

Projet PJ0303 : Océanographie Côtière Opérationnelle  
Action A030310P : CPER-PREVIMER volet 2 - Etude et validation de configurations  
modèles physiques  
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/2013-05 version 1.0



## PREVIMER

Validation des modèles

hydrodynamiques 2D des côtes

de la Manche et de l'Atlantique

## Historique du document

| <i>Version</i> | <i>Date</i> | <i>Auteurs</i>       | <i>Commentaires</i>  |
|----------------|-------------|----------------------|----------------------|
| 1.0            | 08/04/2013  | Lucia Pineau-Guillou | Création du document |
| 1.1            |             |                      |                      |

|                                      |                          |  |
|--------------------------------------|--------------------------|--|
| <i>Auteur :</i><br>L. Pineau-Guillou | <i>Date :</i> 08/04/2013 | <i>Visa :</i><br>  |
| <i>Vérifié par :</i><br>F. Dumas     | <i>Date :</i> 18/04/2013 | <i>Visa :</i><br> |
| <i>Approuvé par :</i><br>F. Lecornu  | <i>Date :</i> 05/06/2013 | <i>Visa :</i><br> |

© 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

|  |           |
|--|-----------|
| <b>1. INTRODUCTION .....</b>   | <b>4</b>  |
| <b>2. MISE EN PLACE DES MODELES.....</b>                                   | <b>5</b>  |
| 2.1.    EMPRISE DES MODELES .....  | 5         |
| 2.2.    BATHYMETRIE .....  | 5         |
| 2.3.    FORÇAGES.....  | 6         |
| 2.4.    METHODOLOGIE DE CALCUL DES SURCOTES .....                          | 6         |
| <b>3. AMELIORATION DE LA PARAMETRISATION .....</b>                         | <b>8</b>  |
| 3.1.    FROTTEMENT .....   | 8         |
| 3.2.    PARAMETRISATION DU VENT.....                                       | 9         |
| 3.3.    FORÇAGES METEOROLOGIQUES .....                                     | 10        |
| <b>4. VALIDATION.....</b>  | <b>14</b> |
| 4.1.    POINTS DE VALIDATION .....   | 14        |
| 4.2.    MAREE.....   | 15        |
| 4.3.    HAUTEURS .....   | 18        |
| 4.4.    SURCOTES.....  | 21        |
| 4.5.    COMPARAISON DES HAUTEURS ET SURCOTES AVEC L'ANCIEN MODELE .....    | 24        |
| 4.6.    COURANTS ISSUS DES MODELES DE RANG 2.....                          | 25        |
| 4.7.    COMPARAISON DES COURANTS ISSUS DES MODELES DE RANG 0, 1 ET 2 ..... | 34        |
| <b>5. CONCLUSION.....</b>  | <b>36</b> |
| <b>6. BIBLIOGRAPHIE .....</b>  | <b>38</b> |

## 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](http://www.previmer.org) un système d'informations et de prévisions multi échelles sur les façades métropolitaines françaises. Il fournit en particulier, en Manche et en Atlantique, 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.

Le développement de ces modèles répond à de nombreux besoins, comme :

- la prévention des risques de submersion marine,
- l'amélioration des modèles de vagues de PREVIMER en prenant en compte l'influence des courants sur les vagues,
- l'aide à la prédiction de la présence ou l'absence de certains habitats (herbiers, laminaires, ....). En effet, la corrélation entre les données d'observation de présence ou absence de certains habitats et les paramètres physiques en relation avec leur développement (par exemple les courants) permet de mettre en place des modèles statistiques (par exemple des modèles de niches écologiques) ; ces modèles statistiques permettent ensuite de prédire les habitats en fonctions des conditions environnementales climatologiques ;
- la fourniture de conditions aux limites pour le développement de modèles littoraux, de résolution plus fine (de l'ordre de quelques dizaines de mètres),
- les études statistiques dans le cadre des Energies Marines Renouvelables...

Ce rapport présente la mise en place, l'amélioration de la paramétrisation et la validation des modèles 2D de niveaux de la mer, surcotes/décotes et courants développés en 2012. Ces modèles sont destinés à remplacer les anciens modèles 2D opérés en routine, des améliorations importantes ayant été intégrées (résolution spatiale, paramétrisation, forçages).

## 2. Mise en place des modèles

### 2.1. Emprise des modèles

Afin de reproduire la dynamique des surcotes, il est nécessaire de disposer d'un modèle suffisamment étendu vers le Nord et l'Ouest, pour prendre en compte les passages dépressionnaires qui s'y développent, générant des surcotes se propageant en Manche et dans le Golfe de Gascogne. Les modèles mis en place sont donc des modèles emboîtés (Figure 1) de résolution progressive :

- 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.

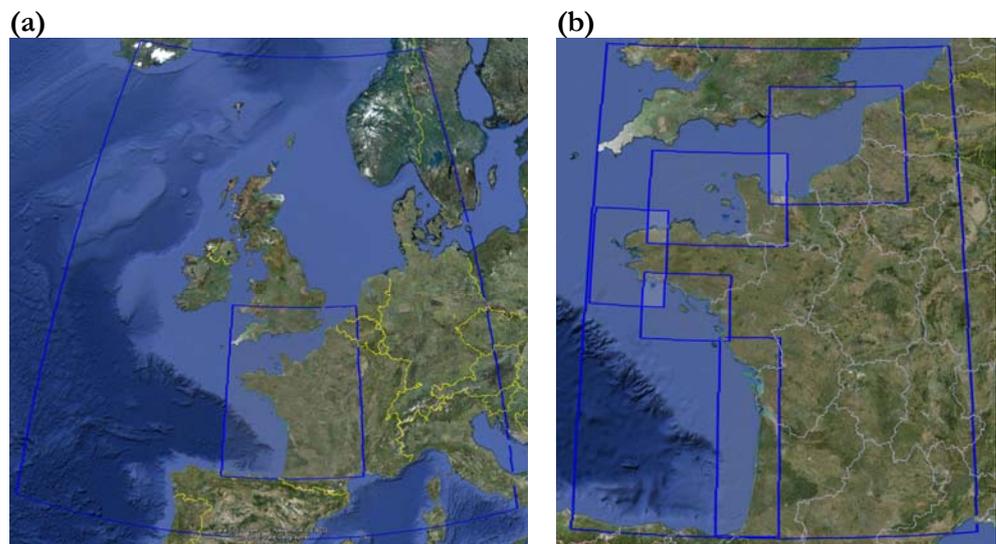


Figure 1: Extension des modèles 2D : rang 0 (Atlantique Nord Est), rang 1 (Manche Gascogne) et 5 rangs 2 (Manche Est, Manche Ouest, Finistère, Sud Bretagne, Aquitaine)

### 2.2. Bathymétrie

La bathymétrie du rang 0 a été réalisée en 2010, puis fournie au BRGM dans le cadre du groupe de travail PREVIMER-surcotes. Elle est issue des données NOOS 1' et des MNT SHOM-Ifremer à 100 m. Elle a été modifiée manuellement par le BRGM (Idier et al., 2012), en particulier suite à des problèmes le long du littoral, notés lors de

la comparaison avec le trait de côte. La bathymétrie du rang 0 est rapportée au niveau moyen.

La bathymétrie du rang 1 est issue des données EMODNET (rapportées au niveau moyen), des MNT SHOM-Ifremer à 500 m et à 100 m (version 2010, rapportées au zéro hydro). Les données EMODNET ont été rapportées au zéro hydro, pour que toutes les données bathymétriques aient la même référence verticale. La bathymétrie du rang 1 est rapportée au zéro hydrographique.

La bathymétrie des rangs 2, rapportée au zéro hydrographique, est issue des MNT à 100 m SHOM-Ifremer (version 2010).

### 2.3. 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, Q<sub>1</sub>, O<sub>1</sub>, P<sub>1</sub>, K<sub>1</sub>, 2N<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>, M<sub>2</sub>, S<sub>2</sub>, K<sub>2</sub> et M<sub>4</sub>).
- 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 composantes harmoniques. 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), Aladin, Arpege Haute Résolution (disponible depuis novembre 2011), et Arome (Seity et al. 2011).

### 2.4. Méthodologie de calcul des surcotes

La méthodologie de calcul des surcotes a été développée dans le cadre du projet PREVIMER Phase I (Romieu & Idier, 2007) et est présentée Figure 2. Les surcotes sont calculées en retranchant aux hauteurs issues d'une simulation avec météo les hauteurs issues d'une simulation sans météo. Les rangs 0 et 1 servent uniquement à calculer les surcotes instantanées à la frontière des rangs 2 ; ces rangs 2 prennent pour conditions limites les surcotes issues du rang 1 et les niveaux de marée issus du modèle de marée du cstFRANCE du SHOM.

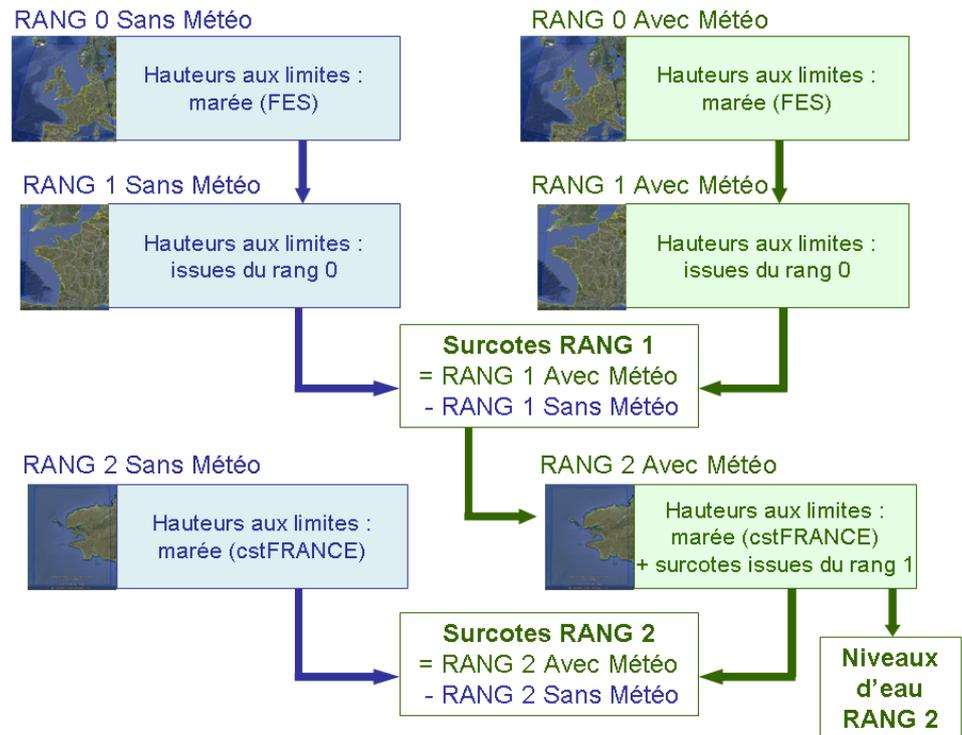


Figure 2 : Méthodologie de calcul des niveaux d'eau et surcotes modélisées

Cette méthode permet d'obtenir une marée précise au niveau des rangs 2, en particulier dans les zones où la marée est complexe et les ondes d'interaction importantes comme par exemple le Golfe Normand-Breton où bien les Pertuis Charentais.

### 3. Amélioration de la paramétrisation

#### 3.1. Frottement

Dans les anciennes chaînes de production (MARS V6), le frottement est paramétrisé selon la loi de Strickler :

$$\tau = \rho \frac{g \bar{U}^2}{k^2 h^{1/3}}$$

avec :

|           |                          |
|-----------|--------------------------|
| $\rho$    | densité de l'eau de mer  |
| $g$       | gravité                  |
| $\bar{U}$ | vitesse moyenne          |
| $k$       | coefficient de Strickler |
| $h$       | hauteur d'eau            |

La configuration optimale mise en place par le BRGM lors de l'étude PREVIMER-surcotes (Idier 2012) est paramétrée avec un coefficient de Strickler de 35. Dans les nouvelles chaînes (MARS V9.06), il s'agit d'une estimation du coefficient de traînée sur le fond à partir d'une longueur de rugosité :

$$\tau = \rho \left( \kappa \frac{\bar{U}}{\ln\left(\frac{h}{ez_0}\right)} \right)^2$$

avec :

|           |                         |
|-----------|-------------------------|
| $\rho$    | densité de l'eau de mer |
| $\kappa$  | constante de Von Karman |
| $\bar{U}$ | vitesse moyenne         |
| $h$       | hauteur d'eau           |
| $z_0$     | longueur de rugosité    |

La hauteur est dépendante de la hauteur maximale de la couche limite de fond  $h_{maxfrot}$ . Par défaut dans MARS,  $h_{maxfrot}$  est égal à 5 m. Les tests ont montré que cette valeur devait être augmentée pour atteindre une amplitude de marée correcte (Figure 5 et Tableau 1). La valeur retenue pour  $h_{maxfrot}$  est de 50 pour les rangs 0 et 1. Cette valeur n'est pas vraiment physique, elle a été conservée car elle est optimale, mais est particulièrement forte probablement pour compenser d'autres problèmes, comme par exemple une bathymétrie insuffisamment précise ou encore le fait que les corrections nodales pour le calcul des marées aux limites ne soient pas prises en compte dans cette version de MARS.

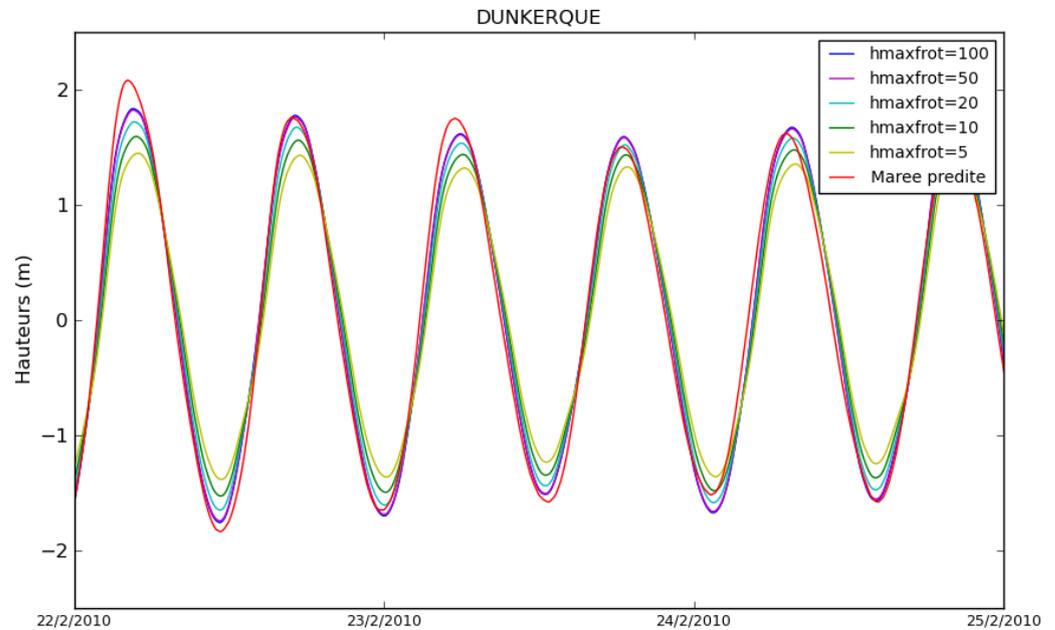


Figure 3 : Sensibilité à Dunkerque des hauteurs d'eau issues du rang 0 sans météo au paramètre  $h_{maxfrot}$

| $h_{maxfrot}$ | Erreur RMS (cm) |            |         |           | Biais (cm)  |            |         |           |
|---------------|-----------------|------------|---------|-----------|-------------|------------|---------|-----------|
|               | La Rochelle     | Le Conquet | St-Malo | Dunkerque | La Rochelle | Le Conquet | St-Malo | Dunkerque |
| 100           | 24              | 19         | 29      | 15        | 4           | 1          | 4       | 2         |
| 50            | 24              | 19         | 28      | 15        | 4           | 1          | 4       | 2         |
| 20            | 24              | 22         | 31      | 20        | 3           | 1          | 4       | 2         |
| 10            | 24              | 24         | 43      | 32        | 3           | 1          | 4       | 3         |
| 5             | 25              | 28         | 61      | 45        | 3           | 1          | 5       | 3         |

Tableau 1 : Erreurs quadratiques moyennes et biais du rang 0 sans météo en fonction du paramètre  $h_{maxfrot}$

### 3.2. Paramétrisation du vent

Le coefficient de traînée utilisé dans les anciennes chaînes de production (MARS V6) est constant et égal à 0.0016. La formulation de Charnock (CHARNOCK, 1955) avec un coefficient constant (0.014) permet d'améliorer la surcote pendant Xynthia (Figure 4). La prise en compte de l'action des vagues permet encore d'améliorer cette paramétrisation : en utilisant le coefficient de Charnock variable issu des modèles de vagues WaveWatchIII® (projet IOWAGA, Arduin et al. 2011), l'amélioration des surcotes atteint une dizaine de cm pendant la tempête Xynthia à La Rochelle. L'amélioration totale pendant Xynthia entre un coefficient de traînée constant et une formulation de Charnock à coefficient variable atteint une vingtaine de cm (18 cm à La Rochelle, soit environ 16% du signal). Ce résultat est consistant avec ceux obtenus dans le cadre du projet PREVIMER-surcotes (Idier et al., 2010a, 2010b, 2012) et ceux obtenus par (Bertin et al, 2012).

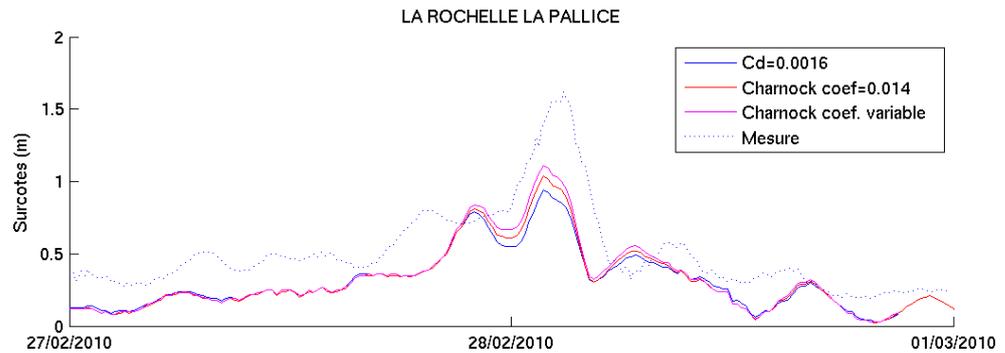


Figure 4 : Influence de la paramétrisation du coefficient de traînée sur les surcotes modélisées (rang 0, ARPEGE 6h)

### 3.3. Forçages météorologiques

Trois modèles météorologiques ont été testés sur le rang 0 : Arpege, Arpege Haute Résolution (HR) et Arome. Leur résolution spatiale et temporelle est résumée dans le Tableau 2, leur extension est présentée Figure 5.

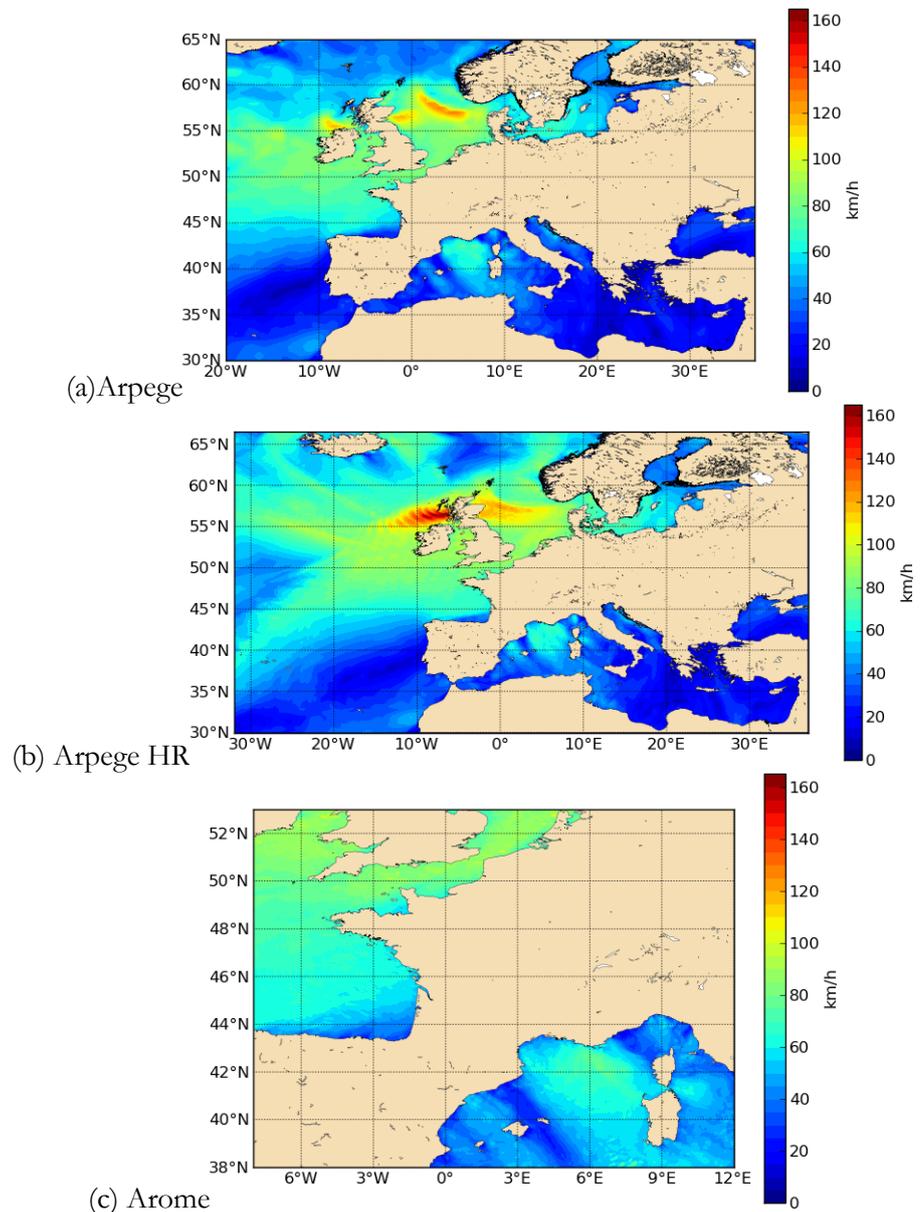
Le modèle Arpege a une résolution temporelle de 6h et spatiale de  $0.5^\circ$ . Les données antérieures à avril 2009 correspondent à 4 analyses par jour. Depuis avril 2009, il s'agit d'une analyse à 0h et 3 prévisions calculées à 0h pour 6h, 12h et 18h.

Le modèle Arpege est disponible en haute résolution depuis novembre 2011, avec une résolution temporelle de 1h et spatiale de  $0.1^\circ$ . 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.

Le modèle Arome a une résolution temporelle de 1h et spatiale de  $0.025^\circ$ , 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).

| Modèle météorologique   | Résolution temporelle | Résolution spatiale |
|-------------------------|-----------------------|---------------------|
| Arpege                  | 6 hours               | $0.5^\circ$         |
| Arpege Haute Résolution | 1 hour                | $0.1^\circ$         |
| Arome                   | 1 hour                | $0.025^\circ$       |

Tableau 2 : Résolution temporelle et spatiale des modèles météorologiques de Météo-France



**Figure 5 : Extension des modèles météorologiques ARPEGE (a), ARPEGE Haute Résolution (b), et AROME (c) – Vents maximums le 03/01/2012 à 12:00 UT**

Les simulations ont été réalisées en janvier 2012 avec les trois forçages suivants : Arpege (6h), Arpege HR (1h) et Arpege HR fusionné avec Arome (ces deux modèles étant de même résolution temporelle 1h). La fusion consiste en une interpolation spatiale sur une grille commune, dont la résolution spatiale est la plus petite des deux ( $0.1^\circ$ ). L'interpolation spatiale est bicubique. Un mécanisme de relaxation permet une transition progressive entre les deux jeux de données sur 20 points de grille de plus haute résolution.

L'influence du forçage météo sur les surcotes en janvier 2012 est présentée Figure 6. Les surcotes du 4 au 7 janvier 2012 à Dunkerque sont présentées Figure 7 : la surcote



la plus importante atteint 2 m à Dunkerque le 5 janvier, pendant la tempête Andrea. Pour chacun des forçages météorologiques, les erreurs quadratiques moyennes (RMS) des surcotes sont présentées Tableau 3, les surcotes maximales sont synthétisées Tableau 4.

Tout d'abord, les résultats sont très proches entre Arpege HR fusionné avec Arome et Arpege HR seul. Par exemple à Dunkerque, l'erreur RMS est de 12 cm avec Arpege HR fusionné avec Arome et 11 cm avec Arpege HR seul ; les surcotes maximales sont également très proches, avec 1.63 m avec Arpege HR fusionné avec Arome et 1.62 m avec Arpege HR seul. Pour le rang 0, il n'est donc pas nécessaire de fusionner Arpege HR et Arome.

Les résultats montrent également que l'erreur RMS pour Arpege HR et Arpege sont très proches (respectivement 11 et 10 cm à Dunkerque) ; par contre, les pics de surcotes de tempête sont vraiment améliorés avec le modèle météo de meilleure résolution spatio-temporelle : la surcote maximale atteint 1.62 m avec Arpege HR, au lieu de 1.45 m avec Arpege, soit une amélioration de 17 cm. Les statistiques montrent clairement une diminution de l'erreur pic avec Arpege HR, ce qui confirme l'amélioration des surcotes maximales (Muller et al. 2013). L'amélioration du forçage météorologique influence donc surtout l'événementiel.

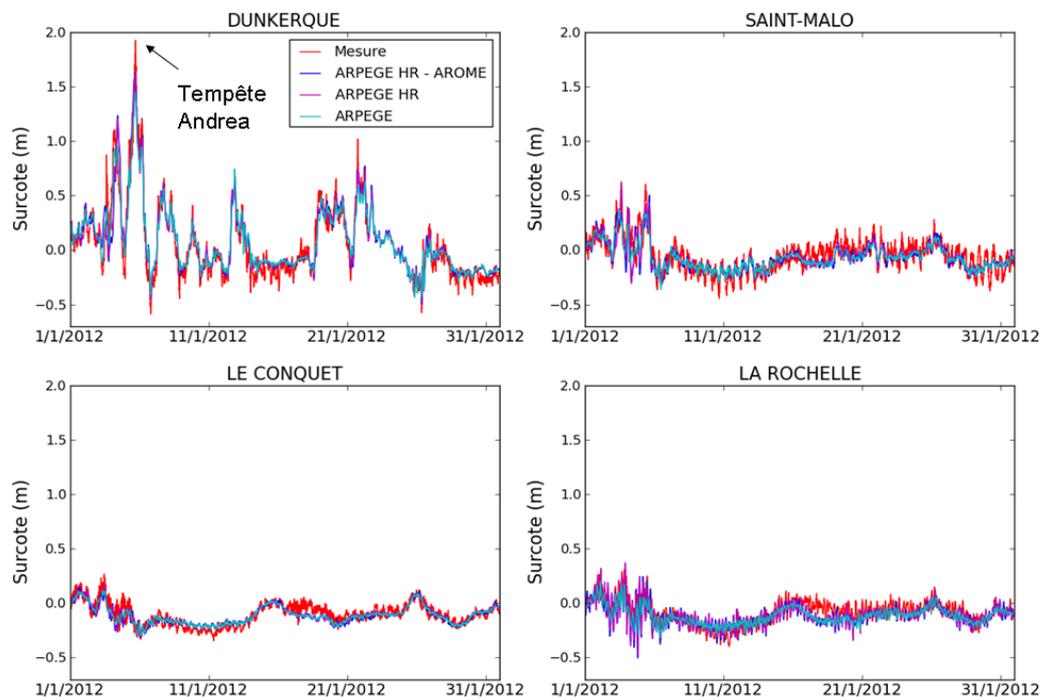


Figure 6: Surcotes à Dunkerque, Saint-Malo, Le Conquet et La Rochelle en janvier 2012 avec différents forçages météorologiques : Arpege HR & Arome, Arpege HR et Arpege

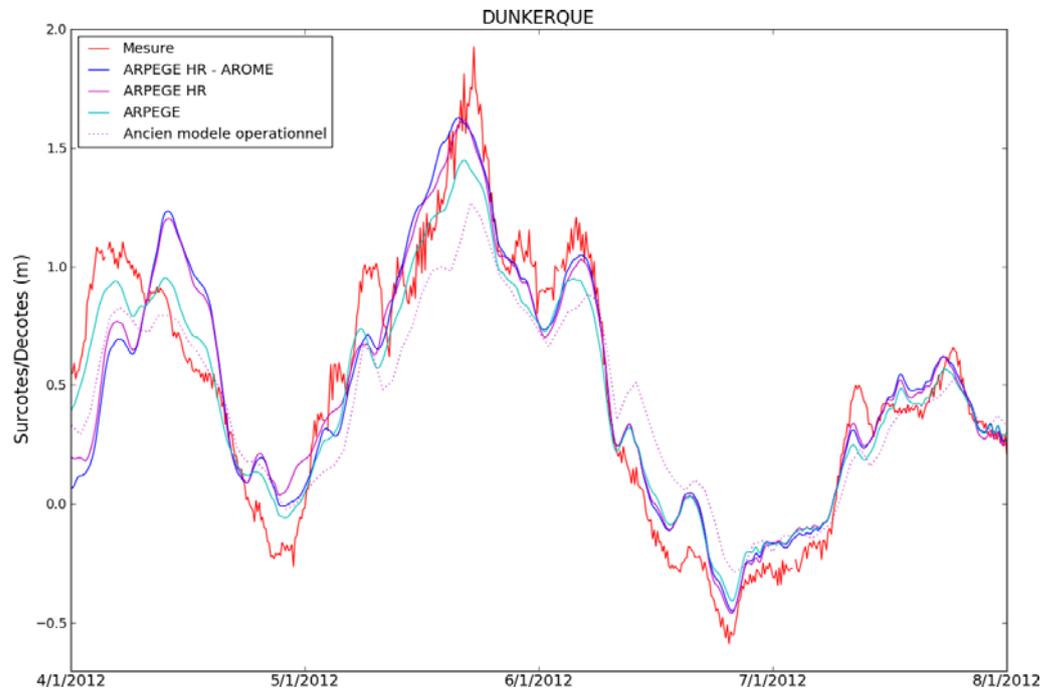


Figure 7 : Surcotes à Dunkerque du 4 au 7 janvier 2012 avec différents forçages météorologiques : Arpege HR & Arome, Arpege HR et Arpege

|                | Arpege HR - Arome | Arpege HR   | Arpege      |
|----------------|-------------------|-------------|-------------|
| Dunkerque      | 12 cm             | 11 cm       | 10 cm       |
| Saint-Malo     | 9 cm              | 9 cm        | 8 cm        |
| Le Conquet     | 6 cm              | 5 cm        | 5 cm        |
| La Rochelle    | 10 cm             | 10 cm       | 8 cm        |
| <b>Moyenne</b> | <b>9 cm</b>       | <b>9 cm</b> | <b>8 cm</b> |

Tableau 3 : Erreur RMS des surcotes à Dunkerque, Saint-Malo, Le Conquet et La Rochelle en janvier 2012 pour différents modèles

|             | Arpege HR - Arome | Arpege HR | Arpege | Mesure |
|-------------|-------------------|-----------|--------|--------|
| Dunkerque   | 163 cm            | 162 cm    | 145 cm | 193 cm |
| Saint-Malo  | 50 cm             | 61 cm     | 36 cm  | 63 cm  |
| Le Conquet  | 14 cm             | 17 cm     | 12 cm  | 27 cm  |
| La Rochelle | 24 cm             | 37 cm     | 21 cm  | 31 cm  |

Tableau 4 : Surcotes maximales en janvier 2012 à Dunkerque pour différents modèles

## 4. Validation

### 4.1. Points de validation

La validation a été effectuée en 19 marégraphes permanents du Réseau d'Observation du Niveau de la Mer (RONIM) du SHOM (Figure 8). Pour chacun de ces marégraphes, les hauteurs d'eau ont été collectées sur le site REFMAR du SHOM (données à 10 minutes validées en temps différé), sur la période correspondant aux marégraphes numériques RONIM. Ceci permet de se limiter à des données de suffisamment bonne qualité et de durée suffisamment longue pour permettre une bonne analyse harmonique. Pour chacun des 19 marégraphes, une analyse harmonique a été effectuée ; la période analysée est récapitulée dans le Tableau 5. A partir des composantes harmoniques ainsi obtenues, les prédictions ont été calculées. Les surcotes aux marégraphes ont été calculées en retranchant aux observations, les prédictions précédemment calculées. L'analyse harmonique des données ainsi que les prédictions ont été effectuées à partir du logiciel *mas* du SHOM.

| Marégraphe          | Période de l'analyse harmonique |
|---------------------|---------------------------------|
| Dunkerque           | Septembre 1996 – Avril 2012     |
| Calais              | Octobre 1998 – Avril 2012       |
| Boulogne-sur-Mer    | Décembre 2000 – Avril 2012      |
| Dieppe              | Février 2009 – Avril 2012       |
| Le Havre            | Décembre 1994 – Avril 2012      |
| Cherbourg           | Octobre 1994 – Avril 2012       |
| Saint-Malo          | Septembre 2003 – Avril 2012     |
| Roscoff             | Juin 2004 – Avril 2012          |
| Le Conquet          | Novembre 1992 – Avril 2012      |
| Brest               | Août 1995 – Avril 2012          |
| Concarneau          | Juillet 1999 – Avril 2012       |
| Le Crouesty         | Février 2002 – Avril 2012       |
| Saint-Nazaire       | Janvier 2007 – Avril 2012       |
| Les Sables d'Olonne | Juin 1999 – Avril 2012          |
| La Rochelle-Pallice | Avril 1997 – Avril 2012         |
| Port-Bloc           | Avril 2000 – Avril 2012         |
| Arcachon            | Avril 2001 – Avril 2012         |
| Boucau-Bayonne      | Juin 1999 – Avril 2012          |
| Saint-Jean de Luz   | Mai 2004 – Avril 2012           |

Tableau 5 : Période de l'analyse harmonique des marégraphes

Les modèles ont été validés en février 2010, pendant le passage de la tempête Xynthia (28 février 2010). Les simulations ont été réalisées du 15 au 28 février 2010, seules la période du 17 au 28 février 2010 a été exploitée, pour s'affranchir de la phase d'ajustement consécutive à l'initialisation des modèles (spin-up observé de l'ordre de quelques jours).



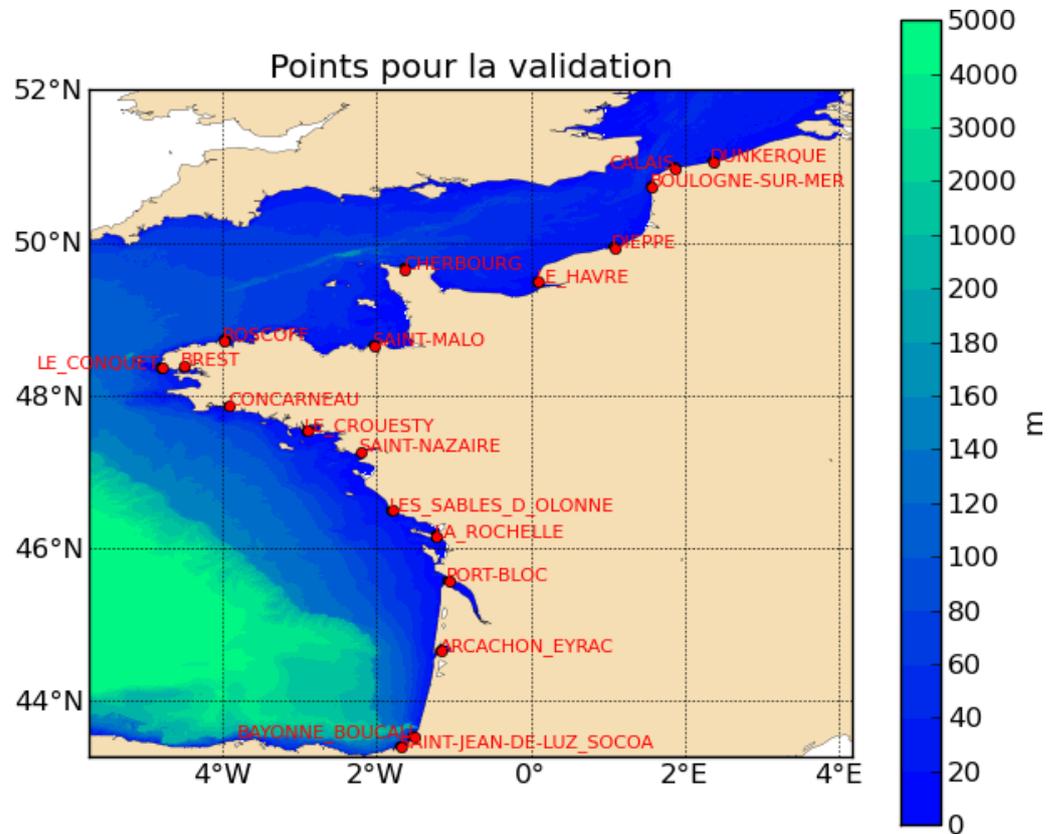


Figure 8 : Points pour la validation de la marée, des hauteurs et surcotes

## 4.2. Marée

La marée modélisée correspond à une simulation sans météo. En chacun des 19 points de validation, et pour chaque rang, la marée modélisée a été comparée à la marée prédite, du 17 au 28 février 2010. Un exemple de graphe de validation de la marée est présenté Figure 9 ; l'ensemble des graphes pour les rangs 2 aux 19 points de validation est présenté en Annexe 1. Les erreurs quadratiques moyennes (RMS) et les biais (moyenne des écarts entre le modèle et la prédiction) pour chaque rang sont synthétisés dans le Tableau 6.

Les erreurs RMS sont en moyenne de 22 cm pour le rang 0, 21 cm pour le rang 1 et 11 cm pour les rangs 2 ; les biais sont en moyennes de 3 cm pour les rangs 0 et 1, nuls pour les rangs 2. On constate une amélioration importante de la marée pour les rangs 2, qui vient principalement de l'introduction aux limites du modèle de marée estFRANCE (115 composantes harmoniques), mais également de l'amélioration de la résolution (2 km à 250 m). La comparaison de la marée au Conquet issue des rangs 0, 1 et 2 avec la marée prédite du 22 au 25 février 2010 (Figure 10) montre clairement l'amélioration entre les rangs 0, 1 et 2.

Les modèles de rang 2 sont particulièrement satisfaisant à Cherbourg (modèle Manche Est) et aux Sables d'Olonne (modèle Aquitaine), avec une erreur RMS de

seulement 6 cm. Par contre, le modèle de rang 2 Aquitaine n'est pas satisfaisant à Arcachon, avec une erreur RMS de 36 cm ; ceci est probablement dû à la bathymétrie du bassin d'Arcachon mal représentée.

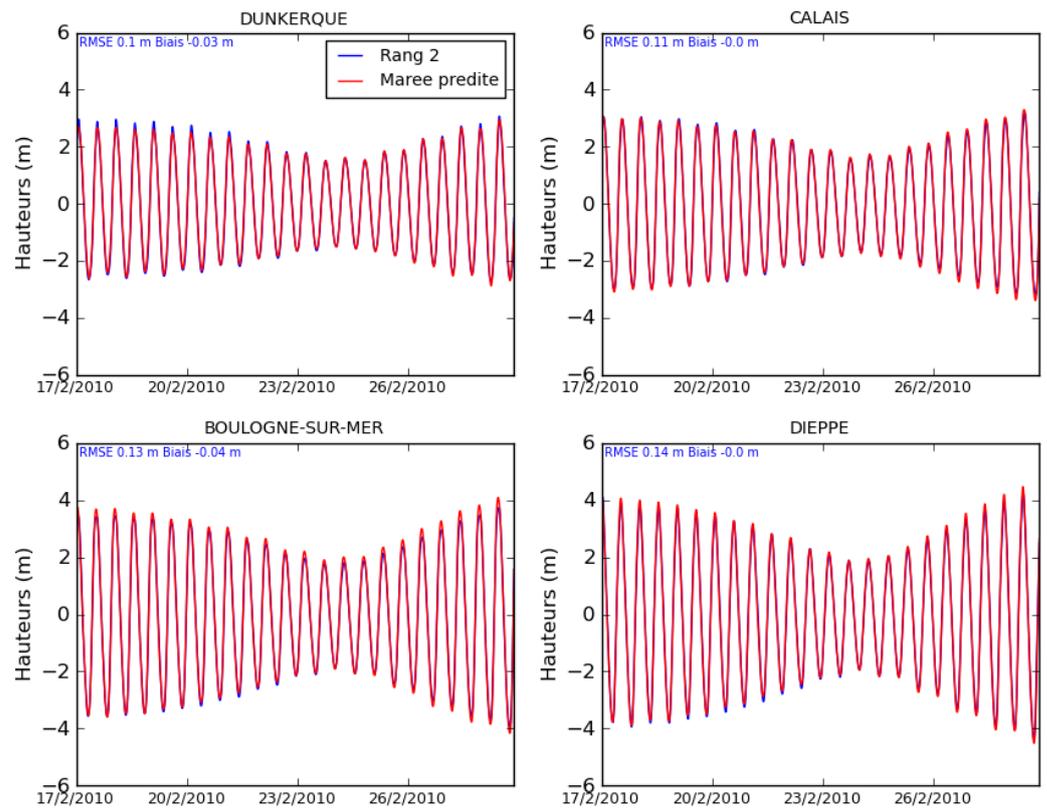


Figure 9 : Comparaison entre la marée issue du rang 2 (sans météo) et la marée prédite à Dunkerque, Calais, Boulogne-sur-Mer et Dieppe

| Points              | Erreur RMS (cm) |              |              | Biais (cm)  |             |             | Nom du Rang 2 |
|---------------------|-----------------|--------------|--------------|-------------|-------------|-------------|---------------|
|                     | Rang 0          | Rang 1       | Rang 2       | Rang 0      | Rang 1      | Rang 2      |               |
|                     |                 |              |              |             |             |             | MANE          |
| Dunkerque           | 15              | 14           | 10           | 3           | 3           | -3          | MANE          |
| Calais              | 17              | 17           | 11           | 4           | 5           | 0           | MANE          |
| Boulogne-sur-Mer    | 20              | 20           | 13           | 2           | 2           | -4          | MANE          |
| Dieppe              | 22              | 23           | 14           | 5           | 5           | 0           | MANE          |
| Le Havre            | 20              | 21           | 13           | 0           | 1           | -4          | MANE          |
| Cherbourg           | 13              | 15           | 6            | 0           | 2           | -1          | MANW          |
| Saint-Malo          | 28              | 30           | 15           | 2           | 2           | -3          | MANW          |
| Roscoff             | 20              | 21           | 7            | 3           | 4           | 0           | MANW          |
|                     |                 |              | 8            |             |             | 3           | FINI          |
| Le Conquet          | 19              | 18           | 7            | 1           | -4          | -4          | FINI          |
| Brest               | 32              | 15           | 10           | 1           | 1           | 0           | FINI          |
| Concarneau          | 14              | 14           | 8            | -2          | -2          | -5          | FINI          |
|                     |                 |              | 7            |             |             | -5          | SUDB          |
| Le Croesty          | 18              | 18           | 7            | 2           | 2           | -1          | SUDB          |
| Saint-Nazaire       | 20              | 21           | 10           | -1          | -1          | -6          | SUDB          |
| Les Sables d'Olonne | 18              | 19           | 6            | -2          | -2          | -2          | AQUI          |
| La Rochelle-Pallice | 24              | 26           | 10           | 3           | 4           | 4           | AQUI          |
| Port-Bloc           | 34              | 19           | 13           | 1           | 0           | 1           | AQUI          |
| Arcachon            | 56              | 55           | 35           | 31          | 34          | 24          | AQUI          |
| Boucau-Bayonne      | 19              | 19           | 10           | 1           | 1           | 2           | AQUI          |
| Saint-Jean de Luz   | 12              | 13           | 8            | 3           | 3           | 4           | AQUI          |
| <b>Moyenne</b>      | <b>22 cm</b>    | <b>21 cm</b> | <b>11 cm</b> | <b>3 cm</b> | <b>3 cm</b> | <b>0 cm</b> |               |

Tableau 6 : Erreurs quadratiques moyennes et biais des hauteurs issues des différents modèles sans météo (marée uniquement)

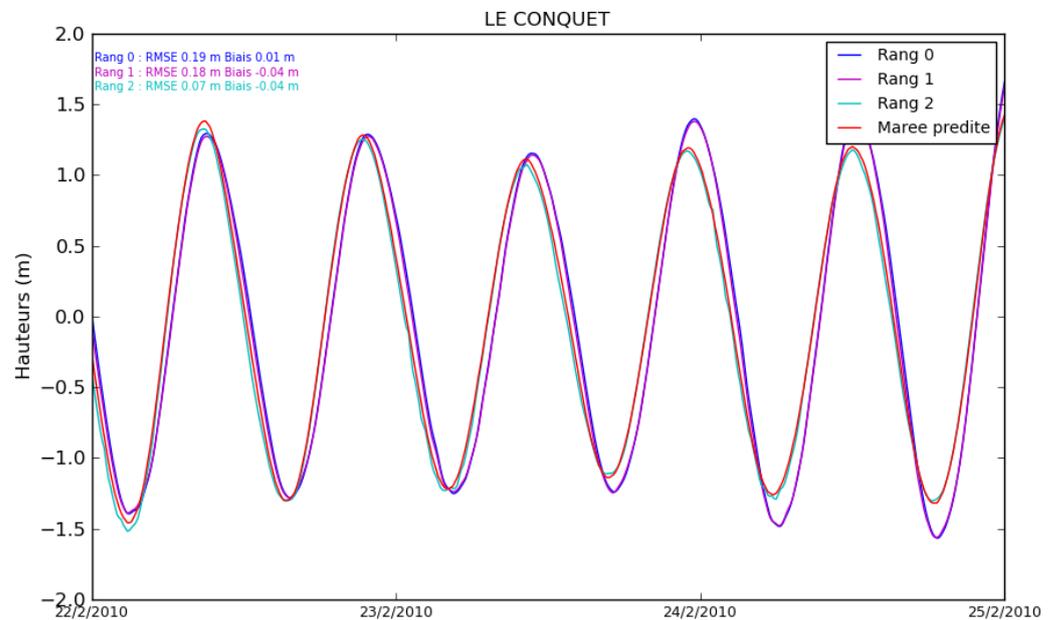


Figure 10 : Comparaison entre la marée issue des rangs 0, 1 et 2 avec la prédiction au Conquet

### 4.3. Hauteurs

Pour le calcul des hauteurs en février 2010, les modèles sont forcés par une fusion d'Arome, Aladin et Arpege 3h. Pour chaque rang, les surcotes modélisées ont été comparées aux observations, du 17 au 28 février 2010. Les observations n'étant pas disponibles à Boulogne-sur-Mer sur cette période (pas de données entre le 05/04/2008 et le 02/03/2010), la comparaison a été réalisée en 18 points de validation. Un exemple de graphe de comparaison est présenté Figure 11 ; l'ensemble des graphes pour les rangs 2 aux 18 points de validation est présenté en Annexe 1. Les erreurs quadratiques moyennes (RMS) et les biais pour chaque rang sont synthétisés dans le Tableau 7.

Les erreurs RMS sont en moyenne de 26 cm pour le rang 0, 24 cm pour le rang 1 et 16 cm pour les rangs 2 ; les biais sont en moyennes de -5 cm pour les rangs 0 et 1, -7 cm pour les rangs 2. Les biais négatifs viennent probablement d'une sous-estimation des surcotes modélisées (voir paragraphe suivant). On constate une amélioration importante des hauteurs pour les rangs 2. Comme expliqué précédemment, ceci vient principalement de l'introduction aux limites du modèle de marée cstFRANCE. La comparaison des hauteurs issues des rangs 0, 1 et 2 avec les observations au Conquet du 22 au 25 février 2010 montre clairement l'amélioration entre les rangs 0, 1 et 2 (Figure 12).

Comme pour la marée, on retrouve de bons résultats pour les rangs 2 à Cherbourg (erreur RMS de 10 cm), mais de mauvais résultats à Arcachon (erreur RMS de 29 cm), dus à une mauvaise représentation de la marée.



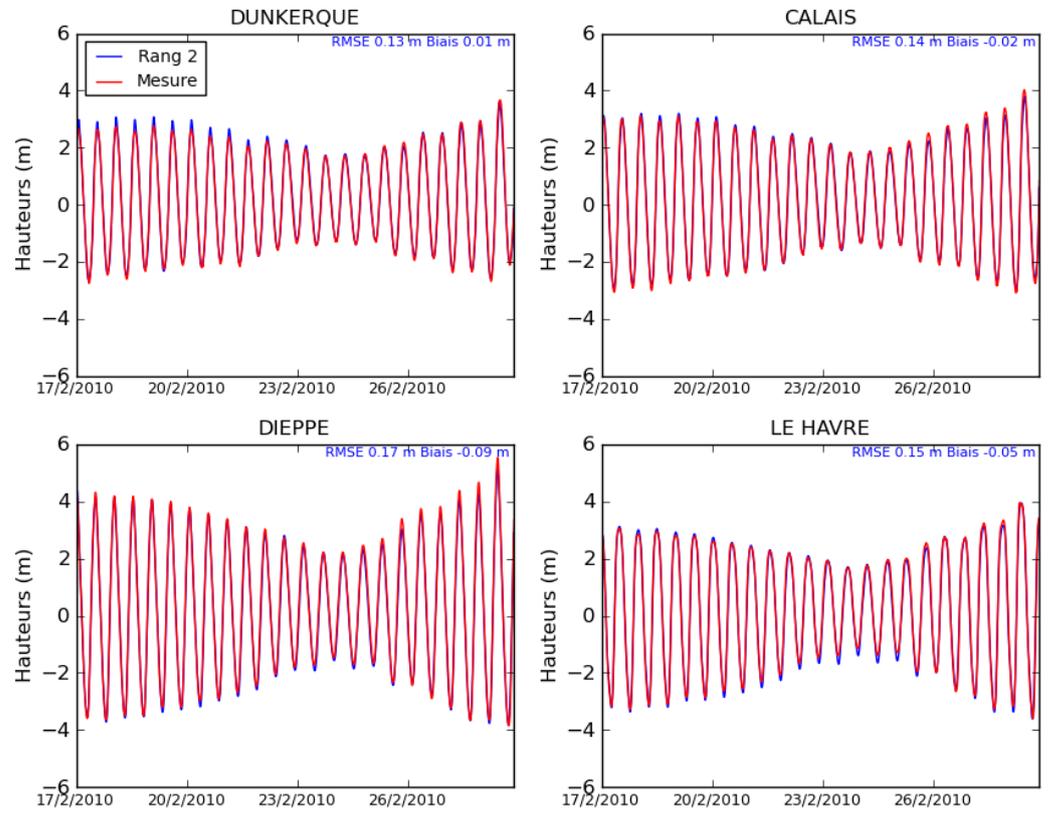


Figure 11 : Comparaison entre la marée issue du rang 2 (sans météo) et la marée prédite à Dunkerque, Calais, Dieppe et Le Havre

| Points              | Erreur RMS (cm) |              |              | Biais (cm)   |              |               | Nom du Rang 2 |
|---------------------|-----------------|--------------|--------------|--------------|--------------|---------------|---------------|
|                     | Rang 0          | Rang 1       | Rang 2       | Rang 0       | Rang 1       | Rang 2        |               |
|                     |                 |              |              |              |              |               | MANE          |
| Dunkerque           | 17              | 16           | 13           | 5            | 5            | 1             | MANE          |
| Calais              | 19              | 19           | 14           | 1            | 2            | -2            | MANE          |
| Dieppe              | 24              | 25           | 17           | -4           | -4           | -9            | MANE          |
| Le Havre            | 21              | 23           | 15           | -2           | -1           | -5            | MANE          |
| Cherbourg           | 16              | 17           | 10           | -6           | -4           | -7            | MANW          |
| Saint-Malo          | 31              | 32           | 20           | -4           | -4           | -7            | MANW          |
| Roscoff             | 23              | 23           | 13           | -7           | -6           | -8            | MANW          |
| Le Conquet          | 24              | 23           | 13           | -6           | -1           | -10           | FINI          |
| Brest               | 34              | 19           | 13           | -7           | -7           | -8            | FINI          |
| Concarneau          | 20              | 20           | 18           | -12          | -12          | -14           | SUDB          |
| Le Crouesty         | 23              | 22           | 16           | -10          | -9           | -12           | SUDB          |
| Saint-Nazaire       | 25              | 26           | 20           | -12          | -11          | -16           | SUDB          |
| Les Sables d'Olonne | 26              | 26           | 18           | -15          | -15          | -14           | AQUI          |
| La Rochelle-Pallice | 28              | 29           | 15           | -7           | -6           | -6            | AQUI          |
| Port-Bloc           | 36              | 23           | 18           | -8           | -9           | -8            | AQUI          |
| Arcachon            | 51              | 48           | 29           | 21           | 24           | 14            | AQUI          |
| Boucau-Bayonne      | 26              | 25           | 17           | -12          | -11          | -10           | AQUI          |
| Saint-Jean de Luz   | 17              | 16           | 12           | -8           | -8           | -7            | AQUI          |
| <b>Moyenne</b>      | <b>26 cm</b>    | <b>24 cm</b> | <b>16 cm</b> | <b>-5 cm</b> | <b>-5 cm</b> | <b>- 7 cm</b> |               |

Tableau 7 : Erreurs quadratiques moyennes et biais des hauteurs issues des différents modèles avec météo

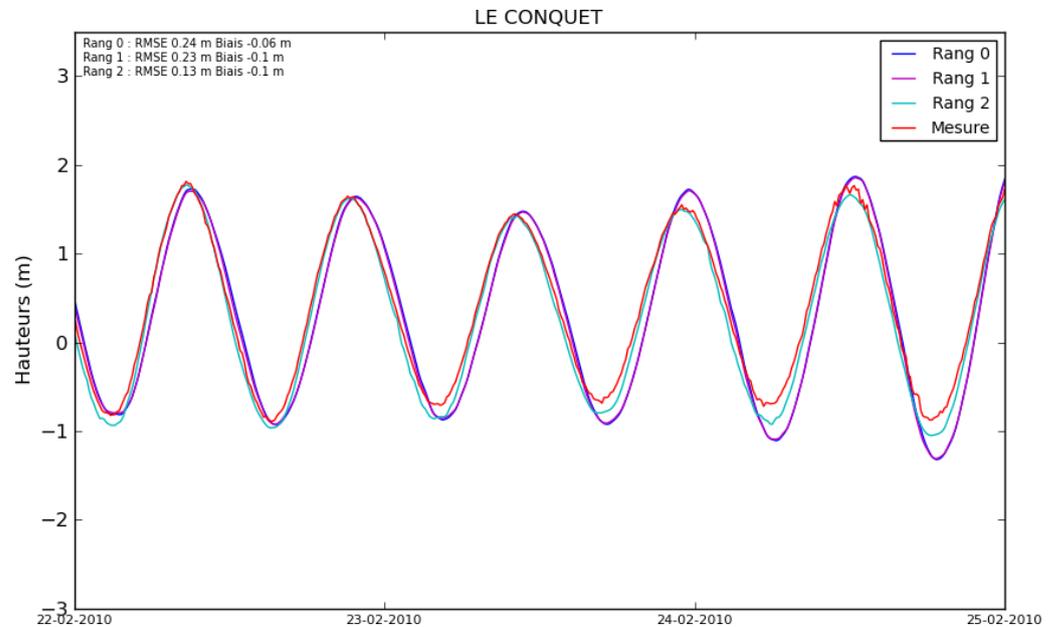


Figure 12 : Comparaison entre les hauteurs issues des rangs 0, 1 et 2 et les observations au Conquet

#### 4.4. Surcotes

En chacun des 18 points de validation (pas de données à Boulogne-sur-Mer, cf. 4.3), et pour chaque rang, les surcotes modélisées ont été comparées aux observations, du 17 au 28 février 2010. Un exemple de graphe de validation des surcotes est présenté Figure 13 ; l'ensemble des graphes pour les rangs 2 aux 18 points de validation est présenté en Annexe 1. Les erreurs quadratiques moyennes (RMS) et les biais pour chaque rang sont synthétisés dans le Tableau 8.

Les erreurs RMS et les biais sont identiques pour tous les rangs : 13 et -8 cm ; un biais négatif signifie que les surcotes modélisées sont globalement inférieures à celles mesurées. L'augmentation de la résolution spatiale de 2 km à 250 m ne permet donc pas d'améliorer significativement les surcotes. La comparaison des surcotes issues des rangs 0, 1 et 2 avec les observations en 4 ports du 22 au 25 février 2010 montre effectivement que les surcotes issues de ces 3 rangs sont très proches (Figure 14), même si une légère amélioration est tout de même apportée au niveau des rangs 2. Les oscillations dans les surcotes mesurées sont probablement dues au déphasage entre l'observation et la prédiction, à cause des effets météorologiques (Muller et al., 2013).

Globalement, les surcotes modélisées restent inférieures à celles mesurées avec un biais de 8 cm en moyenne.

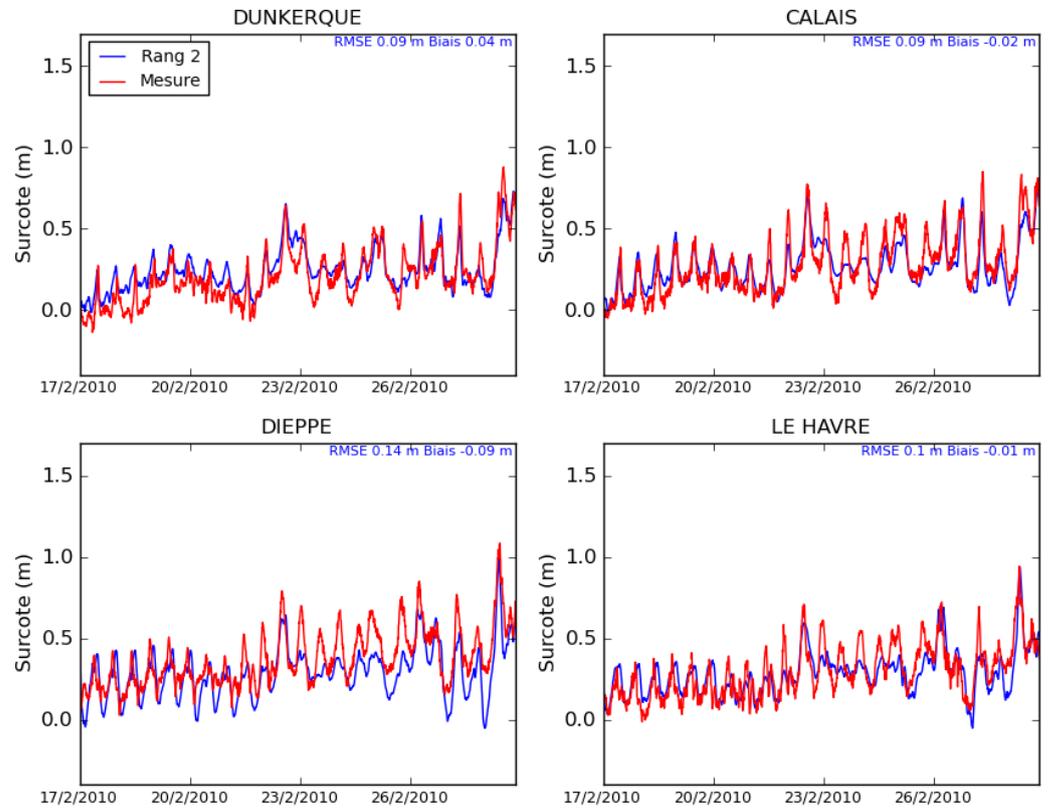


Figure 13 : Comparaison entre les surcotes mesurées et modélisées à Dunkerque, Calais, Dieppe et Le Havre

| Points              | Erreur RMS (cm) |              |              | Biais (cm)   |              |              | Nom du Rang 2 |
|---------------------|-----------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|---------------|
|                     | Rang 0          | Rang 1       | Rang 2       | Rang 0       | Rang 1       | Rang 2       |               |
|                     |                 |              |              |              |              |              | MANE          |
| Dunkerque           | 9               | 9            | 9            | 2            | 3            | 4            | MANE          |
| Calais              | 11              | 11           | 9            | -3           | -3           | -2           | MANE          |
| Dieppe              | 14              | 14           | 14           | -10          | -9           | -9           | MANE          |
| Le Havre            | 11              | 11           | 10           | -2           | -2           | -1           | MANE          |
| Cherbourg           | 10              | 10           | 10           | -6           | -6           | -6           | MANW          |
| Saint-Malo          | 14              | 14           | 14           | -6           | -6           | -5           | MANW          |
| Roscoff             | 13              | 13           | 13           | -10          | -10          | -9           | MANW          |
| Le Conquet          | 11              | 11           | 11           | -7           | -6           | -6           | FINI          |
| Brest               | 12              | 12           | 12           | -8           | -8           | -8           | FINI          |
| Concarneau          | 13              | 13           | 13           | -10          | -9           | -9           | SUDB          |
| Le Crouesty         | 15              | 15           | 15           | -12          | -11          | -11          | SUDB          |
| Saint-Nazaire       | 16              | 16           | 16           | -11          | -10          | -10          | SUDB          |
| Les Sables d'Olonne | 16              | 16           | 16           | -12          | -12          | -12          | AQUI          |
| La Rochelle-Pallice | 15              | 15           | 15           | -10          | -10          | -10          | AQUI          |
| Port-Bloc           | 15              | 14           | 14           | -9           | -9           | -9           | AQUI          |
| Arcachon            | 17              | 17           | 17           | -11          | -10          | -11          |               |
| Boucau-Bayonne      | 16              | 15           | 15           | -12          | -12          | -12          | AQUI          |
| Saint-Jean de Luz   | 14              | 13           | 13           | -11          | -10          | -11          | AQUI          |
| <b>Moyenne</b>      | <b>13 cm</b>    | <b>13 cm</b> | <b>13 cm</b> | <b>-8 cm</b> | <b>-8 cm</b> | <b>-8 cm</b> |               |

Tableau 8 : Erreurs quadratiques moyennes et biais des surcotes issues des différents modèles

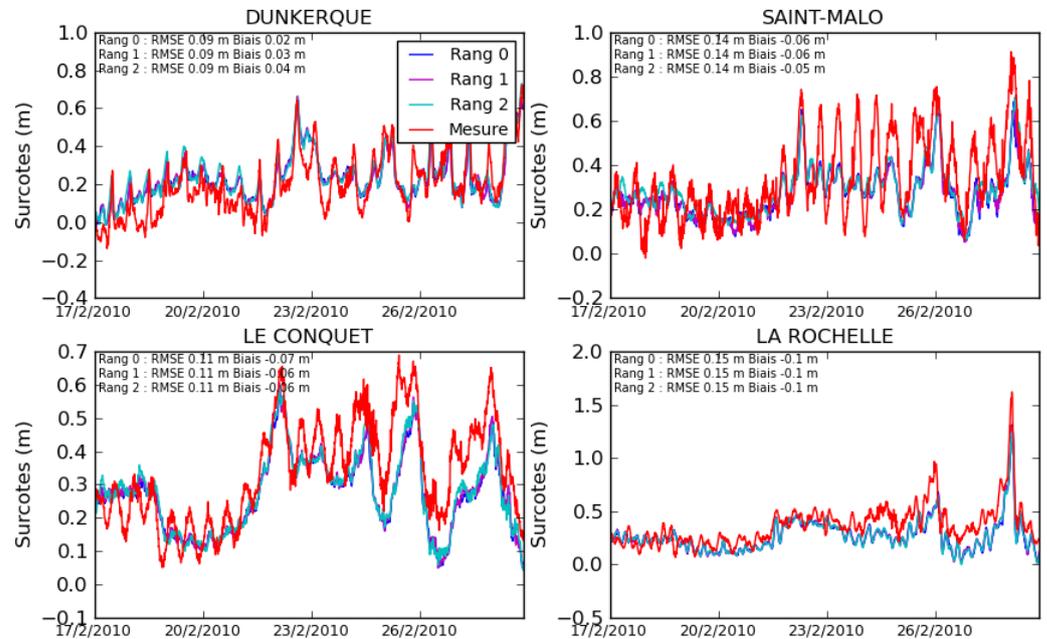


Figure 14 : Comparaison entre les surcotes issues des rangs 0, 1 et 2 et les observations à Dunkerque, Saint-Malo, Le Conquet et La Rochelle

#### 4.5. Comparaison des hauteurs et surcotes avec l'ancien modèle

Une simulation en janvier 2012 a permis de comparer le nouveau modèle (rang 0) forcé par 3 modèles météo différents - Arpege, Arpege HR (Haute Résolution), Arpege HR fusionné avec Arome - avec l'ancien modèle en production depuis 2006 (D1), forcé par Arpege (Figure 7, voir paragraphe 3.3).

En comparant le nouveau et l'ancien modèle avec les mêmes forçages (Arpege), la surcote maximale à Dunkerque pendant la tempête Andrea atteint 1.45 m pour le nouveau modèle au lieu de 1.27 m. Cette amélioration est due à une meilleure résolution spatiale (2 km au lieu de 5.6 km), mais aussi à une meilleure paramétrisation du vent en prenant en compte l'action des vagues grâce à la formulation de Charnock pour le calcul du coefficient de traînée, avec un coefficient de Charnock variable issue de WaveWatch III® (pour l'ancien modèle, le coefficient de traînée est constant et égal à 0.0016, voir paragraphe 3.2).

L'amélioration entre l'ancien modèle (forcé par Arpege) et le nouveau modèle de production (forcé par Arpege HR) en janvier 2012 est résumé Tableau 9 : l'erreur RMS a été divisé par deux (40 à 22 cm) et les surcotes maximales ont été améliorées jusqu'à 35 cm (127 à 162 cm à Dunkerque). Par contre, l'erreur RMS des surcotes reste identique (9 cm). L'amélioration est très nette pour les hauteurs d'eau ; pour les surcotes, l'amélioration est principalement événementielle, avec une amélioration des pics de surcotes pendant les tempêtes.

| Ports       | Erreur RMS des hauteurs |                | Erreur RMS des surcotes |                | Surcotes maximales |                |        |
|-------------|-------------------------|----------------|-------------------------|----------------|--------------------|----------------|--------|
|             | Ancien modèle           | Nouveau modèle | Ancien modèle           | Nouveau modèle | Ancien modèle      | Nouveau modèle | Mesure |
| Dunkerque   | 40 cm                   | 18 cm          | 14 cm                   | 11 cm          | <b>127 cm</b>      | <b>162 cm</b>  | 193 cm |
| Saint-Malo  | 43 cm                   | 29 cm          | 8 cm                    | 9 cm           | <b>32 cm</b>       | <b>61 cm</b>   | 63 cm  |
| Le Conquet  | 50 cm                   | 17 cm          | 5 cm                    | 5 cm           | <b>11 cm</b>       | <b>17 cm</b>   | 27 cm  |
| La Rochelle | 26 cm                   | 23 cm          | 7 cm                    | 10 cm          | <b>14 cm</b>       | <b>37 cm</b>   | 31 cm  |
| <b>Mean</b> | <b>40 cm</b>            | <b>22 cm</b>   | <b>9 cm</b>             | <b>9 cm</b>    |                    |                |        |

Tableau 9 : Erreurs RMS des hauteurs et des surcotes et surcotes maximales pour l'ancien et le nouveau modèle de production en janvier 2012

#### 4.6. Courants issus des modèles de rang 2

La validation des courants a été effectuée par comparaison aux mesures de courants en vive-eau moyenne fournies par le SHOM. Une partie de ces mesures figure sur les cartes marines du SHOM. Ces mesures sont issues de l'analyse statistique de courantomètres ponctuels (à rotor et ADCP) mouillés par le SHOM lors de campagnes en mer. Il s'agit des valeurs horaires des courants en vive-eau moyenne (intensité et direction) de 6h avant la Pleine Mer du port de référence – associé au point de mesure - à 6h après la Pleine Mer.

La localisation des mesures fournies par le SHOM est présentée Figure 15. Certaines mesures n'ont pas pu être exploitées, soit parce qu'elles étaient réalisées par grand fond, soit parce que trop de données étaient manquantes (jusqu'à 9 valeurs sur 13 valeurs horaires de PM-6 à PM+6).

Les mesures exploitées pour la validation du modèle Finistère sont présentées Figure 16 ; les cartes équivalentes pour chacun des 5 modèles sont présentées en Annexe 2 Validation des courants.

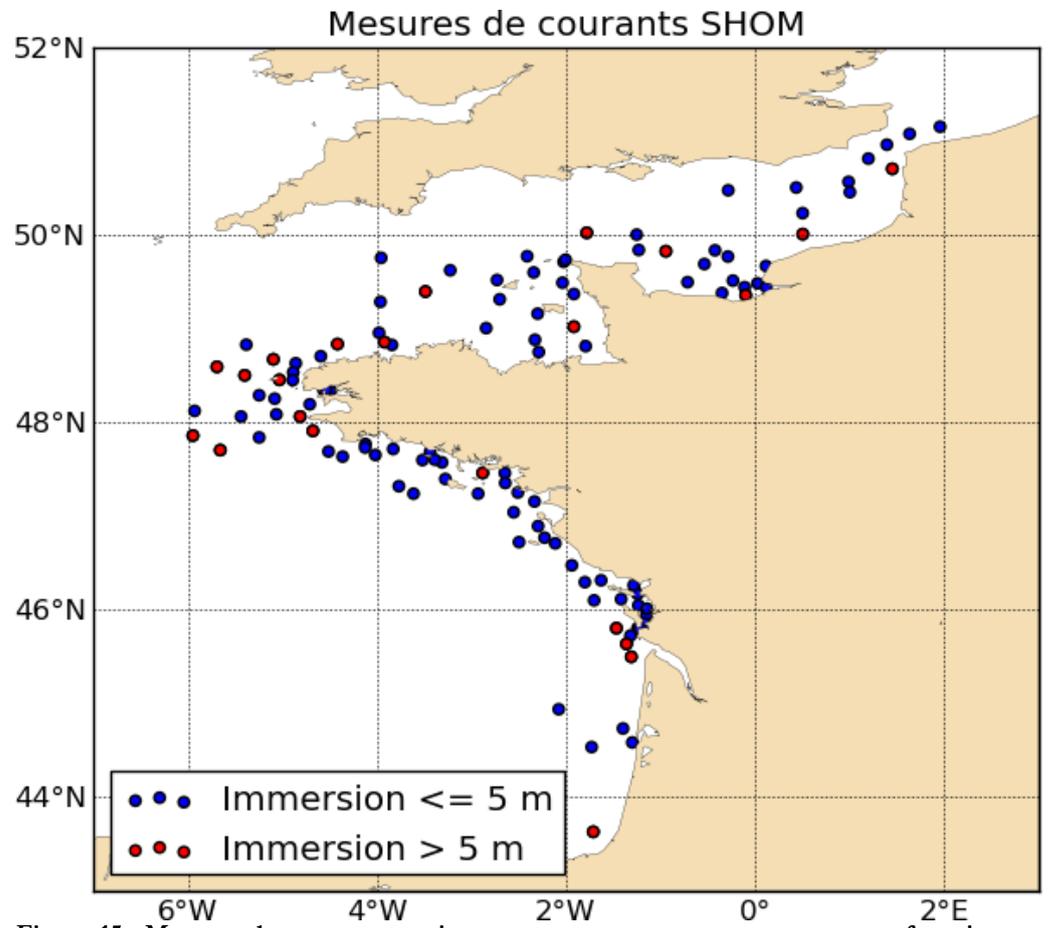


Figure 15 : Mesures de courants en vive-eau moyenne et morte-eau moyenne fournies par le SHOM

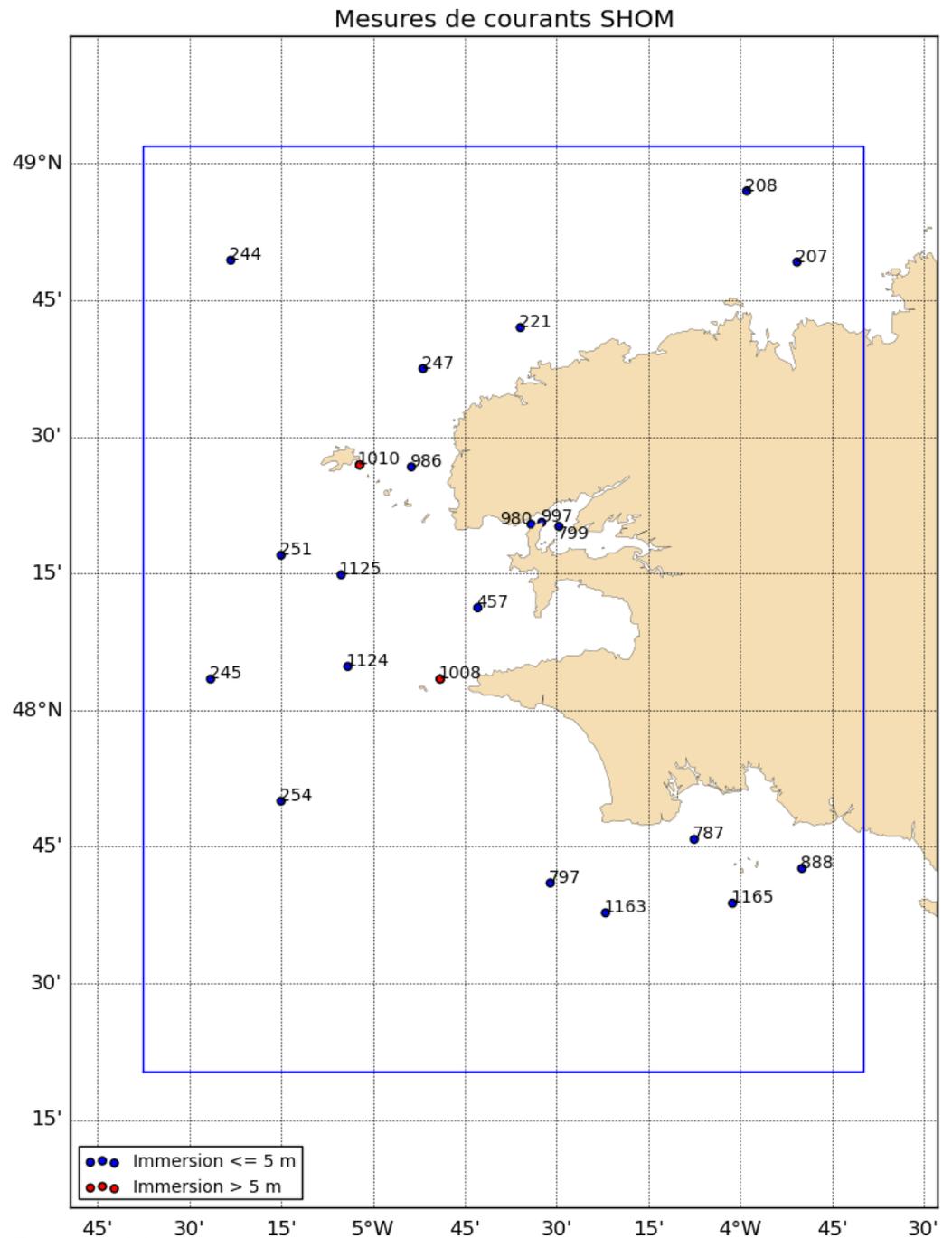


Figure 16 : Mesures de courant exploitées pour la validation du modèle Finistère

Les courants modélisés correspondent à une simulation sans météo le 27/02/2010, car à cette date le coefficient de marée était de 94. La simulation a été réalisée de 10 :14 à 22 :14, ce qui correspond à 6h avant la Pleine Mer de Brest, à 6h après la Pleine Mer de Brest (Pleine Mer à 15 :14 UT). Les résultats de la simulation fournissent ainsi une estimation des courants de vive-eau moyenne. Pour permettre la

comparaison avec les mesures, le déphasage entre Brest et le port de référence de la mesure a été pris en compte.

Les comparaisons en chaque point ont été effectuées. Un exemple est présenté Figure 17. Le graphe du haut représente la rose de courant, celui du bas l'évolution temporelle de la vitesse. L'ensemble de ces graphes, pour chaque point de mesure, est présenté en Annexe 2 Validation des courants.

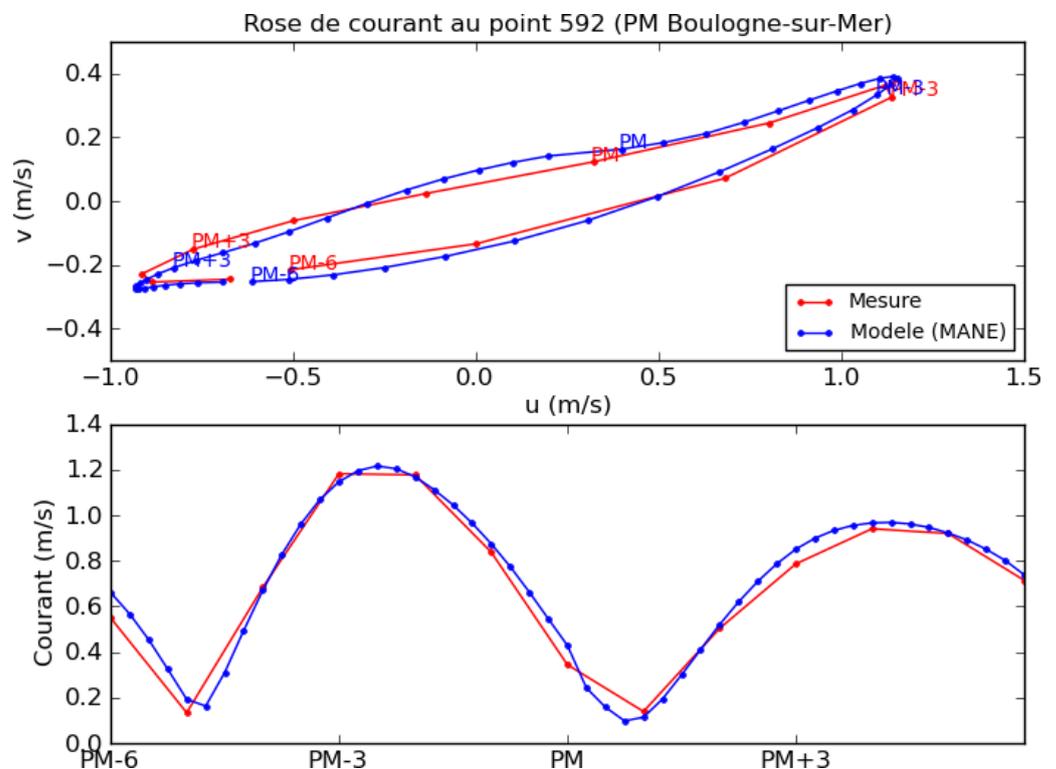


Figure 17 : Comparaison entre les courants de vive-eau moyenne modélisés et mesurés au point 592 en Manche Est

La comparaison des roses de courants modélisés et mesurés en vive-eau moyenne est synthétisée Figure 18 à Figure 22. Dans l'ensemble, les comparaisons sont plutôt satisfaisantes ; les heures de renverse correspondent globalement et les variations d'amplitude sont plutôt bien reproduites. Certains points ne sont pas satisfaisants comme par exemple le point 1243 dans le Pas de Calais, où les directions sont différentes, ou encore le point 1176 à l'entrée de la Manche. La direction de cette mesure est visiblement fautive.

Les courants importants sont bien représentés par le modèle, en particulier dans le Raz Blanchard où la vitesse atteint 4 m/s en vive-eau moyenne (point 150).

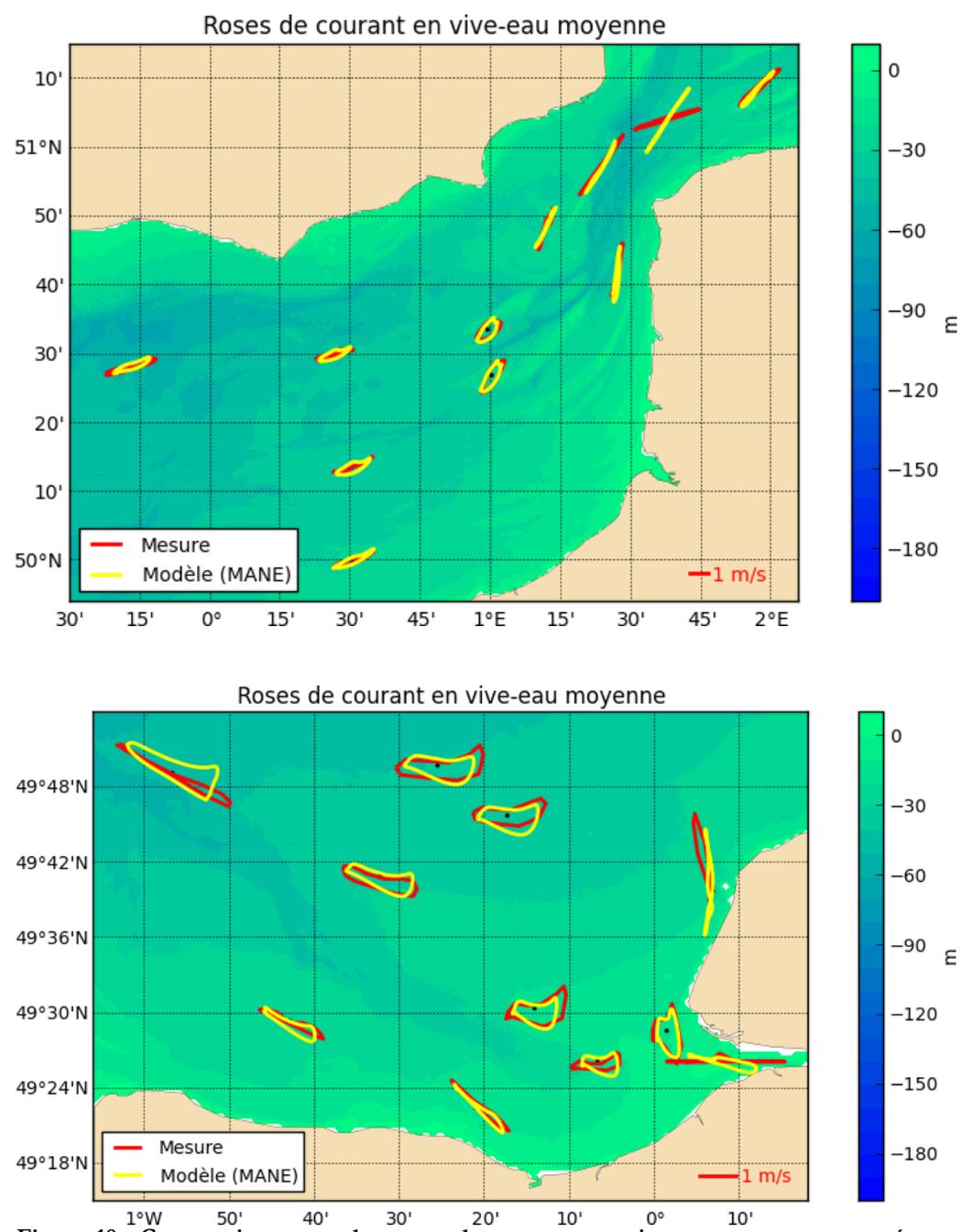


Figure 18 : Comparaison entre les roses de courants en vive-eau moyenne mesurées et modélisées (modèle Manche Est)

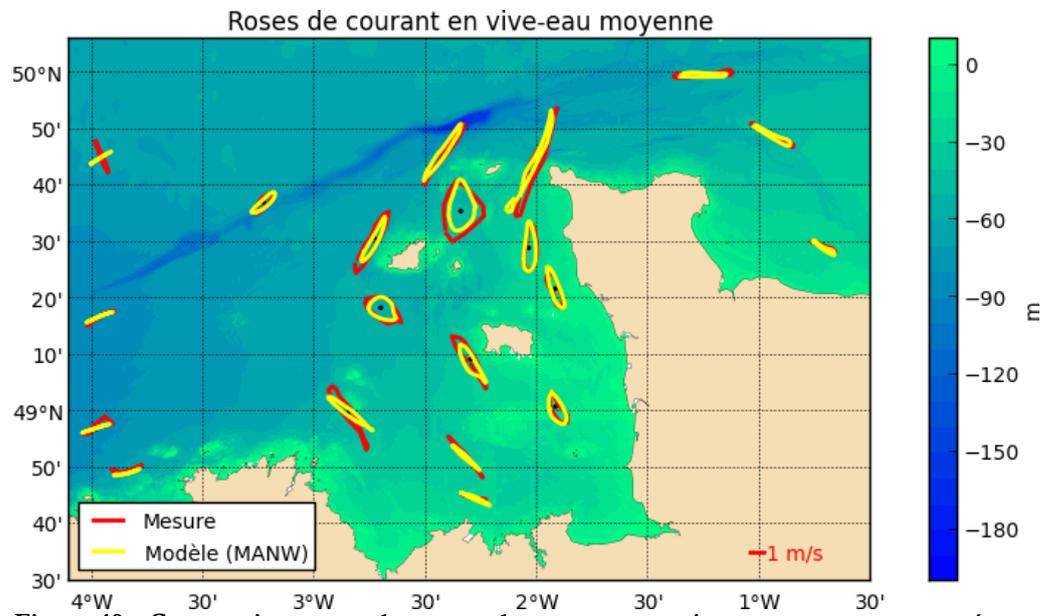


Figure 19 : Comparaison entre les roses de courants en vive-eau moyenne mesurées et modélisées (modèle Manche Ouest)

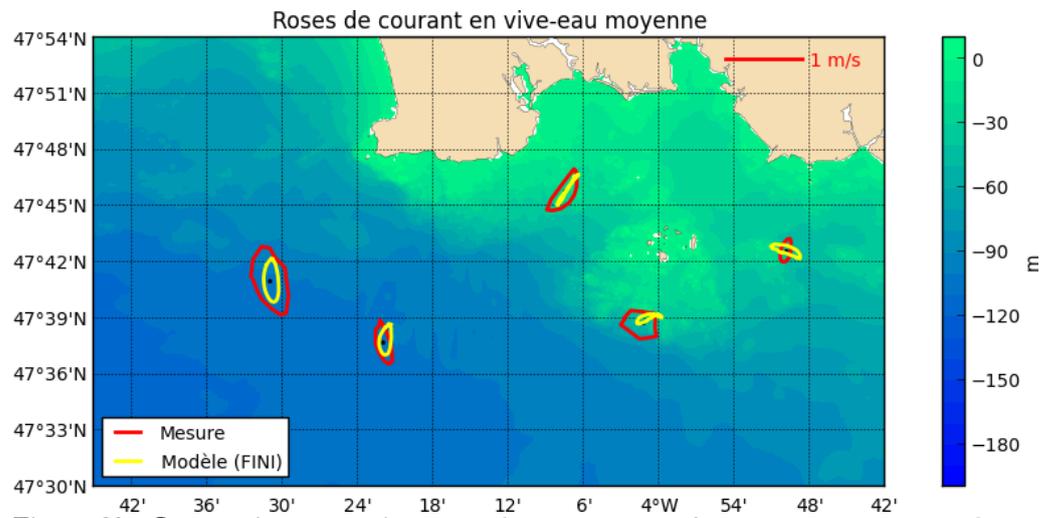
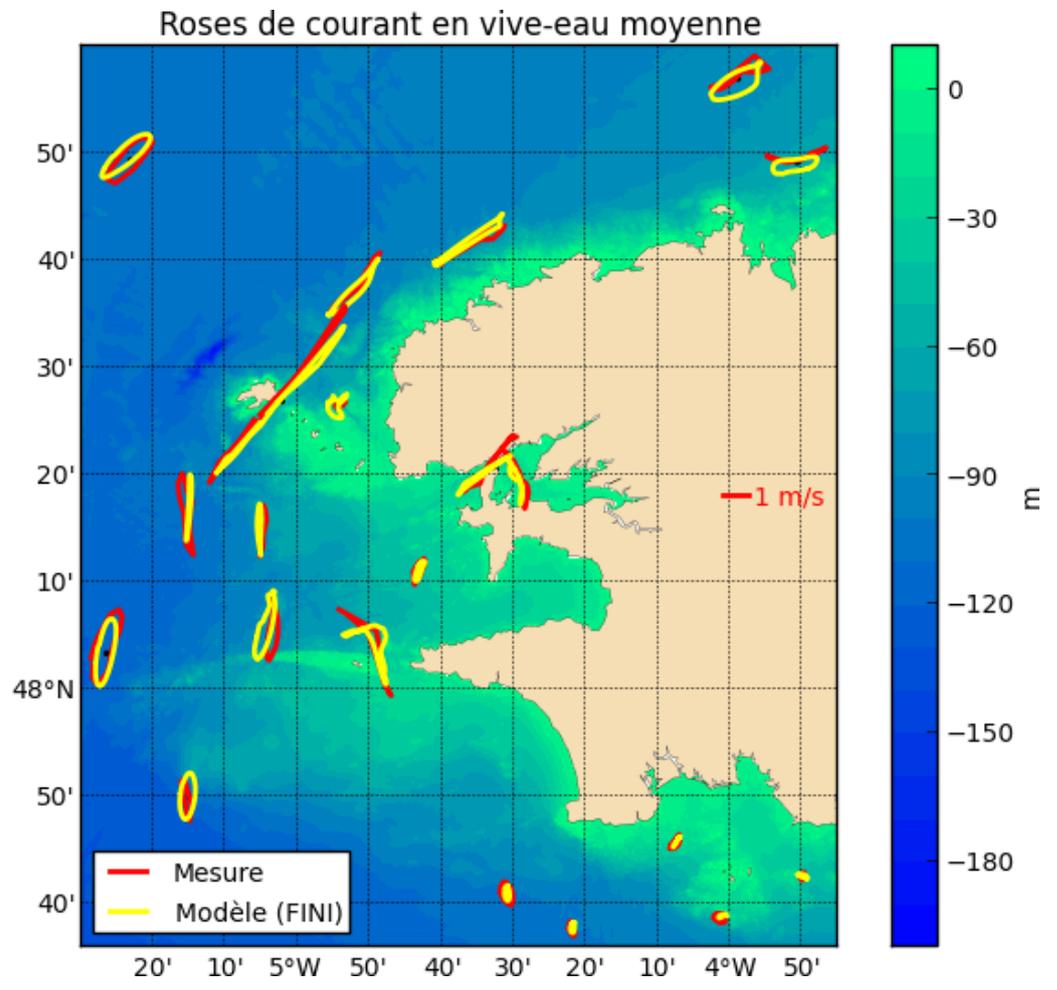


Figure 20 : Comparaison entre les roses de courants en vive-eau moyenne mesurées et modélisées (modèle Finistère)

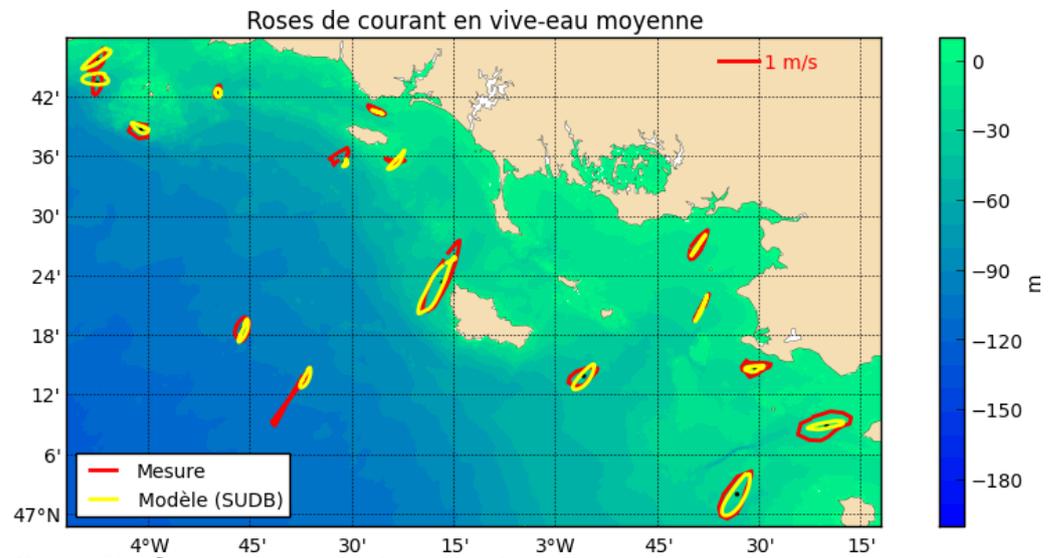


Figure 21 : Comparaison entre les roses de courants en vive-eau moyenne mesurées et modélisées (modèle Sud Bretagne)

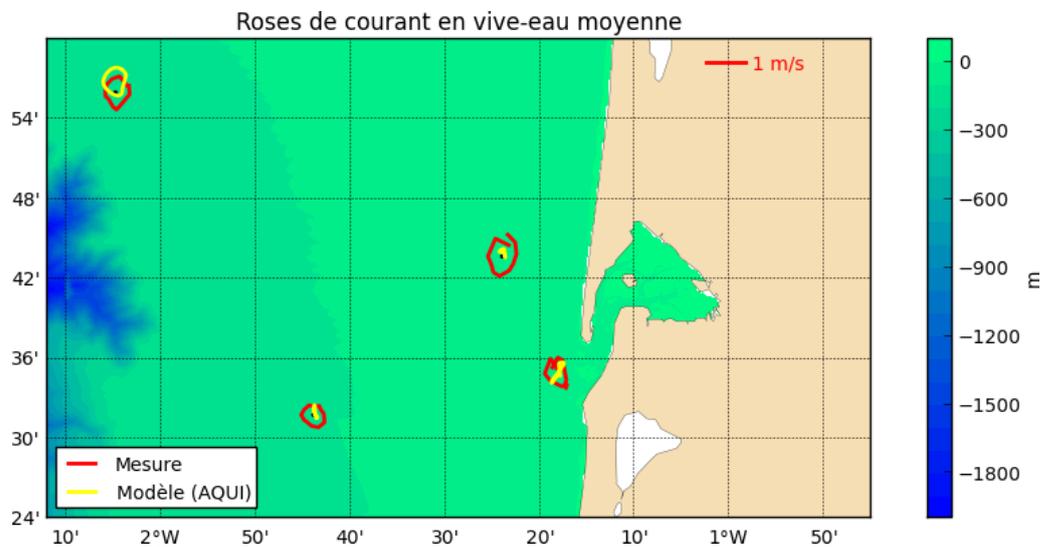
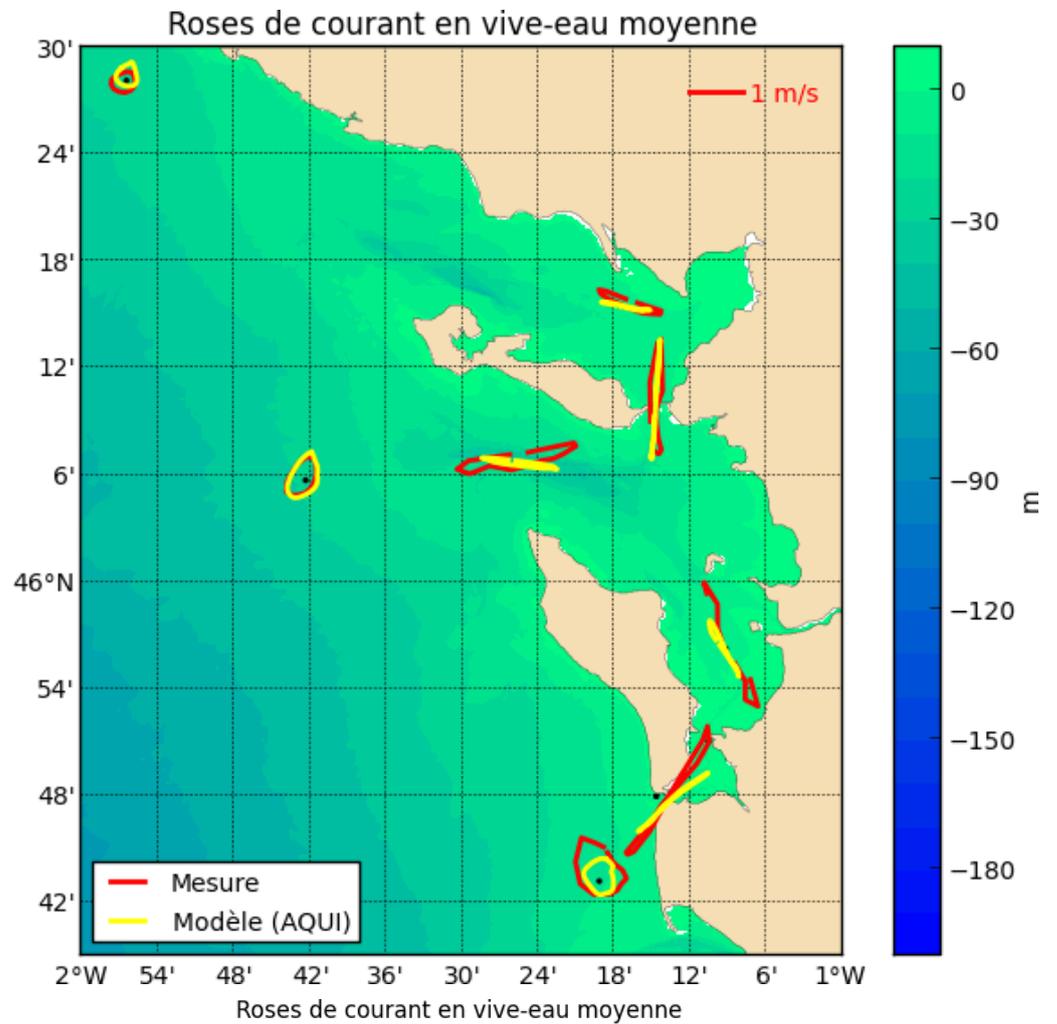


Figure 22 : Comparaison entre les roses de courants en vive-eau moyenne mesurées et modélisées (modèle Aquitaine)

#### 4.7. Comparaison des courants issus des modèles de rang 0, 1 et 2

Une comparaison a été réalisée en Mer d'Iroise entre les courants mesurés et ceux modélisés issus des rangs 0, 1 et 2 (modèle Finistère). Les résultats sont présentés Figure 23. Au large, les courants issus des différents rangs sont assez proches. Par contre en zone côtière, le rang 0 n'est pas de résolution suffisante (2km) pour permettre une bonne représentation du courant, que ça soit au niveau de l'île d'Ouessant (point de mesure 1010, voir Figure 16 pour la localisation des mesures) ou de la rade de Brest (mesures 980 et 799). Le rang 1 est plutôt satisfaisant, mais dans les zones très côtières, le rang 2 reste parfois plus précis, comme par exemple au niveau du point de mesure entre la côte ouest du Finistère et l'île d'Ouessant (mesure 986). Dans la rade de Brest (mesure 799), seul le modèle de rang 2 atteint une amplitude proche de la mesure : le rang 0 fournit un courant d'amplitude inférieure à 0.4 m/s, le rang 1 atteint les 0.6 m/s, le rang 2 atteint les 0.8 m/s et la mesure dépasse les 0.9 m/s.

Par contre, au niveau des limites du modèle de rang 2 (Sud Finistère), les courants issus du rang 2 ne sont pas satisfaisants, par rapport à ceux issus des rangs 0 et 1 (mesures 888 et 1165). En effet, seules les hauteurs sont imposées aux limites du modèle de rang 2 (cstFRANCE ne fournissant que les constantes harmoniques de hauteurs), ce qui génère des incohérences aux niveaux des limites du modèle pour les courants.

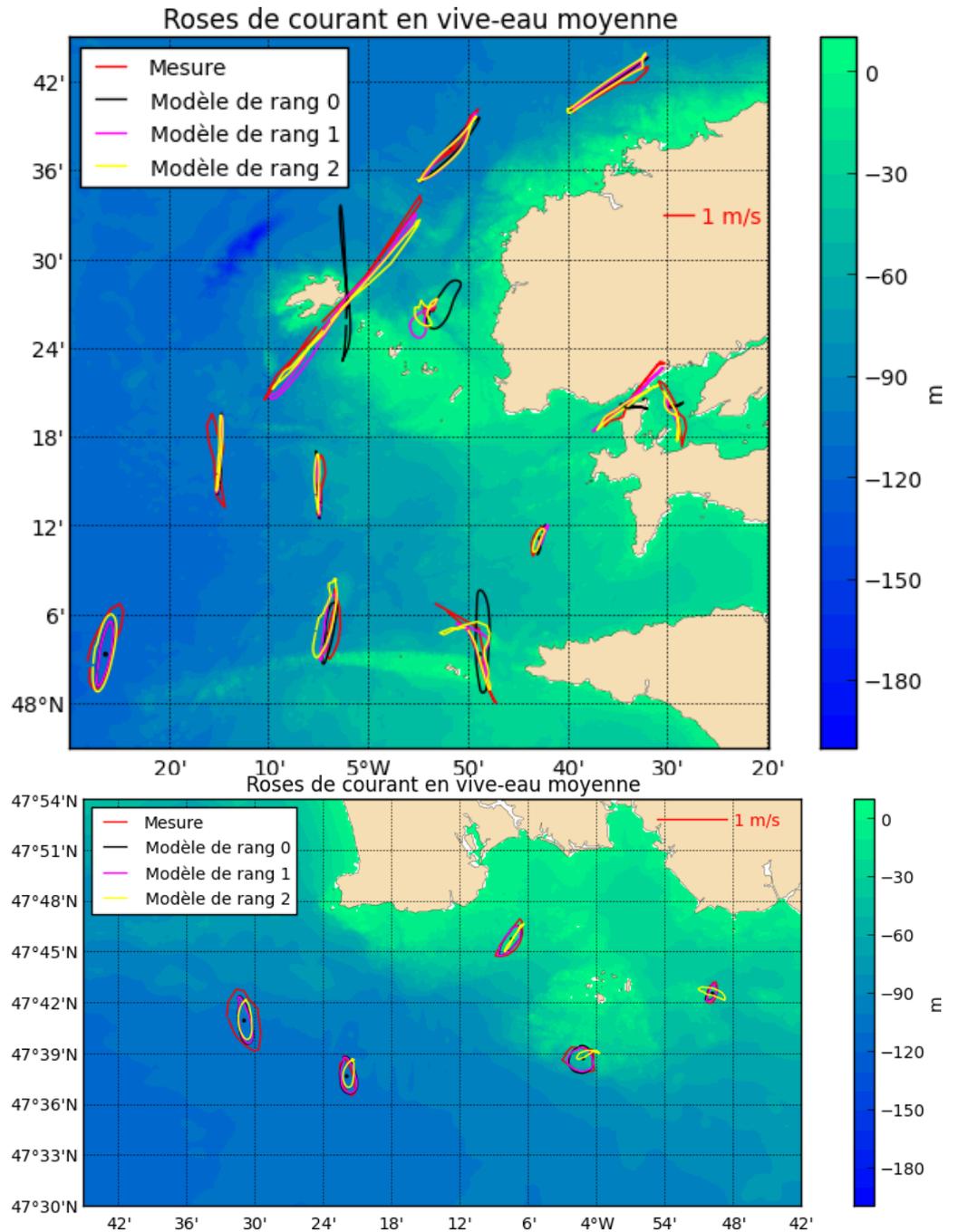


Figure 23 : Comparaison entre les roses de courants en vive-eau moyenne mesurées et modélisées issues des rangs 0, 1 et 2 (modèle Finistère)

## 5. Conclusion

Les modèles hydrodynamiques mis en place permettent de calculer les courants niveaux et surcotes sur l'ensemble des côtes de la Manche et de l'Atlantique, avec une résolution spatiale de 250 m et temporelle de 15 minutes. Des améliorations importantes ont été apportées : amélioration de la résolution spatiale, meilleure paramétrisation du vent, meilleur forçage météorologique, meilleur forçage de marée.

Concernant les niveaux, le modèle a été validé en février 2010 en 19 points. Pour la marée, les erreurs RMS sont divisées par 2 entre le rang 0 et le rang 2 : elles sont en moyenne de 22 cm pour le rang 0, 21 cm pour le rang 1 et 11 cm pour les rangs 2. Les résultats sont similaires pour les niveaux (marée et surcote) avec des erreurs RMS en moyenne de 26 cm pour le rang 0, 24 cm pour le rang 1 et 16 cm pour les rangs 2. Ces améliorations sont dues à l'amélioration de la résolution spatiale entre les rangs 0 et 2 (2 km à 250 m), mais aussi à l'introduction du modèle de marée du SHOM cstFRANCE (115 composantes harmoniques) aux limites du modèle.

Concernant les surcotes, l'amélioration de la résolution spatiale de 2 km à 250 m ne permet pas d'améliorer significativement les surcotes, l'erreur RMS est en moyenne identique pour tous les rangs : 13 cm. Globalement, les surcotes modélisées restent inférieures à celles mesurées avec un biais de 8 cm en moyenne. Une étude plus approfondie pourrait être menée en ne regardant l'impact que sur les événements énergétiques.

La comparaison entre l'ancien et le nouveau modèle (rang 0) pour les niveaux et surcotes a été réalisée en janvier 2012. L'amélioration est très nette pour les hauteurs d'eau (erreur RMS divisée par deux de 40 à 22 cm) ; pour les surcotes, l'erreur RMS reste identique (9 cm), l'amélioration concerne principalement les pics de surcotes pendant les tempêtes, avec une amélioration pouvant atteindre jusqu'à 35 cm (surcote maximale de 162 cm au lieu de 127 cm à Dunkerque pendant la tempête Andréa). L'ensemble de ces améliorations sont dues à l'amélioration de la résolution spatiale (2 km au lieu de 5.6 km), à l'amélioration des forçages météorologiques (Arpege Haute Résolution) mais également à une meilleure paramétrisation du vent en prenant en compte l'action des vagues grâce à la formulation de Charnock pour le calcul du coefficient de traînée, avec un coefficient de Charnock variable issue de WaveWatch III®.

Enfin, les courants en vive-eau moyenne modélisés ont été comparés aux mesures fournies par le SHOM en 95 points. Ces comparaisons sont globalement satisfaisantes.



### 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. L'auteur remercie également les participants au comité de pilotage du projet PREVIMER-surcotes (Ifremer, BRGM, Météo-France, SHOM).



## 6. Bibliographie

Ardhuin, F., Hanafin, J., Quilfen, Y., Chapron, B., Queffelec, P., Obrebski, M., Sienkiewicz, J., Vandemark, D. (2011) Calibration of the IOWAGA global wave hindcast (1991–2011) using ECMWF and CFSR winds. In: Proceedings, 12<sup>th</sup> International Workshop of Wave Hindcasting and Forecasting, Hawaii.

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.

Idier D., Krien Y., Pedreros R., Desramaut N., Pineau-Guillou L., Dumas F. (2010a) Système de prévision de surcotes en Manche/Atlantique et Méditerranée : Etude bibliographique. Rapport BRGM/RP-58918-FR, 92 p.

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

Idier D., Dumas F., Muller H., Pedreros R., Thiebot J., Yates M., Lecornu F., Pineau-Guillou L., Créach D. et Paradis D. (2012) Modélisation des surcotes sur les côtes françaises, manche et atlantique, Congrès SHF : "Evènements extrêmes fluviaux et maritimes", Paris, 1-2 février 2012.

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.

Pineau-Guillou L., Theetten S, Dumas F., Lecornu F., Idier D. (2012) Prévision opérationnelle des niveaux de la mer, surcotes et décotes sur les côtes de la Manche et de l'Atlantique. Journées Nationales Génie côtier – Génie Civil Edition 12 Cherbourg, pp. 957-964. DOI:10.5150/jngcgc.2012.105-P

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).

Romieu E., Idier D. (2007) Previmer – Opérationnalisation de modèles hydrodynamiques régionaux - Délivrables M1 et M2 : Sorties et lecture des résultats à tous les n pas de temps de calcul & Optimisation ondes de tempêtes – onde de marée. Rapport BRGM/RP-55862-FR, 83 p.

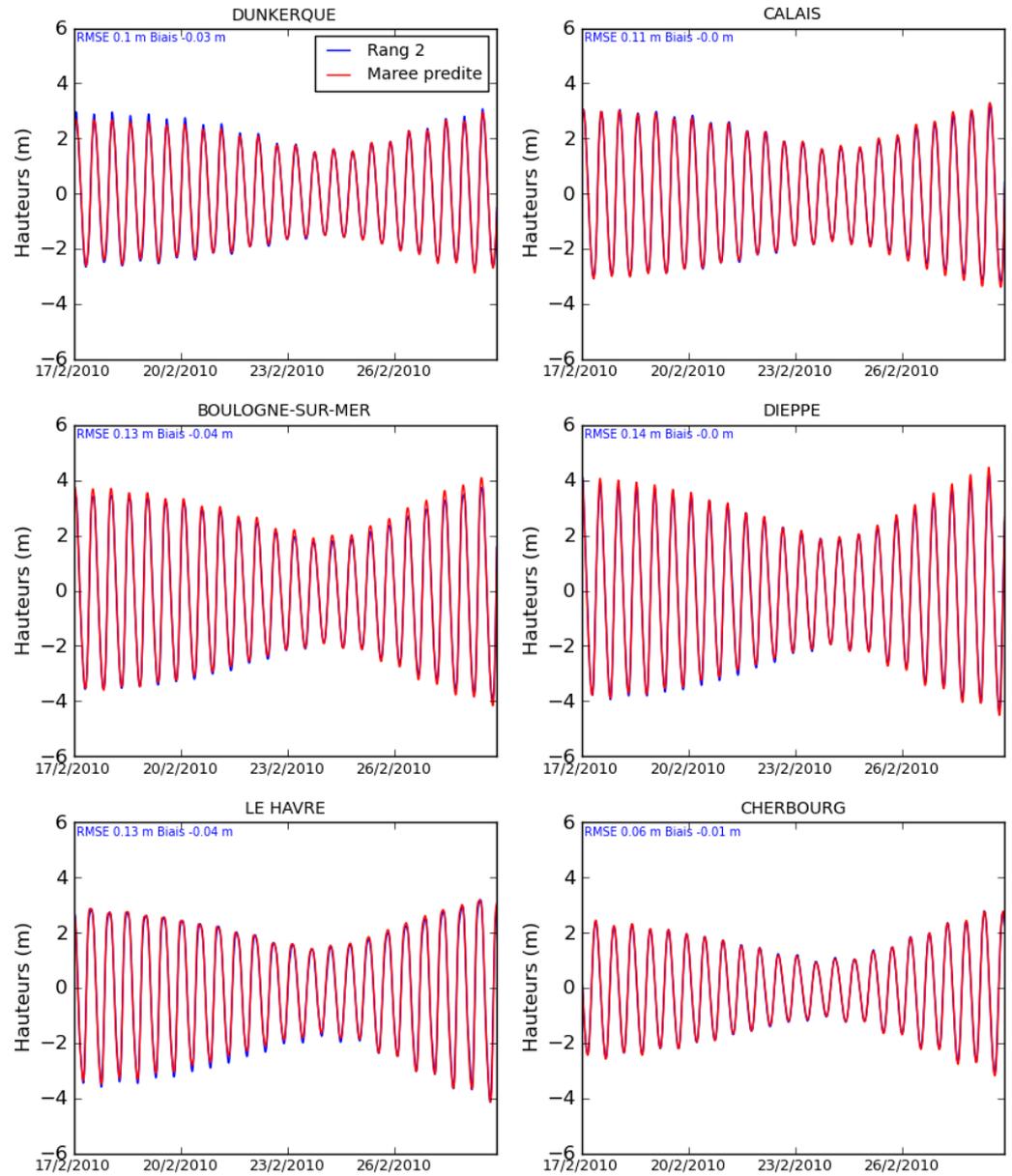
Simon (2007) La marée océanique côtière. Editions Institut Océanographique, Paris, 433pp.

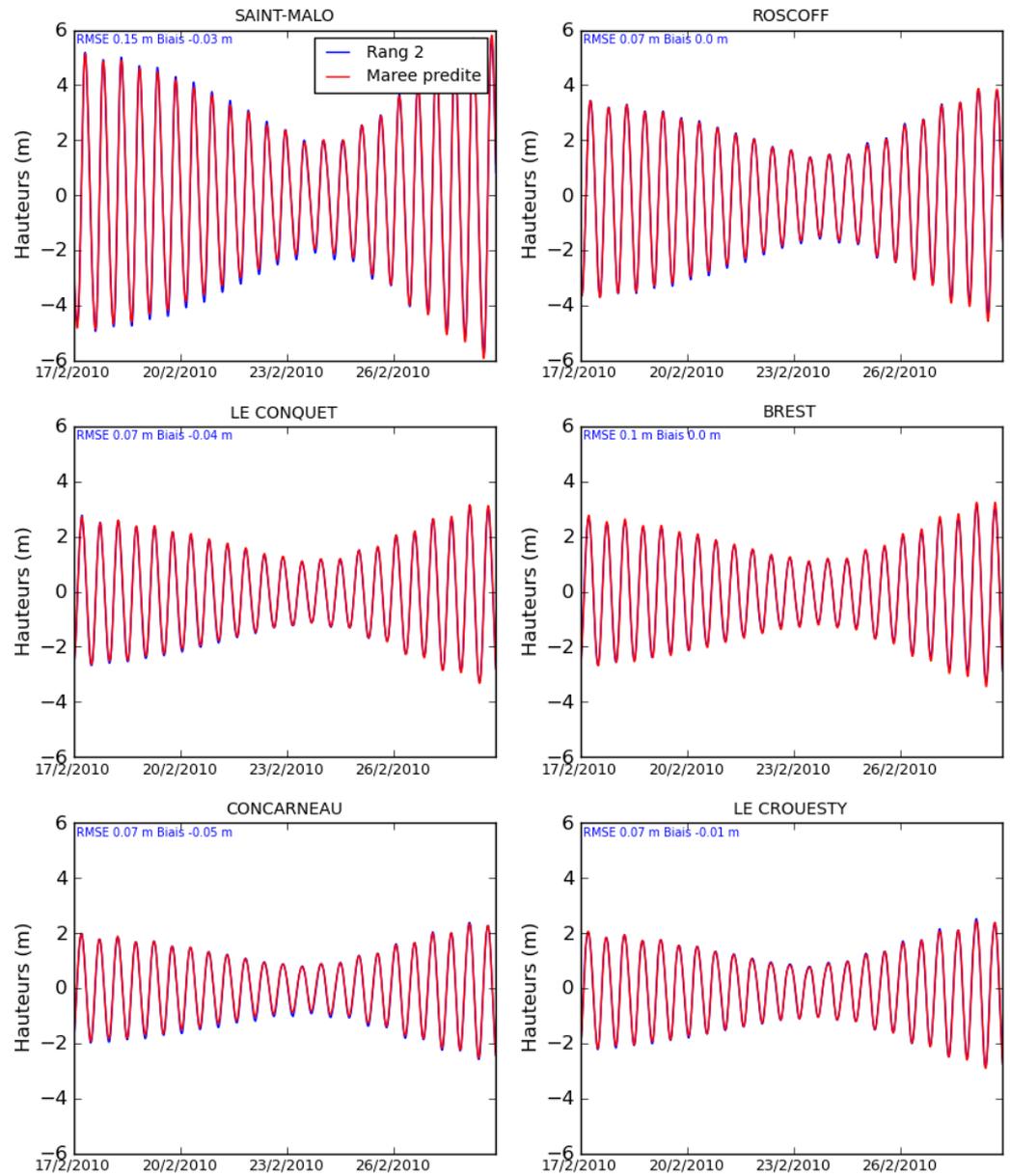


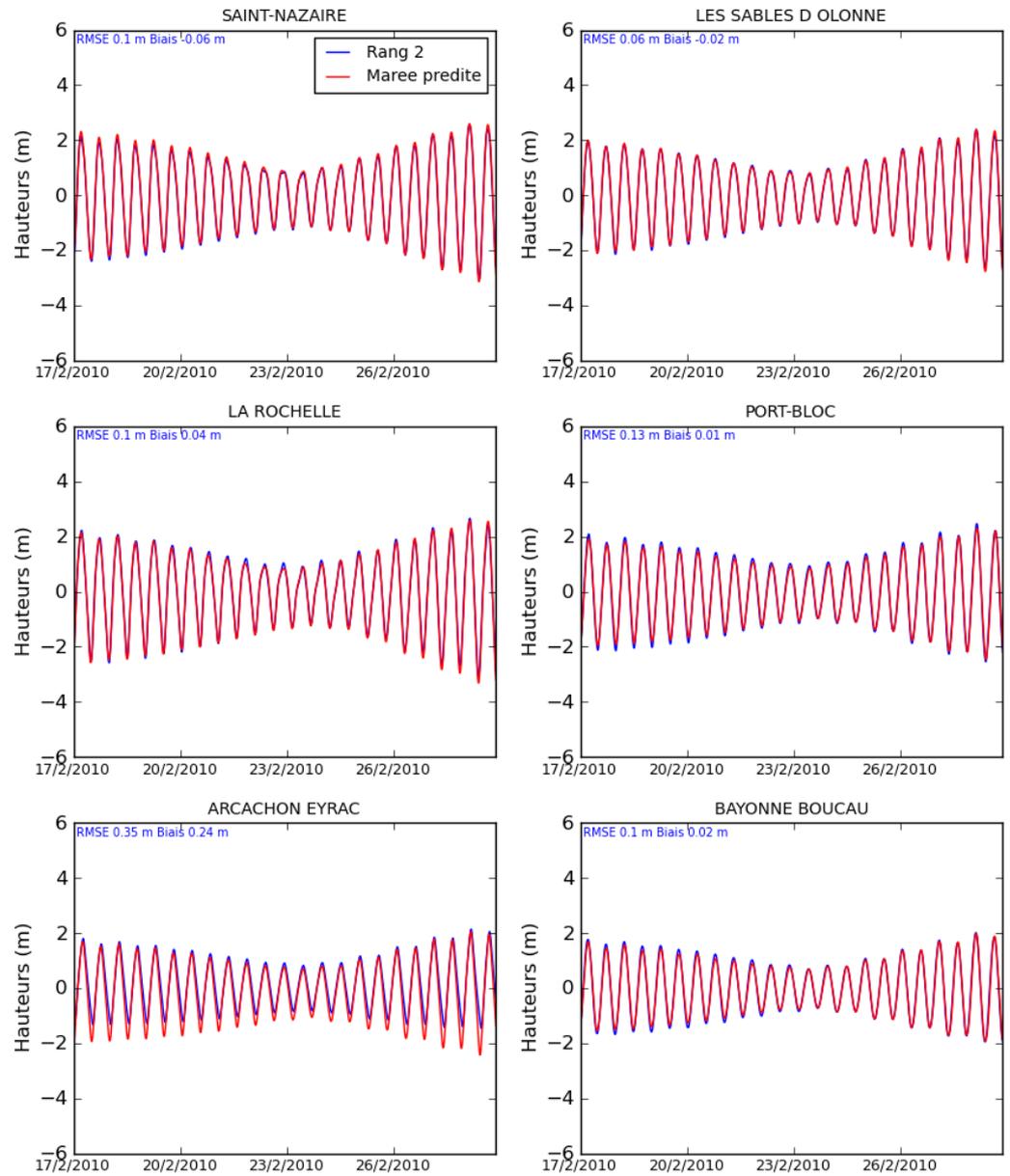
---

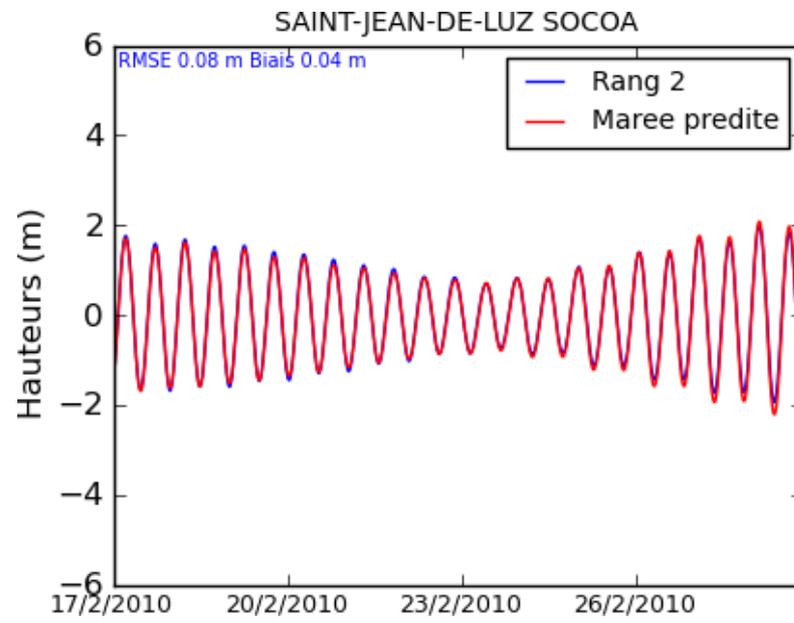
## **Annexe 1 : Validation de la marée, des hauteurs et des surcotes**

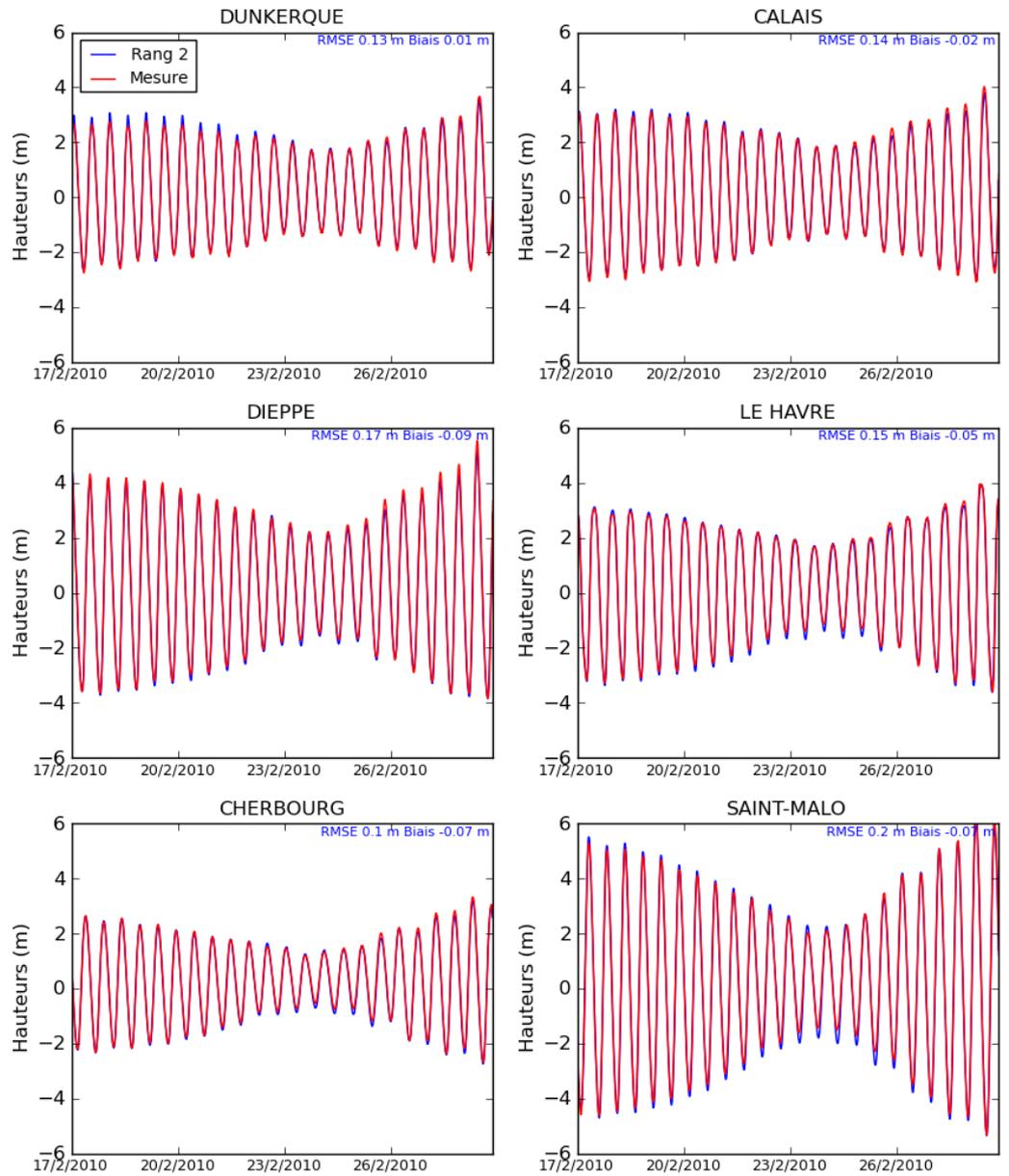


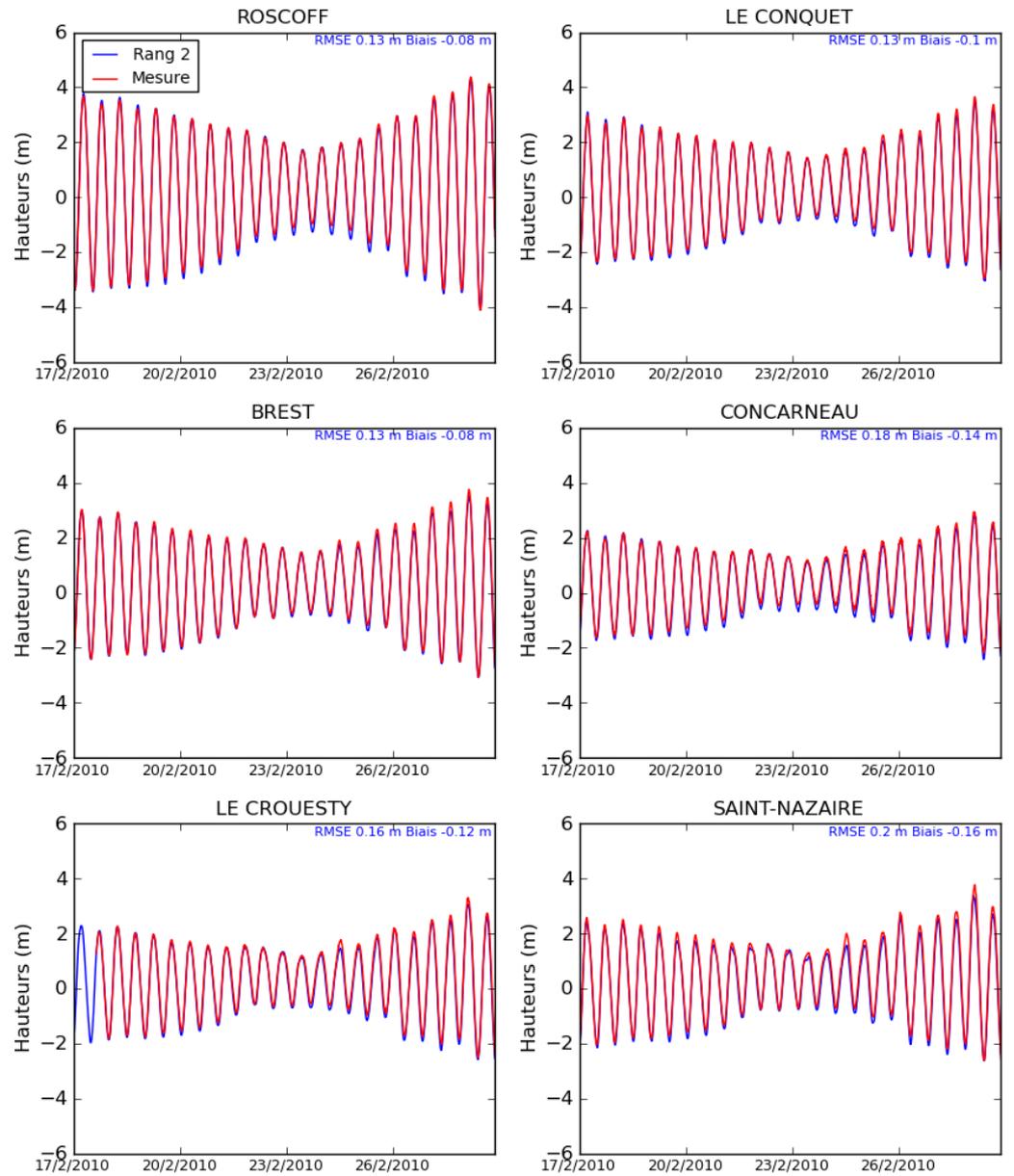


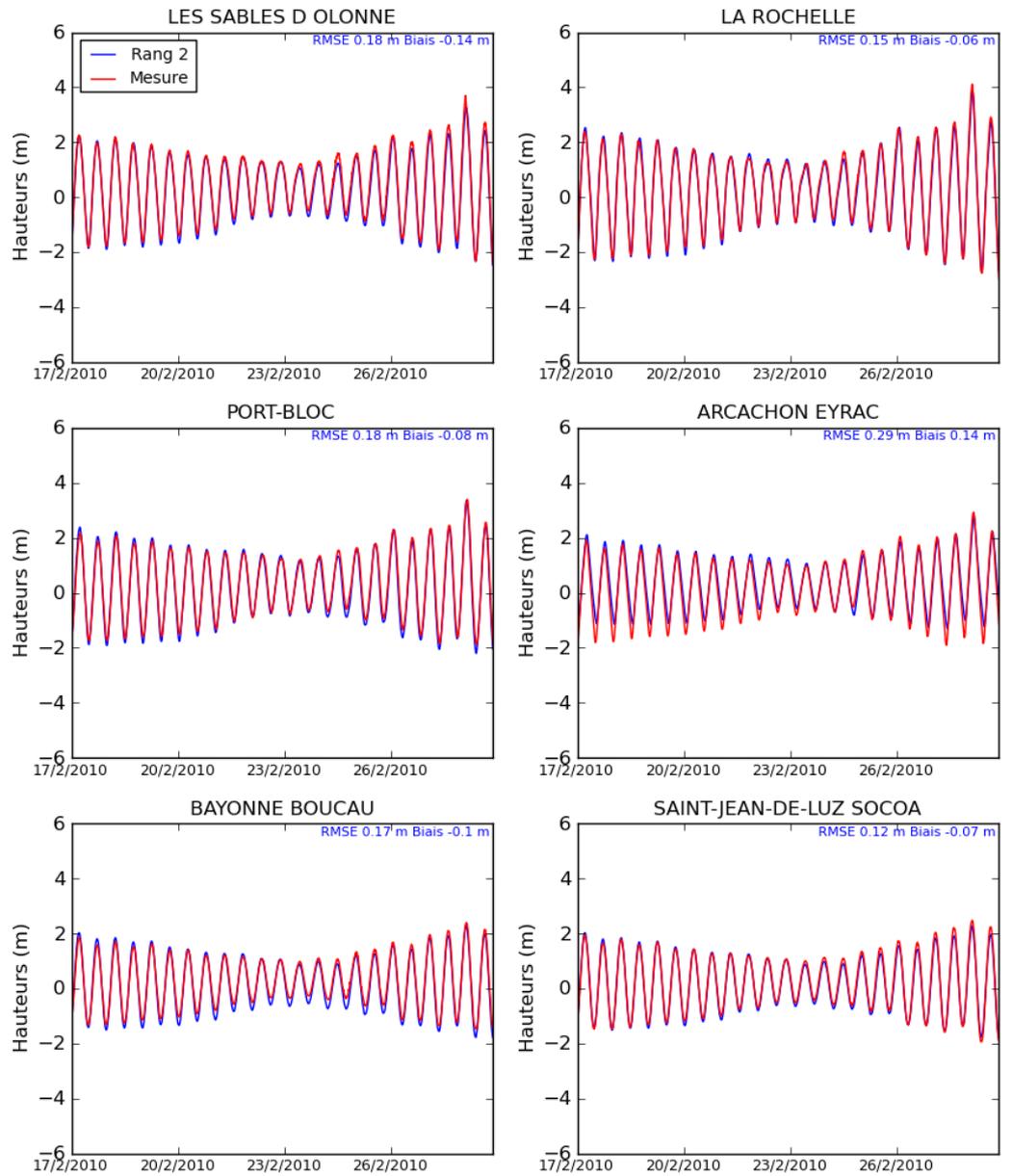


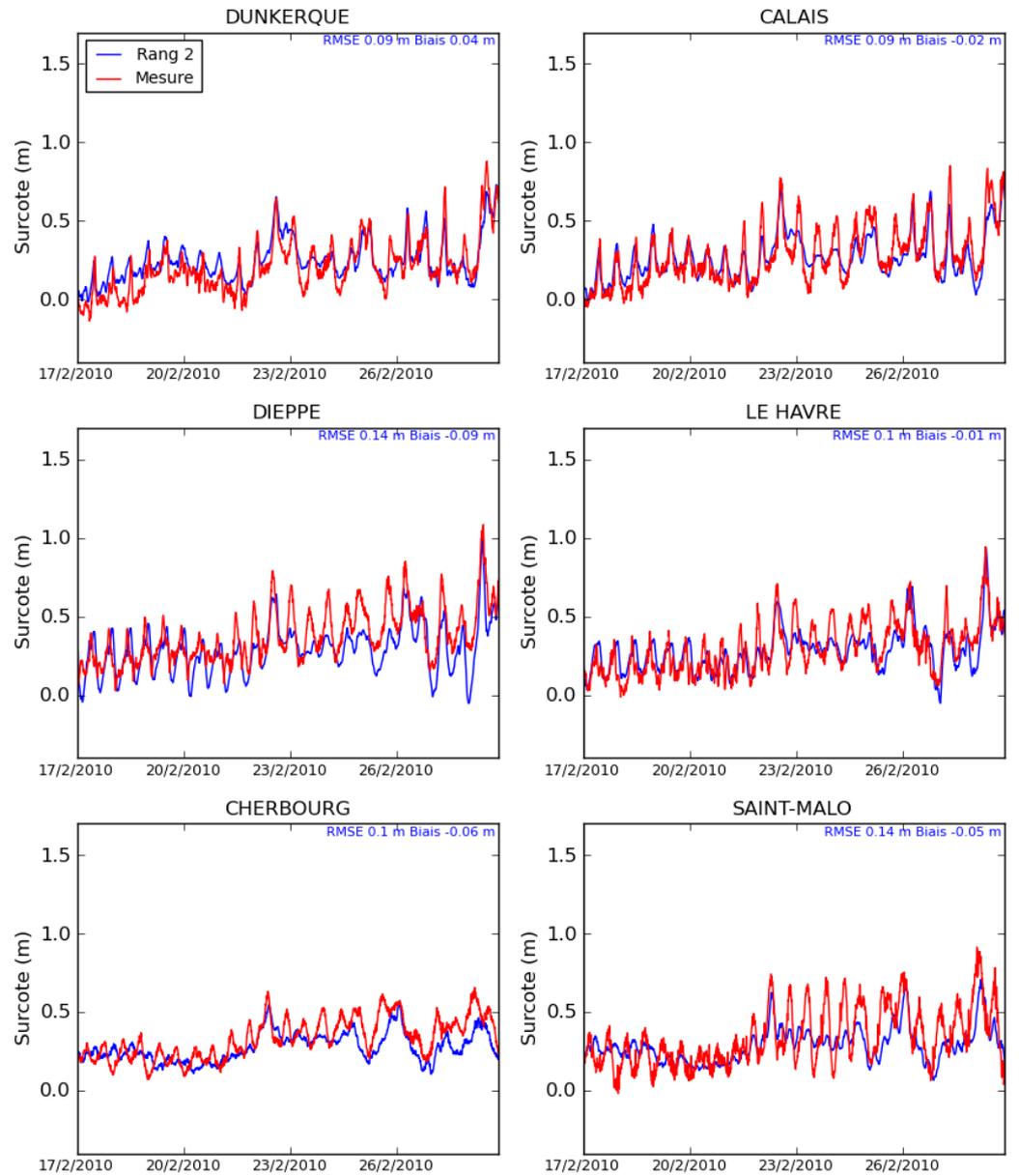


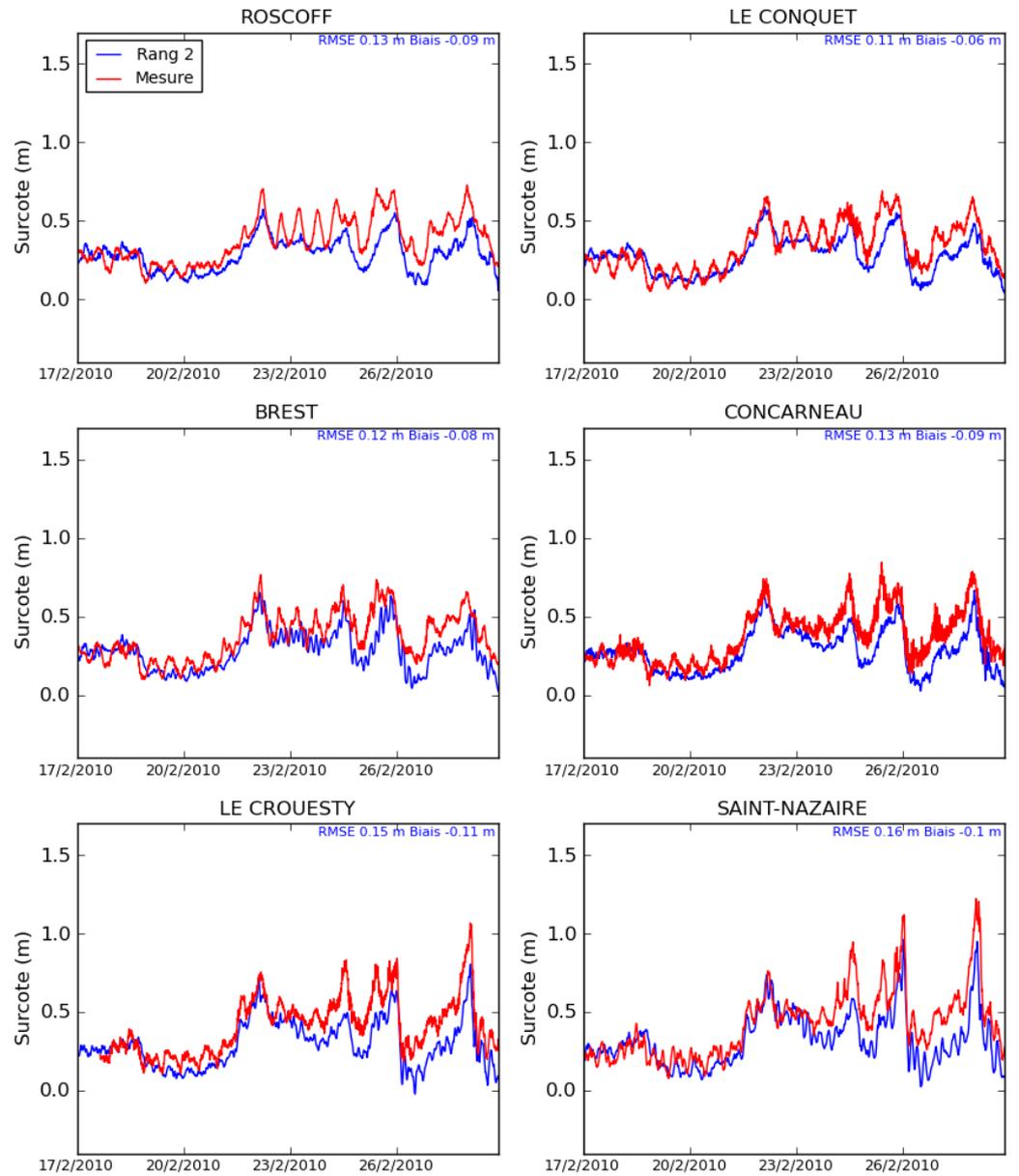


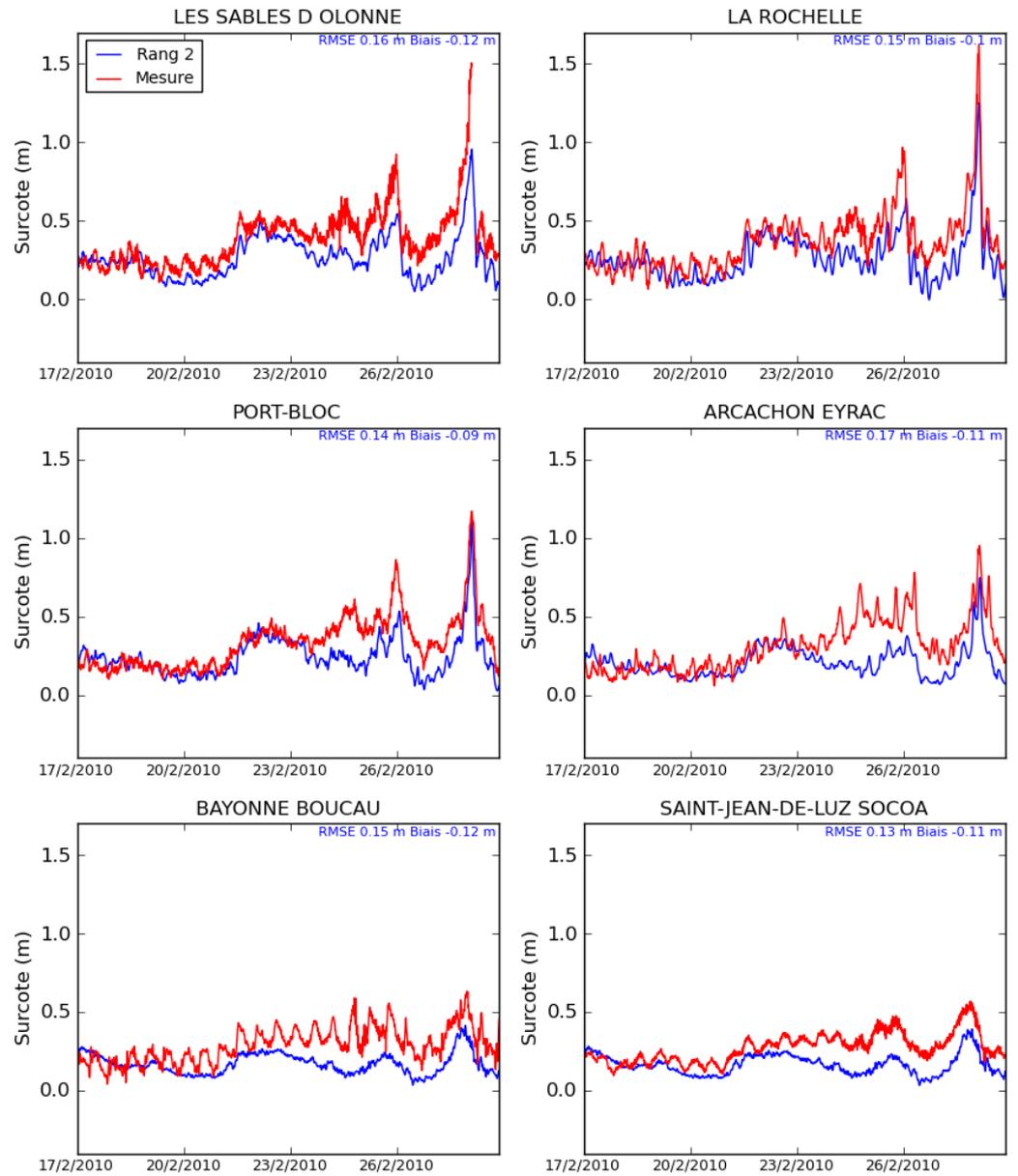






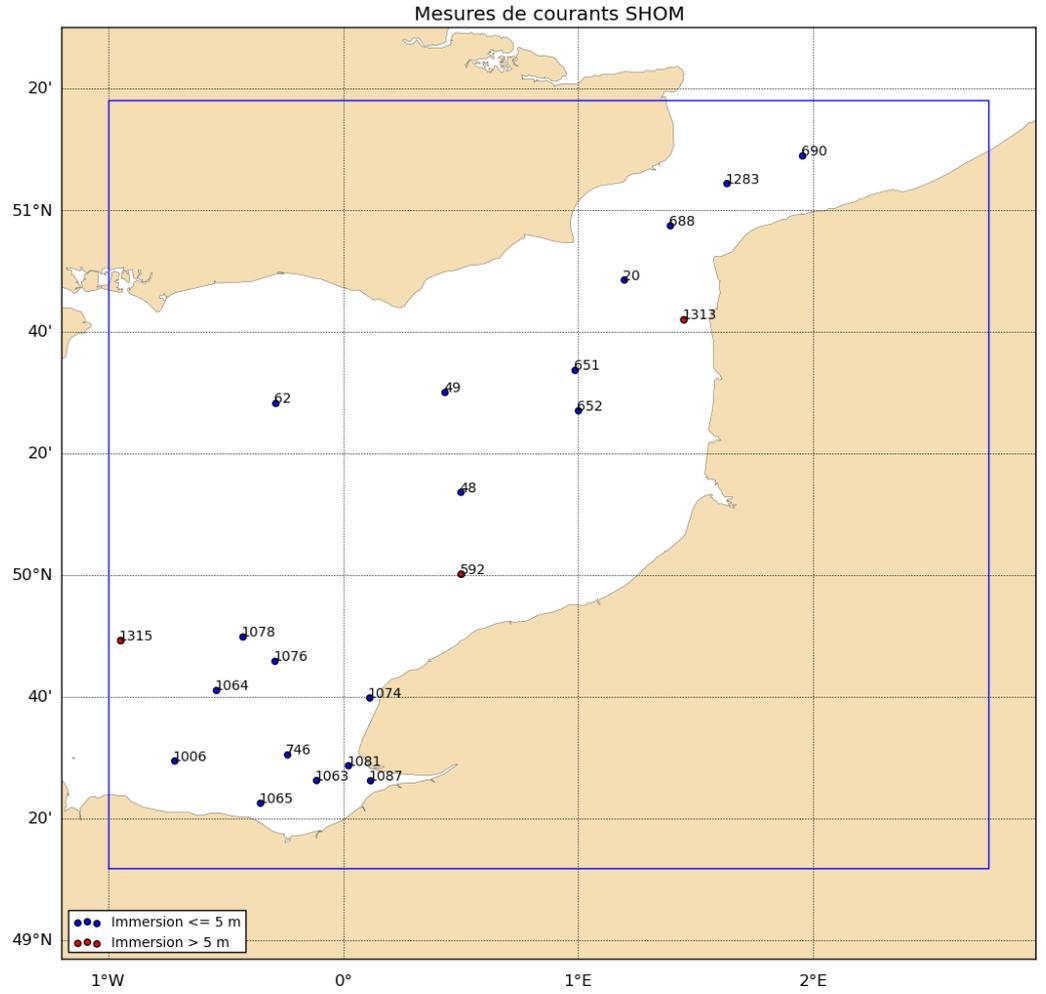


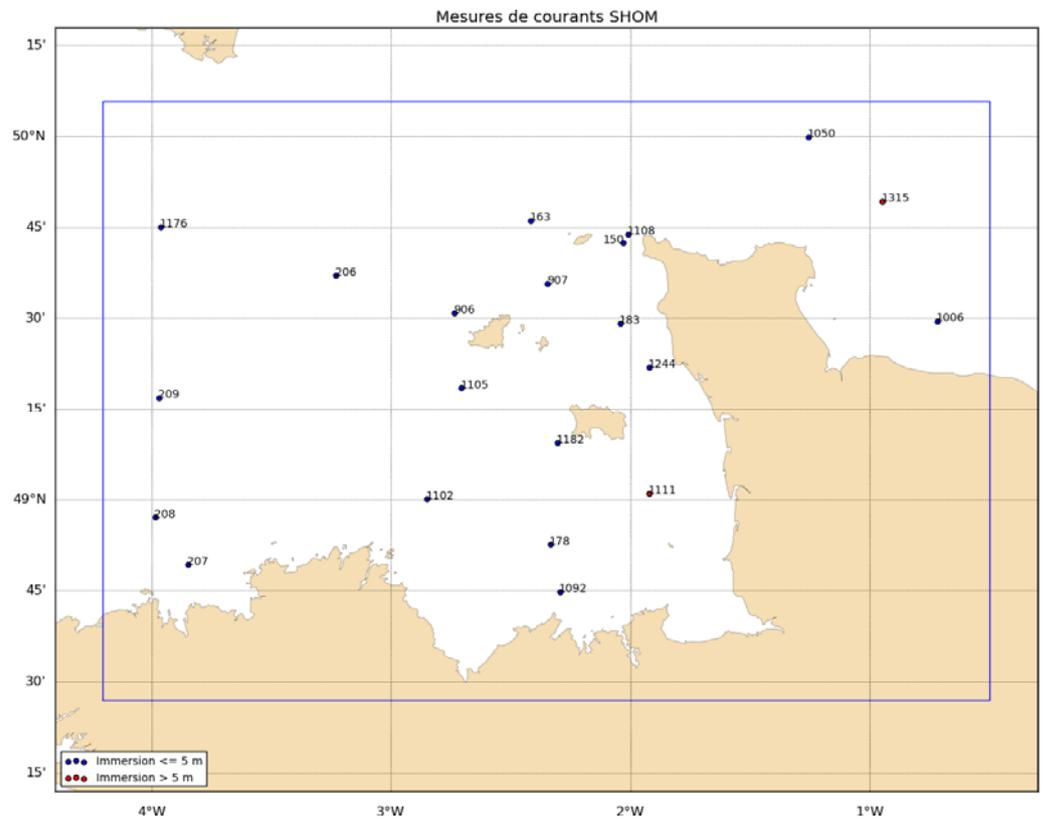




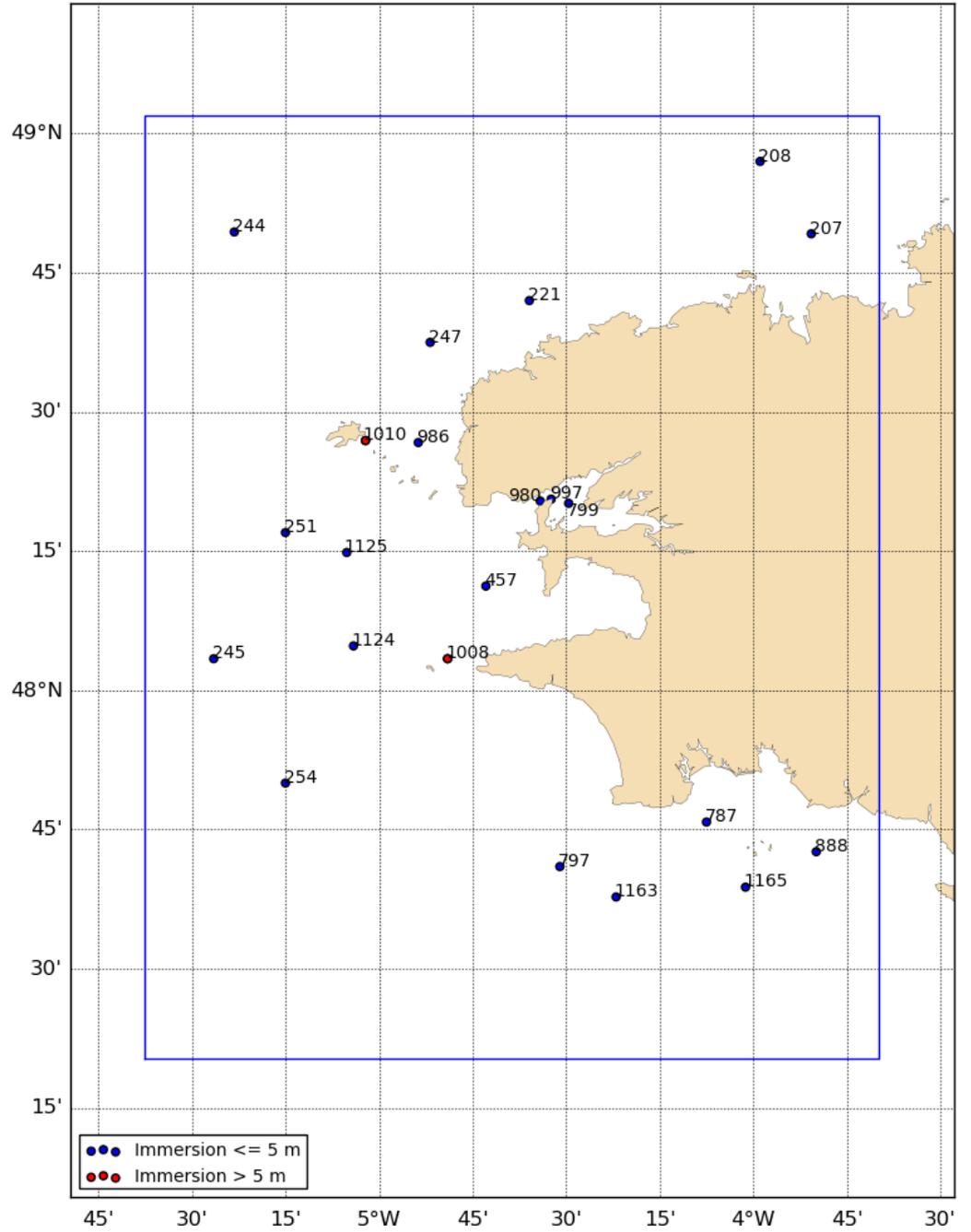
## Annexe 2 : Validation des courants

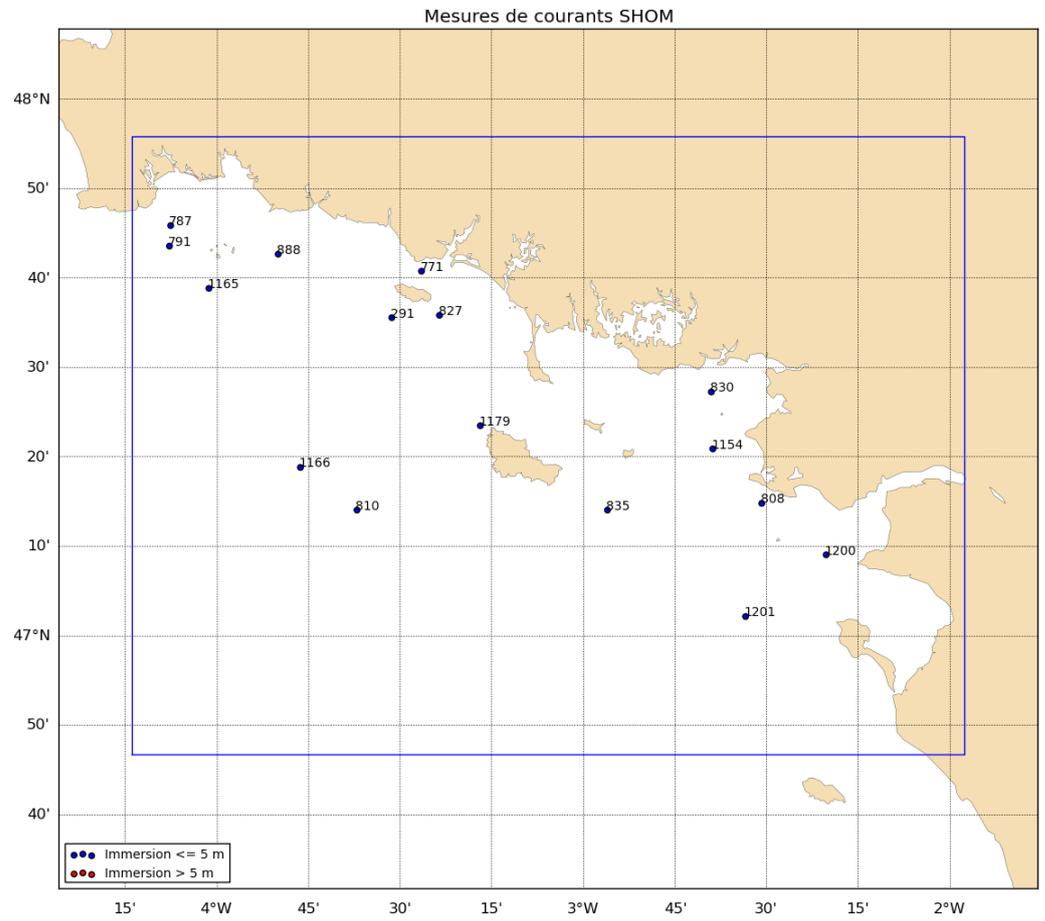


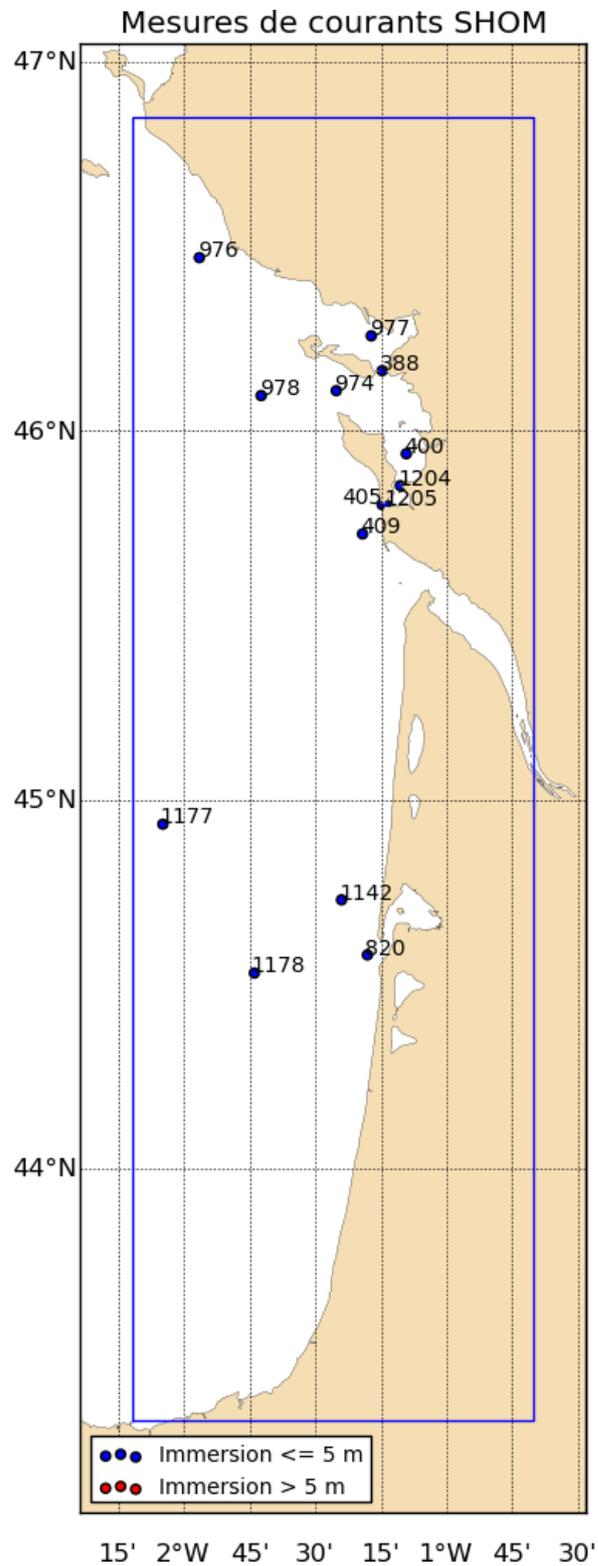


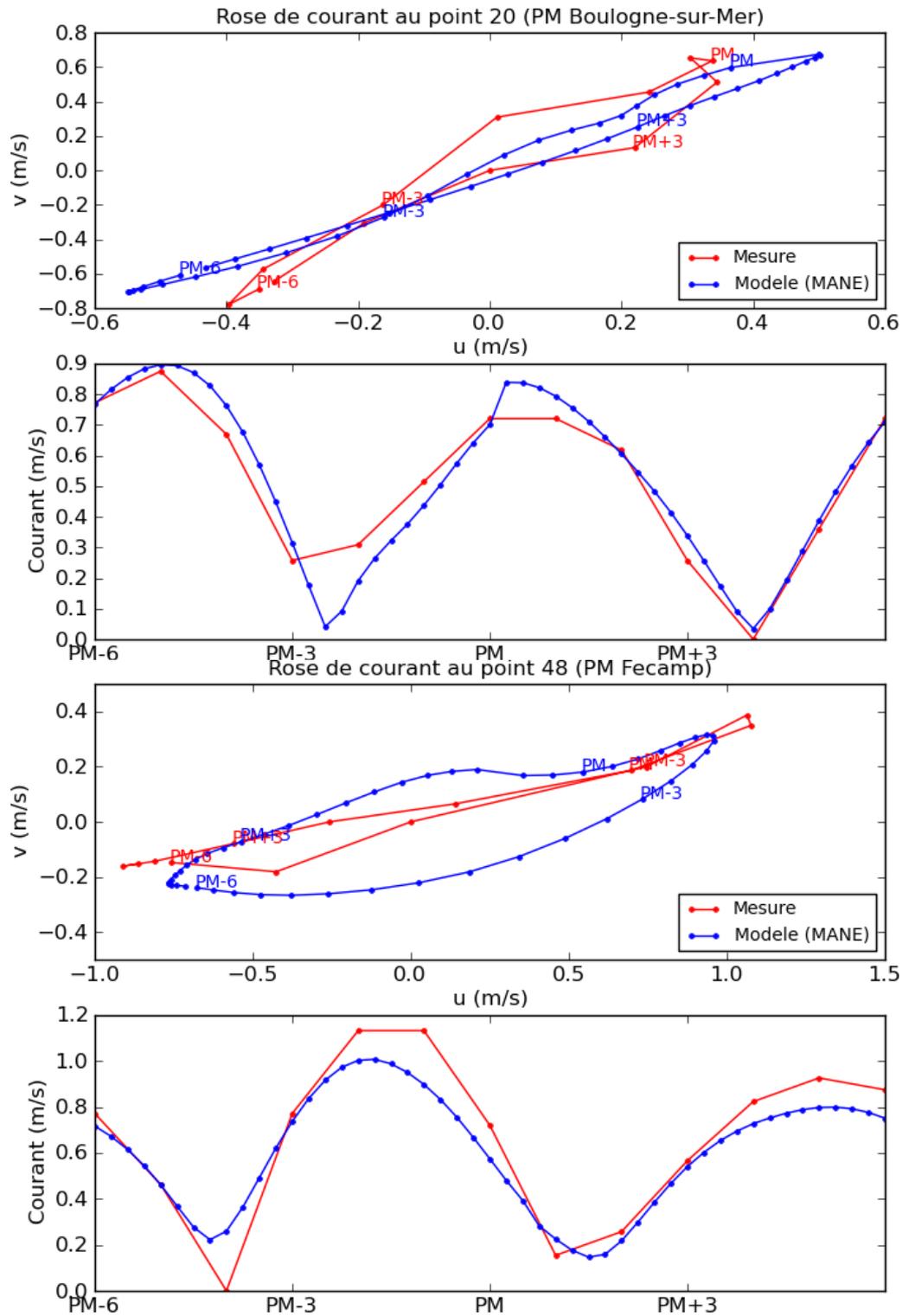


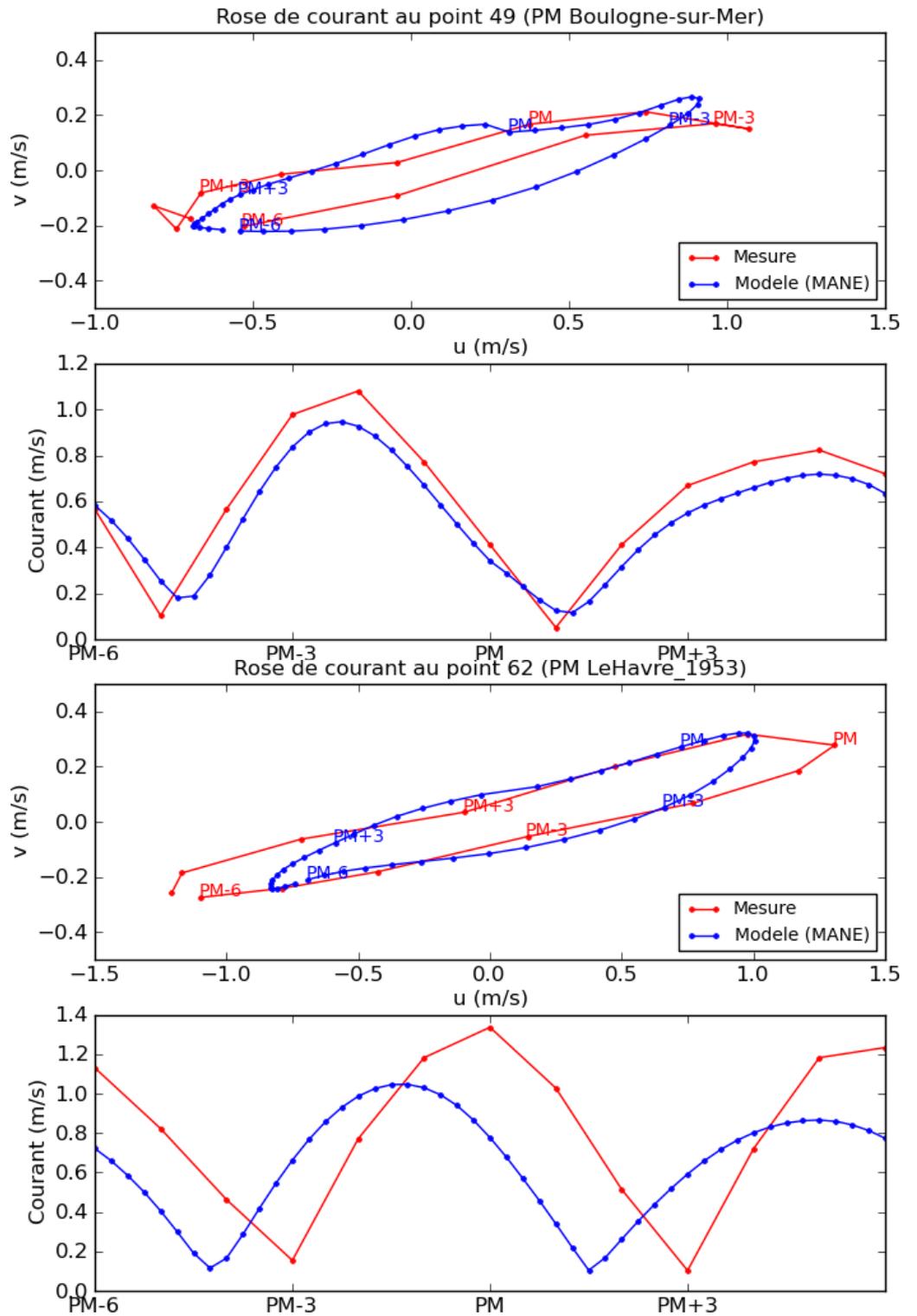
### Mesures de courants SHOM

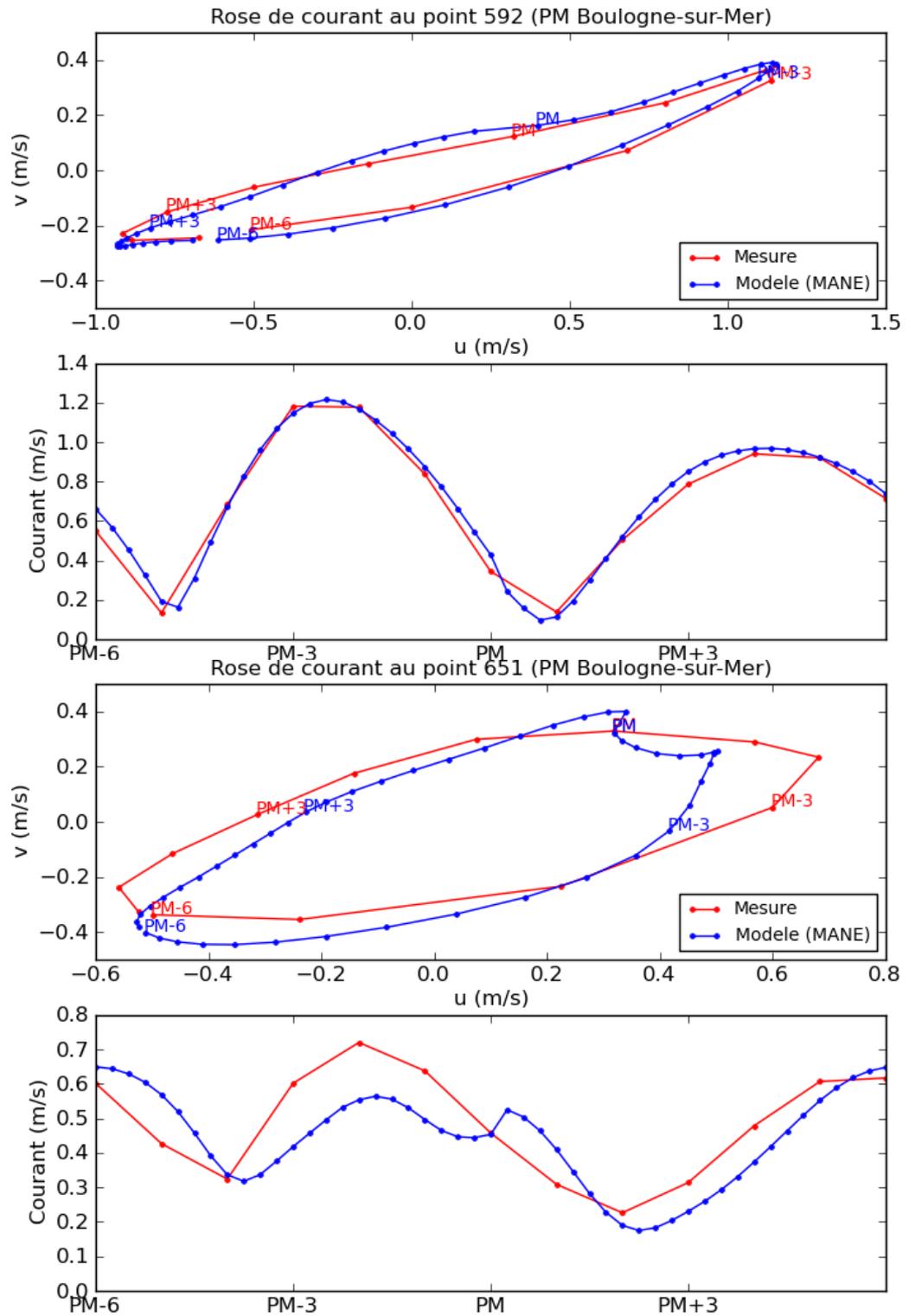


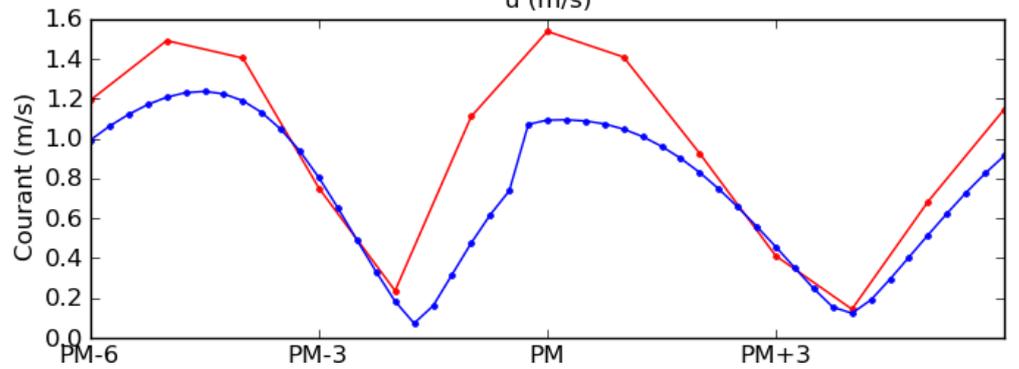
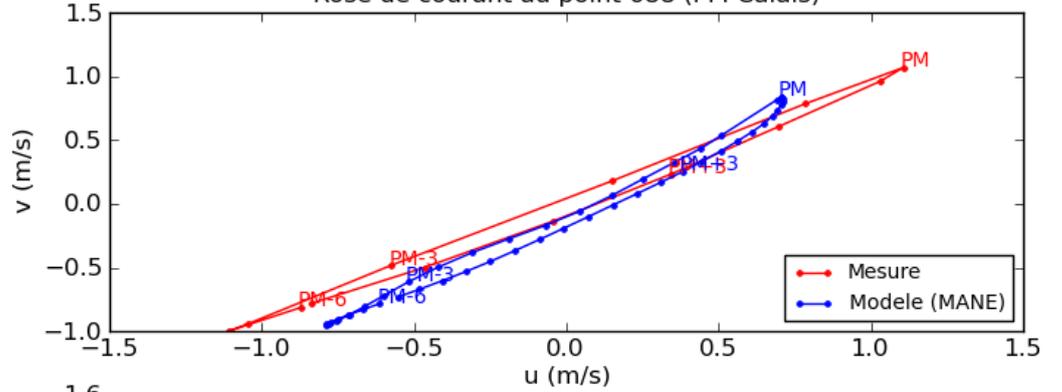
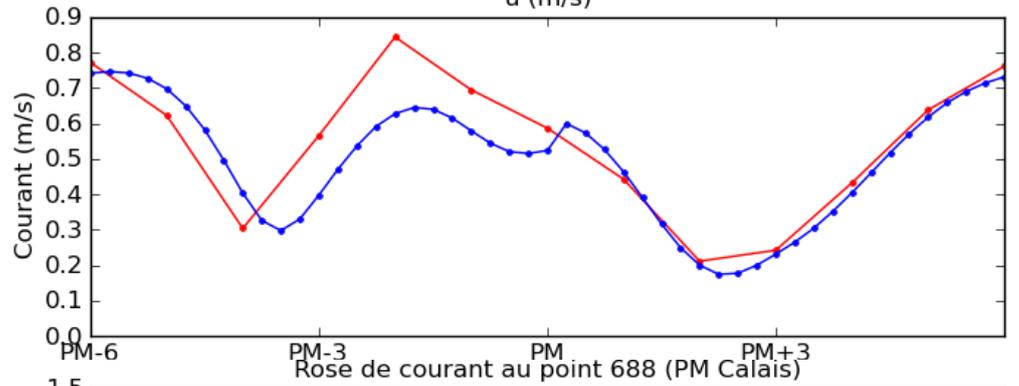
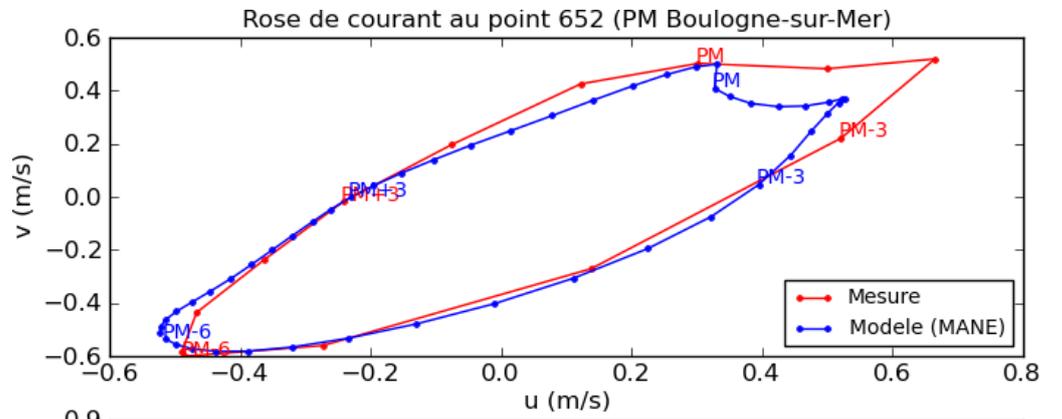


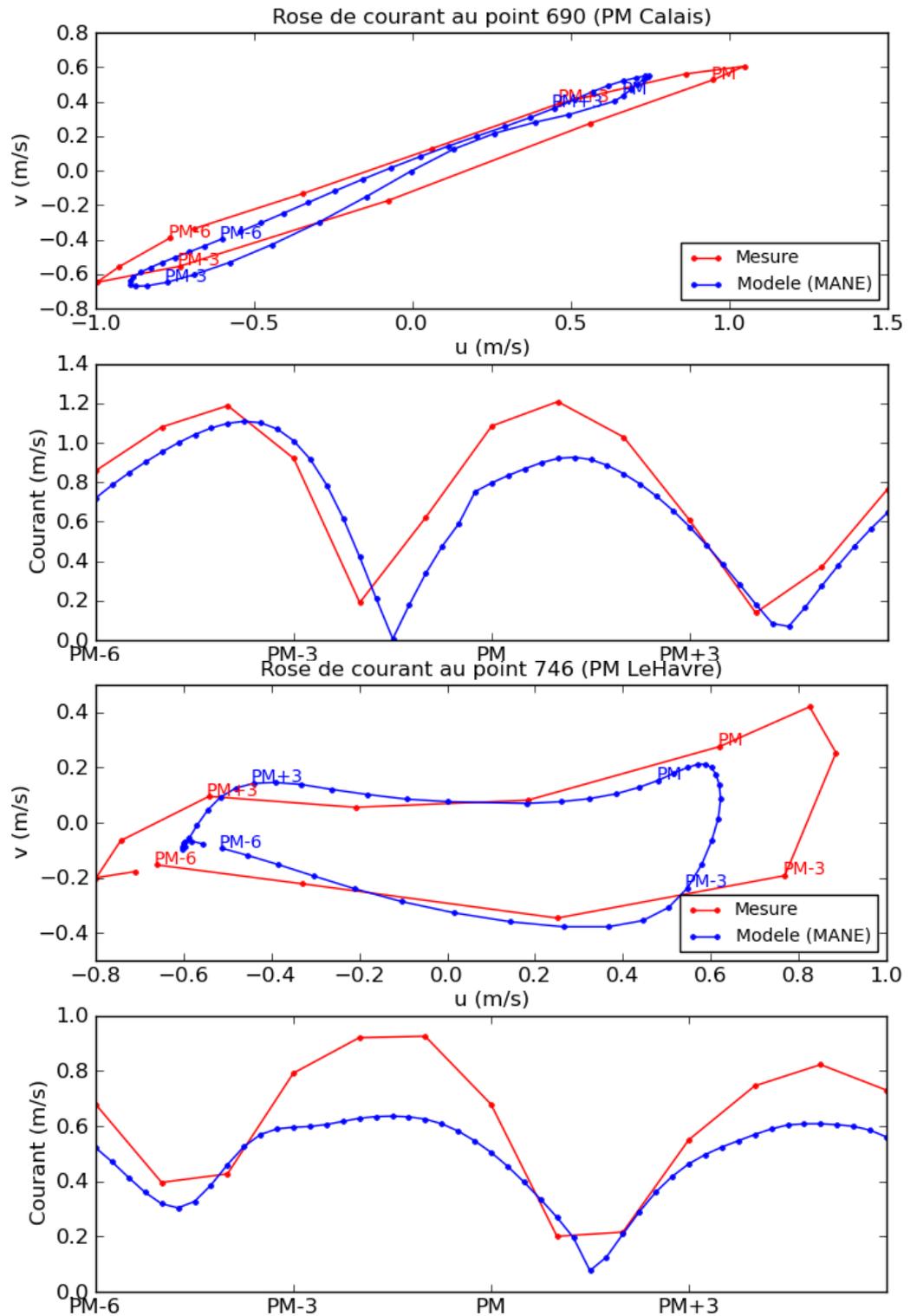


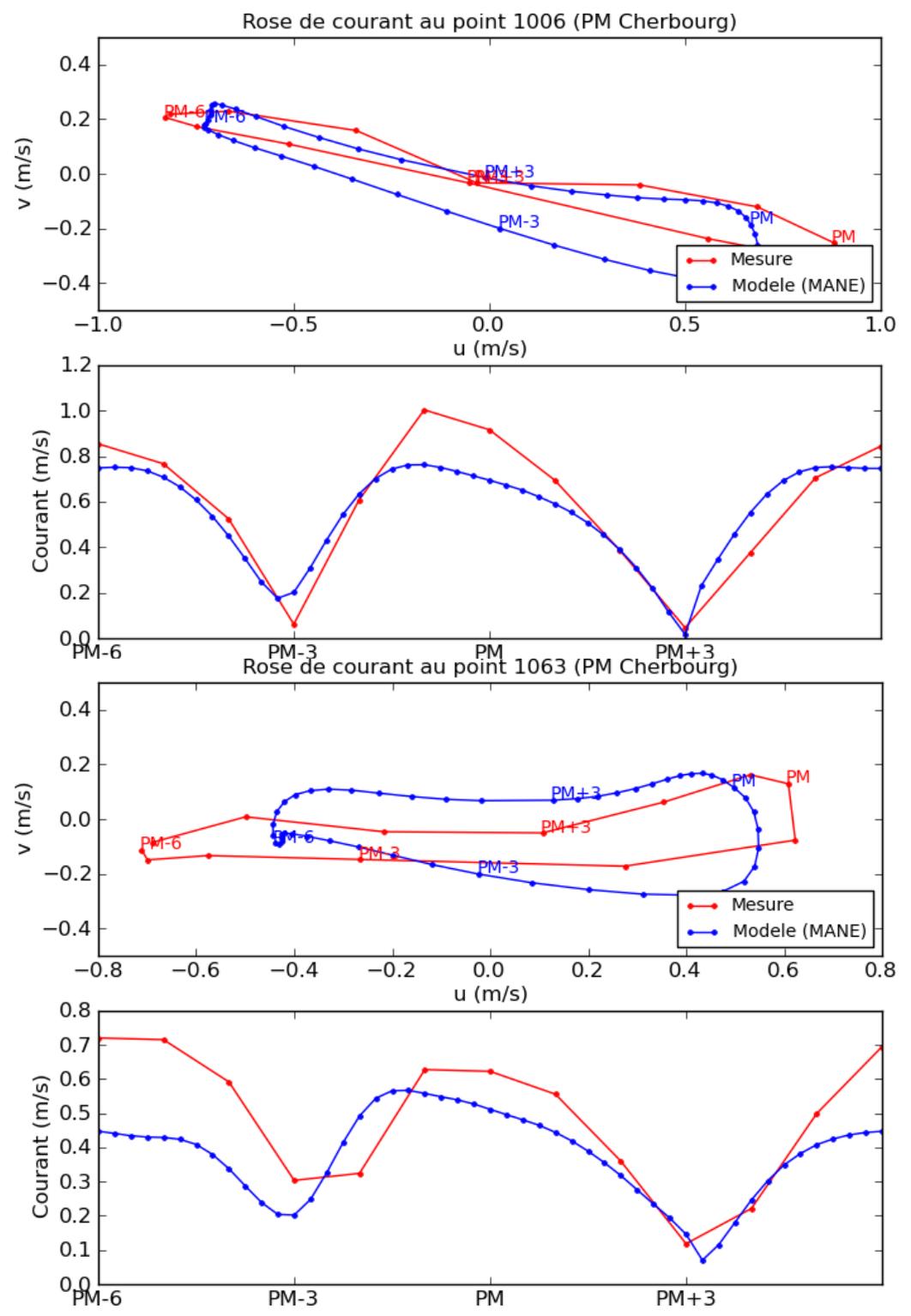


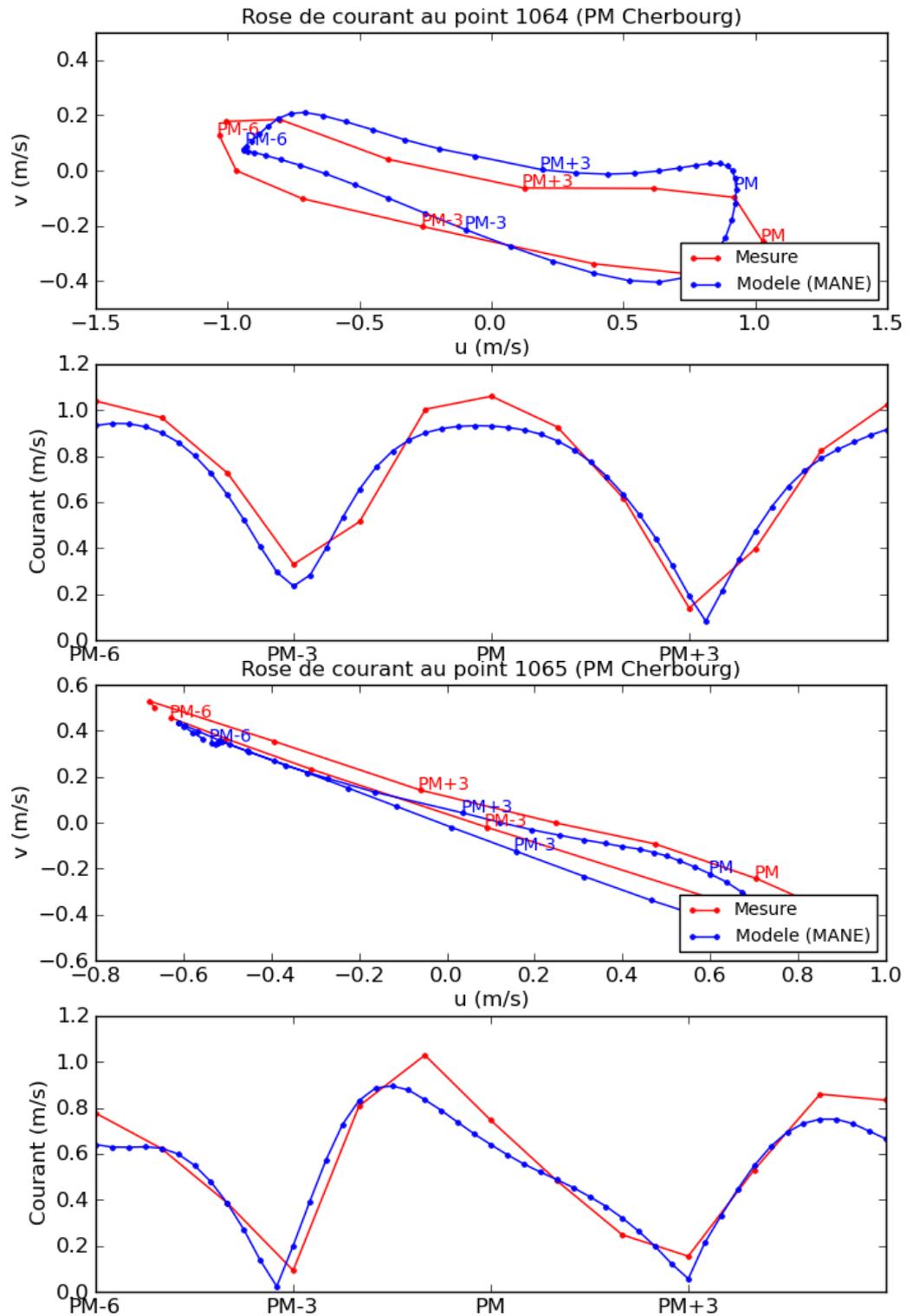


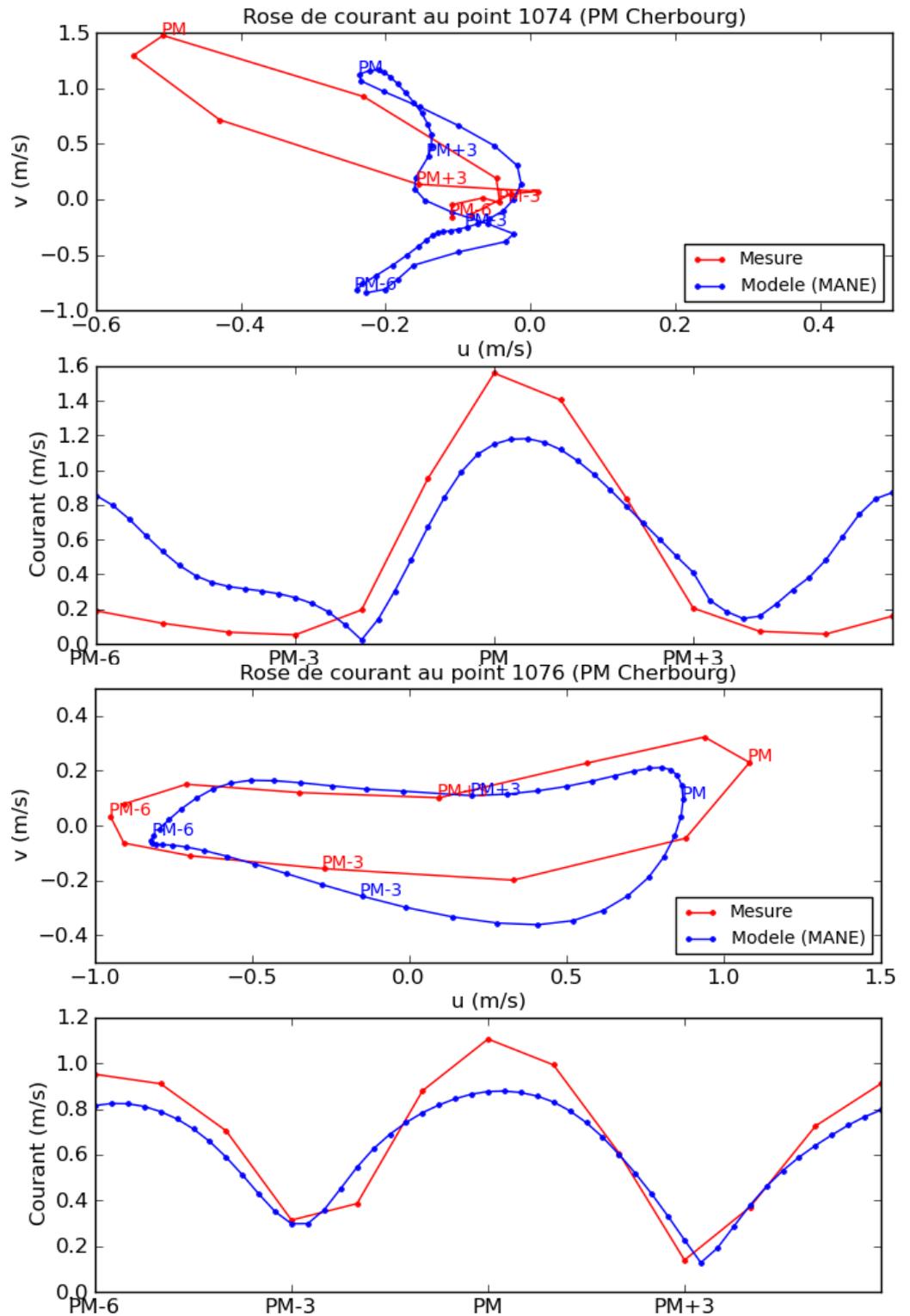


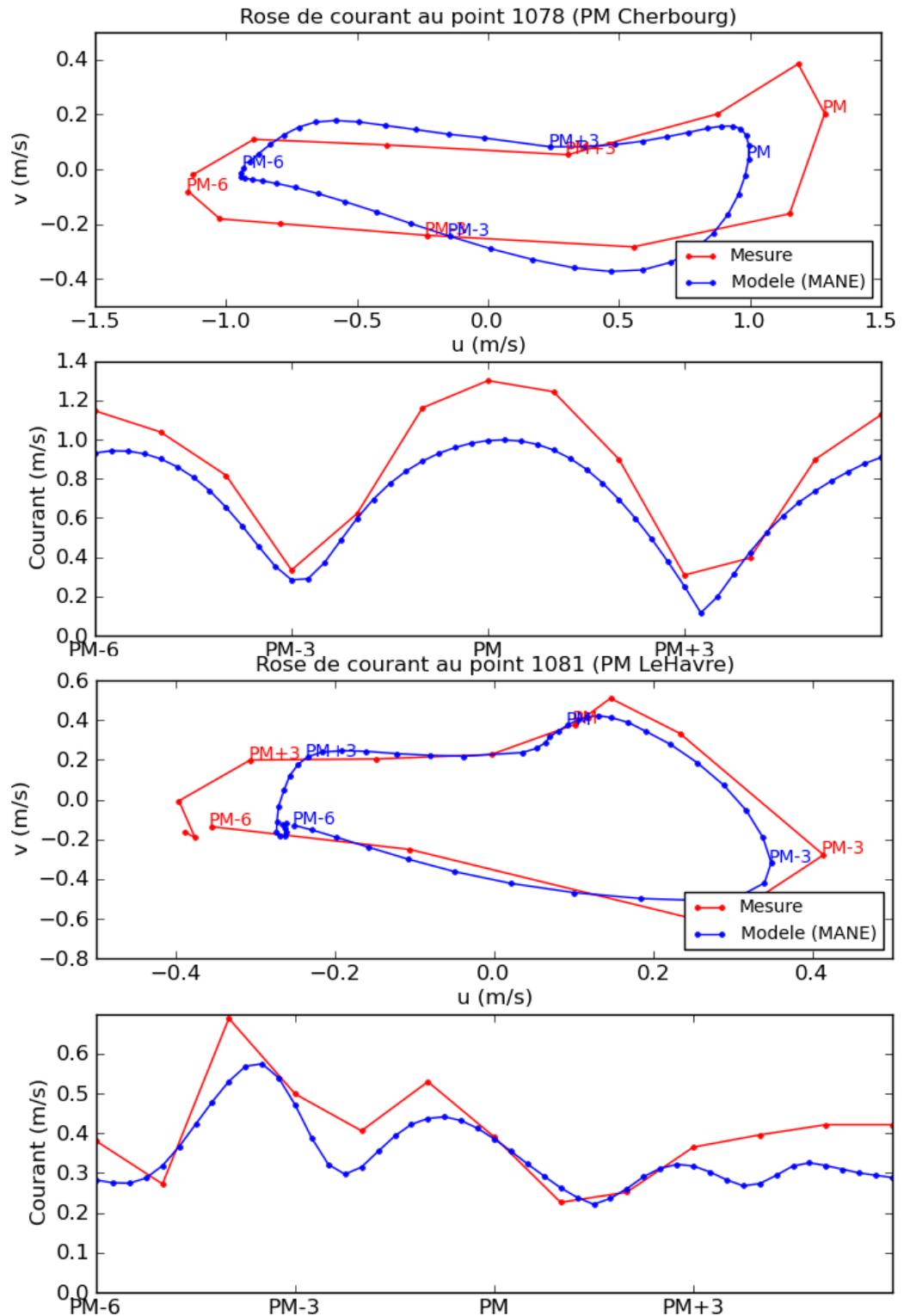


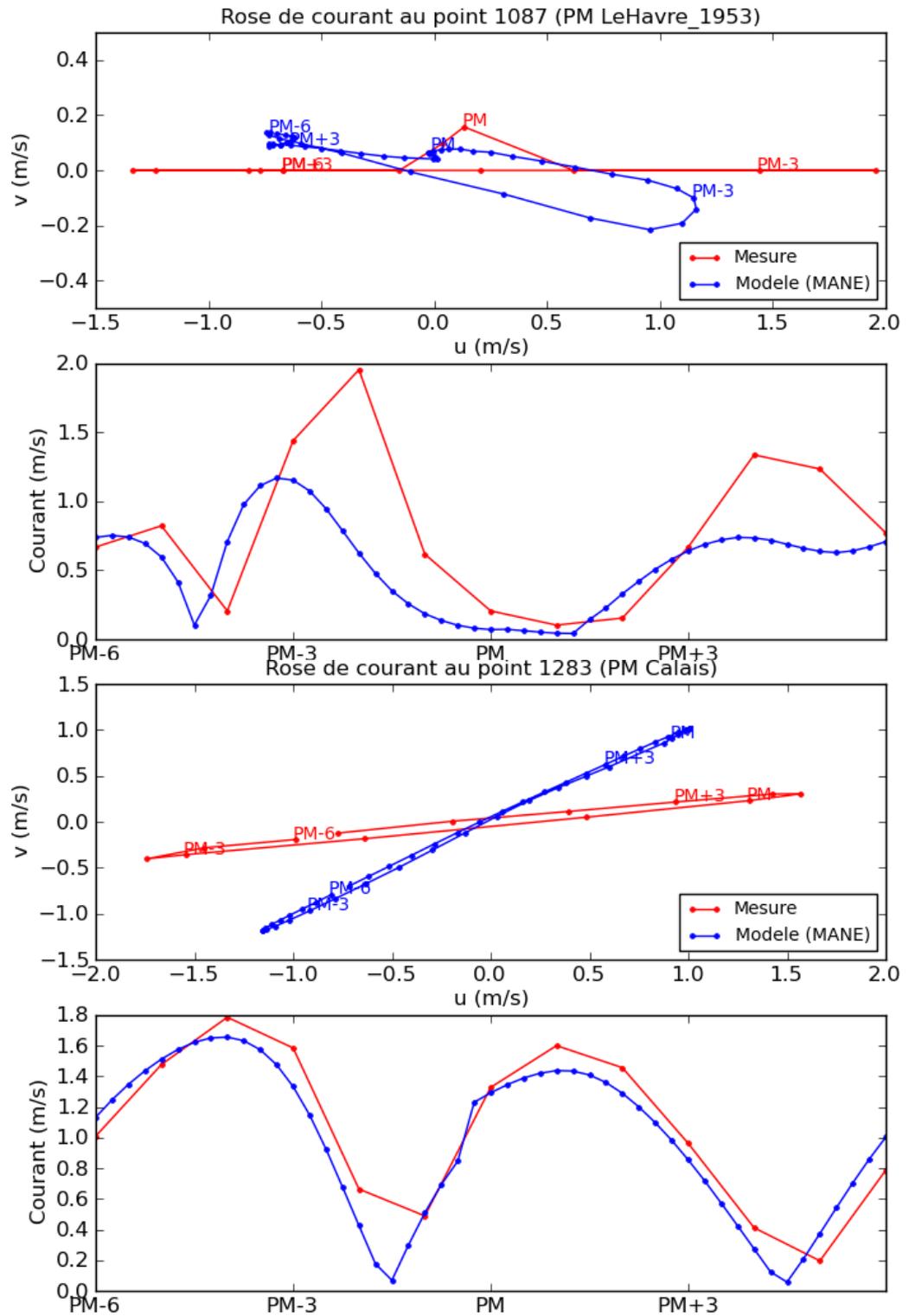


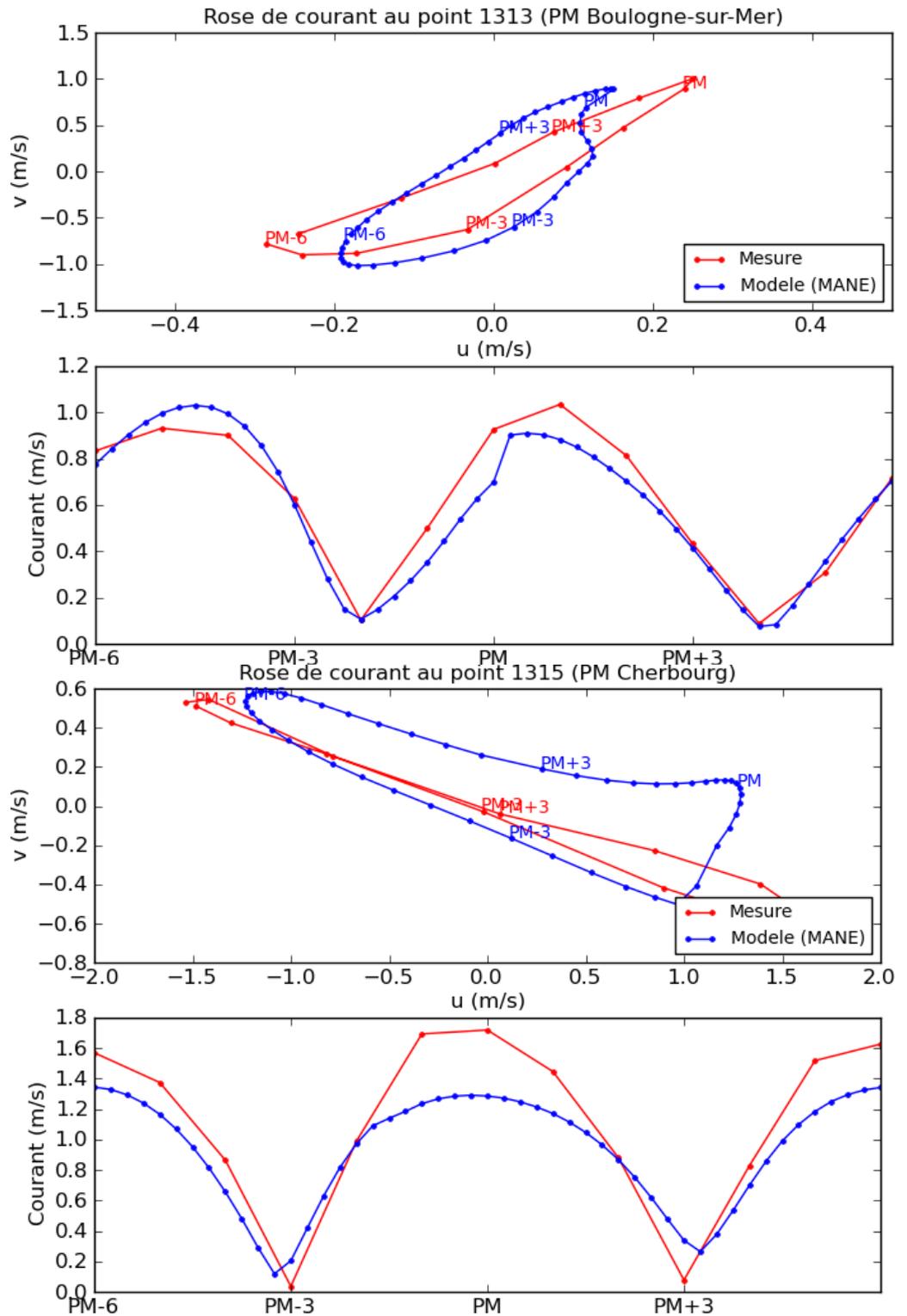


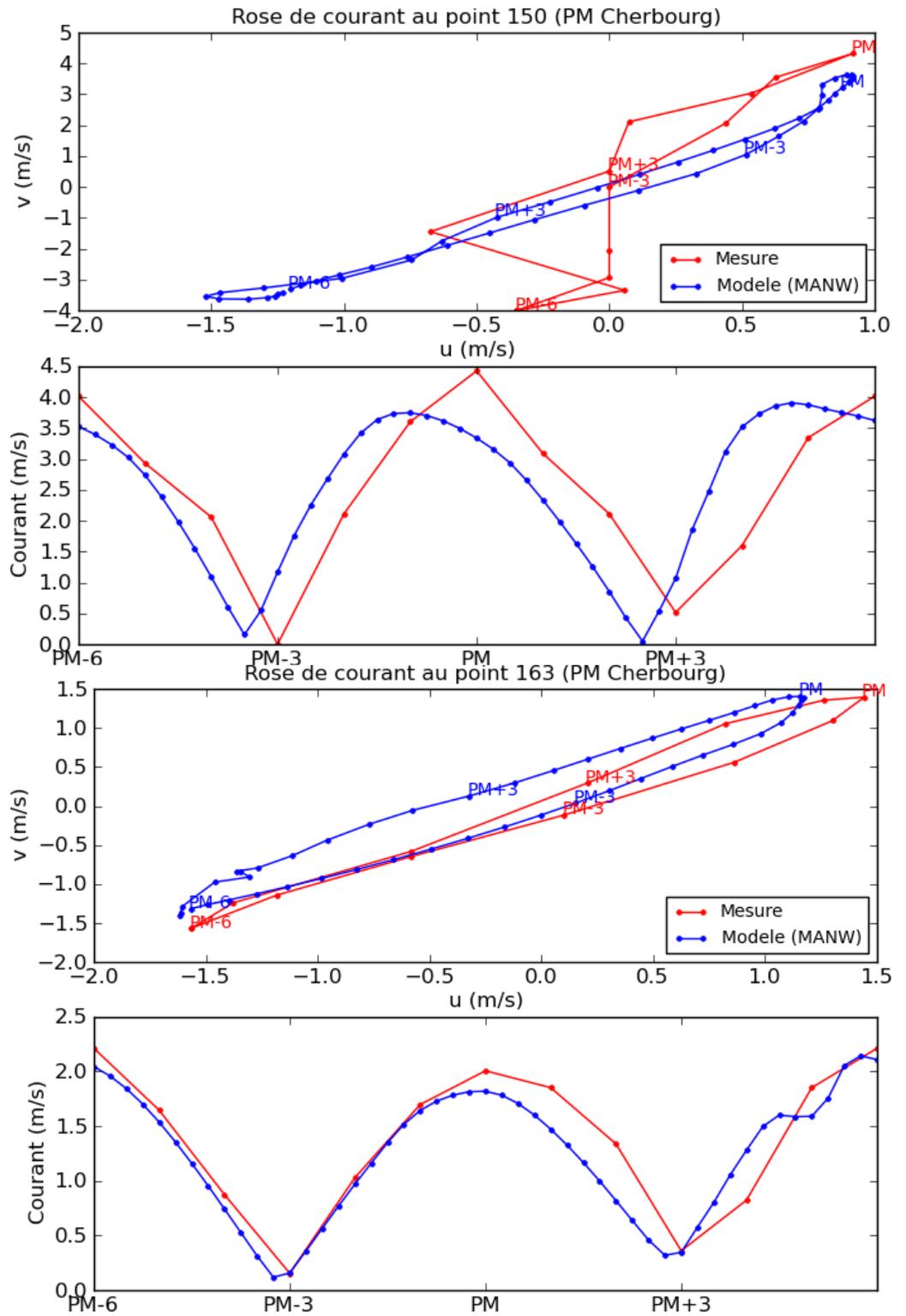


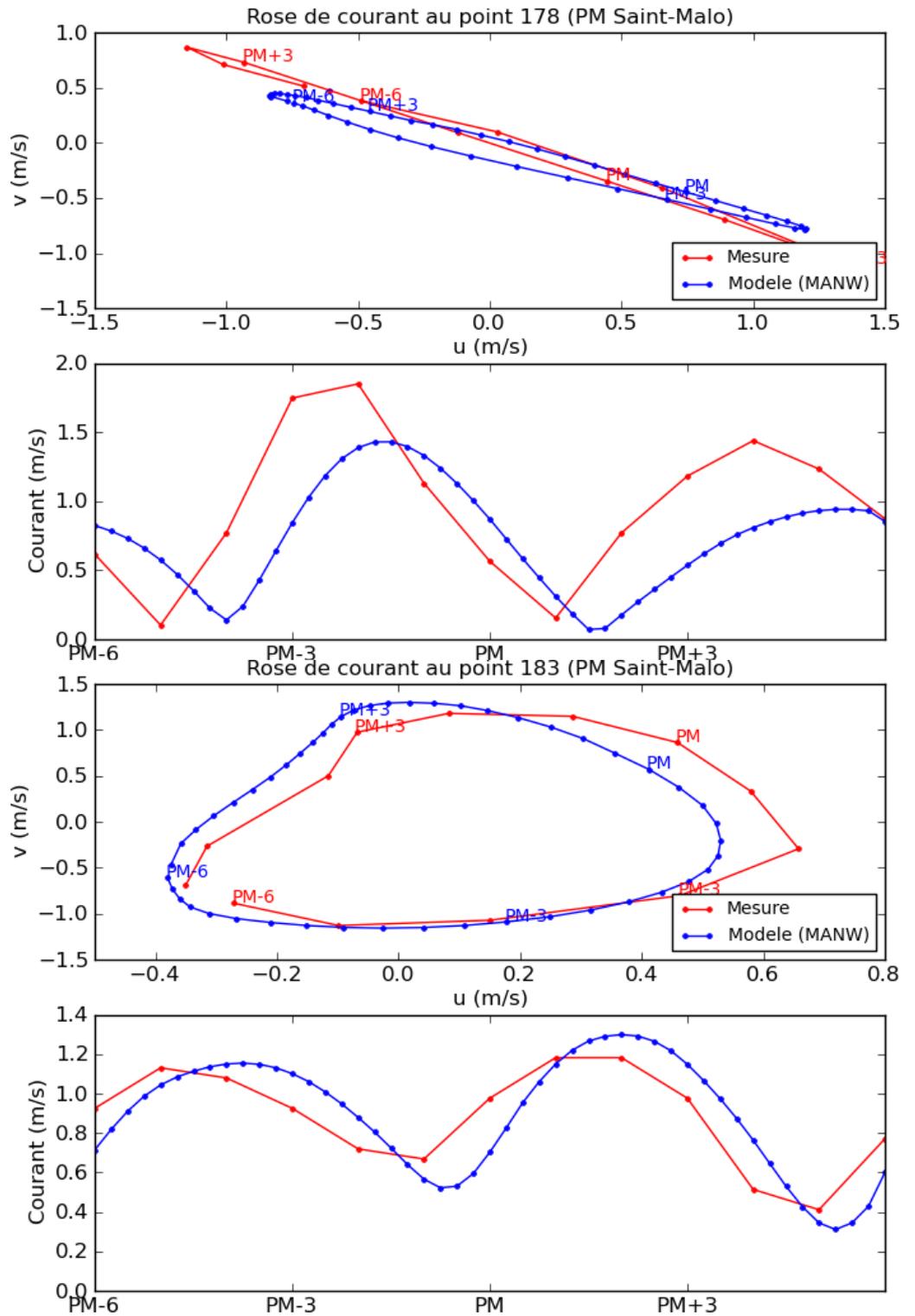


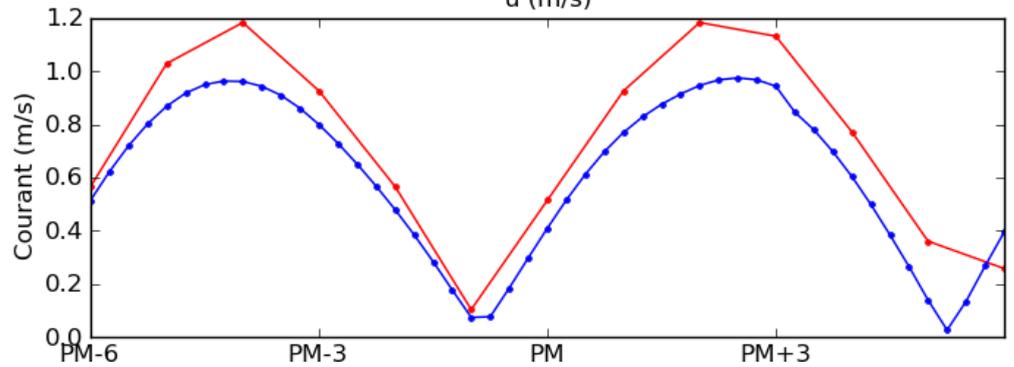
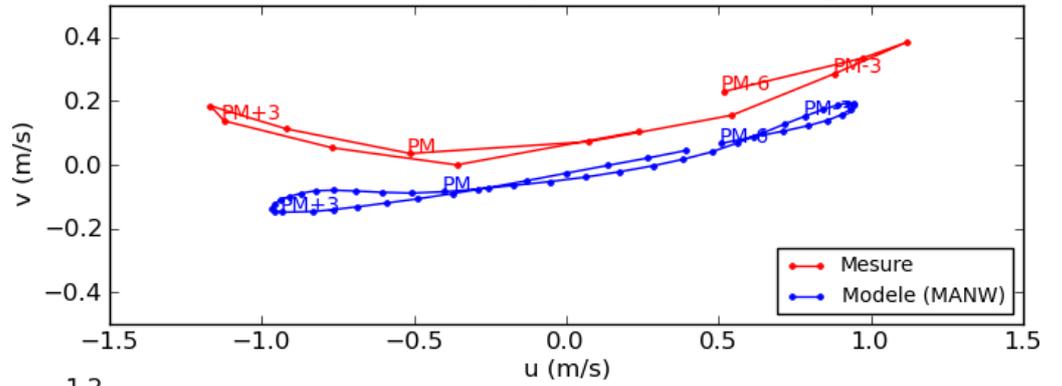
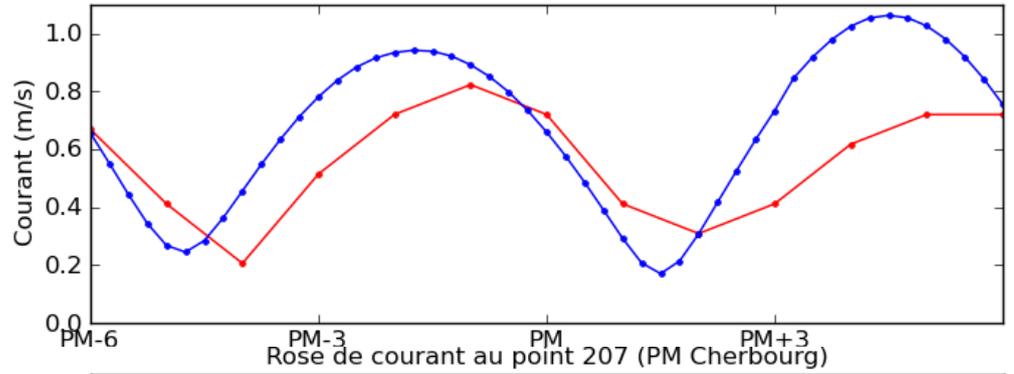
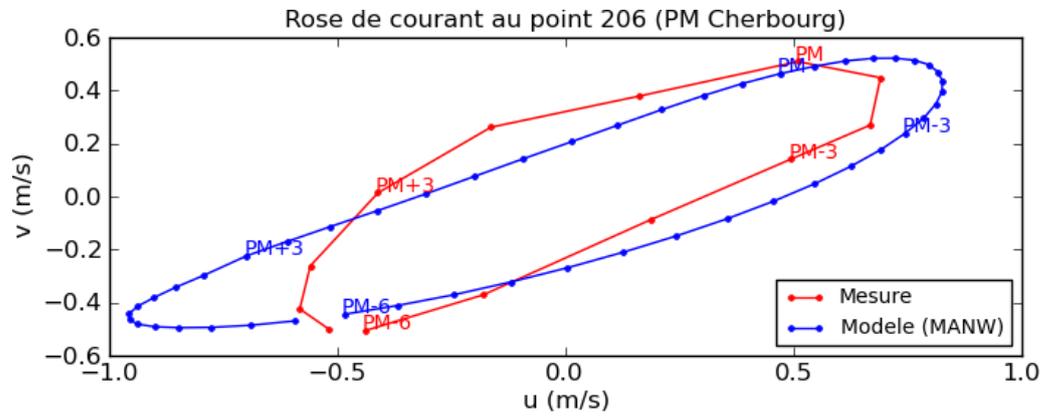


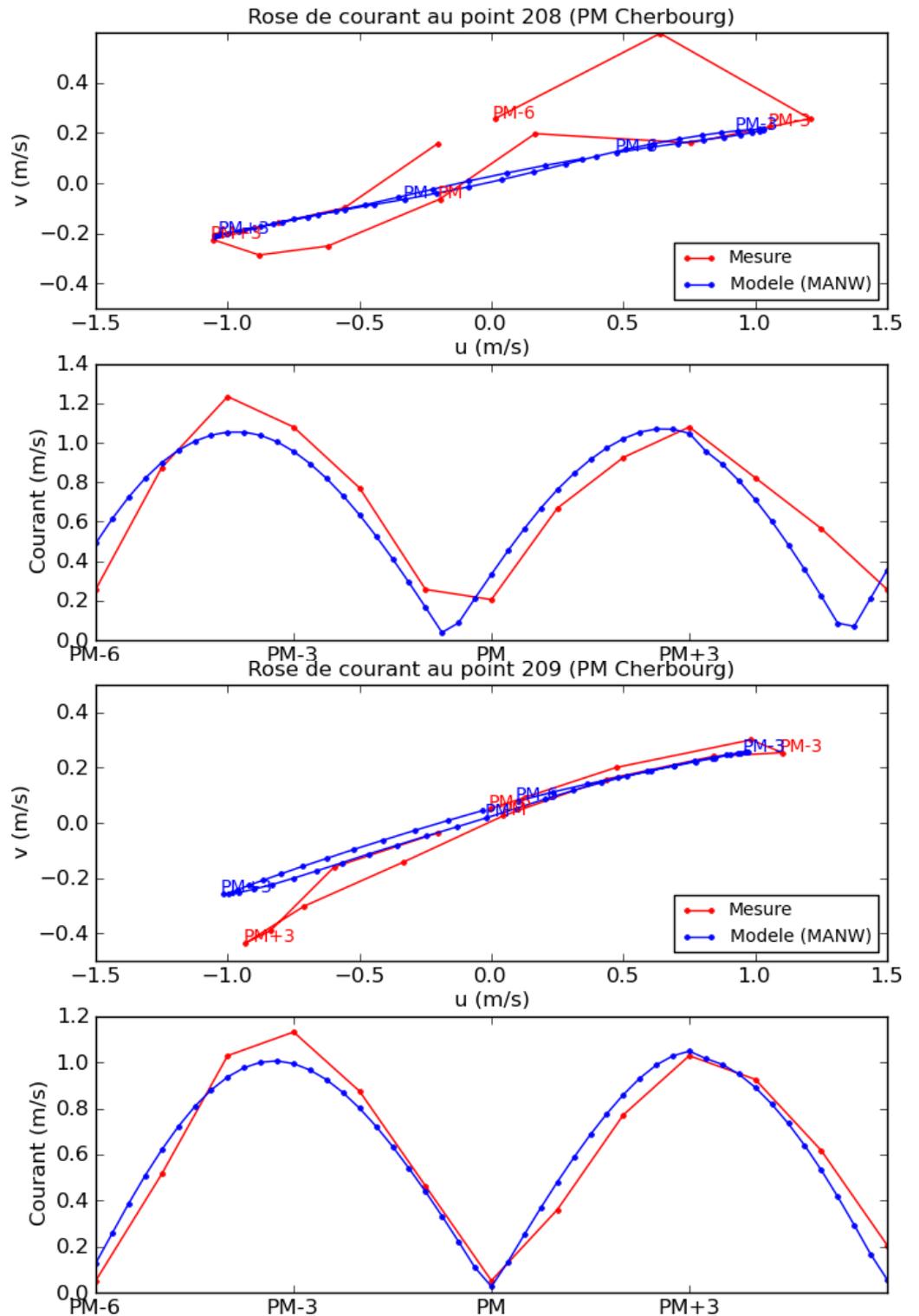


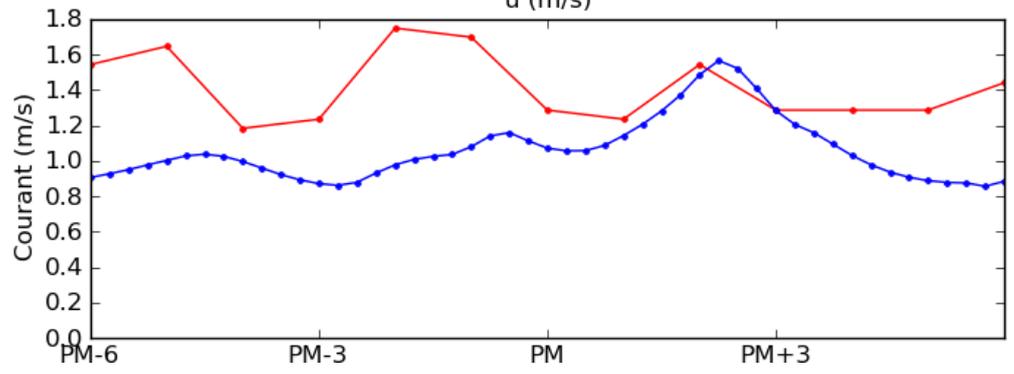
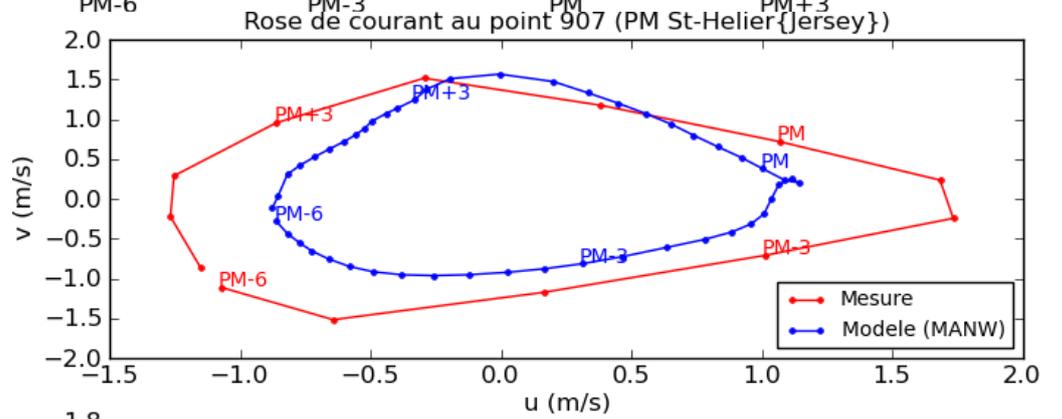
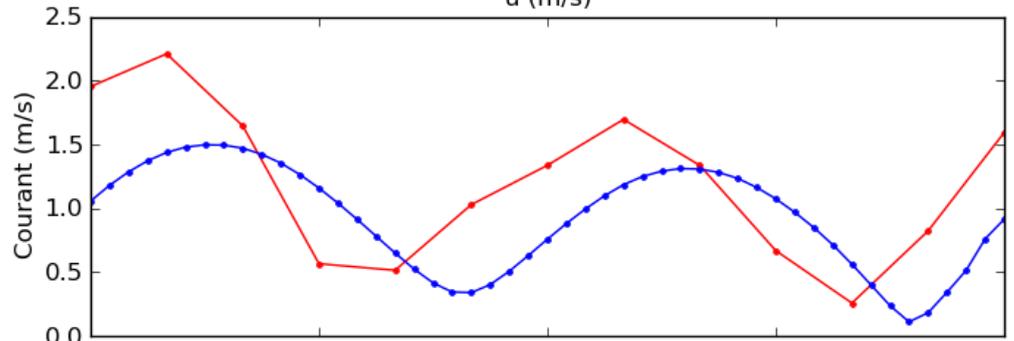
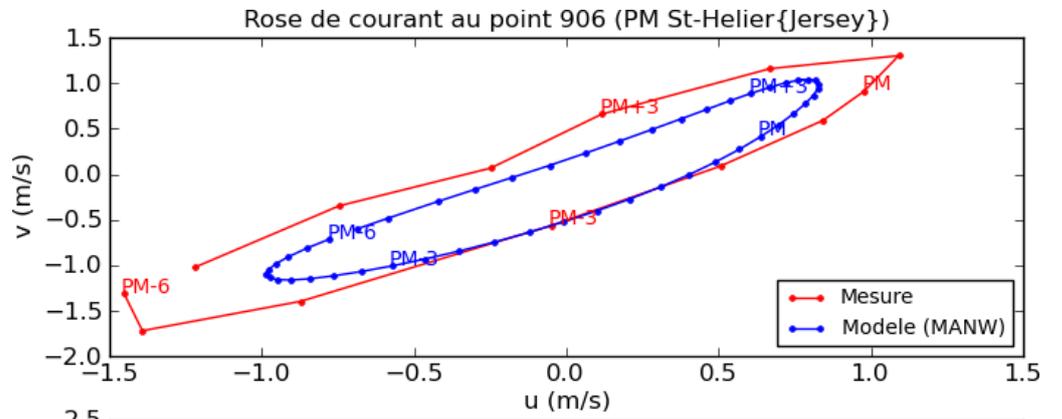


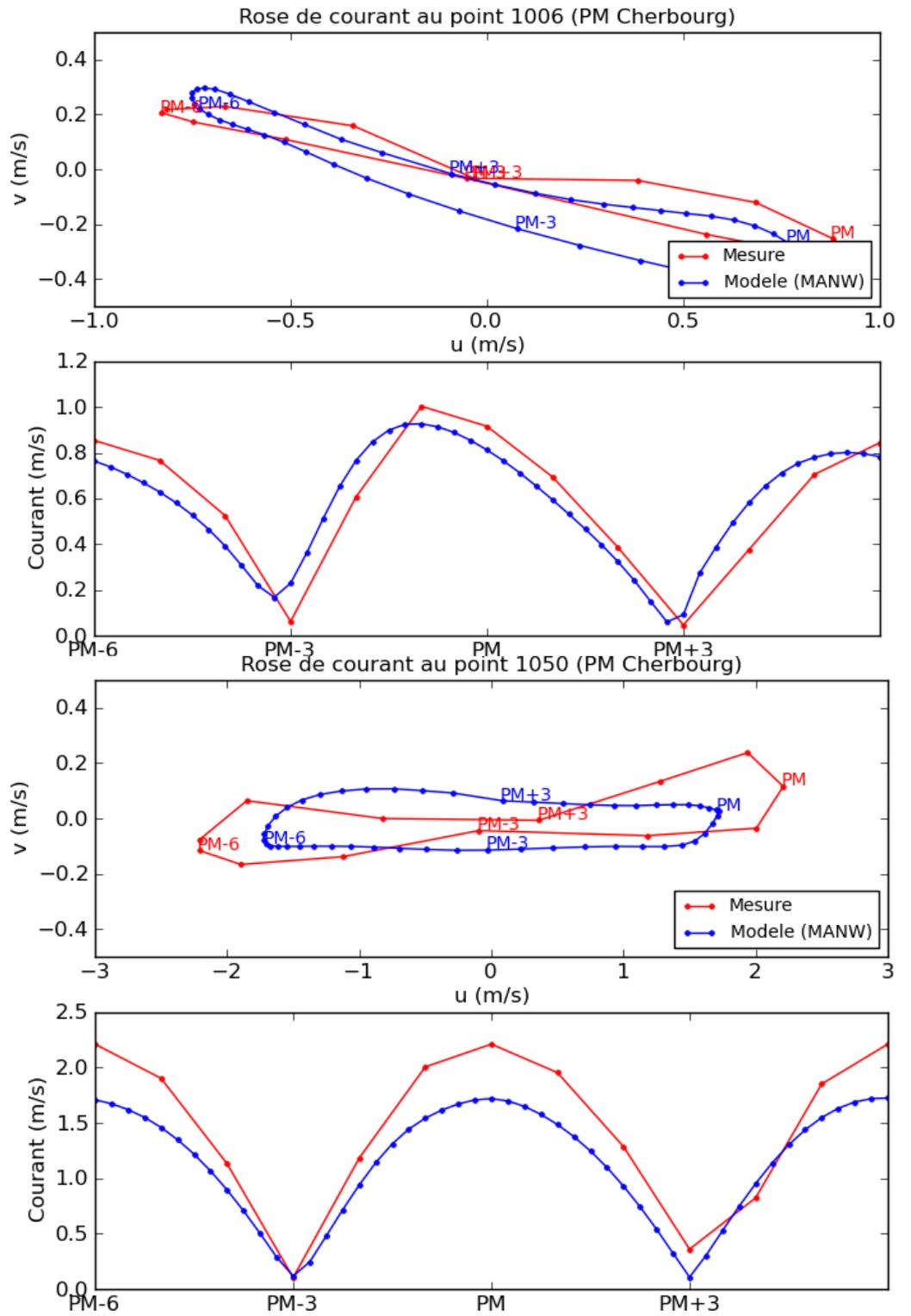


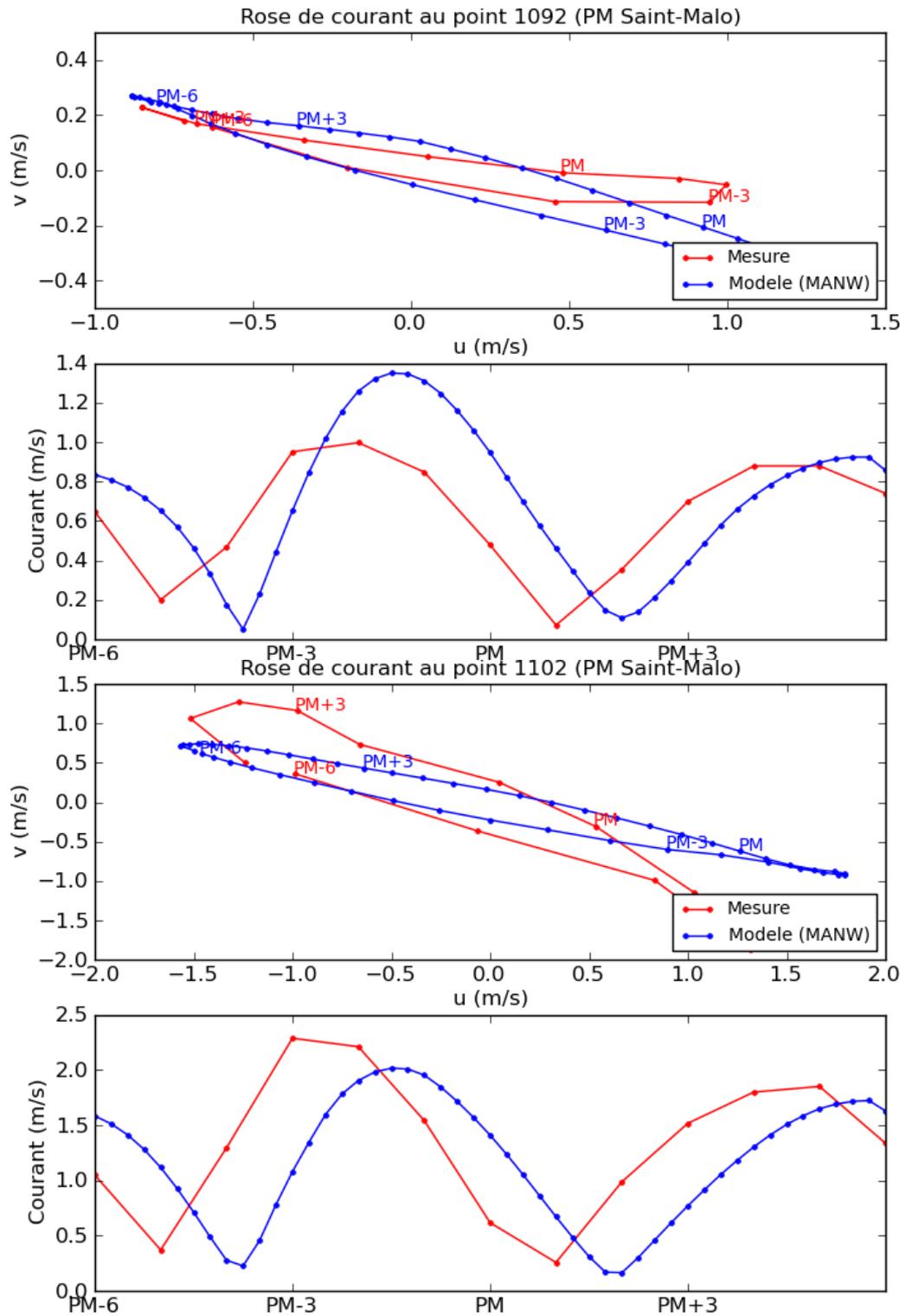


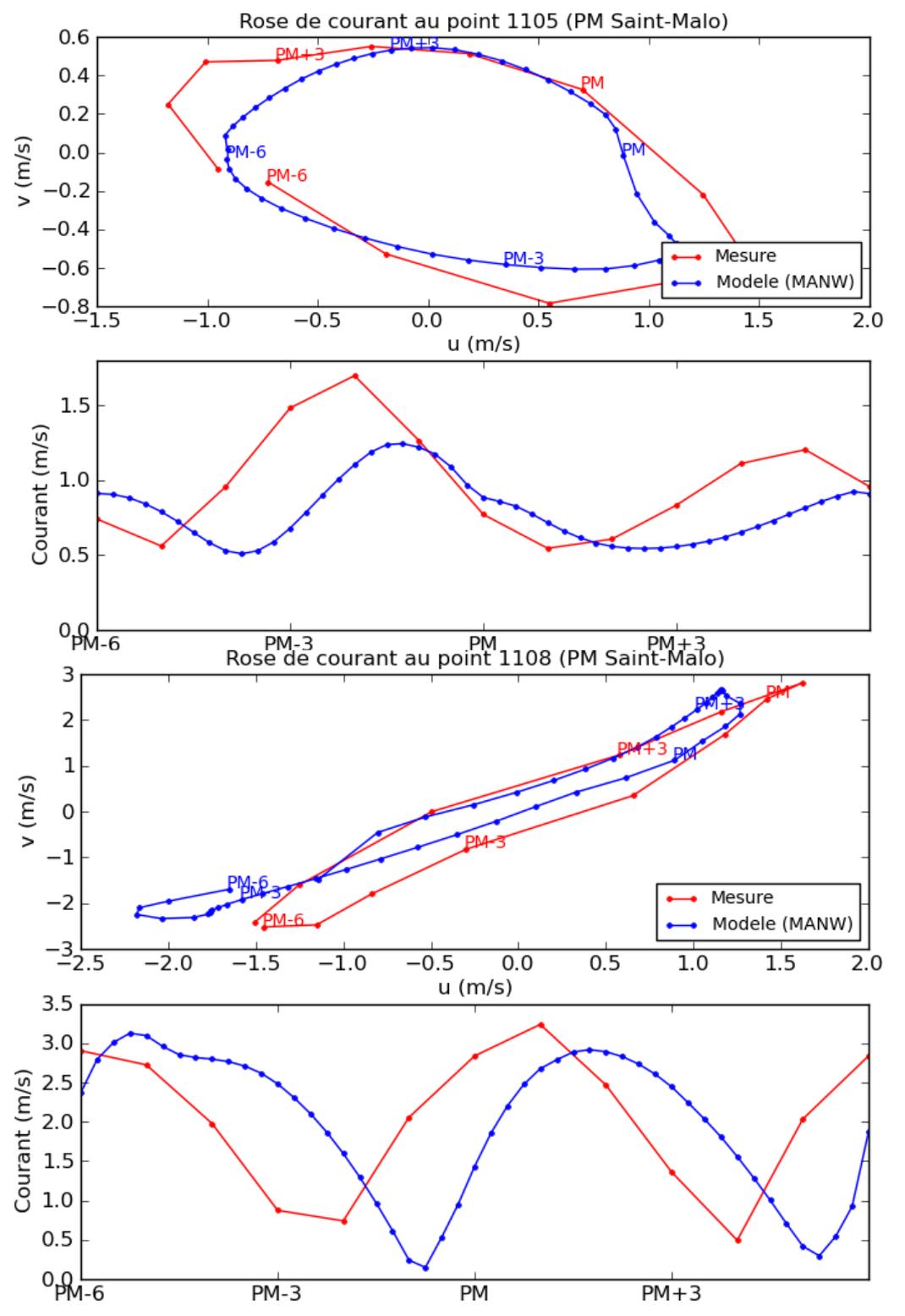


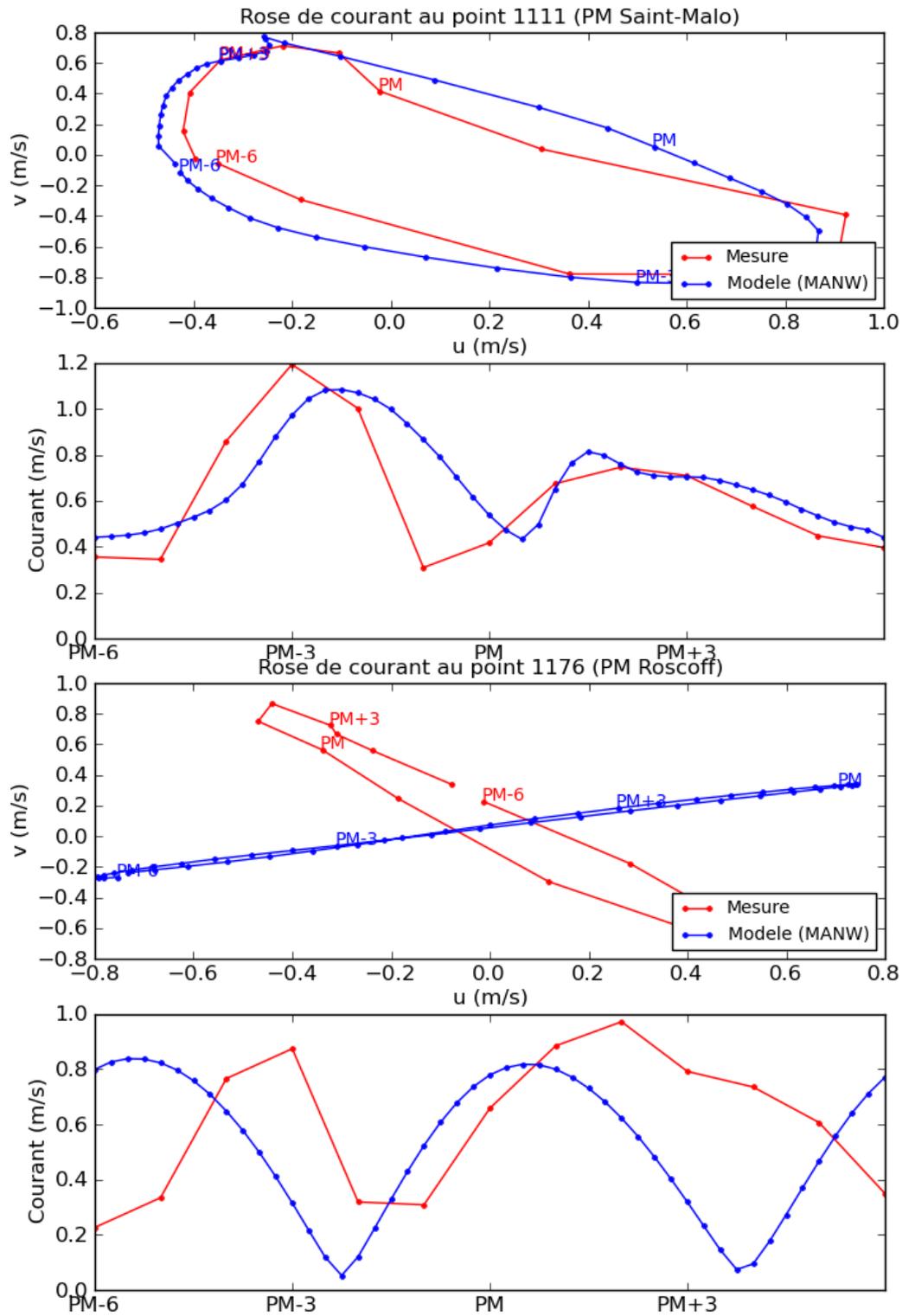


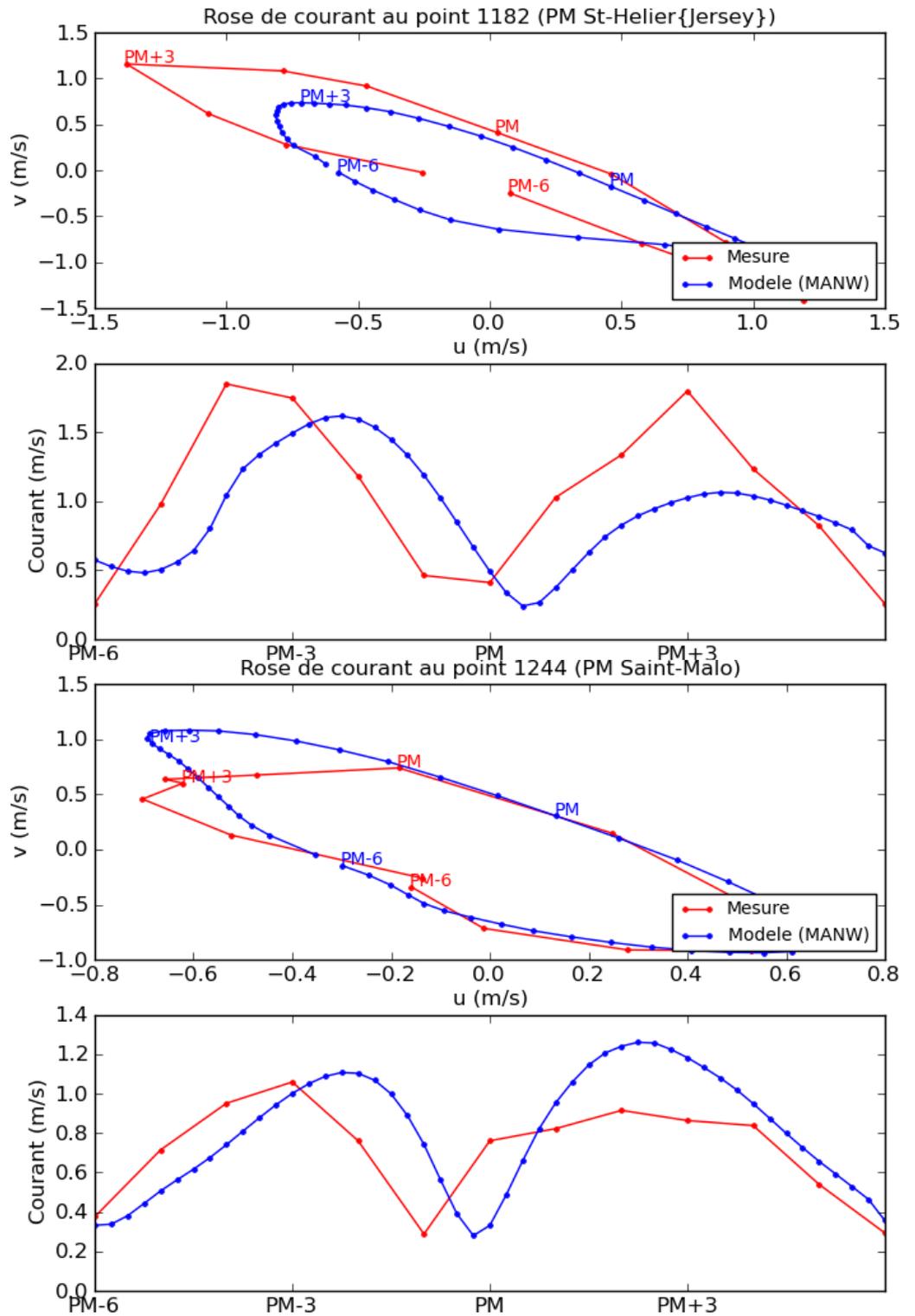


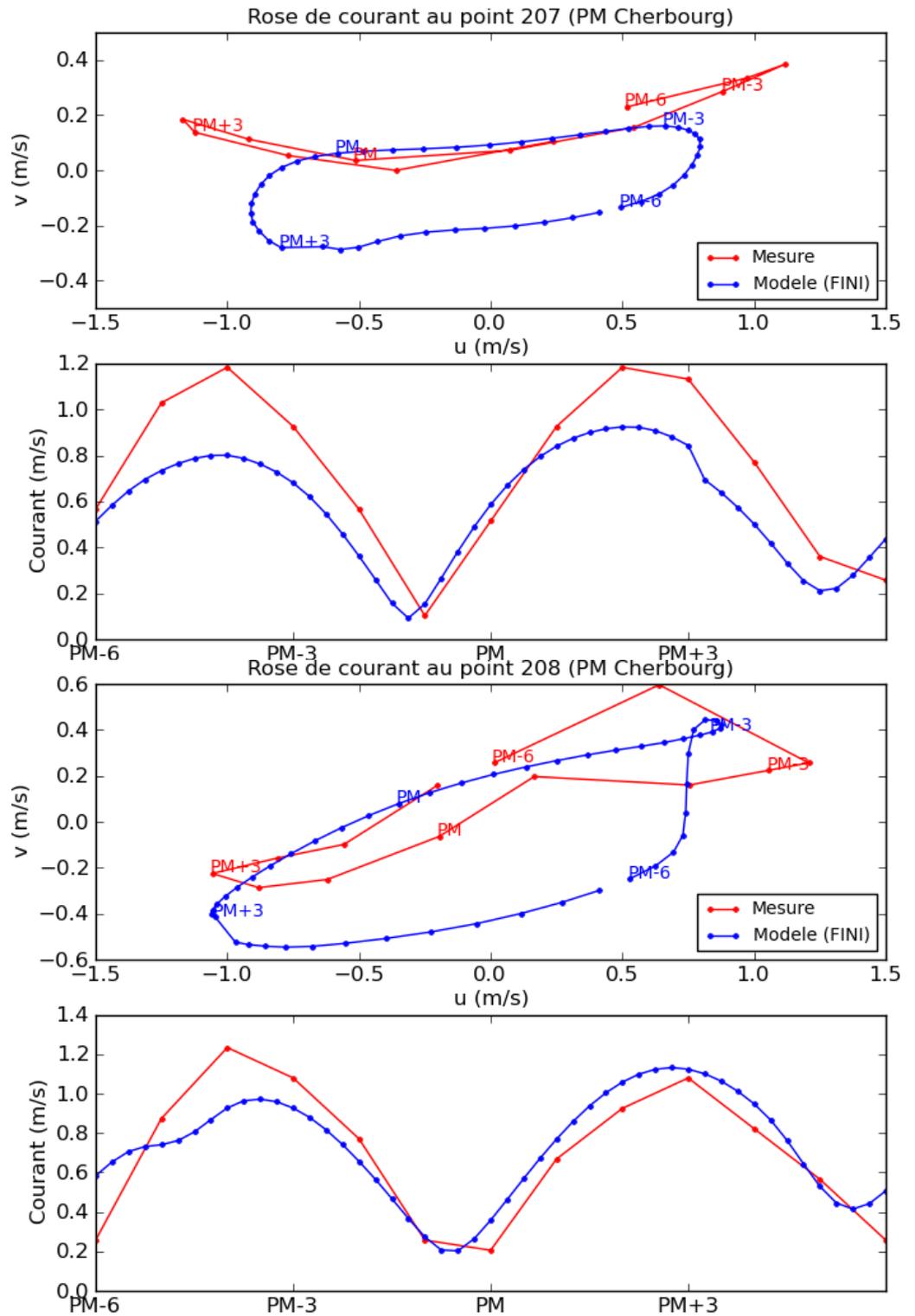


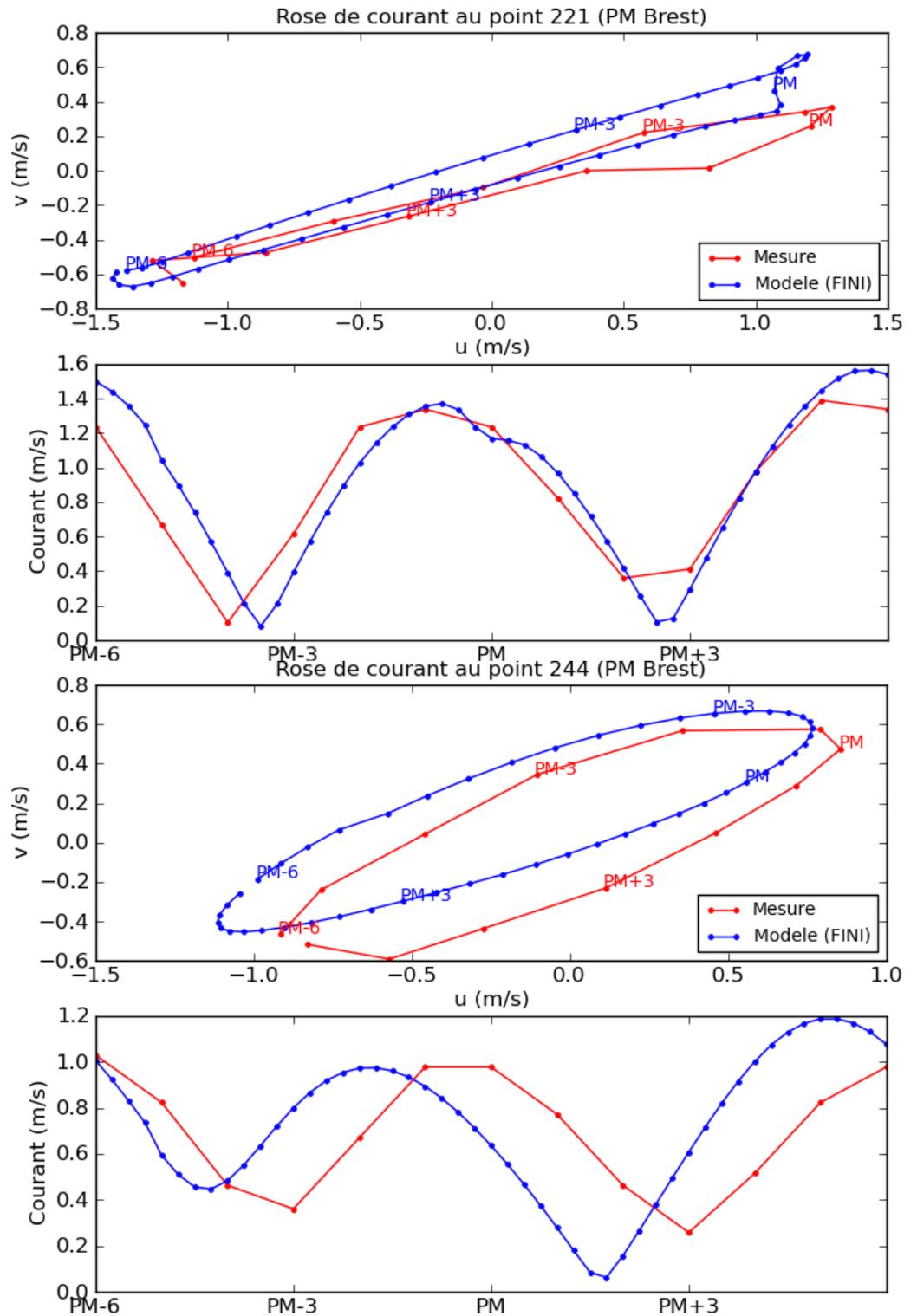


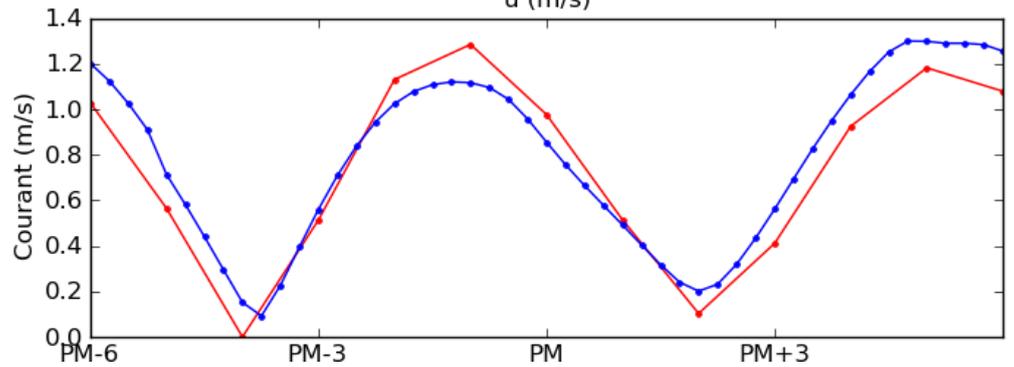
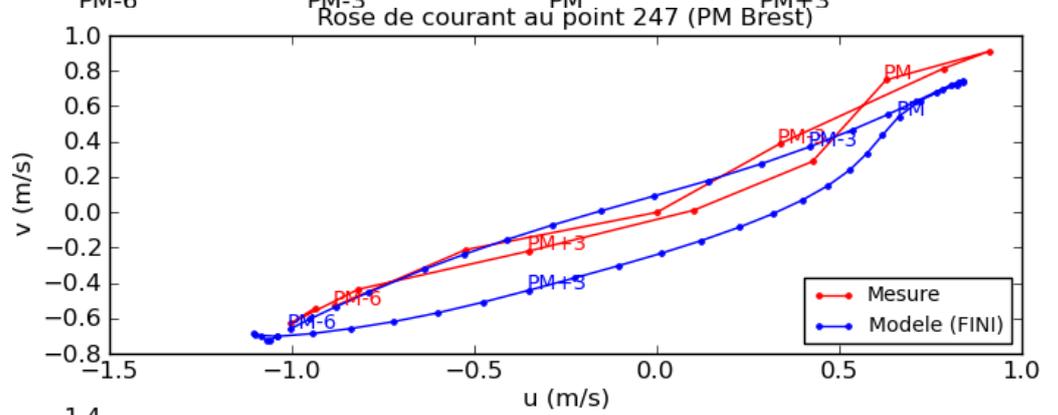
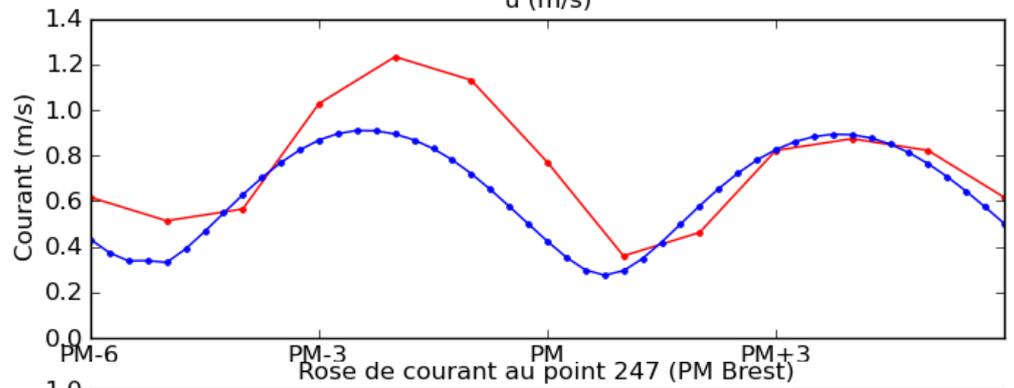
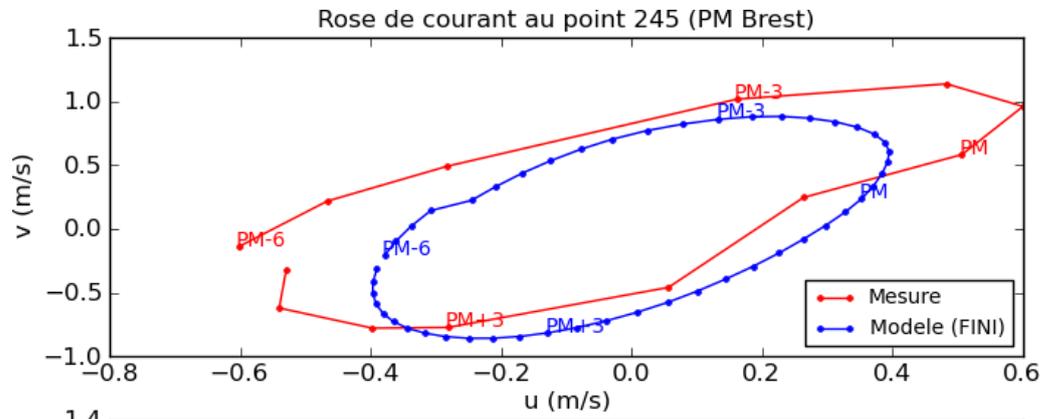


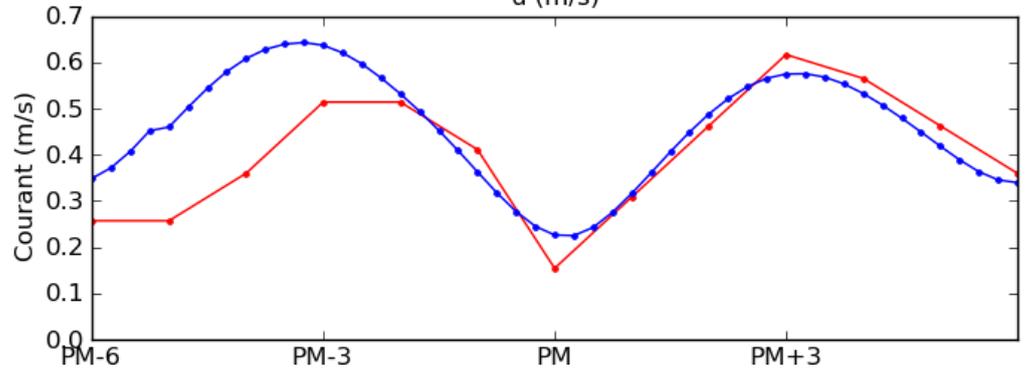
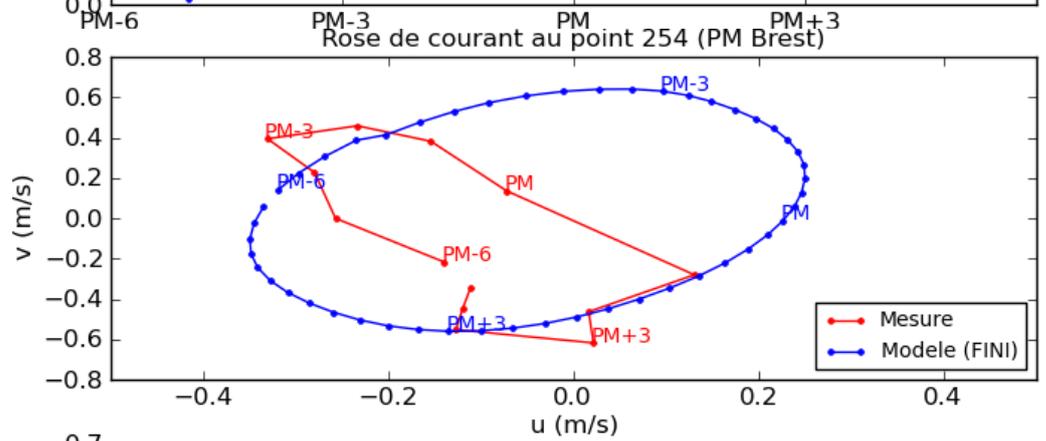
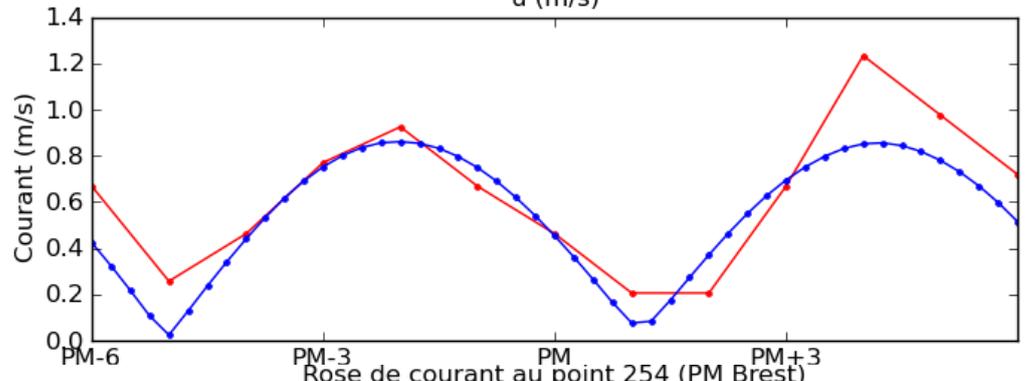
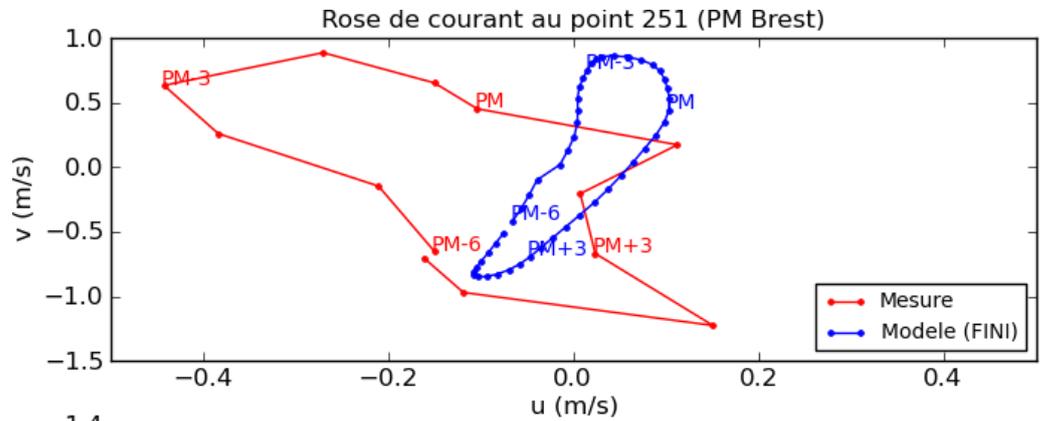


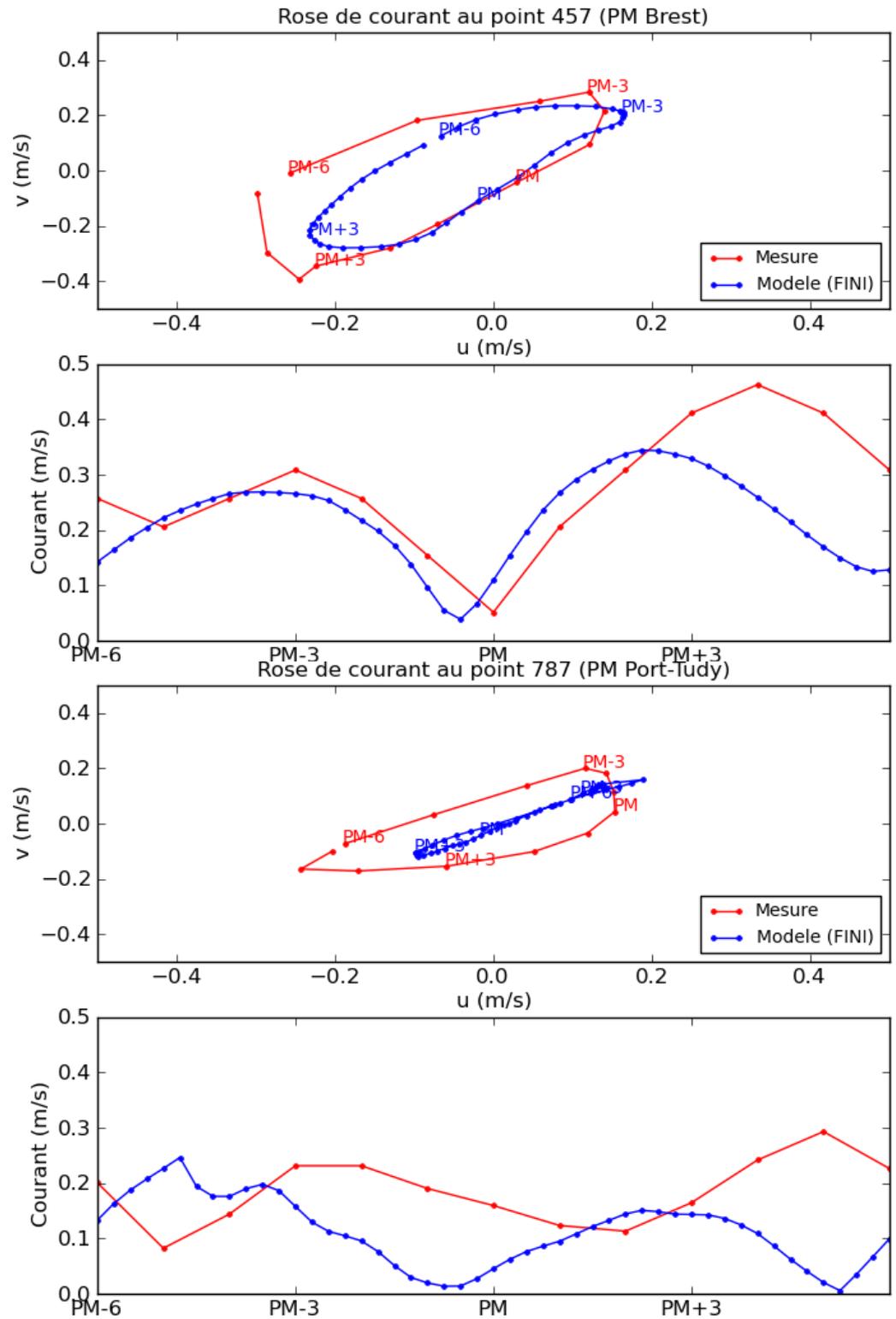


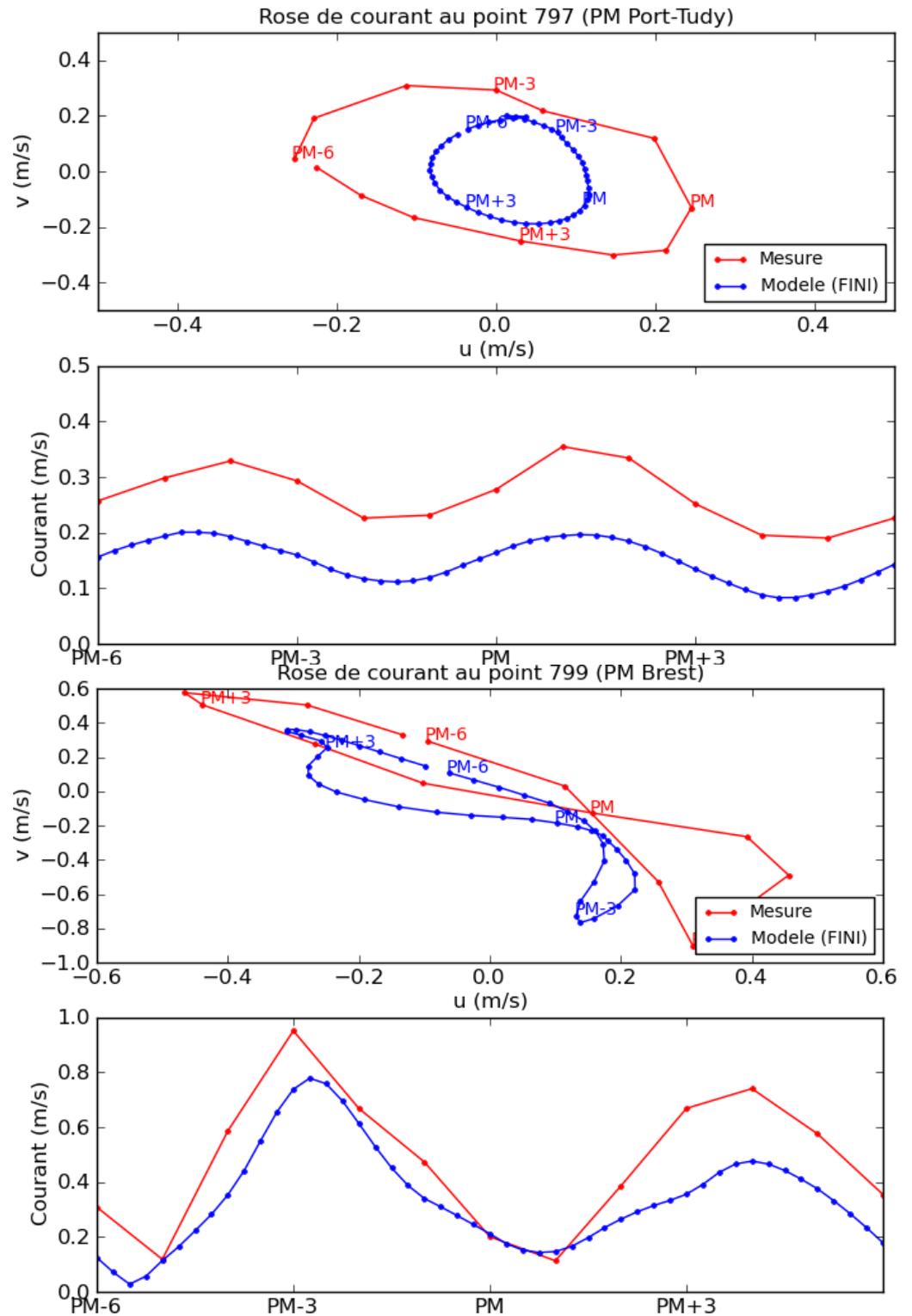


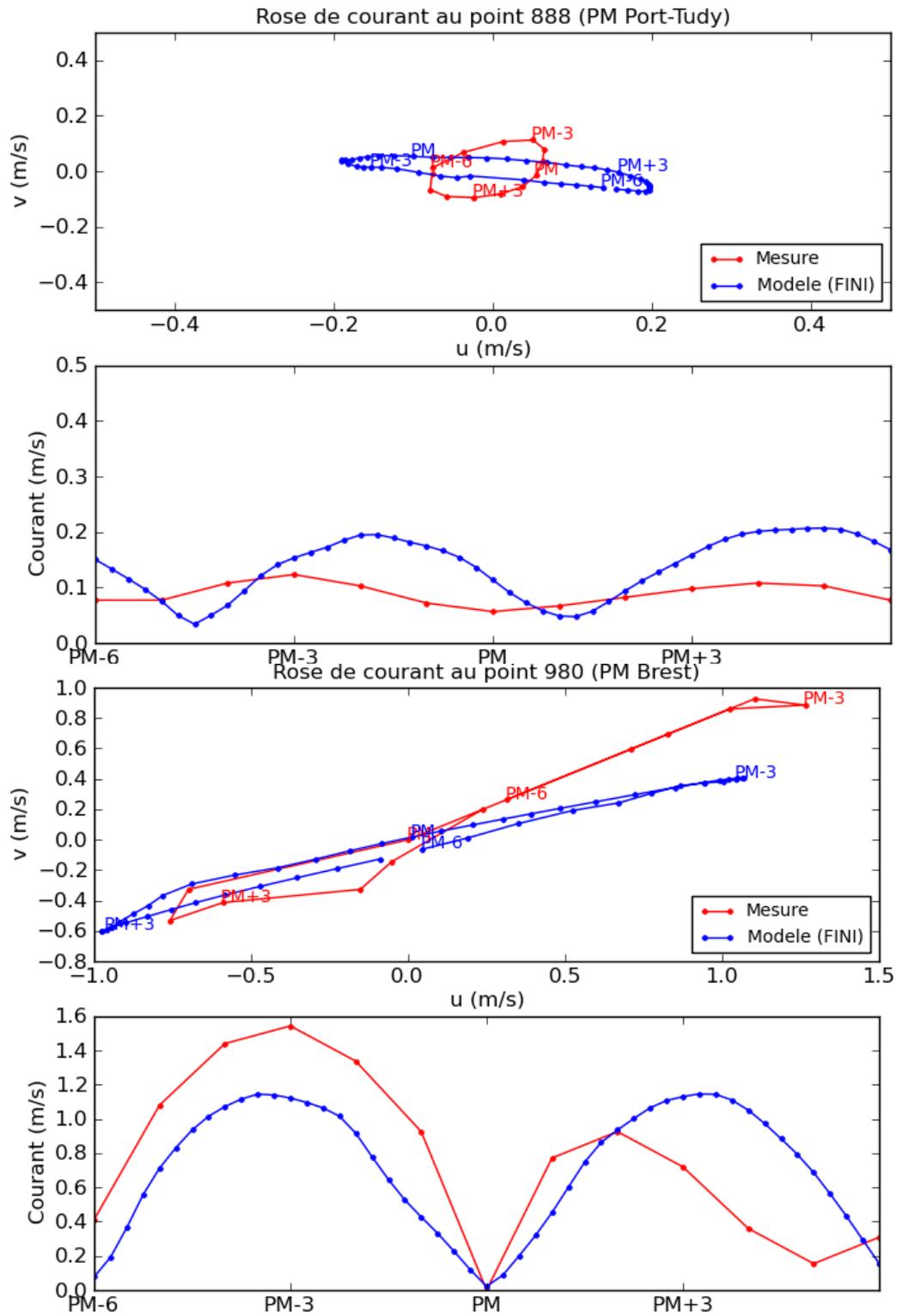


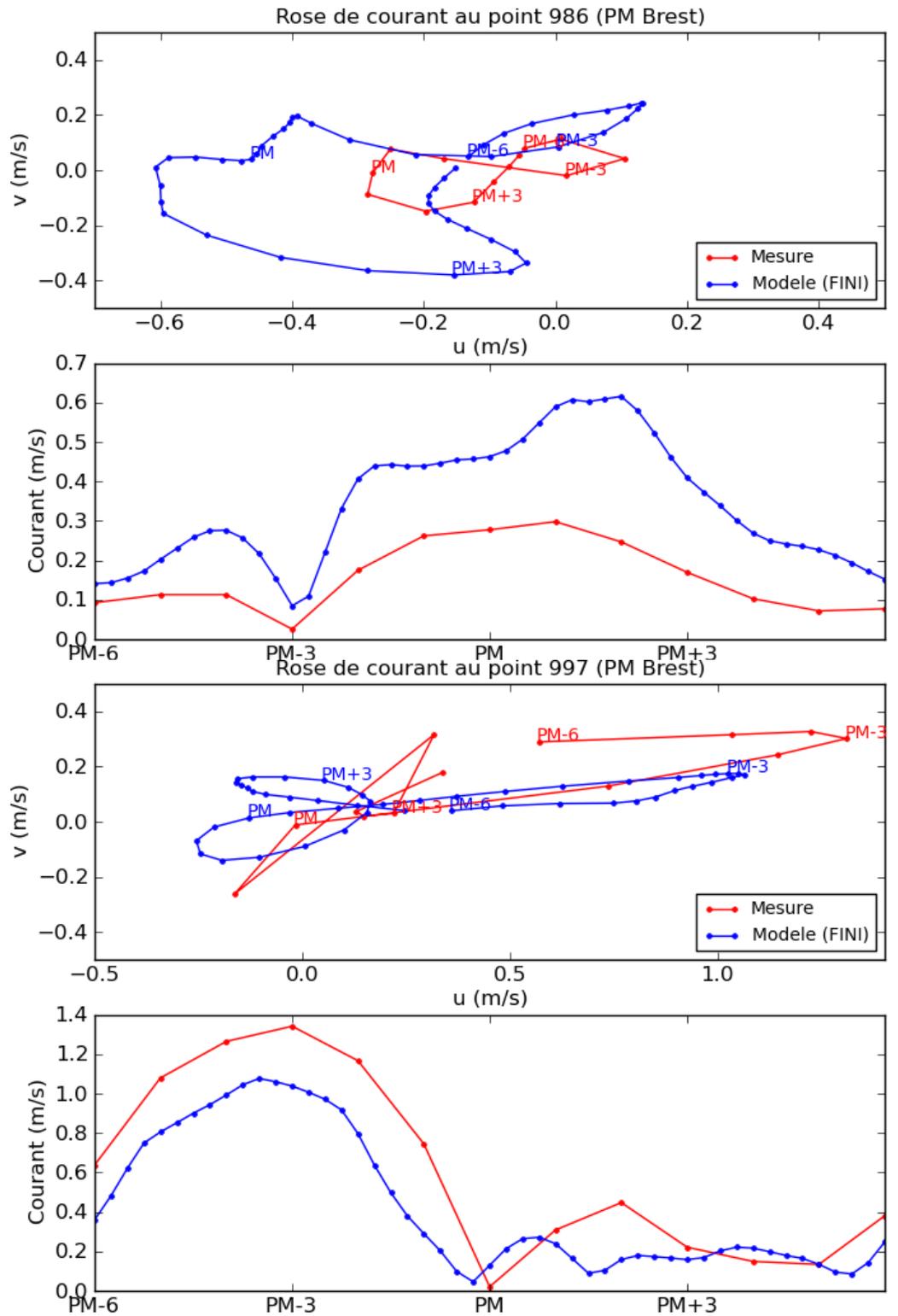


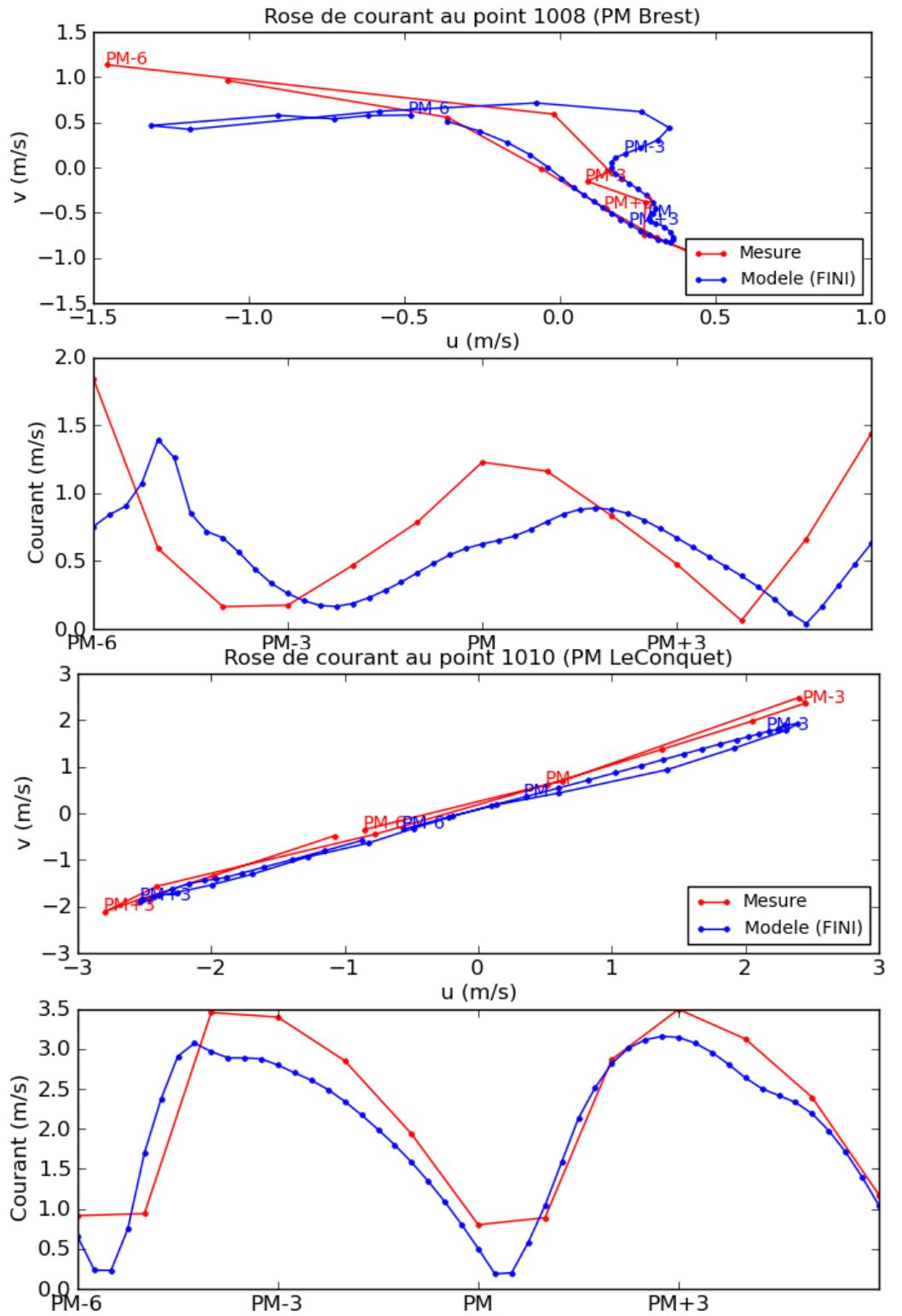


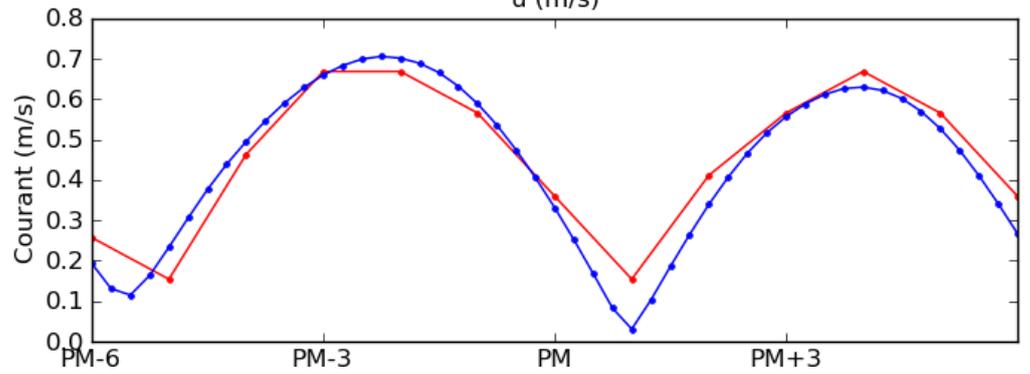
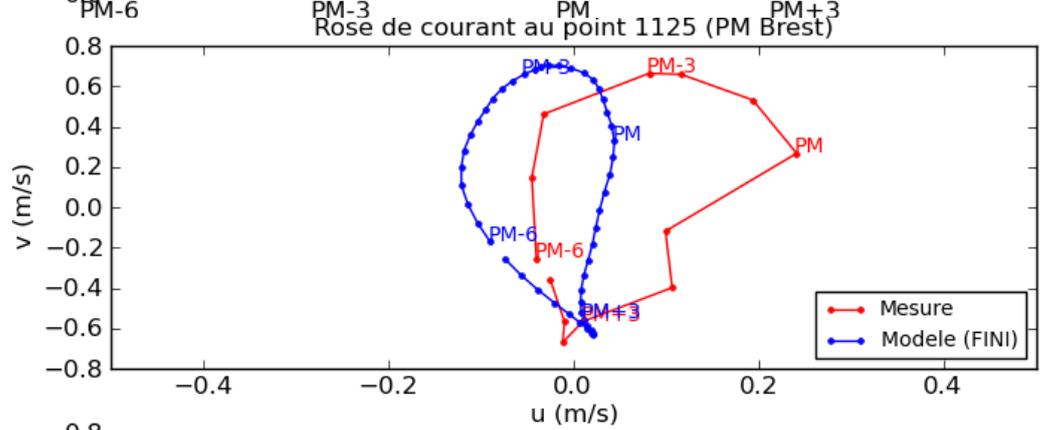
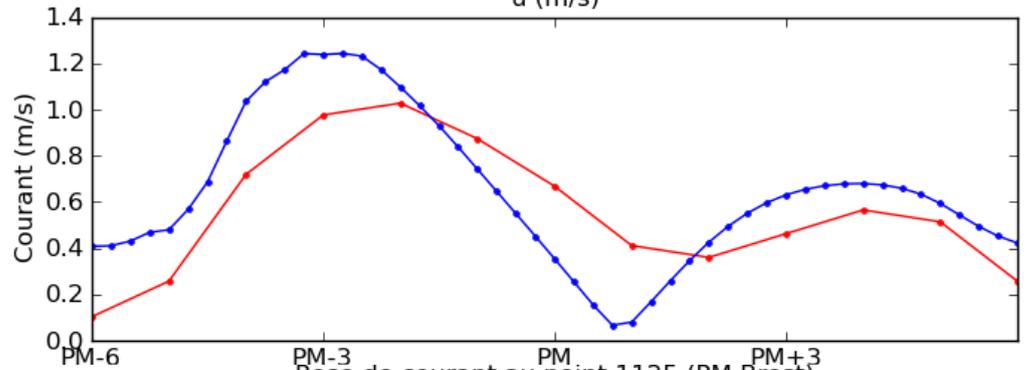
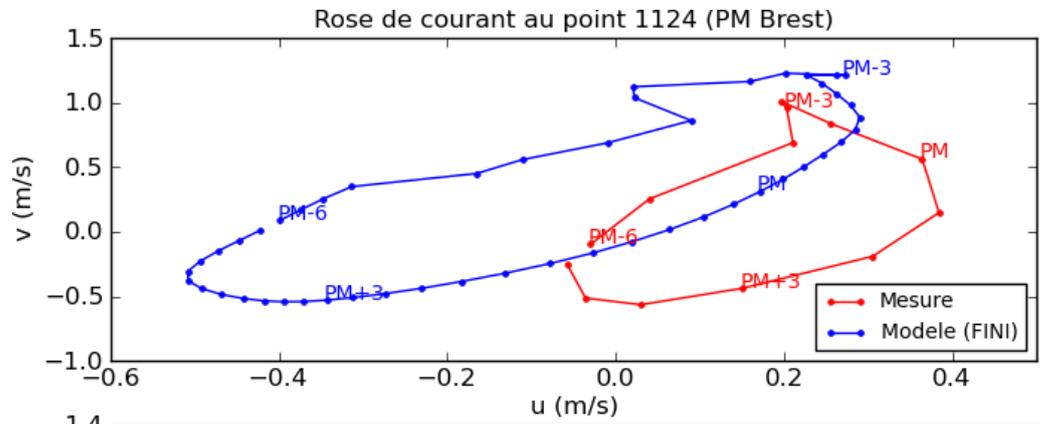


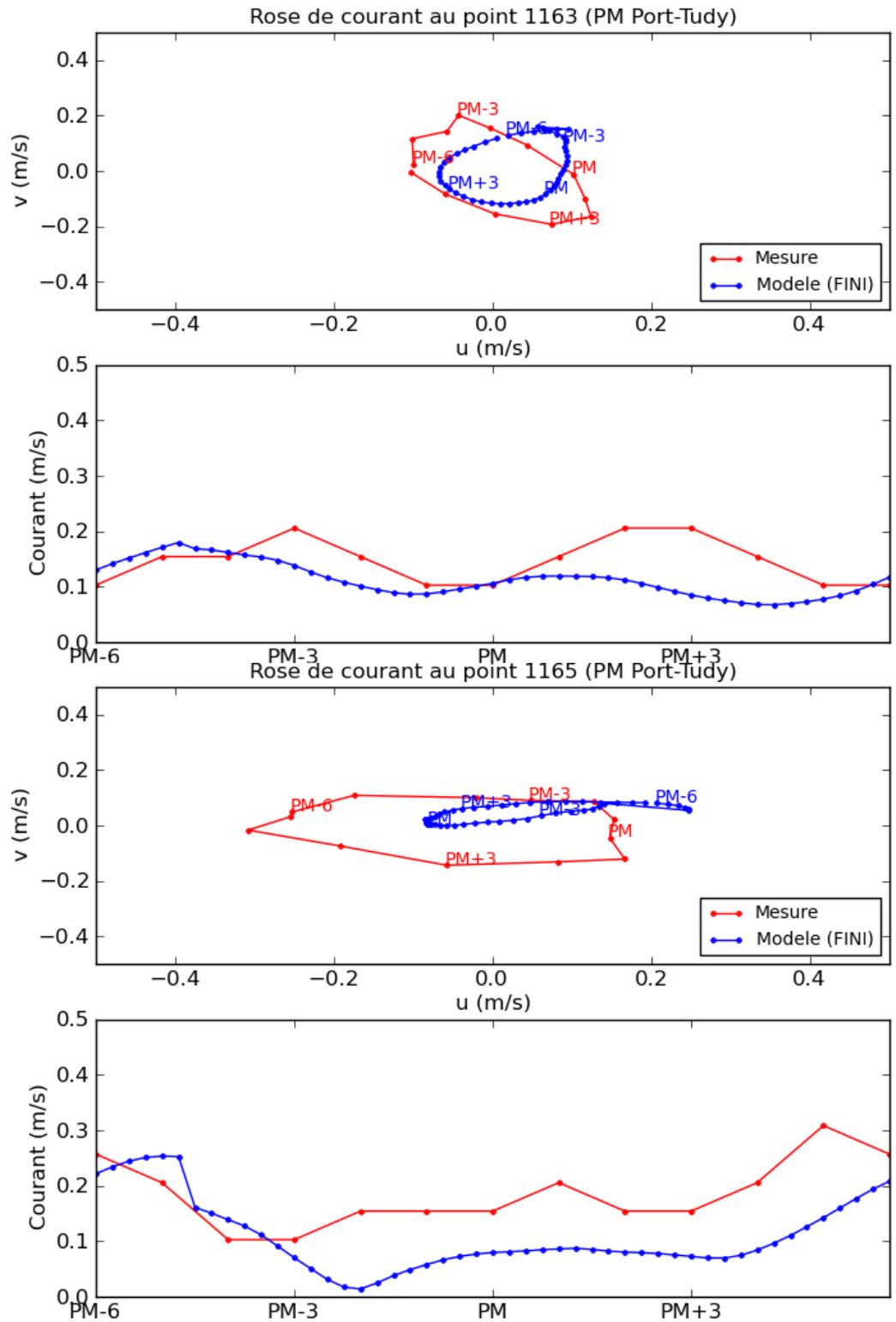


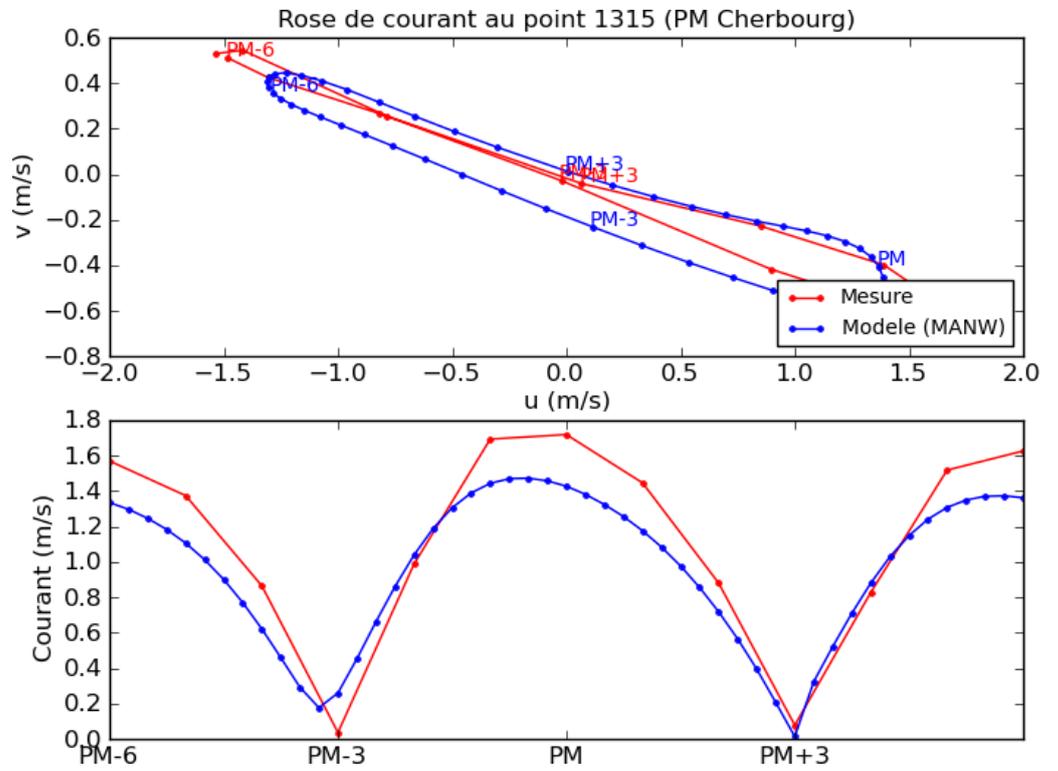


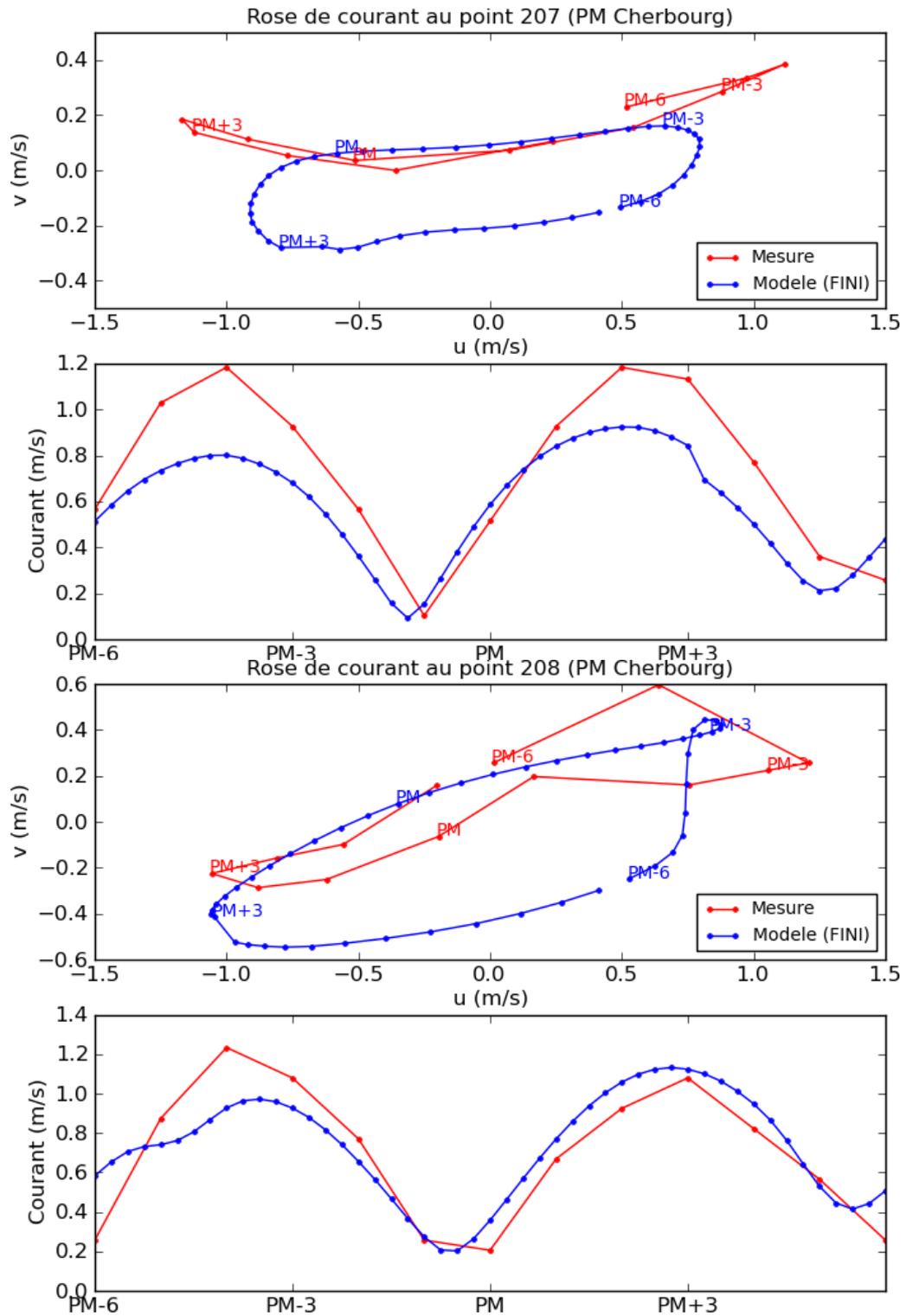


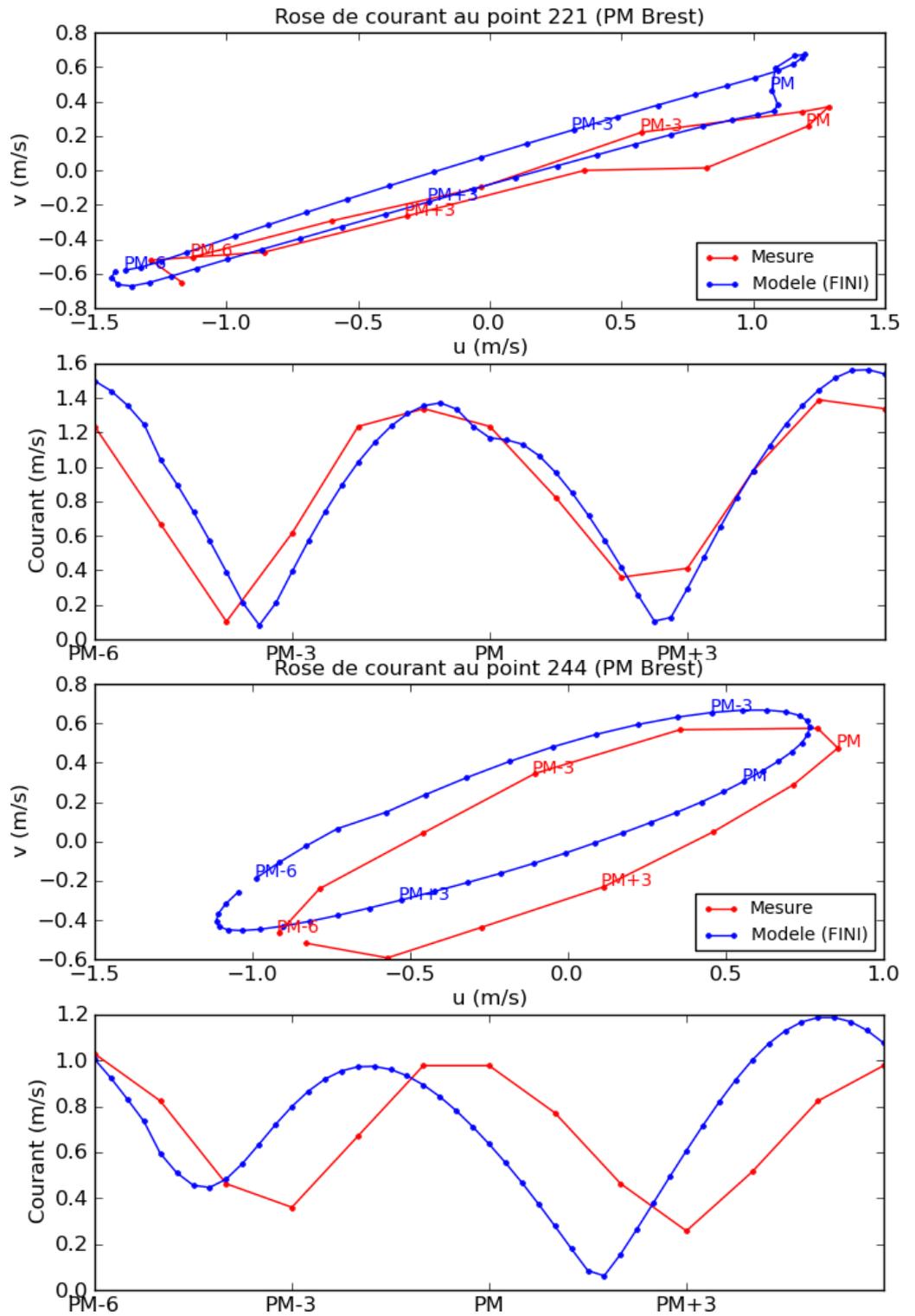


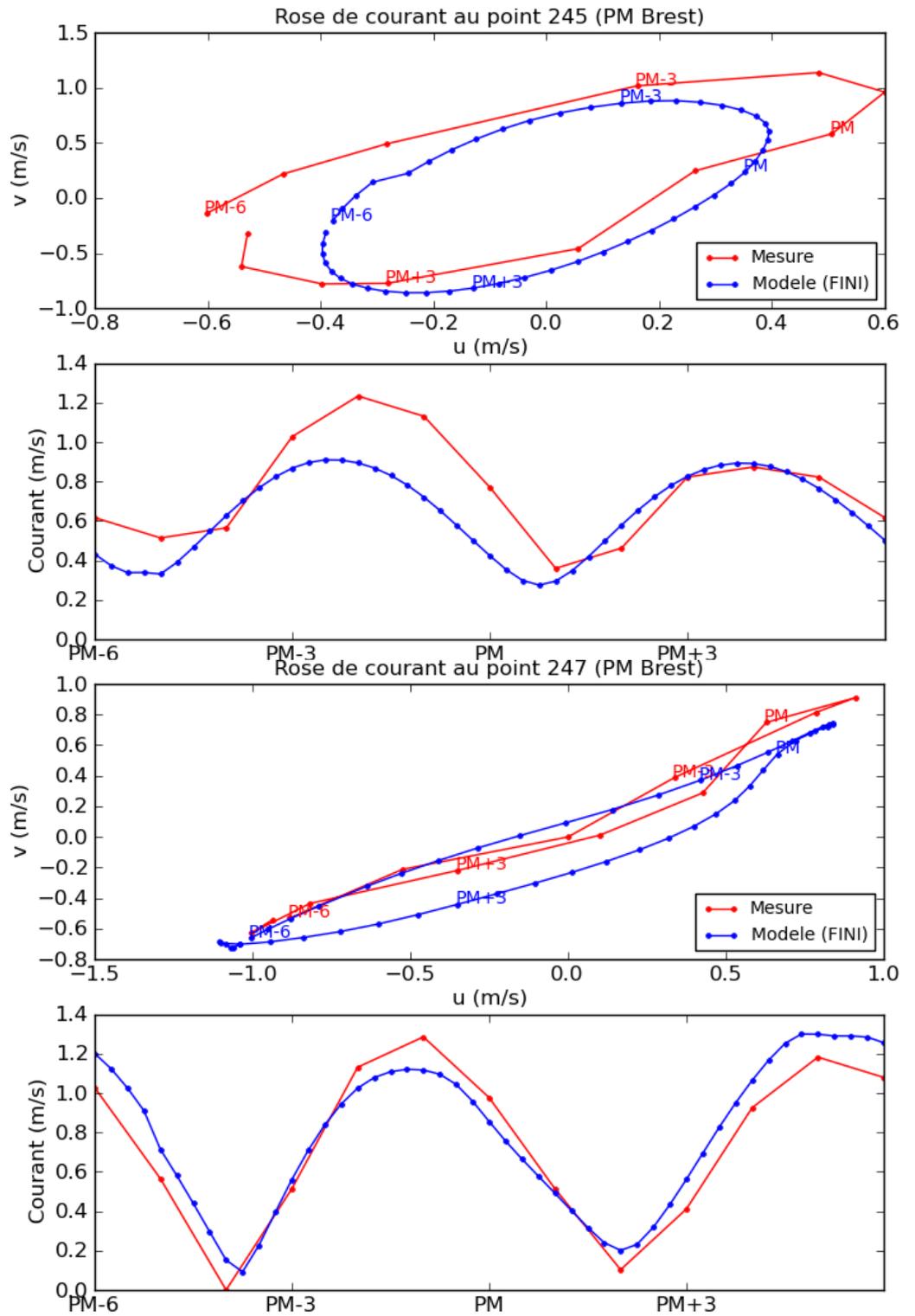


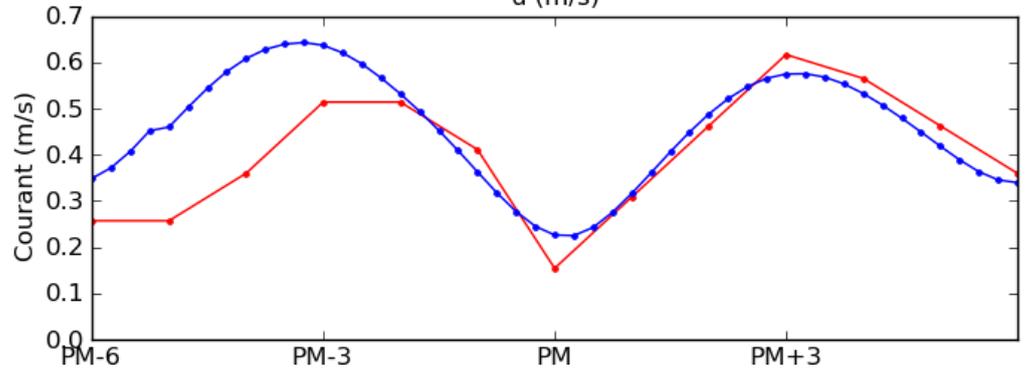
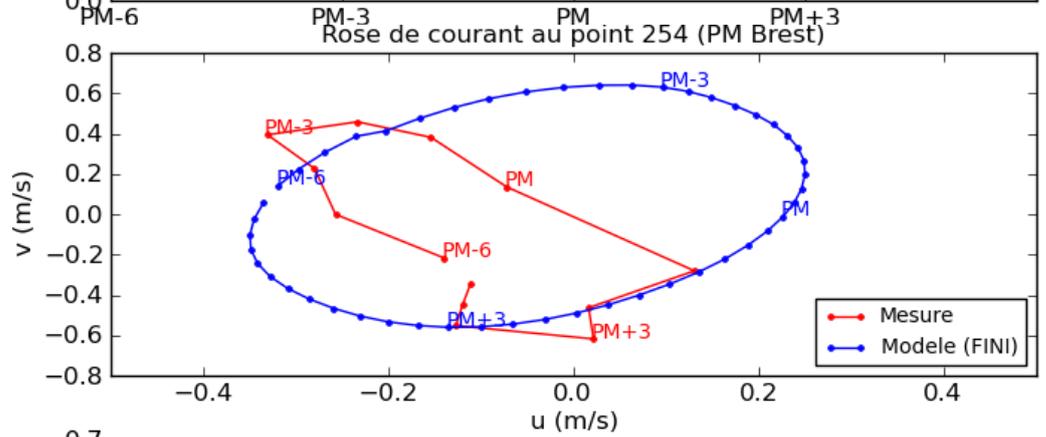
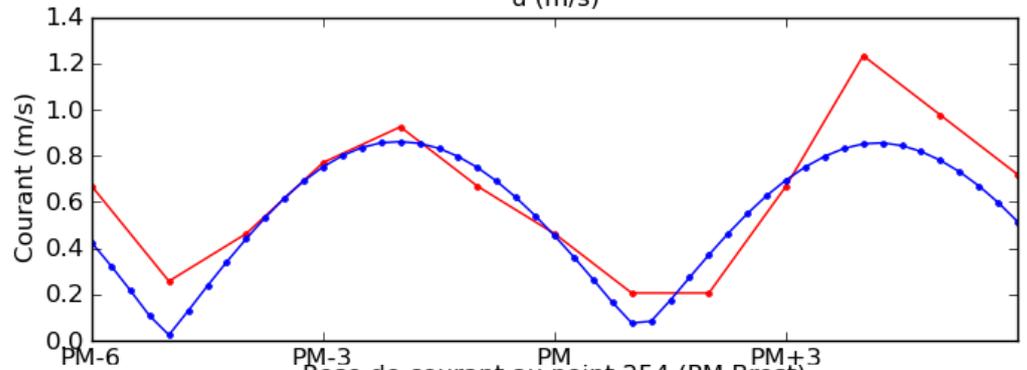
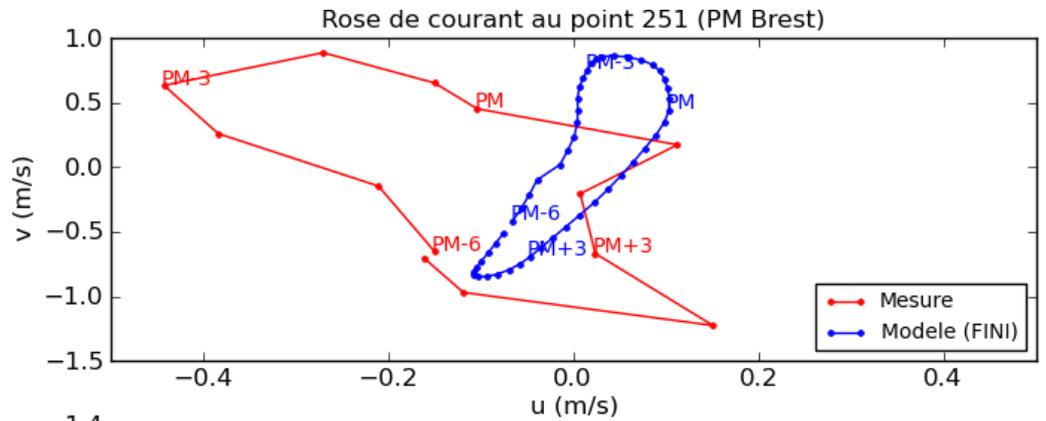


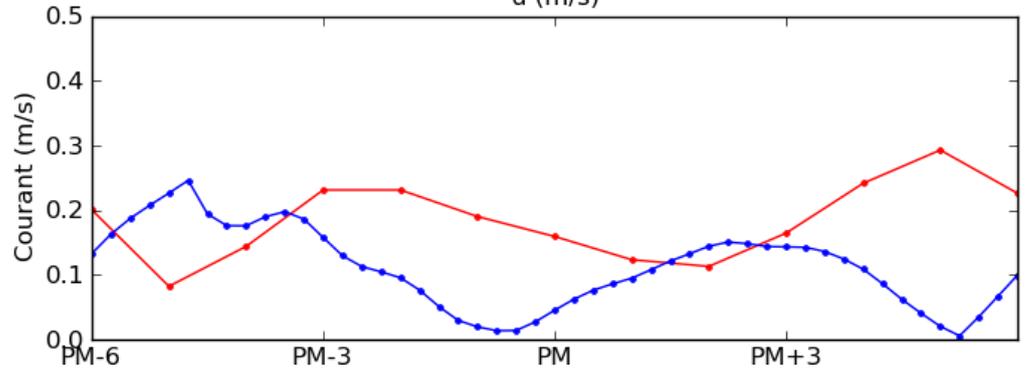
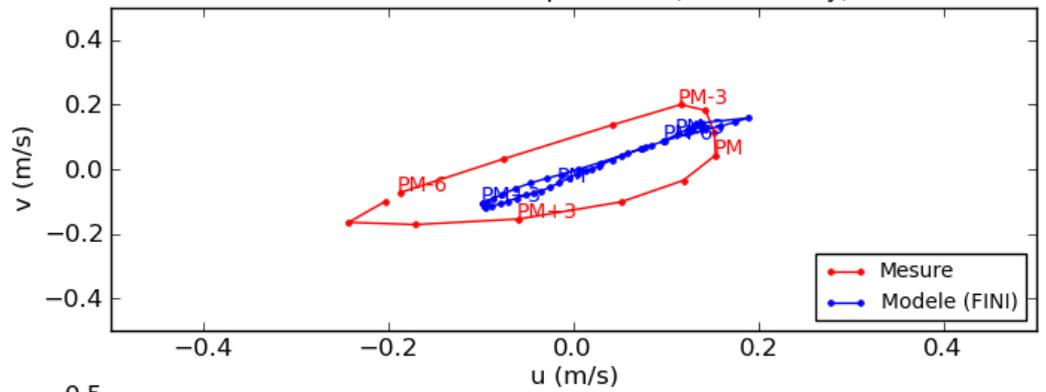
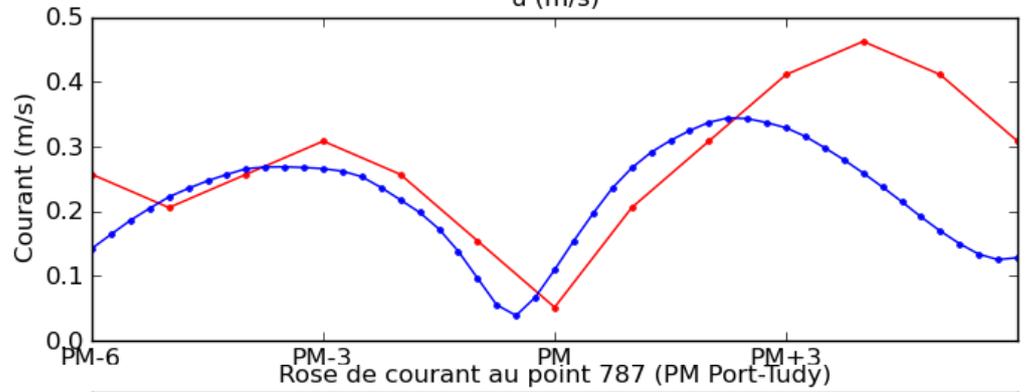
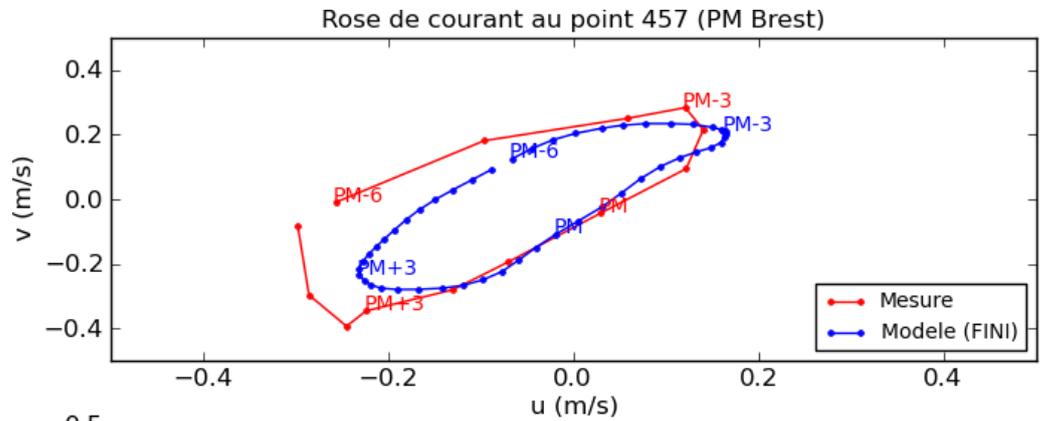


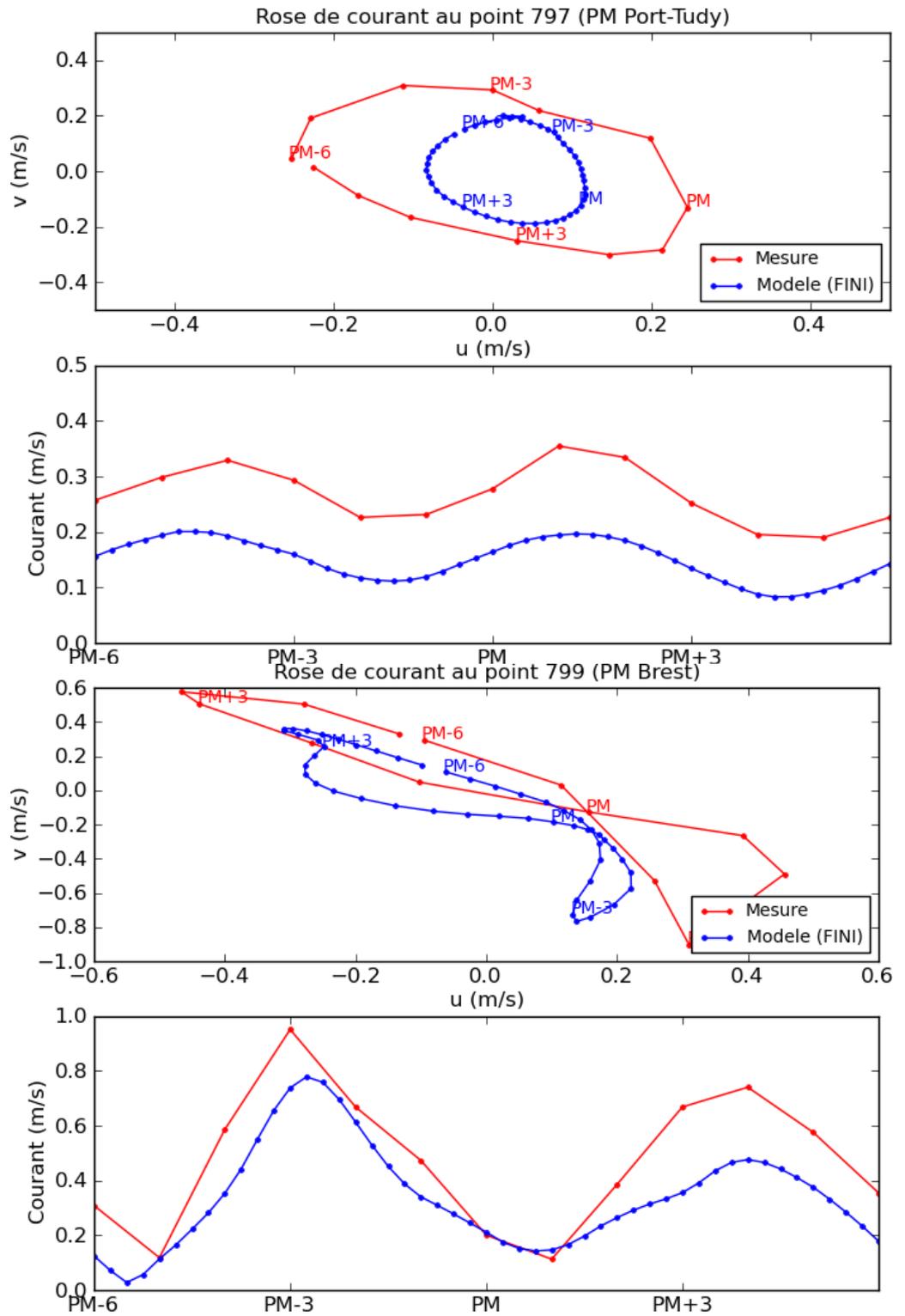


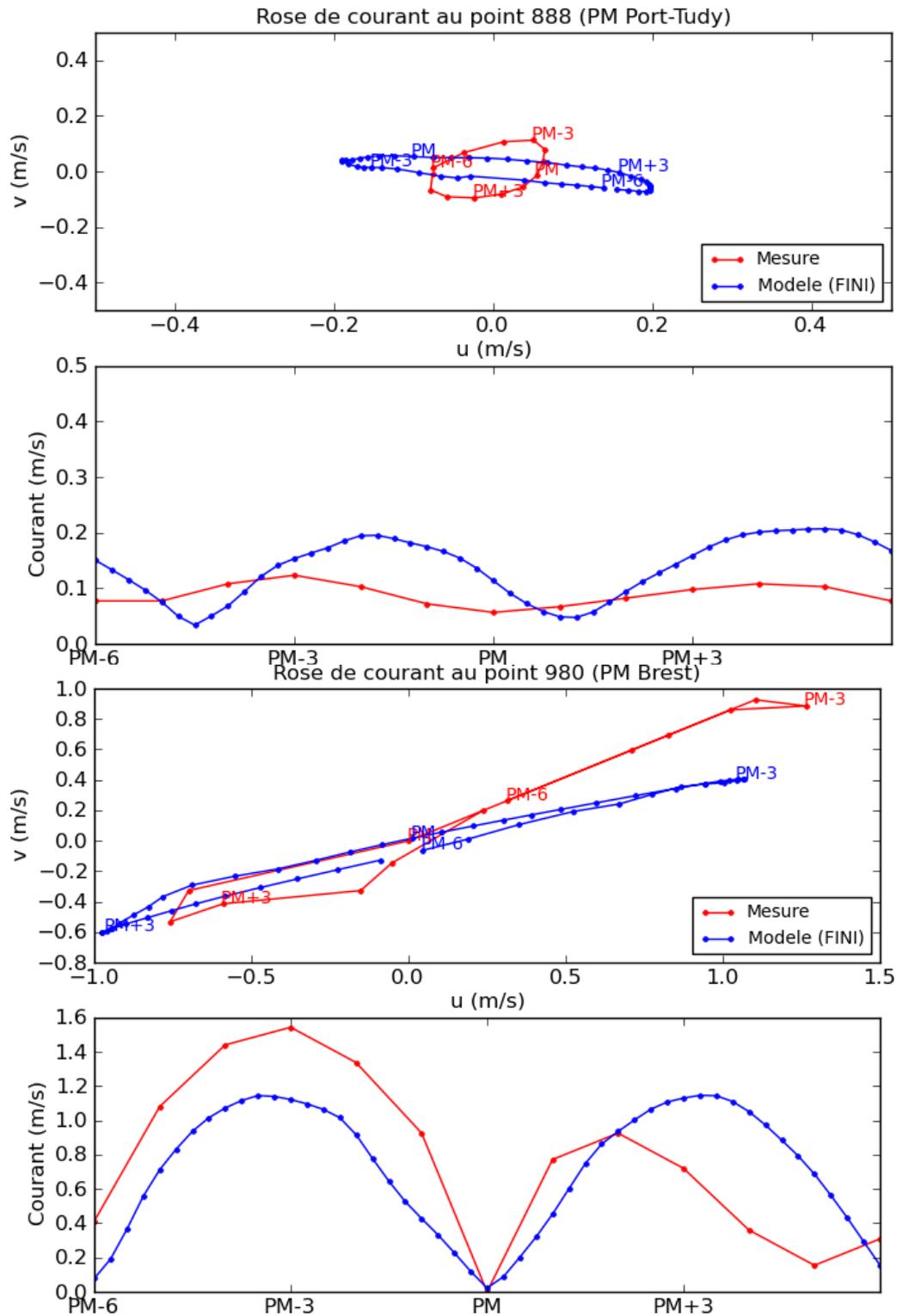


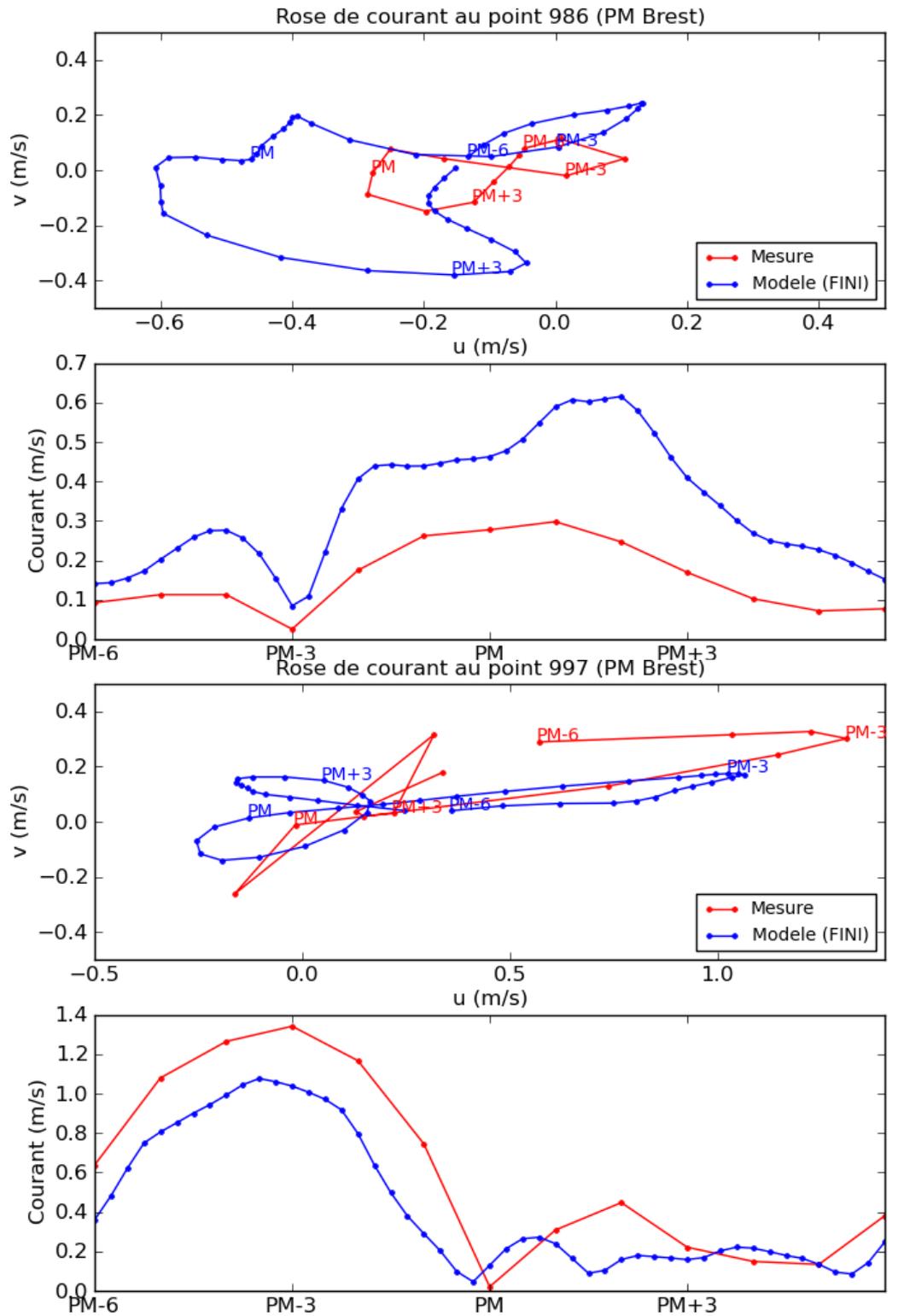


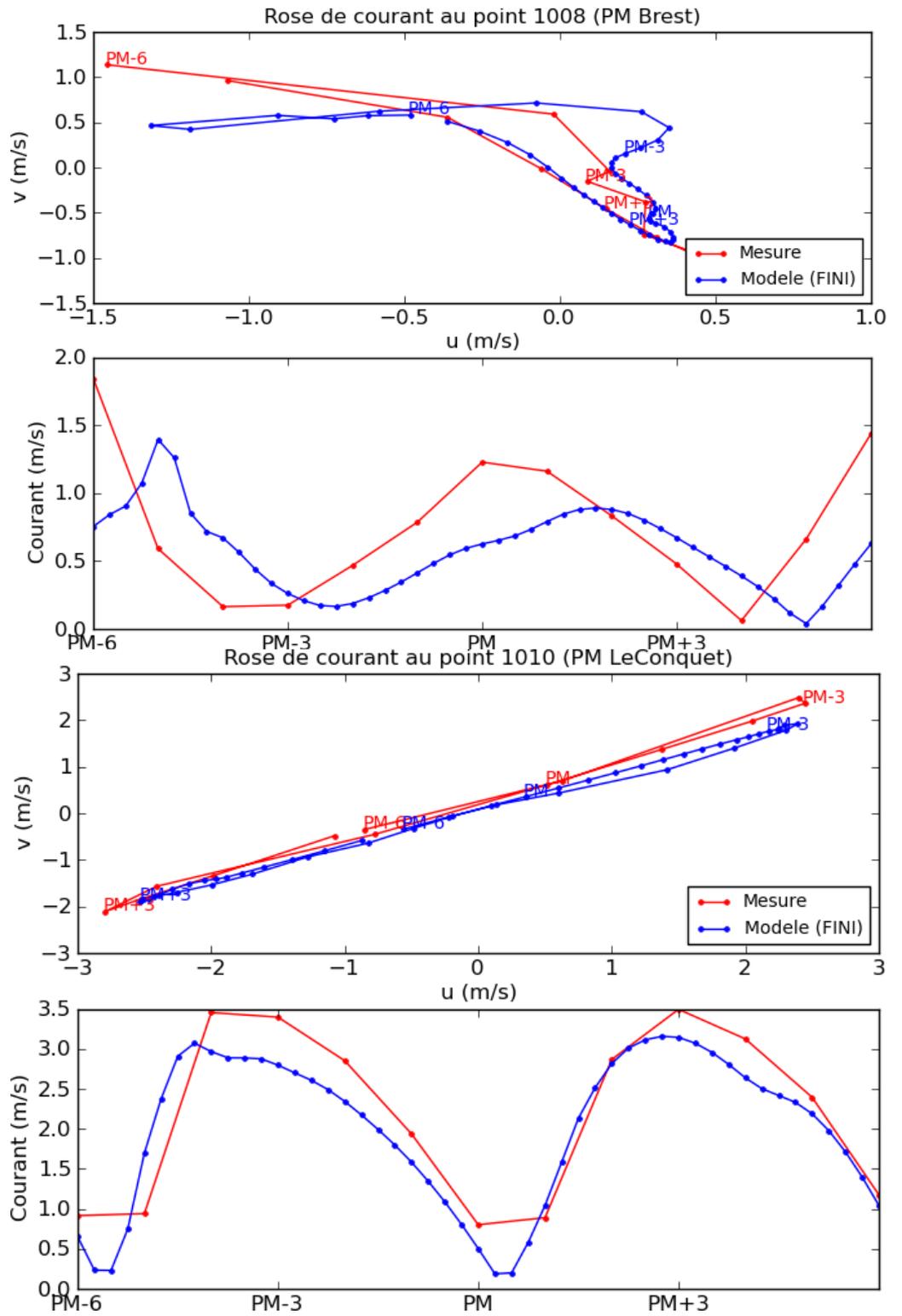


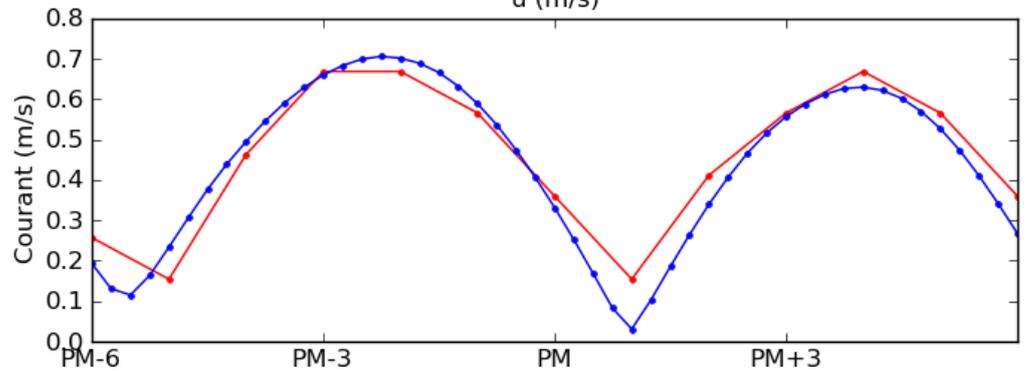
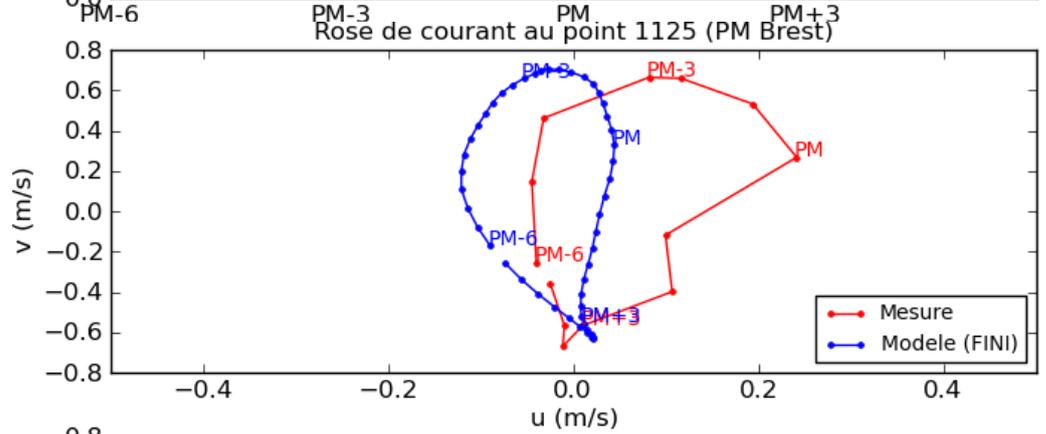
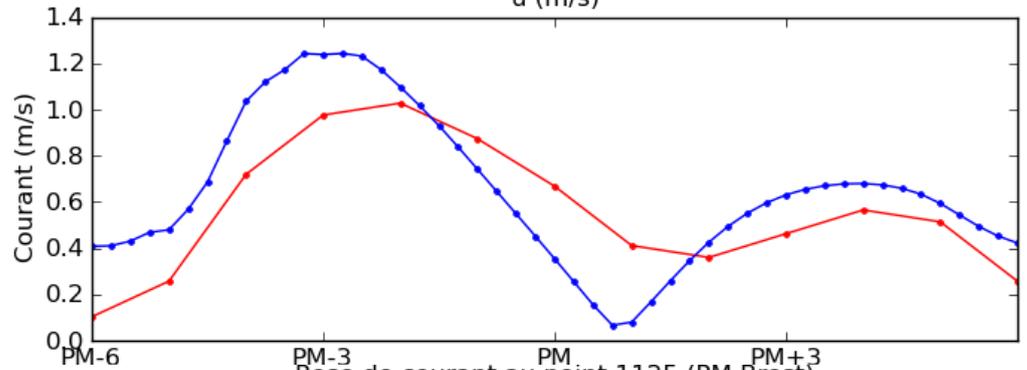
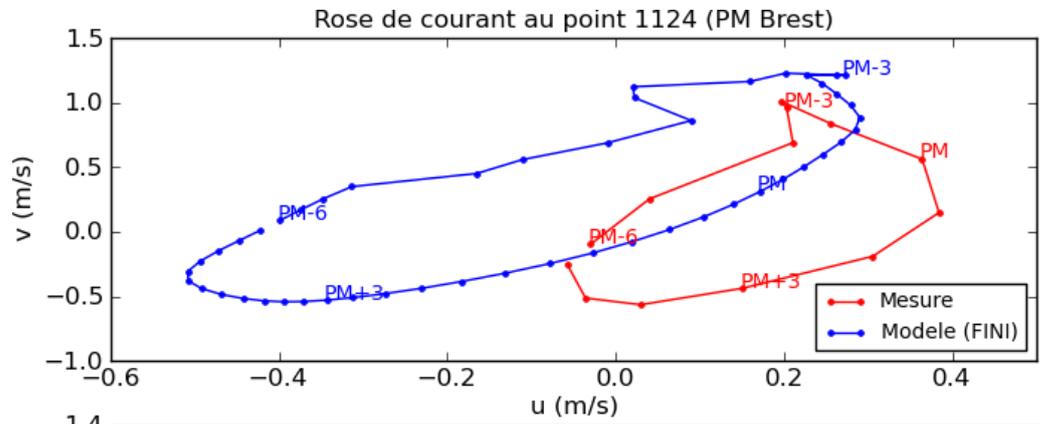




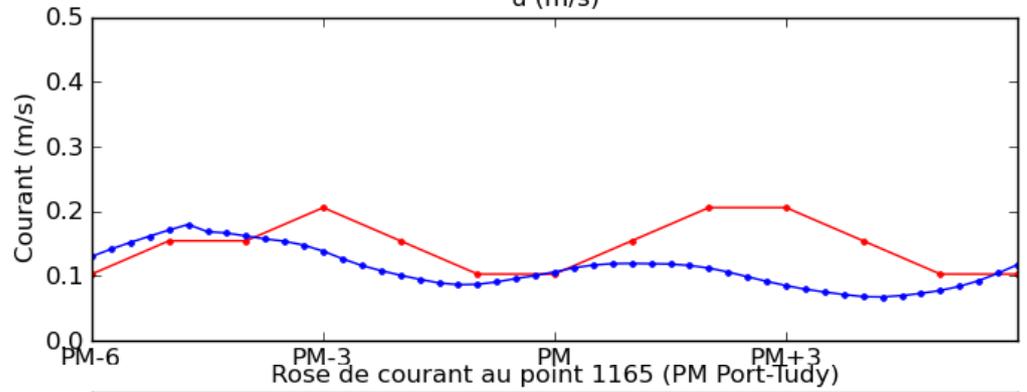
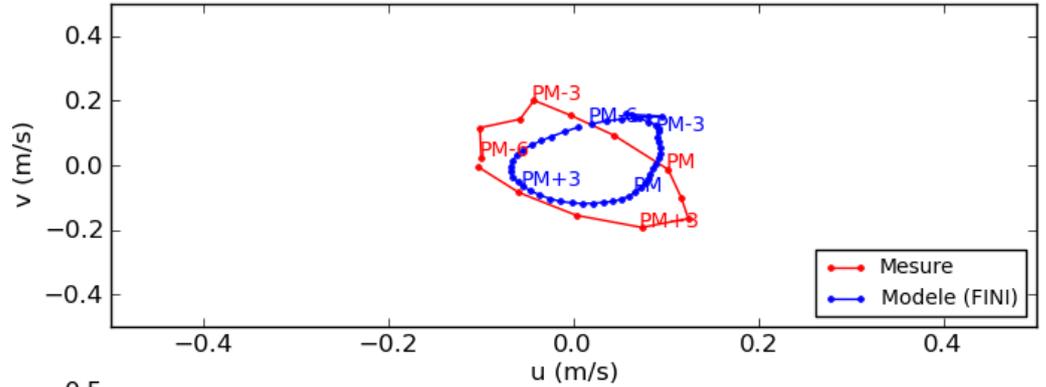








Rose de courant au point 1163 (PM Port-Tudy)



Rose de courant au point 1165 (PM Port-Tudy)

