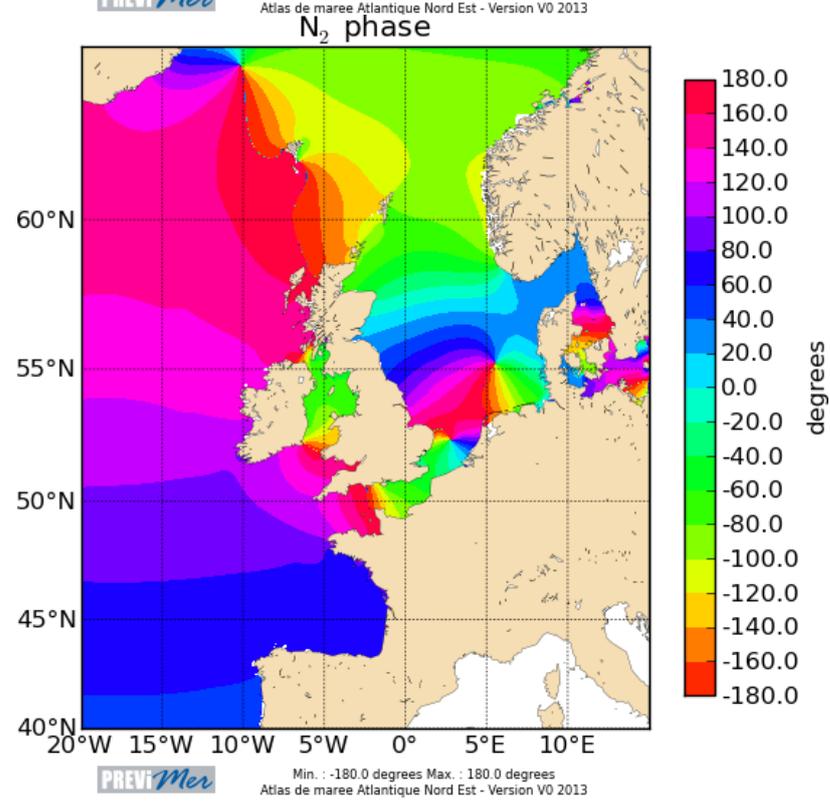
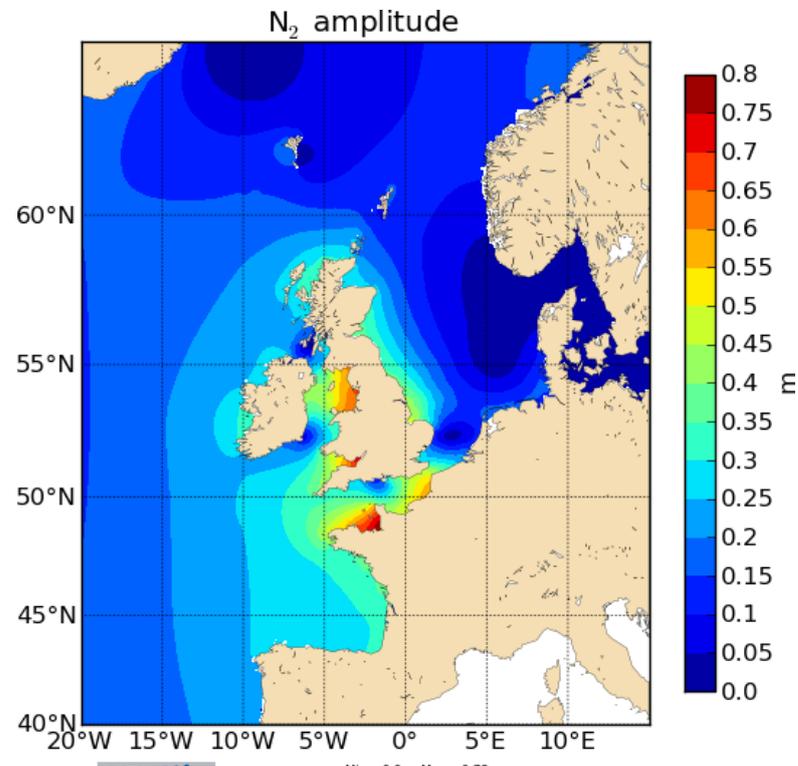


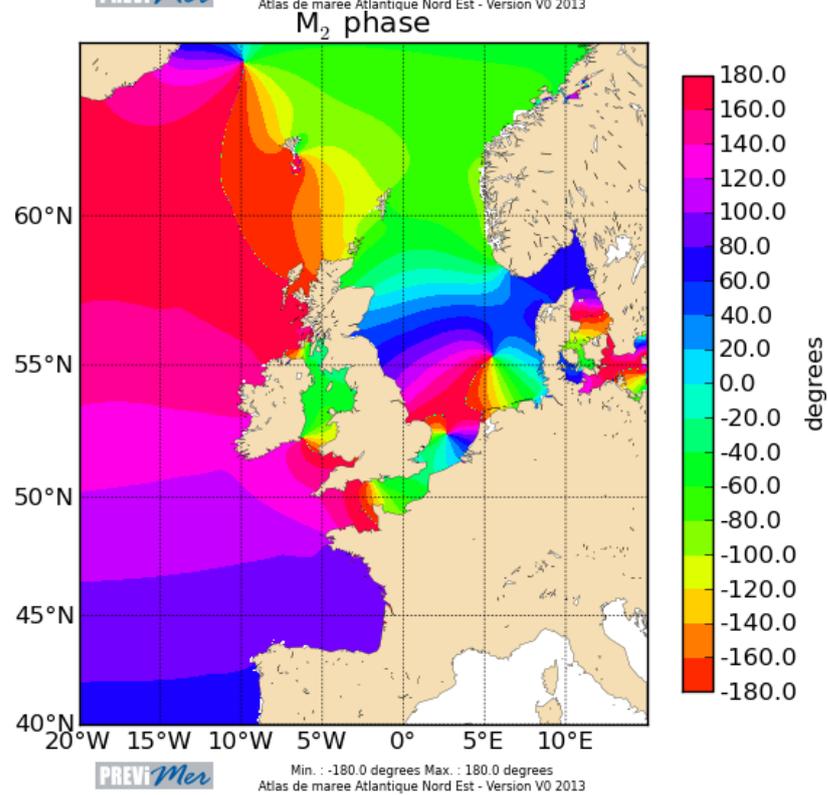
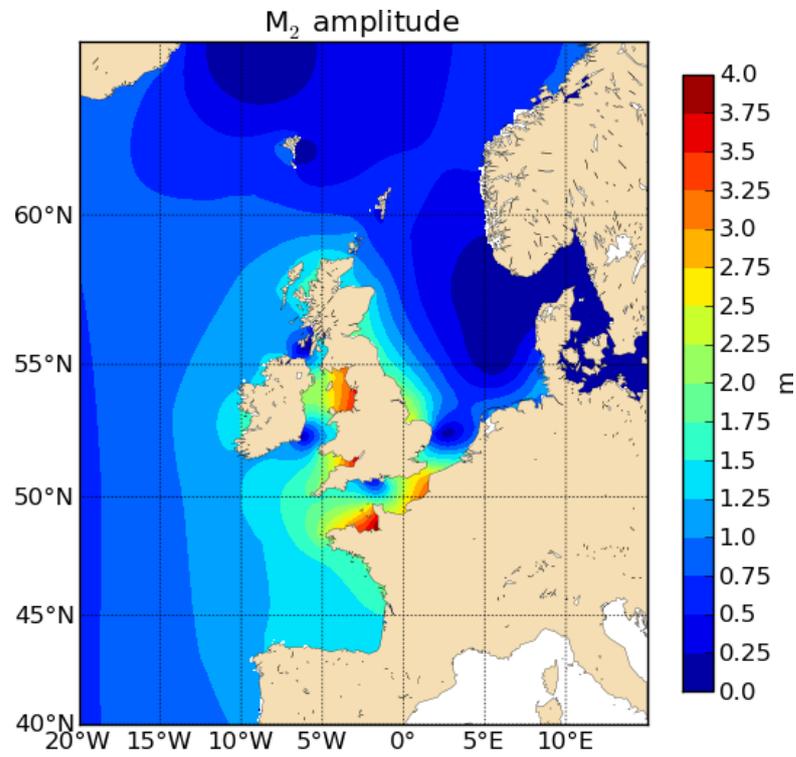


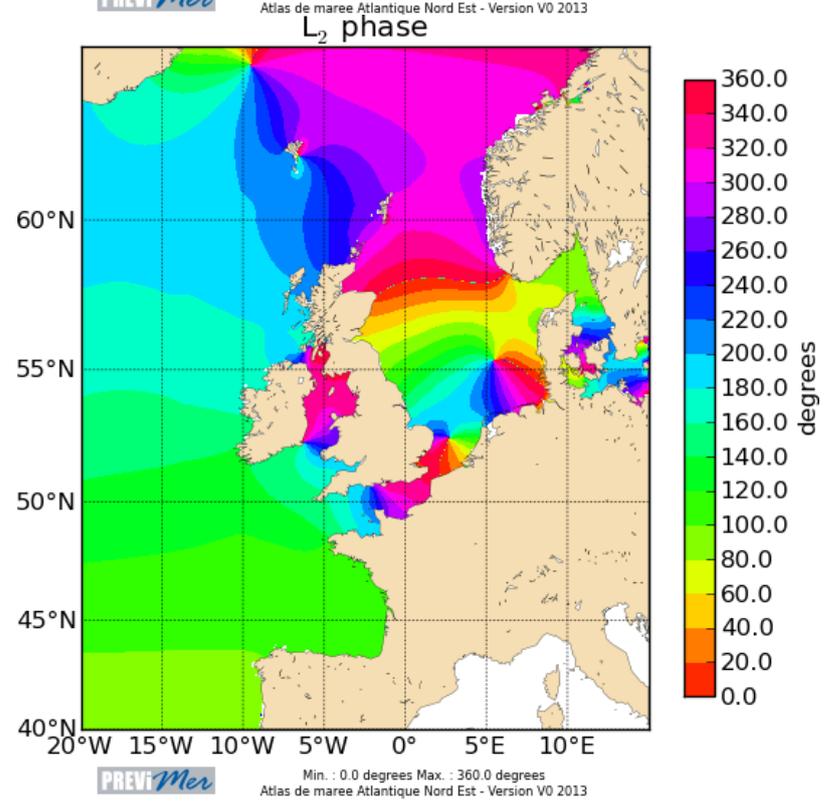
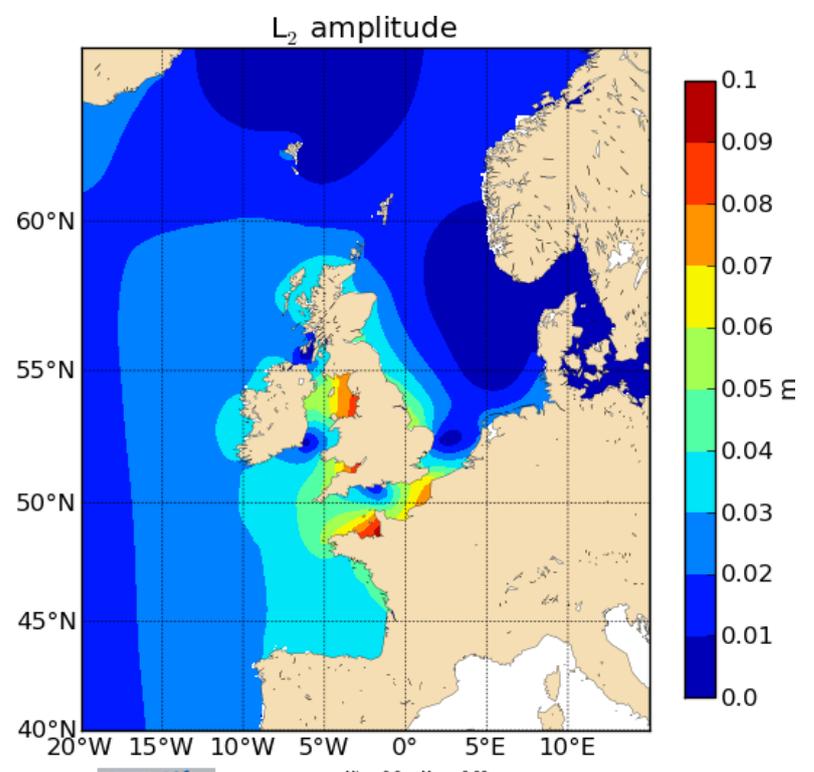


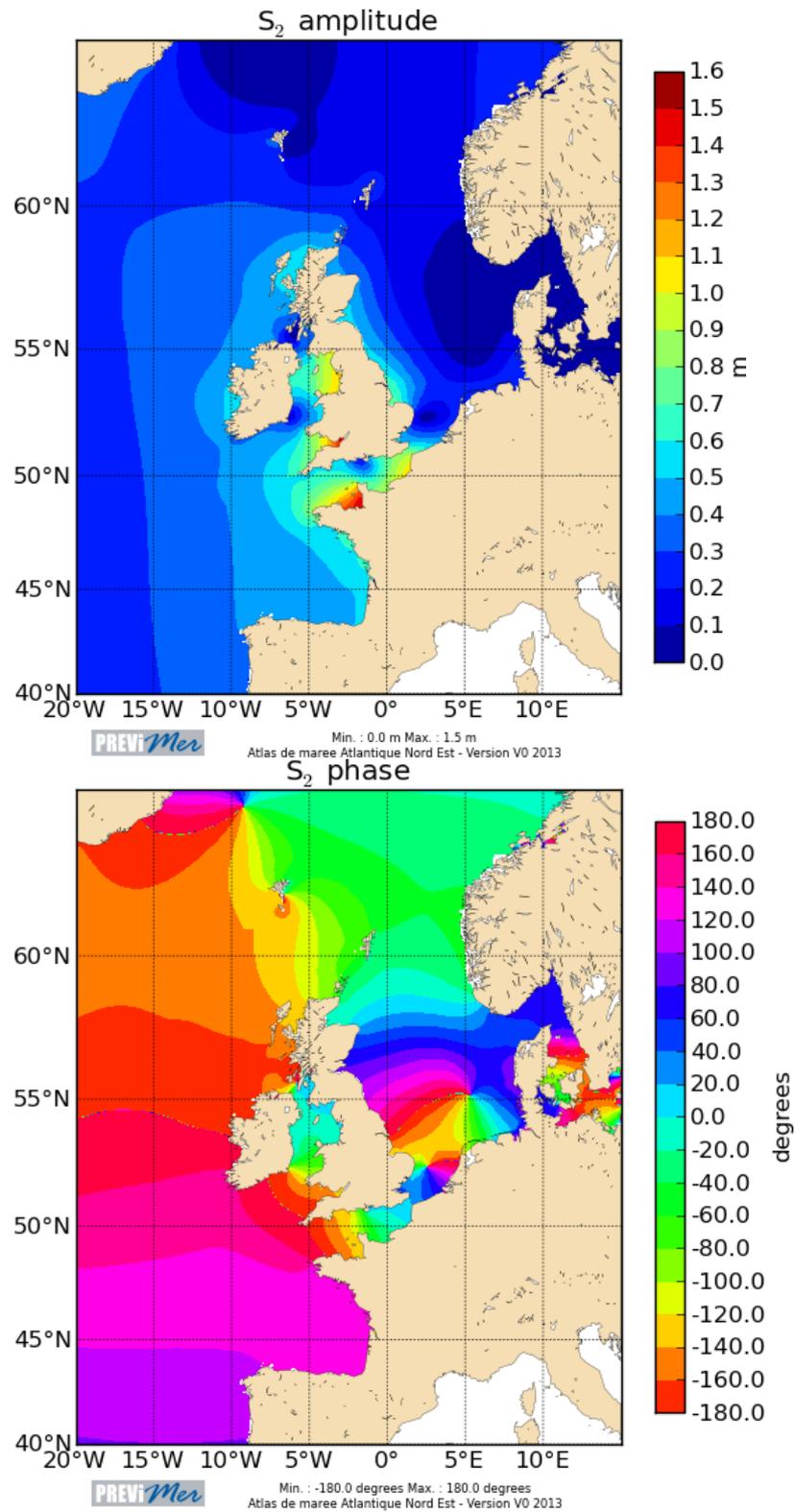


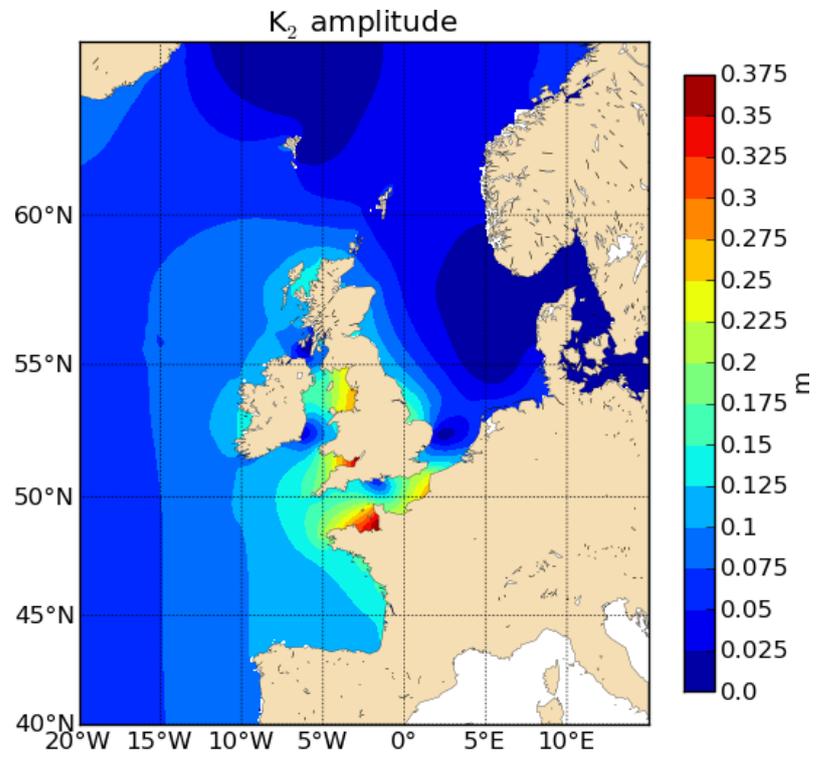




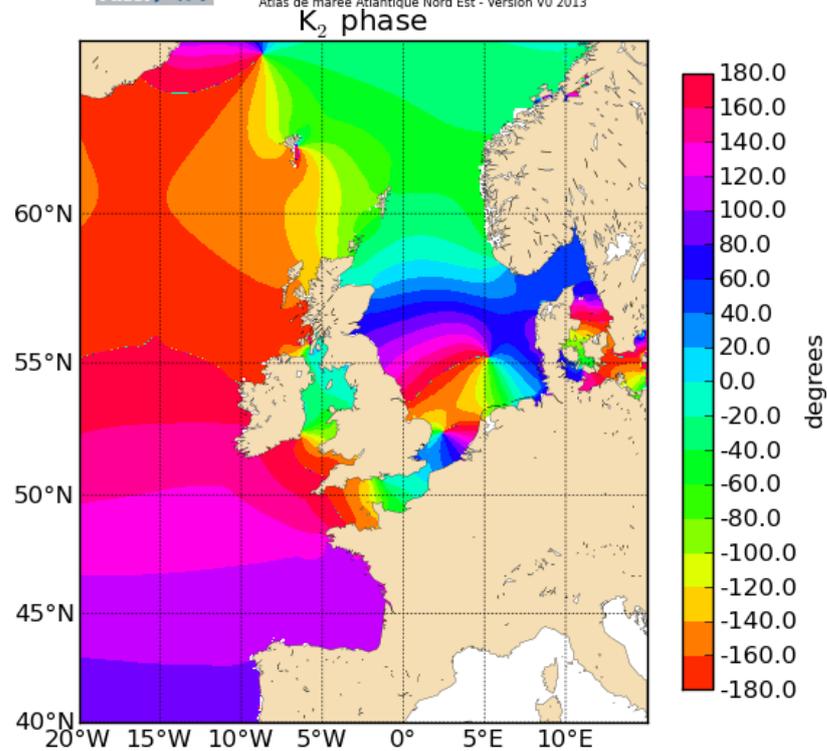








PREViMer Min. : 0.0 m Max. : 0.37 m
Atlas de marée Atlantique Nord Est - Version V0 2013



PREViMer Min. : -180.0 degrees Max. : 180.0 degrees
Atlas de marée Atlantique Nord Est - Version V0 2013

