



Service hydrographique et océanographique de la marine
Département Hydrodynamique Côtière

RAPPORT D'ETUDE

MODELE 3D DE COURANTS DE MAREE
SUR LE LITTORAL DE LA REGION DES PAYS-DE-LA-LOIRE
Modélisation numérique courantologique

Laura Troudet

DECEMBRE 2013





SOMMAIRE

| | |
|--|-----------|
| ABBREVIATIONS | 5 |
| OBJET DE L'ETUDE..... | 6 |
| INTRODUCTION | 7 |
| 1. CARACTERISTIQUES DU LITTORAL DE LA REGION DES PAYS-DE-LA-LOIRE | 9 |
| 1.1. Localisation de la zone d'étude | 9 |
| 1.2. Fonds marins | 9 |
| 1.3. Loire fluviomaritime | 10 |
| 1.4. Estrans : zones découvrantes | 10 |
| 1.5. Salinité et température | 11 |
| 1.6. Nature des fonds | 11 |
| 2. DESCRIPTION DU MODELE NUMERIQUE | 13 |
| 2.1. Présentation du modèle numérique TELEMAC 3D..... | 13 |
| 2.2. Référence altimétrique et planimétrique | 13 |
| 2.3. Emprise du modèle..... | 13 |
| 2.4. Trait de côte..... | 14 |
| 2.5. Maillage | 15 |
| 2.5.1. Maillage horizontal..... | 15 |
| 2.5.1. Maillage vertical | 15 |
| 2.6. Modèle Numérique de Terrain | 17 |
| 2.7. Conditions de forçage..... | 19 |
| 2.7.1. Forçage tidal | 19 |
| 2.7.2. Forçage fluvial | 19 |
| 2.7.3. Conditions de vent | 19 |

| | |
|--|-----------|
| 3. CALAGE HYDRODYNAMIQUE DU MODELE | 21 |
| 3.1. Période simulée | 21 |
| 3.2. Données de calage..... | 22 |
| 3.2.1. Observations du niveau d'eau..... | 22 |
| 3.2.2. Prédications du SHOM | 23 |
| 3.2.3. Mesures de courant | 24 |
| 3.3. Tests de sensibilité..... | 25 |
| 3.3.1. Frottement sur le fond et latéral | 25 |
| 3.3.2. Optimisation du maillage | 26 |
| 3.3.3. Paramétrisation générale du modèle | 27 |
| 3.4. Analyse quantitative du modèle..... | 28 |
| 3.5. Résultats de calage en niveaux d'eau..... | 29 |
| 3.7.1. Comparaisons du modèle avec les mesures marégraphiques..... | 29 |
| 3.7.2. Comparaisons du modèle avec les prédictions du SHOM | 30 |
| 3.6. Résultats de calage en vitesse | 31 |
| 4. EXPLOITATION DU MODELE..... | 33 |
| 4.1. Conditions de forçage pour des marées types..... | 33 |
| 4.1.1. Forçage tidal | 33 |
| 4.1.2. Forçage fluvial | 33 |
| 4.2. Validation des niveaux d'eau..... | 33 |
| 4.3. Validation des courants | 35 |
| CONCLUSION | 39 |
| REFERENCES | 40 |
| ANNEXES | 41 |

ABBREVIATIONS

ADCP : Acoustic Doppler Current Profiler

BDBS : Base de Données Bathymétriques du SHOM

BM : Basse mer

C : Coefficient de marée

EMR : Energies Marines Renouvelables

GEOPAL : Portail Géographique des Pays-de-la-Loire

GPMNSN : Grand Port Maritime de Nantes Saint-Nazaire

GIP: Groupement d'Intérêt Public

LNHE : Laboratoire National d'Hydraulique et Environnement

EDF-R&D : Electricité de France – Recherche et Développement

MAE : Mean Absolute Error

MNT: Modèle Numérique de Terrain

MNTU: Modèle Numérique de Terrain Unifié

PHMA: Plus Hautes Mers Astronomiques

PM : Pleine mer

REFMAR : Réseaux de référence des observations marégraphiques

RMSE : Root Mean Square Error

SHOM: Service hydrographique et océanographique de la marine

TDB : Tide Data Base

OBJET DE L'ETUDE

Compte tenu de l'état de maturité des EMR en France, l'implantation d'hydroliennes devrait suivre très prochainement celle des éoliennes en mer. Pour cette forme d'énergie la connaissance des courants marins sur toute la hauteur de la colonne d'eau revêt un caractère primordial.

Une convention GEOPAL a été établie entre l'Etat, la Région des Pays-de-la-Loire et le SHOM. Il s'agit d'une convention de partenariat relative à la réalisation d'acquisitions de la connaissance du milieu marin sur le littoral des Pays-de-la-Loire dans le but de favoriser l'exploitation des EMR. Un modèle hydrodynamique de courants de marée en trois dimensions a été développé par le SHOM dans le cadre de la convention. L'emprise de l'étude comprend la totalité du littoral de la région des Pays-de-la-Loire. Le modèle a pour but de reproduire la circulation des courants de marée aux abords de ce littoral.

INTRODUCTION

Le modèle numérique courantologique, mis en œuvre dans le cadre de la convention GEOPAL, a pour finalité de représenter correctement la propagation de la marée, et le courant induit, du large à la côte sur le littoral de la région des Pays-de-la-Loire.

L'emprise de l'étude comprend la totalité du littoral de la région des Pays-de-la-Loire incluant l'estuaire de la Loire dans sa partie maritime. L'étude concerne uniquement la partie maritime du littoral. L'estuaire de la Loire est cependant intégré au modèle de par sa proximité et son impact hydrodynamique sur les eaux littorales.

La modélisation hydrodynamique repose sur le système de modélisation aux éléments finis TELEMAC-3D, développé par le LNHE d'EDF-R&D. Cet outil permet de simuler le courant côtier et notamment sa répartition et distribution verticale et correspond parfaitement aux attentes de l'étude.

Une représentation fine des variations des niveaux d'eau et des courants côtiers engendrés par la marée et le forçage fluvial est primordiale en milieu fluviomaritime. Le calage du modèle est réalisé à la fois en niveau d'eau et en vitesse sur des périodes réelles. Ces grandeurs sont évidemment liées et le calage en vitesse dépend prioritairement du calage en niveau d'eau et de la diffusion turbulente horizontale comme verticale. Il est important de disposer de mesures du niveau d'eau fiables et étendues sur la zone d'étude de par son emprise. La validation hydrodynamique du modèle est réalisée par comparaison à des mesures marégraphiques du SHOM mais aussi de partenaires REFMAR tel que le GPMNSN, et par comparaison à des mesures de profils de courants obtenus par ADCP immergés.

Le produit courant de marée 3D résultant de l'exploitation du modèle doit représenter sur trois niveaux de profondeurs (surface, mi-profondeur et fond) un cycle de marée heure par heure pour une morte-eau et une vive-eau moyenne de coefficients respectifs 45 et 95.

L'objectif de ce rapport est d'illustrer la méthode de construction du modèle, de son calage à son exploitation. Ce rapport rend compte du travail effectué pour établir le modèle numérique et comprend quatre parties :

- la première partie décrit les caractéristiques morphologiques et hydrodynamiques de la région des Pays-de-la-Loire,
- la seconde partie présente le modèle courantologique mis en œuvre,
- la troisième partie présente la phase de calage du modèle,
- enfin, la dernière partie présente l'exploitation du modèle dans des conditions hydrodynamiques statistiques.

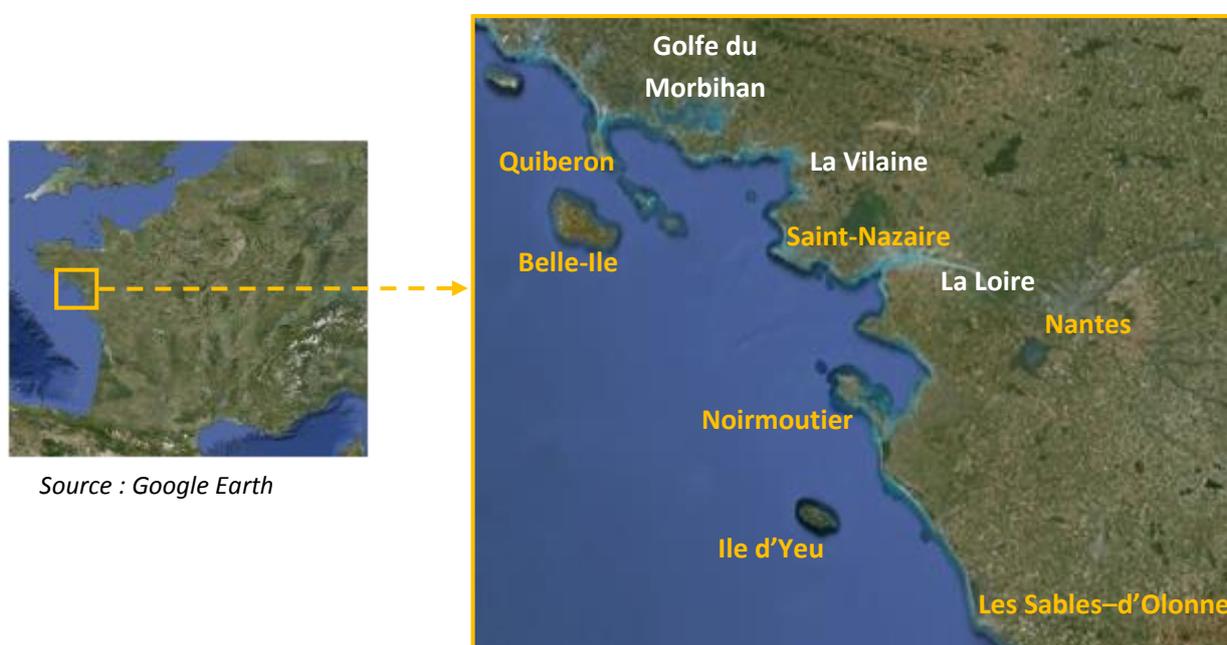


1. CARACTERISTIQUES DU LITTORAL DE LA REGION DES PAYS-DE-LA-LOIRE

Pour préparer la modélisation courantologique, il est nécessaire de bien cerner les problématiques de la zone d'étude et ses caractéristiques. Une revue bibliographique concernant les études de modélisation côtière 3D et en particulier sur la zone d'étude a été faite au préalable.

1.1. Localisation de la zone d'étude

Le littoral de la région des Pays-de-la-Loire s'étend au Nord, de la baie de Pont-Mahé située au Sud de l'estuaire de la Vilaine, jusqu'aux Pertuis Breton.



Source : Google Earth

Figure 1.1 : Localisation de la zone d'intérêt

1.2. Fonds marins

Le littoral de la région des Pays-de-la-Loire ne constitue pas un linéaire simple et uniforme. De nombreuses zones découvrantes et plusieurs îles parsèment le littoral de cette région (l'île Dumet, de Noirmoutier et d'Yeu) avec plusieurs îles bretonnes à proximité.

Les fonds marins de la Grande rade de la Loire présentent une variété de reliefs : des plateaux rocheux (plateaux du Four, de la Banche, etc.) en passant par des bancs de sable ou rocheux (Banc de Guérande) jusqu'à une fosse (Le Grand Trou) à l'embouchure de l'estuaire de la Loire. Tant d'éléments qui influencent la courantologie de la zone de par la présence de forts gradients bathymétriques ainsi que la propagation de l'onde de marée.

Les irrégularités majeures doivent être représentées au mieux par le maillage du modèle. En fonction de l'emprise du modèle et de la taille des mailles, les baies, estuaires, caps et îles sont pris ou non en compte dans le modèle en fonction de leurs envergures et dimensions caractéristiques.

1.3. Loire fluvio-maritime

L'estuaire de la Loire débouche sur la façade Atlantique de la côte Ouest de la France entre la pointe du Croisic et la pointe de Saint-Gildas. Il est caractéristique d'un milieu macrotidal avec un marnage supérieur à 4 m. La Loire maritime est subdivisée en un estuaire dit « interne », en amont de Saint-Nazaire, et un estuaire dit « externe » en aval.

La Loire est le plus long fleuve de France et son débit moyen annuel est d'environ 850 m³/s mais les débits journaliers et les moyennes mensuelles varient fortement.

Il est difficile d'étudier les courants de l'estuaire externe sans prendre en compte l'influence de l'estuaire interne, voire plus en amont de la Loire. L'onde de marée se propage jusqu'à une centaine de kilomètres en amont de Saint-Nazaire, jusqu'à Ancenis. Ce phénomène, appelé plus communément « marée dynamique », est important dans la dynamique de la rade de la Loire car un volume oscillant considérable transite par ce fleuve, de l'ordre de 75 Mm³ en ME à 280 Mm³ en VE. Le bief qui contribue le plus au stockage des entrées est le plus aval, de Saint-Nazaire à Cordemais.

Les apports fluviaux de la Loire sont pris en compte dans l'étude mais les apports de la Vilaine ne sont pas pris en compte car leur forçage est négligeable par rapport à l'emprise du modèle.

1.4. Estrans : zones découvrantes

Les zones découvrantes sont des zones particulières pour le modèle, calcul de la surface libre délicat lors du passage zone mouillée à sèche et inversement. Le littoral de la région des Pays-de-la-Loire présente de nombreux estrans qui se situent au niveau de :

- la baie du Bourgneuf, séparée de l'océan par l'île de Noirmoutier, constitue une très large zone de sédimentation (vasières très plates et polders appelés Marais Breton),
- le littoral Ouest de l'île de Noirmoutier,
- la baie du Croisic,
- la baie de Pont-Mahé,
- l'embouchure de l'estuaire de la Loire,
- le lit majeur de l'estuaire externe.

L'influence des estrans est très importante pour une étude hydrodynamique en zone côtière.

1.5. Salinité et température

Le milieu ne présente pas un fort gradient de température, et donc de densité entre les couches de surface et sub-surface. La salinité est difficile à représenter dans ce lieu d'échanges où les gradients halins sont importants, milieu dit stratifié. Les variations de salinité à l'intérieur de l'estuaire de la Loire dépendent principalement des échanges entre les eaux douces, fonction du débit du fleuve, et les eaux marines, qui se propagent à l'intérieur de l'estuaire. La limite de remontée du front de salinité se situe à Nantes et ce phénomène est appelé « marée de salinité ».

1.6. Nature des fonds

La connaissance de la nature des fonds est utile pour déterminer la rugosité sur le fond à appliquer. La nature du sédiment en place, entraîne en milieu peu profond une modification plus ou moins importante des lignes d'eau et de la turbulence.

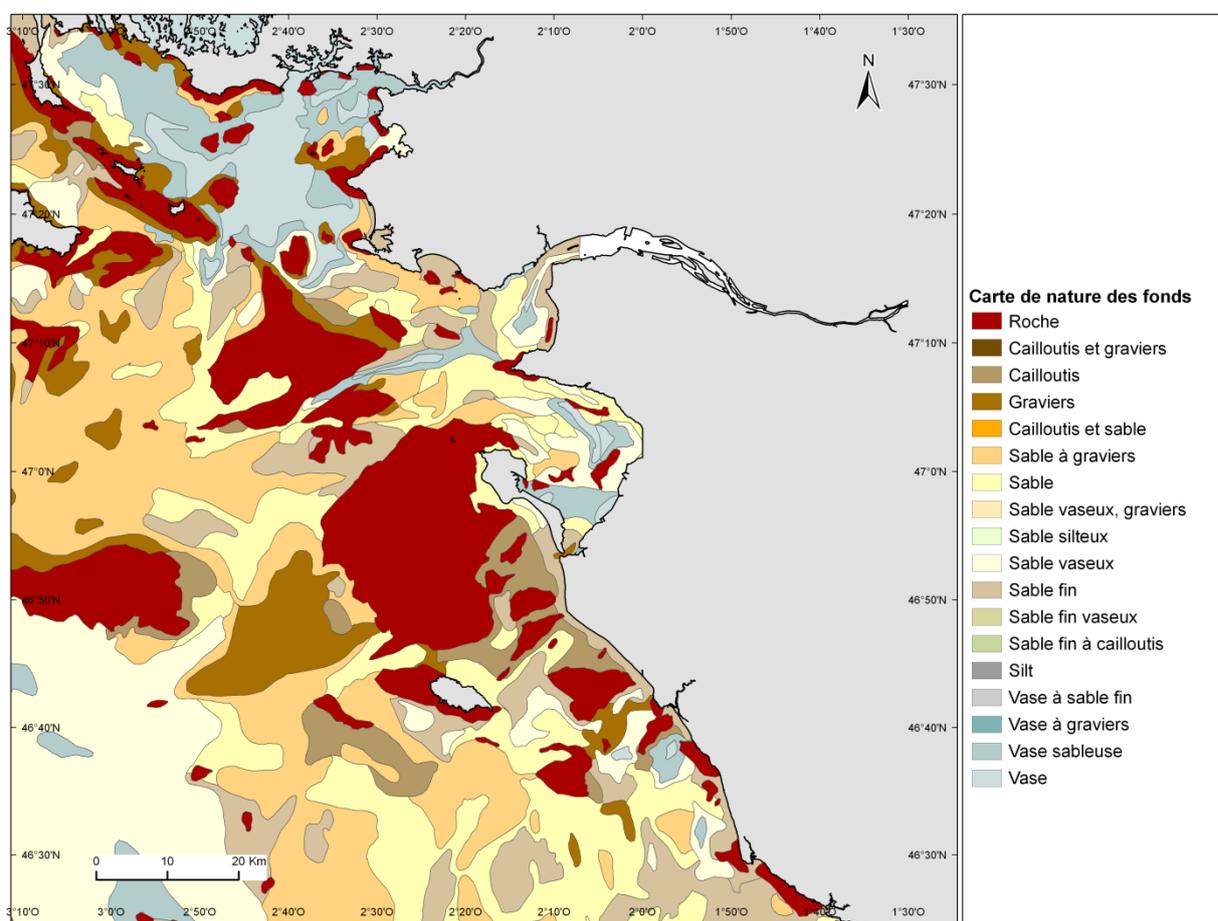


Figure 1.2 : Carte de nature des fonds (source SHOM)



2. DESCRIPTION DU MODELE NUMERIQUE

Les processus hydrodynamiques des systèmes côtiers sont soumis à une énergie mixte, marée et houle, d'une grande complexité. Les mesures in-situ quantifient les grandeurs physiques en un point donné au cours d'un temps limité. Le recours à des modèles numériques permet de mieux comprendre et prévoir ces phénomènes physiques sur une emprise large. La modélisation représente schématiquement les conditions réelles d'un ou plusieurs mécanismes physiques choisis, cas de la marée et des courants induits dans cette étude. Elle tient compte à la fois des données d'entrée et de terrain disponibles, de la connaissance physique du site, des retours d'expérience dans le domaine et des problématiques à étudier sur la zone d'intérêt.

2.1. Présentation du modèle numérique TELEMAC 3D

Les résultats présentés ici sont obtenus à partir du code de calcul TELEMAC 3D, développé par le LNHE d'EDF-R&D.

Le code TELEMAC 3D résout sur un maillage non structuré, aux éléments finis, les équations de Navier-Stokes à trois dimensions. Il permet de prendre en compte le caractère tridimensionnel des écoulements et des effets densimétriques. Ce code calcule la dynamique des écoulements fluviaux et torrentiels, mais aussi la propagation des ondes longues telles que les ondes de marée. Il prend aussi en compte tous les éléments topographiques d'un terrain naturel, les zones sèches et l'influence des phénomènes météorologiques (pression atmosphérique et vent).

2.2. Référence altimétrique et planimétrique

Le MNT a été établi dans le système géodésique **RGF93** en projection **Lambert 93**.

Les altimétries sont définies par rapport au **niveau moyen** marin. Le niveau moyen est issu du modèle Bathyelli 2013. Toutes les données d'entrée et de sortie du modèle ont pour port de référence Saint-Nazaire.

2.3. Emprise du modèle

L'emprise du modèle retenue est présentée sur la Figure 2.1 comme définie dans la convention.

L'étude concerne uniquement la partie maritime du littoral de la région des Pays-de-la-Loire mais le modèle ne se limite pas uniquement à ce littoral. La marée et le courant induit sont les phénomènes hydrodynamiques à reproduire. C'est pourquoi l'estuaire de la Loire est intégré au modèle de par sa proximité et son impact hydrodynamique sur les eaux littorales. Le fleuve Loire est intégré jusqu'à Ancenis, limite de marée dynamique, mais la plaine alluviale n'est pas modélisée car elle présente peu d'intérêt ici face au volume oscillant dans l'estuaire. Seule la partie submersible Nord de l'estuaire, entre Donges et Cordemais, est conservée car toujours

inondée à partir d'un coefficient de marée faible, environ 70. De même, au Nord, le modèle intègre la baie de la Vilaine, la baie de Quiberon et le Golfe du Morbihan.

La frontière maritime se situe à environ 120 km au large de Saint-Nazaire.

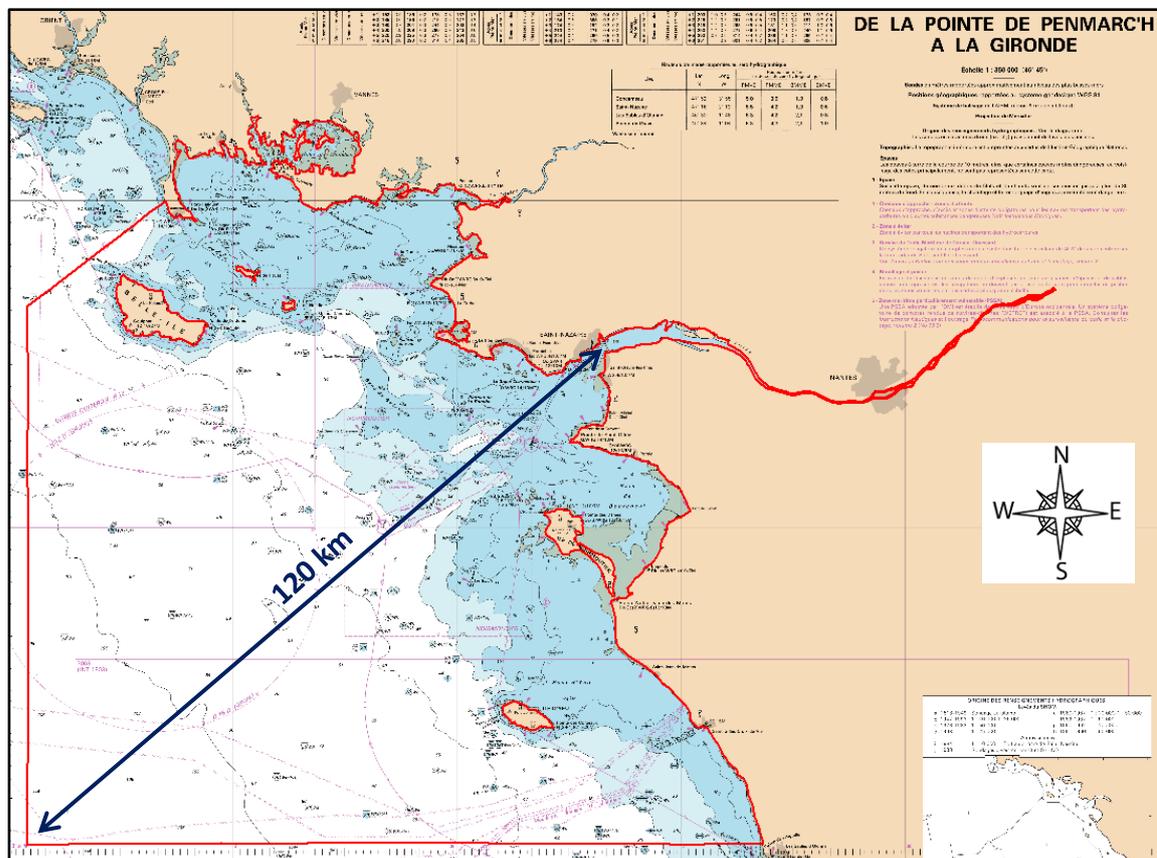


Figure 2.1 : Emprise du modèle (Projection Mercator) Carte Marine SHOM n°6990

2.4. Trait de côte

Le trait de côte utilisé est le trait de côte **HistoLitt-V1** et la cote correspond au niveau des PHMA.

2.5. Maillage

Le maillage aux éléments finis est composé de mailles triangulaires mixtes (de taille et de forme variables selon les zones d'intérêt) permettant de représenter fidèlement la géométrie des fonds. La réalisation du maillage consiste à construire la triangulation du domaine bidimensionnel, puis de le répéter sur la verticale en couches superposées, appelées « plans », pour obtenir un maillage en prisme du domaine tridimensionnel.

2.5.1. Maillage horizontal

Le maillage horizontal se compose de 12 261 nœuds. La Figure 2.2 présente le maillage dans son intégralité.

La taille des mailles varie entre 7 km au large, près de la frontière du modèle, et 50 à 100 m à l'approche du littoral des Pays-de-la-Loire et dans l'estuaire de la Loire, zones les plus raffinées. Un système de lignes de contraintes sur lequel le maillage s'appuie permet de :

- bien représenter les **gradients de bathymétrie** (bancs découvrants, plateaux rocheux, fosses, etc.),
- orienter les lignes de maillage dans les **directions privilégiées de l'écoulement** (embouchure de la Loire, méandres de la baie de Bourgneuf, chenal de navigation, lit mineur et berges en section fluviale, etc.).

Cette taille de maille est suffisante pour avoir une bonne résolution numérique du courant principal, ici le courant de marée, tout en gardant des temps de calculs acceptables. Les calculs sont réalisés sur un PC (processeur 3.4 Ghz et 12 Go de mémoire vive) et le rapport entre le temps simulé et le temps de la simulation pour le modèle hydrodynamique est de l'ordre de 60 (8h12 de calcul pour 21 jours simulés).

2.5.1. Maillage vertical

Sur la verticale le maillage est dupliqué sur **13 plans horizontaux sigma** et compte au final près de **160 000 nœuds de calcul** présenté en figure 2.3. Les plans sont répartis suivant des proportions données, rapprochés en surface et au fond, présenté en figure 2.4 et voir le détail au § 3.3.2.

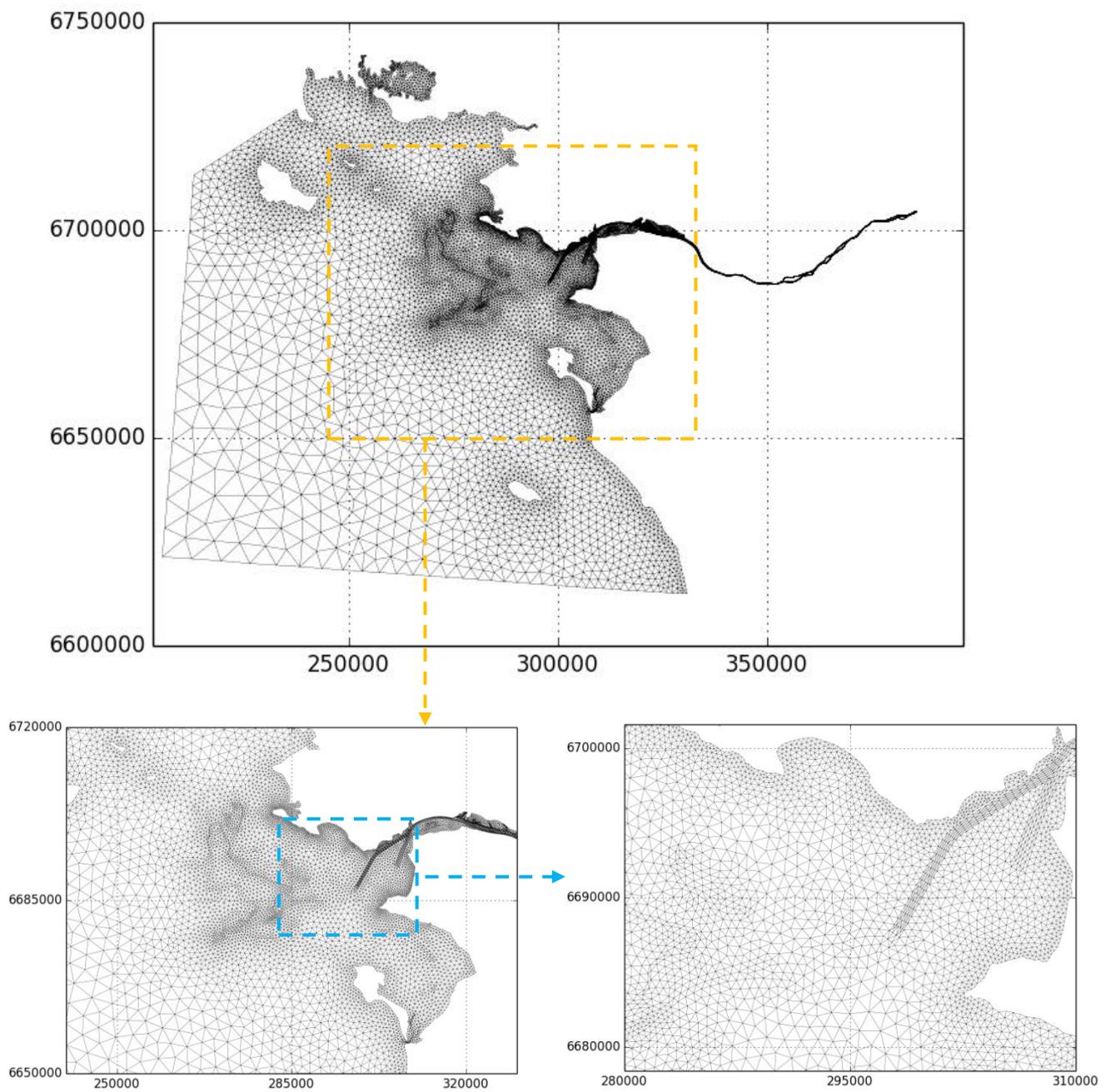


Figure 2.2 : Maillage 2D et zooms sur la rade de la Loire

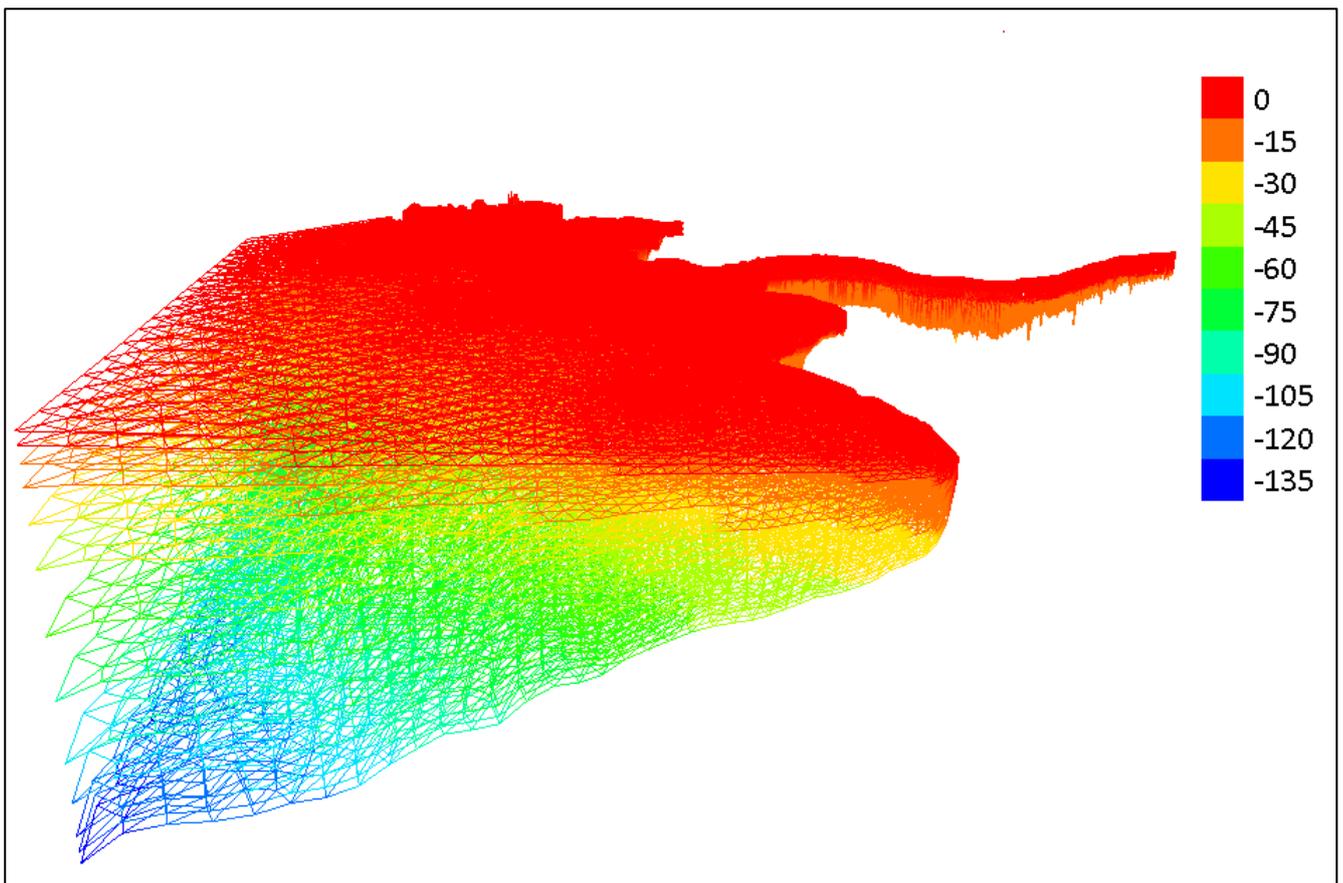


Figure 2.3 : Maillage 3D du modèle avec exemple de répartition des plans cotés en mètres par rapport au niveau moyen

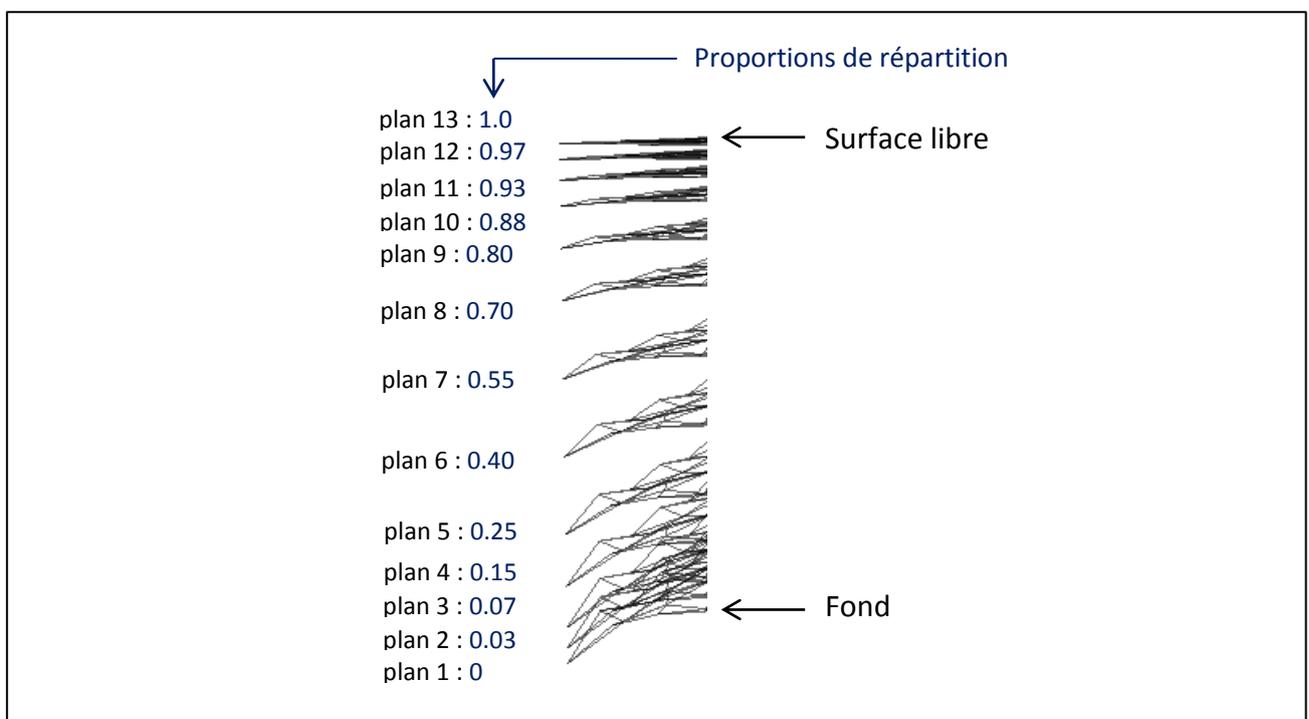


Figure 2.4 : Spécification de la transformation sigma avec proportions données (entre 0 et 1) de la répartition des plans sur la verticale

2.6. Modèle Numérique de Terrain

La bathymétrie provient de plusieurs sources différentes :

- Les sondes bathymétriques issues de la **BDBS** pour la réalisation de 5 MNT de résolutions 50 m, 100 m, 200 m, 500 m et 1 km. Le raccordement des MNT a nécessité un travail de découpage manuel des MNT, en se basant sur des isobathes communes afin de rester au plus proche de la géométrie des fonds et d'éviter la présence de « marches ». La bathymétrie à la côte possède rarement une résolution supérieure à 50 m.
- Dans les zones à estran, en particulier la baie du Bourgneuf, et la côte de l'embouchure de l'estuaire de la Loire, les données de **cartes marines** ont été utilisées :
 - 7068 : De la presqu'île de Quiberon aux Sables-d'Olonne
 - 7394 : De la pointe de Saint-Gildas au goulet de Fromentine
 - 7395 : du Croisic à Noirmoutier
- Le **MNTU du GIP Loire Estuaire**, issue du regroupement de MNT de 2008-2010 de résolution 10 m. Un MNT simplifié du lit du fleuve à l'amont de Nantes issu d'un modèle numérique hydrodynamique de la propriété du GIP Loire Estuaire.

L'interpolation des données de bathymétrie avec le maillage, aboutit au MNT final du modèle numérique qui sert de base aux simulations numériques, voir Figure 2.3.

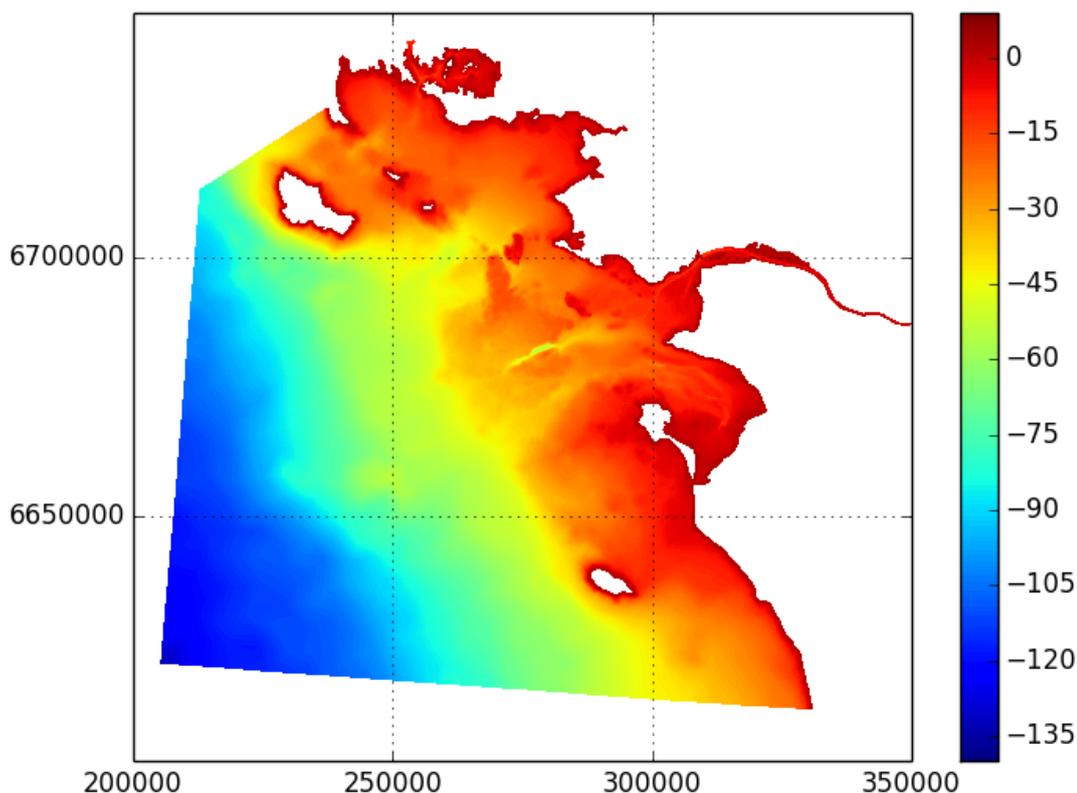


Figure 2.3 : MNT du modèle (bathymétrie en mètres par rapport au niveau moyen)

2.7. Conditions de forçage

Les conditions de forçage maritime et fluvial du modèle sont détaillées ci-après.

2.7.1. Forçage tidal

Le signal de marée est issu du modèle **cstFRANCE** qui comprend 143 composantes harmoniques. Ce modèle cstFRANCE est élaboré à partir de résultats de modèles de propagation de marée et de mesures marégraphiques. Les niveaux d'eau prédits sont calculés en chaque point frontière maritime à partir des constantes harmoniques de cstFRANCE à l'aide du module **MASG2**. Seule la hauteur d'eau est imposée à cette frontière.

Le modèle courantologique fonctionne en prédiction. Les dates de début et fin des prédictions du niveau d'eau sont des données d'entrée du module MASG2.

La frontière maritime est ouverte et seul le niveau d'eau est connu en ses points et non la vitesse à imposer. Appelé communément modèle « **sous-contraint** ». La méthode de Thompson est ici utilisée pour calculer l'information manquante en vitesse pour une frontière à niveau d'eau imposé.

2.7.2. Forçage fluvial

Un apport d'eau douce au niveau de la frontière fluviale respectant le débit réel de la Loire est imposé directement en amont du modèle. Il correspond au débit journalier moyen de la station hydrométrique de Montjean-sur-Loire issue de la **Banque Hydro**.

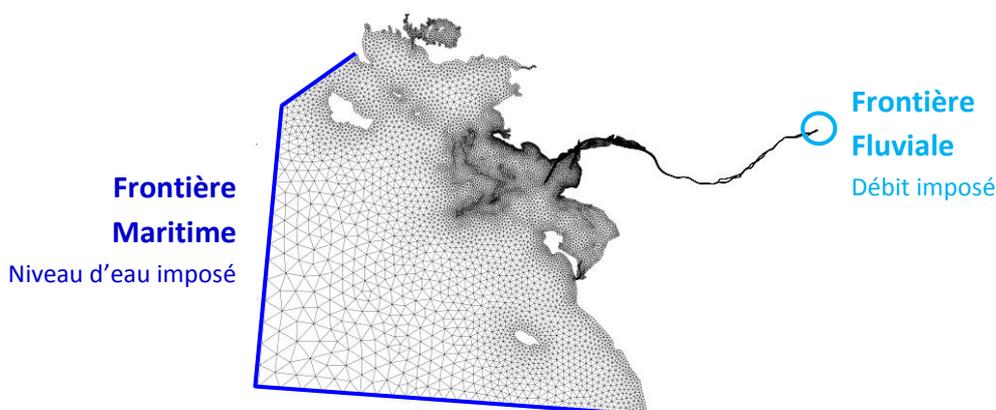


Figure 2.4 : Types de frontières liquides

2.7.3. Conditions de vent

Les conditions de vent ne sont pas appliquées sur le modèle. Il s'agit uniquement d'un modèle de propagation de la marée et des courants induits par celle-ci.



3. CALAGE HYDRODYNAMIQUE DU MODELE

La courantologie reproduite par le modèle est directement liée aux conditions de forçage qui sont imposées. Dans la phase de calage, le modèle sera dit prédictif. La méthodologie de la modélisation repose sur une approche statistique qui consiste à comparer le modèle aux mesures et aux prédictions du SHOM.

3.1. Période simulée

Lors de l'**automne 2011**, une campagne de mesures EMR dans le cadre de la convention GEOPAL a été réalisée. Les résultats de ces mesures sont exploités dans la présente étude, qui sont les observations du niveau d'eau et de courants. La période simulée intègre par conséquent la période de mesure.

La période de simulation retenue est de 1 mois, du 21/09/2011 au 21/10/2011. Cette période inclut un cycle complet de marée, période entre deux mêmes phases de la Lune, dont la période de mesures au large disponibles qui va du 1 au 17 octobre 2011. Les conditions de marée à cette période présentent des caractéristiques de forte variation du coefficient de marée (37 à 111). Les débits varient peu et sont faibles car en **période d'étiage** (de 124 à 210 m³/s), voir sur la Figure 3.1.

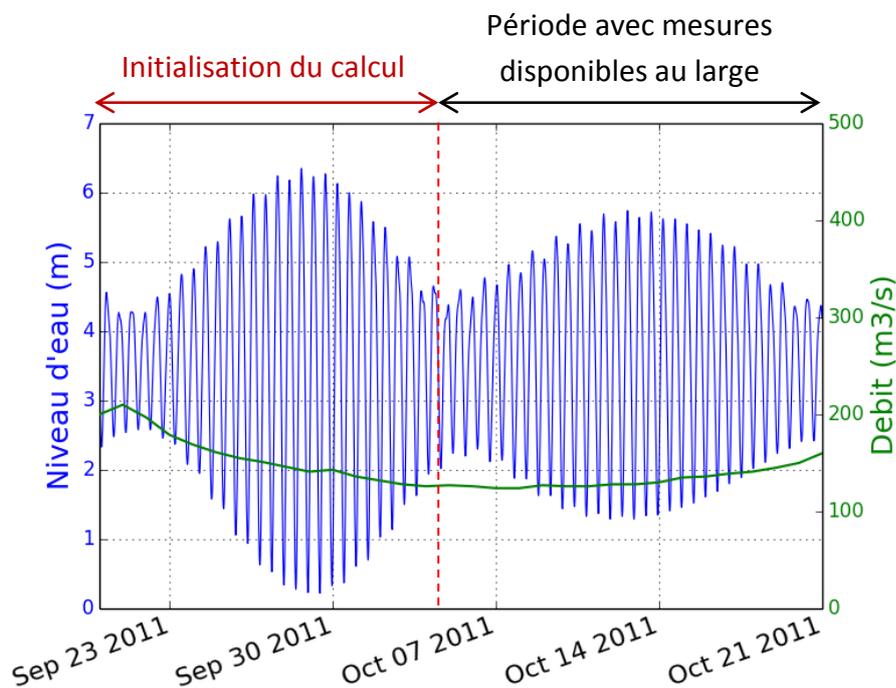


Figure 3.1 : Période de calcul simulée pour le calage hydrodynamique

3.2. Données de calage

3.2.1. Observations du niveau d'eau

Les données de références exploitées sont localisées sur la Figure 3.2. Les **neuf stations** sont détaillées ci-dessous :

- Le Grand Trou Ouest : niveaux d'eau issus de la campagne de mesures EMR
- Saint-Nazaire et Pointe-de-Saint-Gildas : mesures marégraphiques du SHOM
- Montoir, Paimboeuf-Kuhlmann, Cordemais, Le Pellerin, Nantes Usine Brulée et Nantes-Salorges : mesures marégraphiques du GPMNSN (données issues du partenariat avec REFMAR)

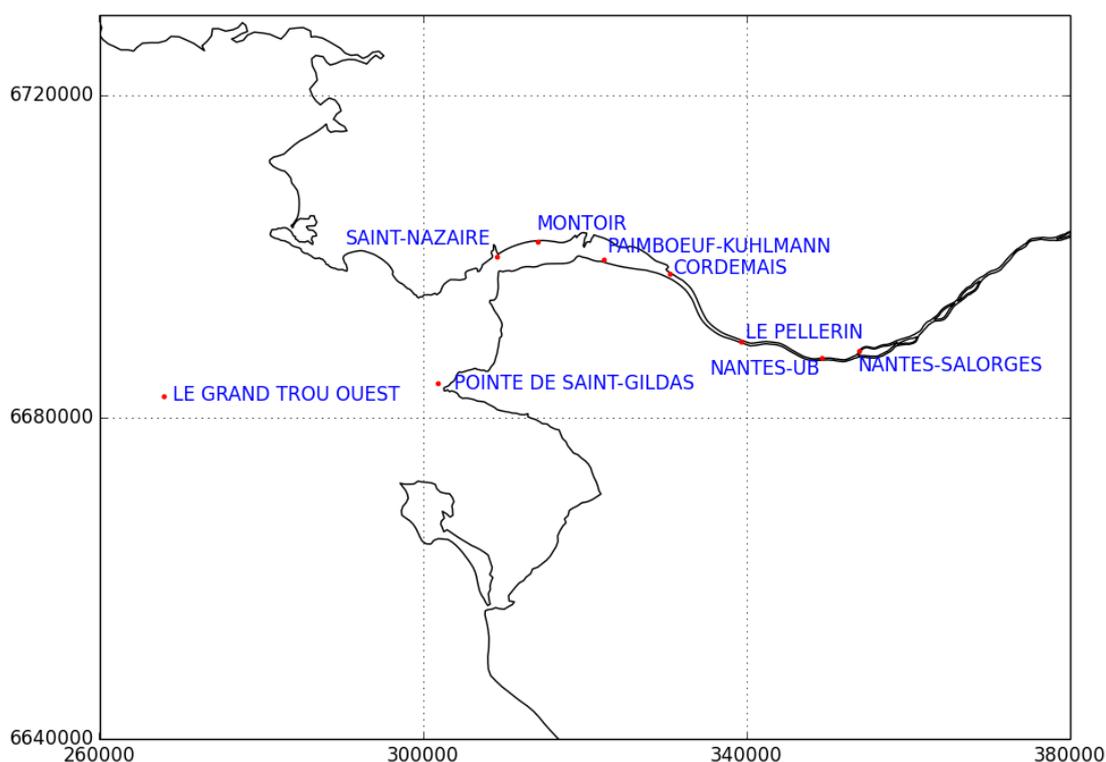


Figure 3.2 : Localisation des stations d'observations du niveau d'eau en octobre 2011

3.2.2. Prédiction du SHOM

Les prédictions de la surface libre sont également utilisées pour le calage en les comparant aux résultats du modèle. Dans les prédictions seule l'évolution du niveau d'eau liée à la marée astronomique est calculée. Dans les données d'observations les phénomènes de surcote et décote affectant le niveau d'eau sont aussi présents car mesurés par les marégraphes.

Le SHOM dispose d'une grande base de données de mesures, appelé **TDB**, ainsi que des constantes harmoniques exploitées pour la prédiction des niveaux d'eau. Les données de prédictions en niveau d'eau sont disponibles aux 30 points localisés sur la Figure 3.3.

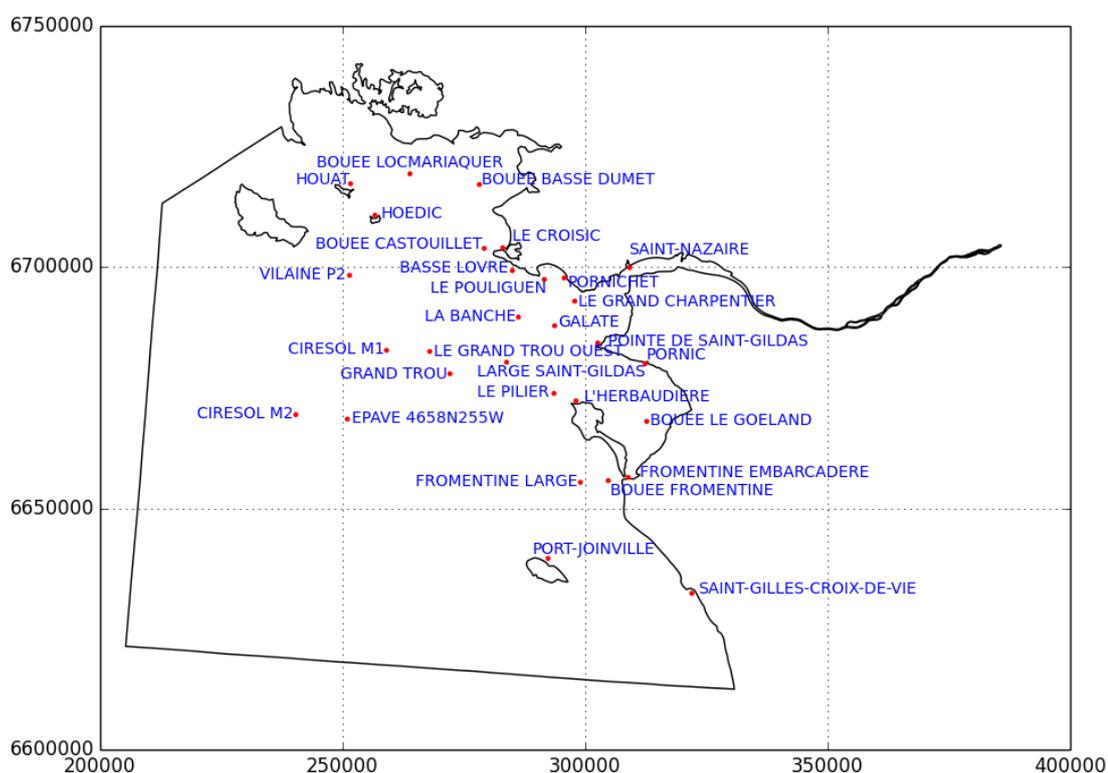


Figure 3.3 : Localisation des points de prédictions (constantes harmoniques disponibles)

3.2.3. Mesures de courant

Le calage en vitesse dépend prioritairement du calage en niveau d'eau et de la diffusion turbulente horizontale comme verticale. Souvent un bon calage en niveau permet d'obtenir un calage satisfaisant voire bon en vitesse. Il est souvent difficile de disposer de nombreuses mesures de l'intensité du courant sur la colonne d'eau concomitantes en temps.

Seuls deux points de mesures de profils de courants obtenus par ADCP immergés sont disponibles sur la période d'octobre 2011. Ils sont localisés sur la Figure 3.4. Les types d'instruments utilisés sont des **ADCP profileurs** :

- Ouest Plateau de la Banche (station 1378) : résolution de la mesure 18 couches d'épaisseur 2 m [8 couches exploitées de 19 m à 5 m par rapport à la surface libre]
- Sud Banc Guérande (station 1377) : résolution 18 couches d'épaisseur 2.5 m [9 couches exploitées de 27 m à 7 m par rapport à la surface libre]

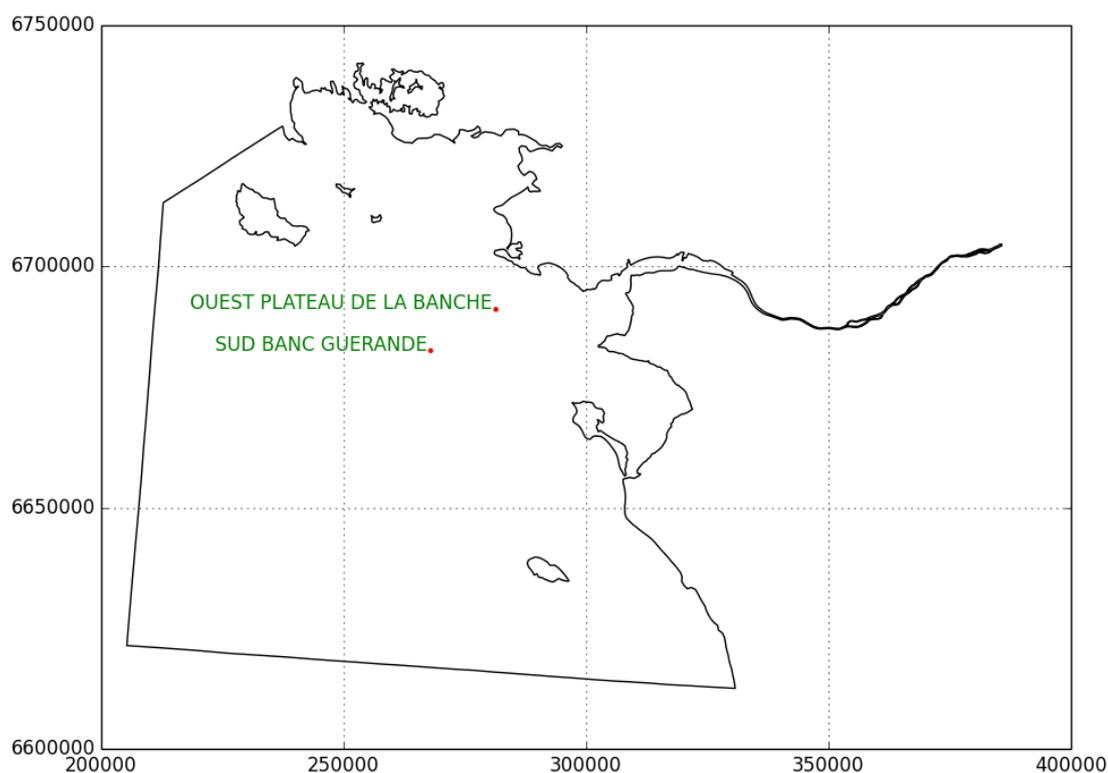


Figure 3.4 : Localisation des points de mesures de courants (ADCP profileurs)

Ces appareils posés sur le fond fournissent des profils de courants sur toute la colonne d'eau. Un signal est enregistré pour plusieurs couches d'épaisseurs déterminées, au cours du temps. Les hauteurs de couches ne sont cependant pas toutes exploitables, certaines couches sont hors d'eau ou présentent une qualité du signal enregistré dégradé. Les couches dégradées se situent majoritairement à l'approche de la surface libre et sont déterminées graphiquement par des fortes discontinuités concernant l'amplitude du signal enregistré, le profil de vitesse, la rose de courant, l'intensité de la vitesse, etc.

3.3. Tests de sensibilité

Plusieurs tests de sensibilité ont été effectués afin d'obtenir un modèle stable et un calage satisfaisant pour les besoins de l'étude. Ces tests ont portés principalement sur le paramétrage physique et numérique du modèle, et le maillage dont certains points sont détaillés ci-dessous :

3.3.1. Frottement sur le fond et latéral

Le frottement sur le fond est paramétré selon la **loi de Chézy** dont la contrainte sur le fond (τ_b) est donné par :

$$\tau_b = \rho g \frac{\bar{U}^2}{C^2}$$

ρ densité de l'eau de mer

g gravité

\bar{U} vitesse moyenne

C coefficient de Chézy variant de 20 à 90 $\text{m}^{1/2} \cdot \text{s}^{-1}$ (du plus rugueux au plus lisse)

En milieu maritime, le frottement présente des enjeux beaucoup plus faibles que dans la partie estuarienne notamment du fait de hauteurs d'eau plus importantes. La propagation de la marée est essentiellement contrôlée par des effets topographiques. La modification du coefficient de frottement ne modifie pas de façon significative l'organisation de l'écoulement dans la partie maritime. Elle est plus significative dans la partie fluviale et au niveau des zones découvrantes du fait de la faible hauteur d'eau. Cependant les tests avec un frottement plus rugueux au niveau des zones de faible fond n'ont pas abouti à des améliorations nettes, de l'ordre d'un centimètre, par rapport aux observations en particulier en amont de Le Pellerin et sur la zone découvrante de la Baie du Bourgneuf.

Un frottement latéral est appliqué à tous les nœuds de bord du maillage 3D. La valeur du frottement imposée à chacun des nœuds de bord est égale à celle appliquée à leur valeur de frottement de fond correspondant.

Les mesures et prédictions de hauteur d'eau ont permis de caler au mieux le frottement du modèle représenté en Figure 3.5.

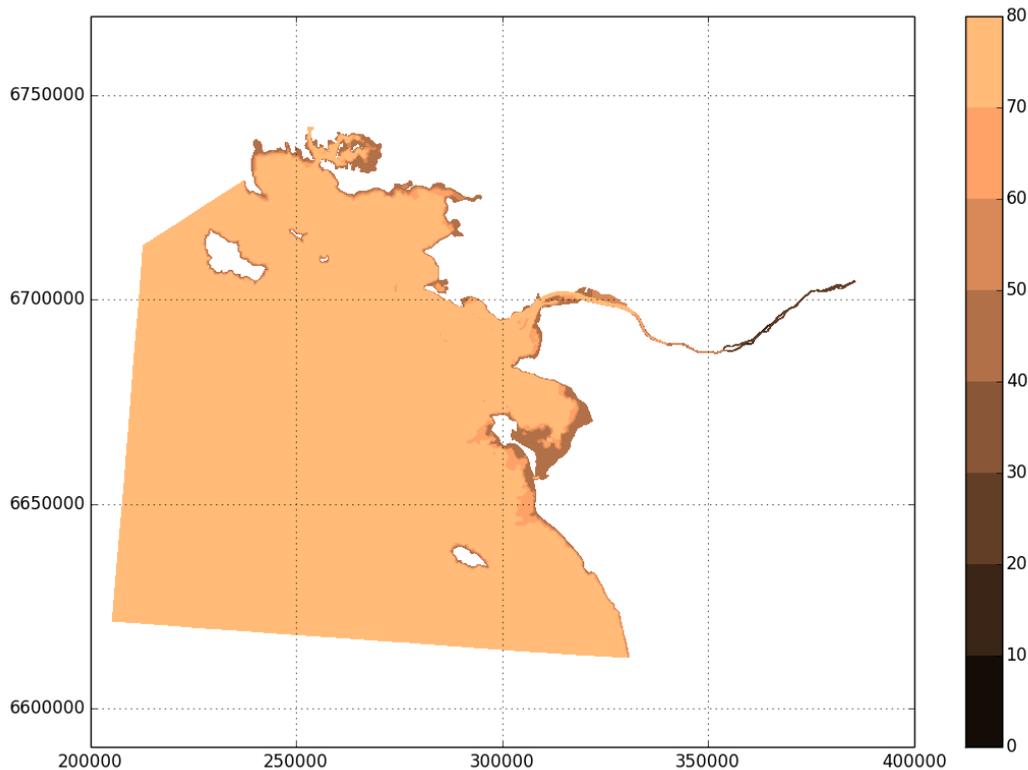


Figure 3.5 : Carte de frottement du modèle (Coefficient de Chézy en $m^{1/2}.s^{-1}$)

3.3.2. Optimisation du maillage

Une fois la triangulation du domaine bidimensionnel construite, il faut le répéter sur la verticale en couches superposées (appelées « plans »). Comme la surface libre évolue en temps, les cotes z du maillage 3D varient d'un pas de temps à un autre. Il est cependant possible de figer le maillage sur un pas de temps et de choisir la répartition des plans suivant la verticale appelée « transformée sigma ». Le maillage a été construit avec un coefficient de proportionnalité variable par plan. Les plans, 13 retenus au total, en transformation sigma avec des proportions données sont rapprochés en surface et au fond afin d'affiner le calcul sur le fond dû au frottement et en surface au niveau des zones découvrantes.

Des tests réduisant l'emprise fluviale du maillage au niveau de l'amont de Nantes ont été réalisés. Réduire l'emprise de propagation de l'onde de marée à l'intérieur de la Loire engendre une surestimation du niveau d'eau aux stations situées dans la partie externe de l'estuaire, soit de Nantes à Cordemais principalement. L'emprise fluviale jusqu'à Ancenis a donc été maintenue afin de conserver la zone de propagation de l'onde de marée dans son entier et un bon calage en niveau d'eau jusqu'à Cordemais.

3.3.3. Paramétrisation générale du modèle

L'emprise maritime de modélisation étant étendue il est nécessaire de prendre en compte la force d'inertie de Coriolis. L'influence de la **force de Coriolis** dans les équations de Navier-Stokes est régie par le nombre de Rossby (R_0) qui est fonction du coefficient de Coriolis (C_c). Cette force n'est importante que si $R_0 \ll 1$, soit pour les grands domaines océaniques. Par définition, le coefficient de Coriolis est la grandeur définie par :

$$C_c = 2\omega \sin \lambda$$

λ latitude moyenne du modèle

ω vitesse de rotation de la terre

La frontière maritime était initialement contrôlée en niveau d'eau (marée). Le modèle s'est alors avéré insatisfaisant voire incohérent concernant les gradients de vitesse aux limites car il était sous-contraint par sa limite maritime. Ce phénomène est bien connu en modélisation concernant des frontières maritimes ouvertes où l'on ne connaît que le niveau en quelques points et non le profil de vitesse à la limite. La méthode retenue, « **méthode de Thompson** », consiste à utiliser la méthode des caractéristiques pour essayer de calculer l'information manquante, soit ici le gradient de vitesse à la limite tout en conservant le degré de liberté à la limite. Cette méthode a permis d'obtenir des courants aux abords des limites plus propres et cohérents avec les mesures disponibles au SHOM.

Le modèle utilise l'hypothèse de pression hydrostatique, c'est-à-dire que la pression en un point n'est fonction que du poids de la colonne d'eau qui le surmonte et de la pression atmosphérique en surface. L'utilisation de TELEMAC-3D en domaine côtier nécessite de définir deux modèles de turbulence horizontal et vertical. En effet, pour ce type d'application la notion d'échelle des tourbillons peut-être fortement différente en espace selon l'horizontal ou la vertical. Le choix du schéma de **Smagorinsky** est retenu pour le modèle de turbulence horizontal, cas de non linéarité forte de l'écoulement. Le modèle de turbulence vertical choisi est celui de **longueur de mélange** qui exprime la viscosité turbulente en fonction du gradient des vitesses moyennes et de la longueur de mélange (théorie de Prandtl).

Lors d'une simulation, la valeur du **nombre de Courant** (C_o) a une influence importante sur la qualité des résultats. Ce nombre représente le nombre de mailles traversées par une particule d'eau sur un pas de temps. Il permet de déterminer un pas de temps de calcul correct et est connu pour son lien avec la condition de convergence CFL (Courant Friedrichs Lewy). La qualité des résultats se dégrade si le nombre de Courant dépasse des valeurs de 7 ou 8. Ce nombre adimensionnel est défini de la manière suivante :

$$C_o = \Delta t \left[\frac{u}{\Delta x} + \frac{v}{\Delta y} \right]$$

u et v vitesses suivant la direction x et y

Δx et Δy intervalles dimensionnels

Δt intervalle temporel

3.4. Analyse quantitative du modèle

Le calage hydrodynamique est quantifié par des méthodes statistiques **d'erreur absolue moyenne** (MAE) et **d'erreur moyenne quadratique** (RMSE). Ils permettent de comparer les résultats obtenus par un modèle prédictif avec les résultats de mesures ou prédictions. MAE et RMSE sont des variables statistiques classiques qui permettent donc de caractériser la précision d'un modèle. Leurs valeurs ne peuvent être que positives et, plus elles tendent vers zéro moins l'erreur commise est importante.

Pour les variables niveau d'eau et composantes de vitesse, l'erreur est définie comme la différence entre les valeurs obtenues par TELEMAC 3D (X_{model}) et les données d'observation ou de prédiction (X_{obs}).

$$MAE = \left[n^{-1} \sum_{i=1}^n |X_{model} - X_{obs}| \right]$$

$$RMSE = \left[n^{-1} \sum_{i=1}^n |X_{model} - X_{obs}|^2 \right]^{1/2}$$

Un paramètre Skill, appelé « **index of agreement** » par Willmott (1981), et récemment utilisé dans différentes études de dynamique côtière et estuarienne a aussi été estimé pour le modèle. Ce descripteur statistique adimensionnel, fonction de la moyenne des données observées ($\overline{X_{obs}}$), reflète le degré selon lequel les données observées sont estimées avec précision par la modélisation. Cet index n'est pas une mesure de la corrélation au sens strict du terme mais plutôt une estimation du degré du résultat du modèle sans erreurs, plus il tend vers 1 moins l'erreur commise est importante.

$$Skill = 1 - \frac{\sum |X_{model} - X_{obs}|^2}{\sum (|X_{model} - \overline{X_{obs}}| + |X_{obs} - \overline{X_{obs}}|)^2}$$

Les résultats de l'analyse statistique des niveaux d'eau et des courants sont présentés sur une **période de 15 jours**, du 02 octobre au 16 octobre 2011.

3.5. Résultats de calage en niveaux d'eau

3.7.1. Comparaisons du modèle avec les mesures marégraphiques

| STATIONS | MAE (m) | RMSE (m) | Skill |
|-----------------------|---------|----------|--------|
| Le Grand Trou Ouest | 0.06 | 0.08 | 0.9983 |
| Point de Saint-Gildas | 0.14 | 0.17 | 0.9980 |
| Saint-Nazaire | 0.13 | 0.16 | 0.9973 |
| Montoir | 0.10 | 0.13 | 0.9978 |
| Paimboeuf-Kuhlmann | 0.10 | 0.13 | 0.9977 |
| Cordemais | 0.13 | 0.16 | 0.9965 |
| Le Pellerin | 0.22 | 0.27 | 0.9902 |
| Nantes-Usine Brulée | 0.45 | 0.54 | 0.9598 |
| Nantes-Salorges | 0.53 | 0.62 | 0.9454 |

Tableau 1 : Statistiques sur 15 jours (observations du niveau d'eau et TELEMAR 3D)

Les représentations graphiques sont présentées en **ANNEXE 1**.

La propagation de la marée est bien représentée sur la partie maritime du modèle. Au niveau du Grand Trou Ouest et jusqu'à la partie aval de Cordemais les mesures aux marégraphes sont bien simulées avec une **erreur moyenne RMSE** pour les 6 premières stations de **0.13 m**. L'évolution de l'intrusion marine est bien reproduite sur le bief qui contribue le plus au stockage d'eau, de Saint-Nazaire à Cordemais. Sur la partie maritime le frottement a très peu d'influence sur les résultats au Grand Trou Ouest, à Saint-Nazaire et à la Pointe-de-Saint-Gildas. La courbe de marée obtenue est principalement due à la bathymétrie et aux conditions aux limites. Ainsi la qualité des forçages et données d'entrée sont bien évidemment des paramètres déterminants pour ce qui est du résultat en hauteur d'eau.

En amont de Le Pellerin, l'onde de marée perd en amplitude. Les basses mers sont difficilement atteintes contrairement aux pleines mers. Cette partie de la rivière est plus difficile à modéliser car l'énergie de l'onde de marée est très dissipée par le frottement sur le fond. La partie estuarienne à l'amont de Cordemais est peu raffinée pour un fleuve, elle est modélisée pour représenter le volume oscillant généré principalement par la marée dynamique. Un frottement très rugueux est appliqué dans le fleuve pour prendre en compte les pertes de charges dues aux épis, piles de pont, végétation sur le lit majeur qui ne sont pas prises en compte dans un maillage trop grossier. De plus en période d'étiage, cas de la période de calage, le lit des fleuves est très incisé, cependant le MNTU de cette zone ne correspond pas à une bathymétrie d'étiage, ce qui expliquerait la difficulté d'atteindre le niveau des basses mers. De plus le maillage devrait être beaucoup plus raffiné pour intégrer une telle morphologie incisée du fond mais augmenterait considérablement le temps de calcul. La partie fluviale n'est pas la zone d'intérêt de l'étude c'est pourquoi une diminution de l'amplitude de marée modélisée par rapport aux mesures en amont de Le Pellerin est acceptable et expliquée par la faible résolution du maillage dans cette zone et la difficulté de reproduire les conditions de frottement en période d'étiage.

3.7.2. Comparaisons du modèle avec les prédictions du SHOM

| STATIONS | MAE (m) | RMSE (m) | Skill |
|---------------------------|-------------|-------------|---------------|
| Le Grand Trou Ouest | 0.07 | 0.08 | 0.9988 |
| Saint-Nazaire | 0.11 | 0.13 | 0.9975 |
| Pointe de Saint-Gildas | 0.16 | 0.18 | 0.9950 |
| Bouée Castouillet | 0.08 | 0.10 | 0.9983 |
| Bouée Fromentine | 0.09 | 0.10 | 0.9981 |
| Bouée Le Goéland | 0.10 | 0.11 | 0.9982 |
| Fromentine Embarcadère | 0.20 | 0.24 | 0.9889 |
| Fromentine Large | 0.06 | 0.08 | 0.9990 |
| Galate | 0.07 | 0.09 | 0.9987 |
| Grand Trou | 0.07 | 0.08 | 0.9988 |
| La Banche | 0.09 | 0.11 | 0.9978 |
| Le Croisic | 0.09 | 0.11 | 0.9978 |
| Le Grand Charpentier | 0.08 | 0.10 | 0.9984 |
| Le Pilier | 0.06 | 0.07 | 0.9992 |
| Le Pouliguen | 0.07 | 0.09 | 0.9988 |
| L'Herbaudière | 0.07 | 0.08 | 0.9990 |
| Pornic | 0.11 | 0.13 | 0.9977 |
| Pornichet | 0.10 | 0.13 | 0.9974 |
| Basse Lovre | 0.08 | 0.09 | 0.9985 |
| Ciresol M1 | 0.06 | 0.07 | 0.9992 |
| Ciresol M2 | 0.14 | 0.16 | 0.9949 |
| Large Saint-Gildas | 0.07 | 0.08 | 0.9988 |
| Epave 4658N255W | 0.04 | 0.05 | 0.9996 |
| Port-Joinville | 0.06 | 0.07 | 0.9990 |
| Saint-Gilles-Croix-de-Vie | 0.04 | 0.05 | 0.9995 |
| Hoëdic | 0.12 | 0.14 | 0.9962 |
| Houat | 0.09 | 0.11 | 0.9979 |
| Bouée Locmariaquer | 0.12 | 0.14 | 0.9967 |
| Bouée Basse Dumet | 0.14 | 0.13 | 0.9959 |
| Vilaine P2 | 0.13 | 0.18 | 0.9960 |
| <i>Moyenne</i> | <i>0.08</i> | <i>0.10</i> | <i>0.9988</i> |

Tableau 2 : Statistiques sur 15 jours (prédictions SHOM et TELEMAC 3D)

Certaines représentations graphiques sont présentées en **ANNEXE 2**.

Les descripteurs statistiques révèlent que le modèle reproduit bien l'oscillation verticale du niveau d'eau sur toute l'emprise maritime avec une **erreur moyenne RMSE de 0.10 m**. Seule la partie découvrente de la baie du Bourgneuf présente l'erreur la plus importante, révélée par la station Fromentine Embarcadère. Une des explications, en plus d'être une zone fortement découvrente, est que le jeu de données bathymétriques est peu résolu dans cette zone, données d'entrée qui seraient à améliorer par des levés photogrammétriques ou Lidar récents par exemple.

Au final, les erreurs les plus importantes sont concentrées au niveau de la baie de Bourgneuf et en amont de Cordemais dans l'estuaire. **L'onde de marée se propage, après calage, correctement** sur l'ensemble du littoral de la Région des Pays-de-la-Loire.

3.6. Résultats de calage en vitesse

La capacité du modèle à reproduire les intensités des vitesses de courant est évaluée grâce à la campagne de mesures réalisée dans le cadre de la convention GEOPAL :

- composante de vitesse zonale u , d'Ouest en Est,
- composante de vitesse méridionale v , du Sud vers le Nord.

Comparaisons à différentes couches par rapport à la surface libre suivant la station de référence détaillées aux tableaux 3 et 4.

| SUD BANC GUERANDE (u ; v) | | | |
|---------------------------|--------------------------|---------------------------|------------------------|
| couches en mètres | MAE (m.s ⁻¹) | RMSE (m.s ⁻¹) | Skill |
| 7 m | 0.07 ; 0.09 | 0.09 ; 0.11 | 0.9425 ; 0.8232 |
| 9.5 m | 0.06 ; 0.09 | 0.08 ; 0.11 | 0.9548 ; 0.8388 |
| 12 m | 0.06 ; 0.08 | 0.08 ; 0.10 | 0.9618 ; 0.8557 |
| 14.5 m | 0.06 ; 0.08 | 0.07 ; 0.10 | 0.9653 ; 0.8548 |
| 17 m | 0.05 ; 0.08 | 0.06 ; 0.10 | 0.9720 ; 0.8458 |
| 19.5 m | 0.04 ; 0.08 | 0.06 ; 0.09 | 0.9763 ; 0.8357 |
| 22 m | 0.04 ; 0.07 | 0.05 ; 0.09 | 0.9787 ; 0.8231 |
| 24.5 m | 0.04 ; 0.07 | 0.05 ; 0.09 | 0.9761 ; 0.8091 |
| 27 m | 0.05 ; 0.07 | 0.06 ; 0.08 | 0.9603 ; 0.7933 |
| <i>Moyenne</i> | <i>0.05 ; 0.08</i> | <i>0.07 ; 0.10</i> | <i>0.9653 ; 0.8311</i> |

**Tableau 3 : Statistiques sur 15 jours au point 1377
(observations de courants et TELEMAC 3D)**

| OUEST PLATEAU BANCHE (u ; v) | | | |
|------------------------------|--------------------------|---------------------------|------------------------|
| couches en mètres | MAE (m.s ⁻¹) | RMSE (m.s ⁻¹) | Skill |
| 5 m | 0.04 ; 0.12 | 0.06 ; 0.14 | 0.9647 ; 0.4532 |
| 7 m | 0.04 ; 0.10 | 0.05 ; 0.12 | 0.9658 ; 0.5235 |
| 9 m | 0.04 ; 0.11 | 0.05 ; 0.09 | 0.9681 ; 0.5605 |
| 11 m | 0.04 ; 0.08 | 0.05 ; 0.10 | 0.9656 ; 0.6001 |
| 15 m | 0.04 ; 0.07 | 0.05 ; 0.09 | 0.9603 ; 0.6196 |
| 17 m | 0.04 ; 0.07 | 0.05 ; 0.09 | 0.9519 ; 0.6282 |
| 19 m | 0.05 ; 0.07 | 0.06 ; 0.08 | 0.9366 ; 0.6320 |
| <i>Moyenne</i> | <i>0.04 ; 0.09</i> | <i>0.05 ; 0.10</i> | <i>0.9590 ; 0.5740</i> |

**Tableau 4 : Statistiques sur 15 jours au point 1378
(observations de courants et TELEMAC 3D)**

Certaines représentations graphiques sont présentées en **ANNEXE 3**.

Le modèle reproduit correctement la composante de **vitesse zonale u** aux deux points de mesures qui correspond à la composante principale du courant de marée sur le littoral Loire-Atlantique, direction du courant principalement orienté d'Ouest en Est. Pour la vitesse zonale, le modèle obtient une moyenne RMSE de 0.07 et 0.05 m.s⁻¹ respectivement pour les stations 1377 et 1378 soit au total une **erreur moyenne RMSE de 0.06 m.s⁻¹**.

Lors de la période de ME, aux alentours du 7 octobre, le modèle surestime la composante de **vitesse méridionale v**. Le phénomène est accentué pour la station 1378 et est présent aussi sur son cycle de VE mais de façon réduite. Cette surestimation au niveau de la composante v, en ME, explique les faibles valeurs obtenues pour le paramètre Skill contrairement à la composante u. Le paramètre Skill permet de rendre compte d'erreurs non révélées par la MAE et la RMSE. Pour la vitesse méridionale, le modèle obtient une **erreur moyenne RMSE de 0.10 m.s⁻¹**.

Les temps de renverse des courants sont quant à eux bien reproduits.

Les résultats sont satisfaisants sur tout le littoral et dans la partie externe de l'estuaire. A l'issue de cette phase de calage, le modèle est disposé pour la production de cartes de courants de marée, objet de la convention GEOPAL.

4. EXPLOITATION DU MODELE

4.1. Conditions de forçage pour des marées types

4.1.1. Forçage tidal

Pour les marées statistiques, le signal de marée est toujours issu du modèle de constantes harmoniques *cstFRANCE*. Cependant le modèle hydrodynamique n'est plus simulé en prédictions de période réelle mais en prédictions de marées statistiques. Le modèle simule des marées types :

- marée de ME moyenne de coefficient 45,
- marée de VE moyenne de coefficient 95.

Les niveaux d'eau à la frontière maritime sont calculés à partir du programme *cl45-95* ayant pour port de référence Saint-Nazaire.

4.1.2. Forçage fluvial

Un débit moyen de $850 \text{ m}^3/\text{s}$ est imposé à la frontière fluviale.

Les courants modélisés correspondent à une simulation de 3 jours de calcul statistique de marées types VE moyenne (C=95) et de ME moyenne (C=45). Les deux premiers jours de calcul correspondent à une phase d'initialisation du modèle, seuls les résultats correspondant au troisième jour sont exploités pour l'étude. Avant d'être exploité, le modèle est comparé aux données statistiques (prédictions du niveau d'eau et roses de courant) du SHOM issues de l'analyse des mesures.

4.2. Validation des niveaux d'eau

La validation se fait sur les mêmes points de mesure que pour le calage, localisés sur la Figure 3.3. Le SHOM dispose de constantes harmoniques en chacun des points de mesures issues de leur analyse. Seul le point *Le Grand Trou Ouest* n'en dispose pas car la période de mesure, sur 15 jours, était d'une durée trop courte pour effectuer une analyse harmonique. Il est ainsi possible de calculer les niveaux d'eau prédits pour des coefficients de marée de ME et VE moyennes. Ces niveaux d'eau sont comparés statistiquement aux résultats de simulation du modèle, voir Tableau 5.

Certaines représentations graphiques sont présentées en **ANNEXE 4**.

Le modèle reproduit correctement les amplitudes de marée de ME et VE moyennes sur toute l'emprise maritime. L'erreur la plus grande se situe toujours au niveau Sud de la Baie du Bourgneuf avec la station Fromentine Embarcadère. **L'erreur moyenne RMSE en ME est de 0.03 m et en VE est de 0.08 m.**

| C = 45 ; C = 95 | | | |
|---------------------------|----------------|-----------------|-----------------|
| | MAE (m) | RMSE (m) | Skill |
| Saint-Nazaire | 0.03 ; 0.06 | 0.03 ; 0.08 | 0.9996 ; 0.9995 |
| Pointe de Saint-Gildas | 0.03 ; 0.07 | 0.03 ; 0.10 | 0.9996 ; 0.9992 |
| Bouée Castouillet | 0.03 ; 0.08 | 0.04 ; 0.08 | 0.9993 ; 0.9993 |
| Bouée Fromentine | 0.06 ; 0.05 | 0.07 ; 0.06 | 0.9973 ; 0.9997 |
| Bouée Le Goéland | 0.06 ; 0.13 | 0.07 ; 0.16 | 0.9982 ; 0.9987 |
| Fromentine Embarcadère | 0.07 ; 0.21 | 0.08 ; 0.25 | 0.9965 ; 0.9929 |
| Fromentine Large | 0.02 ; 0.03 | 0.02 ; 0.04 | 0.9998 ; 0.9998 |
| Galate | 0.04 ; 0.06 | 0.04 ; 0.07 | 0.9992 ; 0.9996 |
| Grand Trou | 0.02 ; 0.04 | 0.02 ; 0.05 | 0.9999 ; 0.9998 |
| La Banche | 0.04 ; 0.07 | 0.04 ; 0.07 | 0.9991 ; 0.9995 |
| Le Croisic | 0.03 ; 0.17 | 0.04 ; 0.23 | 0.9994 ; 0.9947 |
| Le Grand Charpentier | 0.02 ; 0.07 | 0.03 ; 0.08 | 0.9997 ; 0.9994 |
| Le Pilier | 0.03 ; 0.07 | 0.04 ; 0.09 | 0.9994 ; 0.9993 |
| Le Pouliguen | 0.02 ; 0.06 | 0.03 ; 0.08 | 0.9997 ; 0.9995 |
| L'Herbaudière | 0.04 ; 0.08 | 0.05 ; 0.11 | 0.9991 ; 0.9990 |
| Pornic | 0.07 ; 0.16 | 0.08 ; 0.20 | 0.9973 ; 0.9968 |
| Pornichet | 0.03 ; 0.04 | 0.03 ; 0.05 | 0.9995 ; 0.9998 |
| Basse Lovre | 0.02 ; 0.04 | 0.02 ; 0.05 | 0.9998 ; 0.9998 |
| Ciresol M1 | 0.03 ; 0.06 | 0.03 ; 0.07 | 0.9995 ; 0.9995 |
| Ciresol M2 | 0.01 ; 0.02 | 0.02 ; 0.02 | 0.9998 ; 0.9999 |
| Large Saint-Gildas | 0.02 ; 0.05 | 0.02 ; 0.07 | 0.9998 ; 0.9996 |
| Epave 4658N255W | 0.02 ; 0.02 | 0.02 ; 0.03 | 0.9997 ; 0.9999 |
| Port-Joinville | 0.02 ; 0.06 | 0.03 ; 0.07 | 0.9996 ; 0.9996 |
| Saint-Gilles-Croix-de-Vie | 0.02 ; 0.03 | 0.02 ; 0.04 | 0.9998 ; 0.9999 |
| Hoëdic | 0.02 ; 0.06 | 0.03 ; 0.07 | 0.9996 ; 0.9995 |
| Houat | 0.03 ; 0.07 | 0.03 ; 0.08 | 0.9994 ; 0.9994 |
| Bouée Locmariaquer | 0.02 ; 0.05 | 0.03 ; 0.07 | 0.9997 ; 0.9995 |
| Bouée Basse Dumet | 0.02 ; 0.05 | 0.03 ; 0.06 | 0.9997 ; 0.9997 |
| Vilaine P2 | 0.03 ; 0.05 | 0.04 ; 0.08 | 0.9994 ; 0.9992 |

Tableau 5 : Statistiques sur 3^{ème} jour de calcul
(Comparaisons entre les prédictions SHOM en ME et VE moyenne, et TELEMAC 3D)

4.3. Validation des courants

La validation des courants se fait également sur les mêmes points de mesures que pour le calage (stations 1377 et 1378). Le SHOM dispose aussi d'autres mesures de courants sur la zone modélisée, courantomètres mouillés lors de différentes campagnes en mer. Les points de mesures disponibles sont localisés en Figure 4.1. Les courantomètres sont regroupés suivant leur nature :

- mesure ponctuelle de la vitesse en surface (**rotor** et **ADCP ponctuel** de 1967 à 2007),
- mesure du profil de vitesse sur toute la colonne d'eau (**ADCP profileur** en 2011).

L'analyse statistique des mesures fournit les courants de marées types, en chaque point de mesure, pour une ME moyenne (coefficient 45) et une VE moyenne (coefficient 95). Les valeurs horaires des courants en ME et VE (direction, intensité, roses de courant, composantes de vitesse u et v) sont déterminées de 6h avant la PM du port de référence à 6h après la PM.

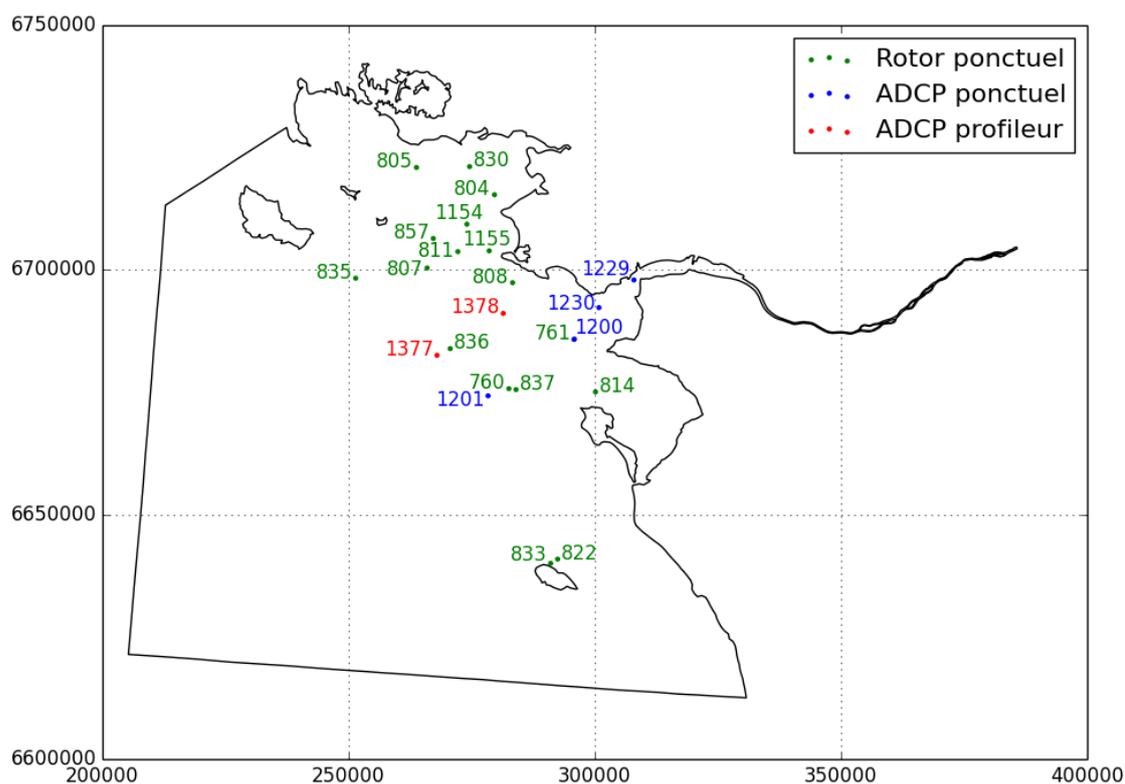


Figure 4.1 : Localisation des courantomètres ponctuels et profileurs

Les résultats de simulation fournissent une estimation des courants de ME et VE moyenne, 6 heures avant et après la PM. Une comparaison entre les roses de courants statistiques (issues de l'analyse des mesures) et le modèle est alors possible.

La comparaison en chaque point est synthétisée en Figure 4.2 pour la VE moyenne et en Figure 4.3 pour la ME moyenne. Cette comparaison est ici limitée aux courantomètres ponctuels et les zooms sur la partie Nord et Sud sont présentés en **ANNEXE 5**.

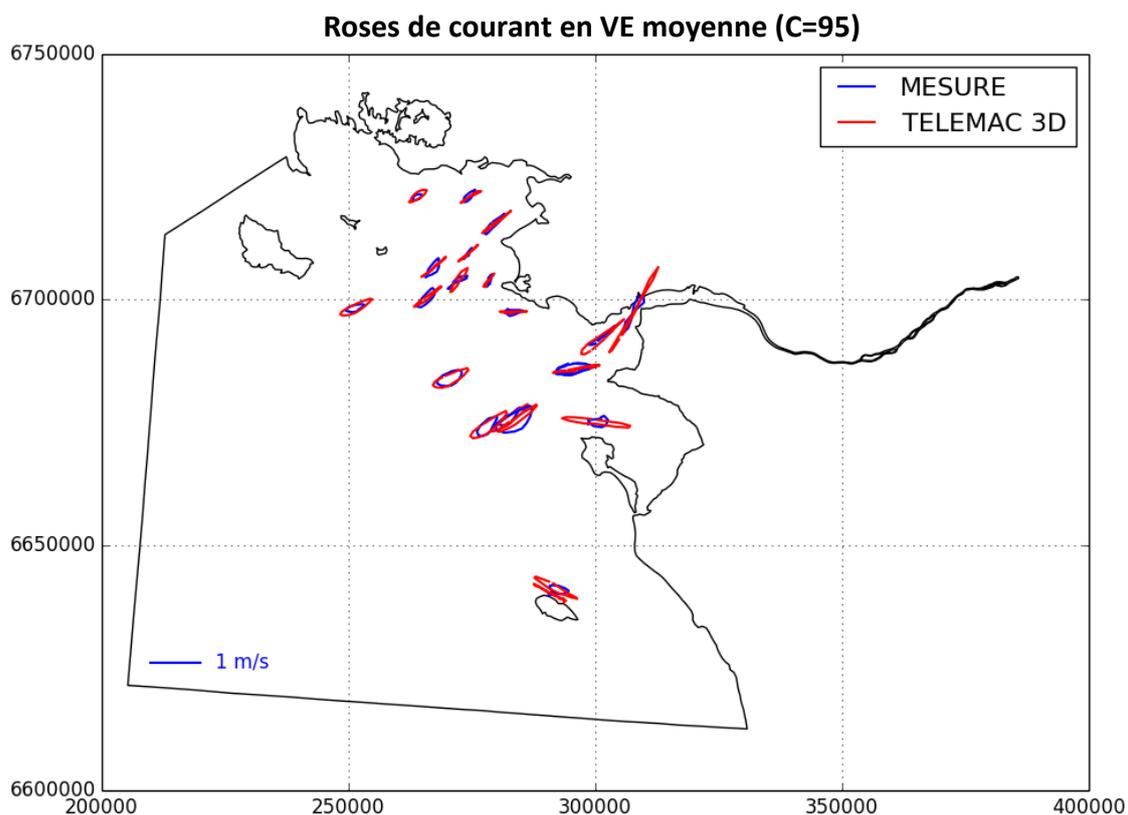


Figure 4.2 : Comparaisons entre les roses de courant, issues des courantomètres ponctuels, et modélisées en VE

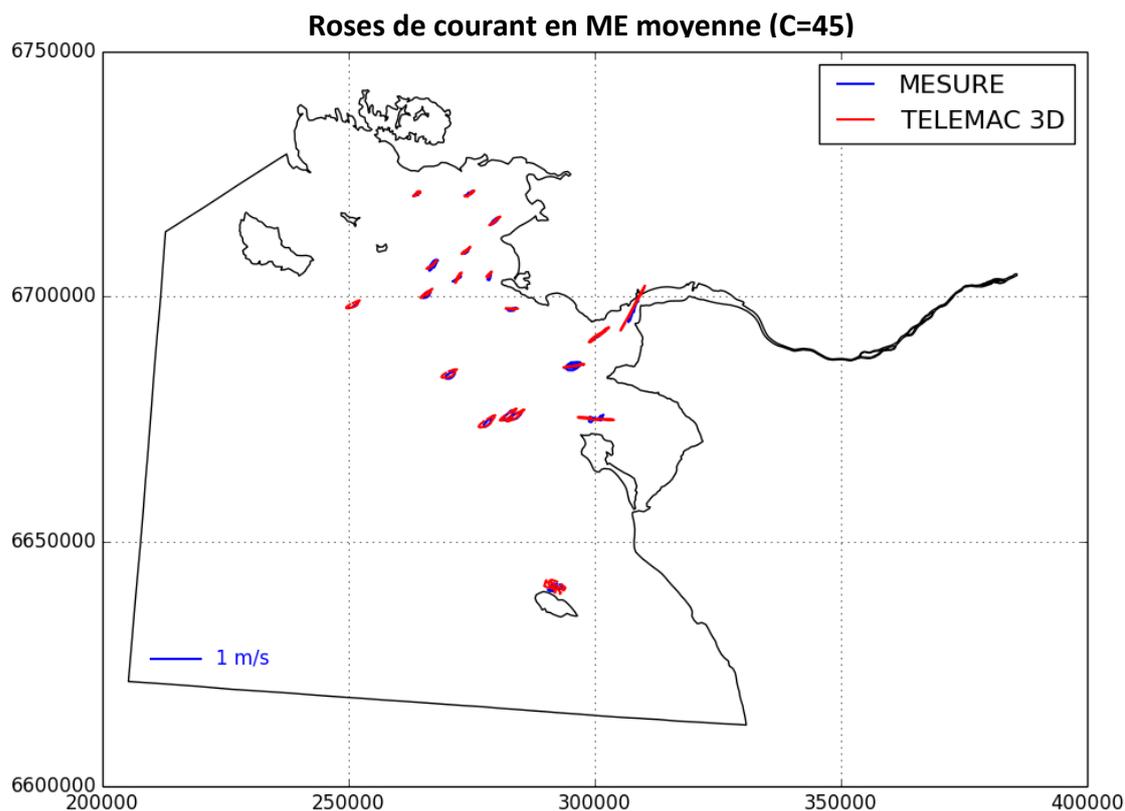


Figure 4.3 : Comparaisons entre les roses de courant, issues des courantomètres ponctuels, et modélisées en ME

Dans l'ensemble, les comparaisons sont satisfaisantes. Les heures de renverse correspondent et les variations d'amplitude sont plutôt bien reproduites que ce soit en VE ou ME. Les courants alternatifs à l'entrée de l'embouchure de la Loire sont bien simulés. Les points les moins satisfaisants sont les points 814, 822 et 833 où l'amplitude modélisée en VE est plus forte que celle issue des mesures.

Les données de courants issues des courantomètres ADCP de type profileurs ont aussi été comparées au modèle. La comparaison s'effectue pour différentes couches, caractérisant la surface, la mi-profondeur et le fond. Les données de vitesse et de direction du courant sur une VE sont comparées et illustrées en **ANNEXE 6**. L'évolution des courants sur la colonne d'eau est correctement modélisée en comparaison de l'analyse statistique des stations 1377 et 1378.

Au final, les courants importants sont bien représentés par le modèle sur le littoral de la région des Pays-de-la-Loire. L'exploitation du modèle pour des données de courants de ME et VE moyenne est validée pour l'élaboration de produits de courants marins dont des exemples sont présentés en **ANNEXE 7**.



CONCLUSION

L'objet de l'étude était de fournir sur les points du maillage les informations de vitesse et de direction du courant :

- en VE moyenne (coefficient de marée égal à 95) et ME moyenne (coefficient de marée égal à 45) ;
- sur un cycle de marée, heure par heure : 6 heures avant la pleine mer du port de référence à 6 heures après ;
- pour trois niveaux de profondeurs : surface, mi-profondeur et fond.

Le modèle hydrodynamique 3D mis en place permet de calculer l'évolution des courants de marée sur la colonne d'eau sur l'ensemble du littoral de la région des Pays-de-la-Loire, incluant l'estuaire de la Loire. Le calcul repose sur un système de modélisation aux éléments finis qui s'appuie sur un maillage triangulaire mixte et des plans sur la verticale en transformation sigma. Le modèle courantologique présente une résolution spatiale variable (d'une centaine de mètres à la côte à quelques kilomètres au large) et temporelle de 15 minutes.

Le calage du modèle a été réalisé à la fois en niveau d'eau et en vitesse sur une période réelle récente (septembre et octobre 2011). Les données de références utilisées pour le calage sont de deux types :

- mesures in-situ :
 - observations du niveau d'eau ;
 - courantomètres de type ADCP profileur ;
- prédictions du SHOM des hauteurs d'eau.

La propagation de la marée est de bonne qualité et statistiquement le modèle représente bien les intensités des vitesses par comparaison aux mesures. Les erreurs du modèle sont estimées par des descripteurs statistiques. Au final le modèle présente des erreurs moyennes de type RMSE par rapport aux niveaux d'eau observés de 0.13 m, prédictions de 0.10 m, et profils de vitesses : composante u de $0.06 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ et composante v $0.10 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$.

Le modèle calé est opérationnel pour simuler des marées statistiques de type ME et VE moyennes de coefficients respectifs 45 et 95. Les résultats de cette modélisation sont comparés aux données statistiques du SHOM issues de l'analyse des mesures (prédictions du niveau d'eau et roses de courants). Le modèle présente une erreur moyenne de type RMSE par rapport aux niveaux d'eau statistiques de 0.03 m en ME et 0.08 m en VE. L'oscillation verticale du niveau d'eau et les courants de marée induits sont bien reproduits par le modèle. Les résultats de la modélisation statistique sont validés et exploités pour l'élaboration de produits de courants marins.

REFERENCES

- [1] Bernard S. 2007. La marée océanique côtière. *Institut océanographique*. ISBN 978-2903581329
- [2] Guide to programming in the Telemac system version 6.0. Version 1.0.
- [3] Hervouet J.M. 2003. Hydrodynamique des écoulements à surface libre. Modélisation numérique avec la méthode des éléments finis. *Presses de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées*. ISBN 2-85978-379-2.
- [4] Le Bars Y, Lyard F, Jeandel C, Dardengo Leonardo. 2010. The AMANDES tidal model for the Amazon estuary and shelf. *Ocean Modelling* 31: 132-149.
- [5] Modèle numérique de terrain sur le secteur au large de la Loire : procédures, données et analyses. SHOM, Rapport interne, SHOM/DOPS/MIP/BATHY, 2013.
- [6] Pham C-T, 2013. Méthodologie pour la simulation de la marée avec la version 6.2 de TELEMAC 2D et 3D.
- [7] Réalisation d'un outil opérationnel de calcul des courants côtiers à partir de TELEMAC-3D. SOGREAH, 2005, Rapports n°2-740212-R1, n° 2-740212-R2, n° 2-740212-R3 et n° 2-740212-R4.
- [8] Smagorinsky J. 1963. General circulation experiments with the primitive equations I: The basic experiment. *Monthly Weather Review*. 91(3) : 99-164.
- [9] Système de modélisation TELEMAC – Hydrodynamique tridimensionnelle – Logiciel TELEMAC 3D Version 6.2 – Manuel de l'utilisateur.
- [10] Toublanc F, Brenon I, Coulombier T, Le Moine O. 2013. Salinity and suspended dynamics in response to forcing changes in a small macrotidal estuary (Charente, France). *Coastal Dynamics*.
- [11] Warner J.C, W.R Geyer, Lertzak J.A. 2005. Numerical modeling of an estuary: A comprehensive skill assessment. *Journal of Geophysical Research*, VOL. 110n C05001, doi:10.1029/2004JC002691.
- [12] Willmott C.J. 1981. On the validation of models. *Physical Oceanography*, 2: 184-194.
- [13] Willmott C.J. 1982. Some comments on the evaluation of model performance. *Bulletin of The American Meteorological Society* 63: 1309-1313.
- [14] Willmott C.J, Matsuura K. 2005. Advantages of the mean absolute error (MAE) over the root mean square error (RMSE) in assessing average model performance. *Climate Research* 30: 79-82.
- [15] Willmott C.J, Robeson S, Matsuura K. 2012. Short communication a refined index of model performance. *International Journal of Climatology* 32: 2088-2094



ANNEXES

ANNEXE 1

Comparaisons entre les observations du niveau d'eau et le modèle 42

ANNEXE 2

Comparaisons entre les prédictions SHOM et le modèle 44

ANNEXE 3

Comparaisons entre les mesures ADCP et le modèle 46

ANNEXE 4

Comparaisons entre les prédictions du SHOM (coefficients 45 et 95) et le modèle 48

ANNEXE 5

Zooms sur la comparaison entre les roses de courants issues des mesures et du modèle 50

ANNEXE 6

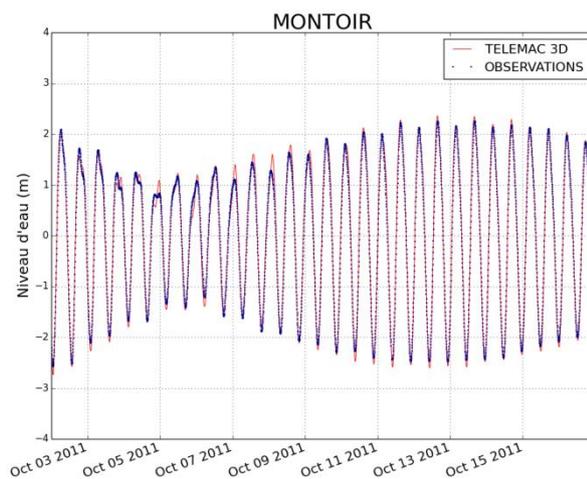
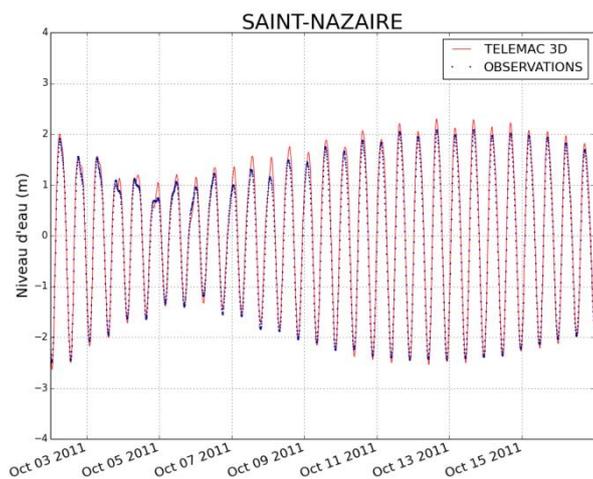
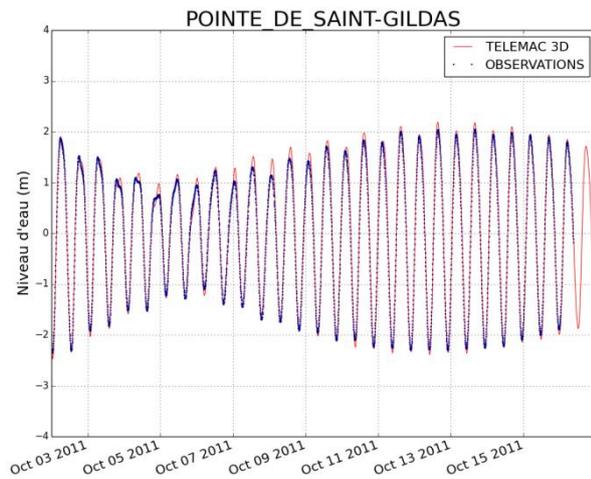
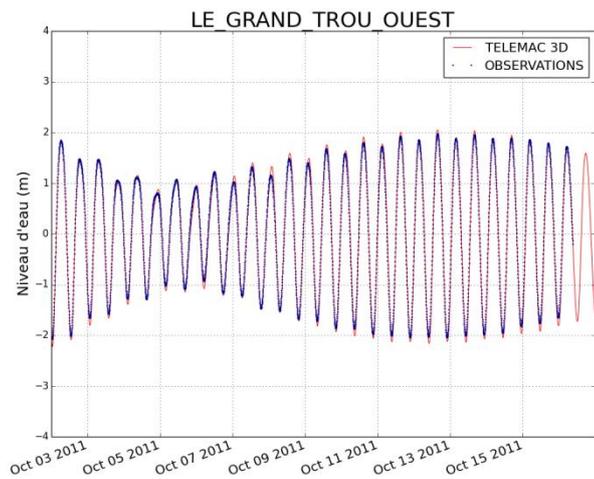
Comparaisons entre les courants statistiques (ADCP profileur) et modélisés..... 53

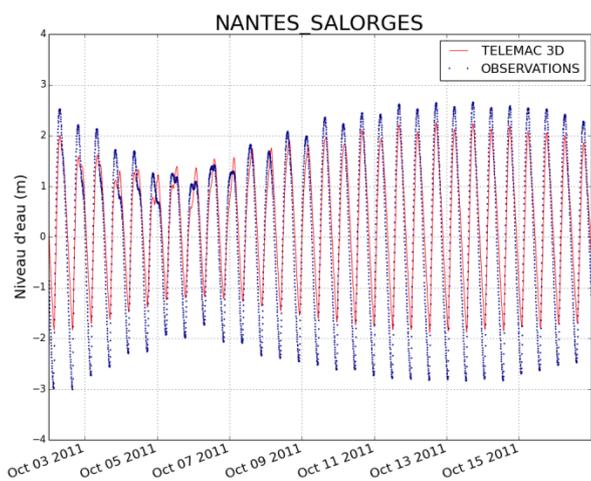
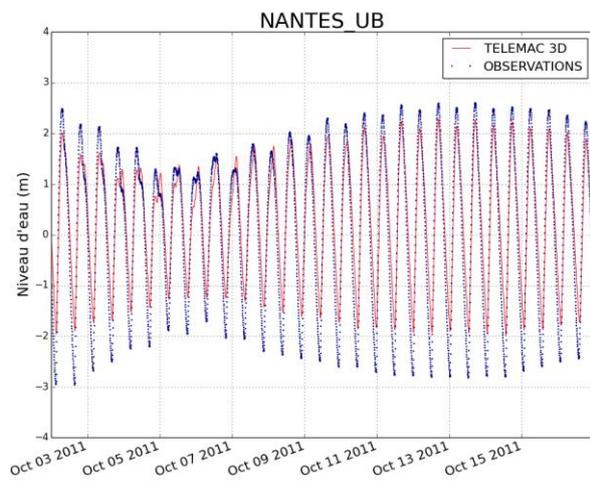
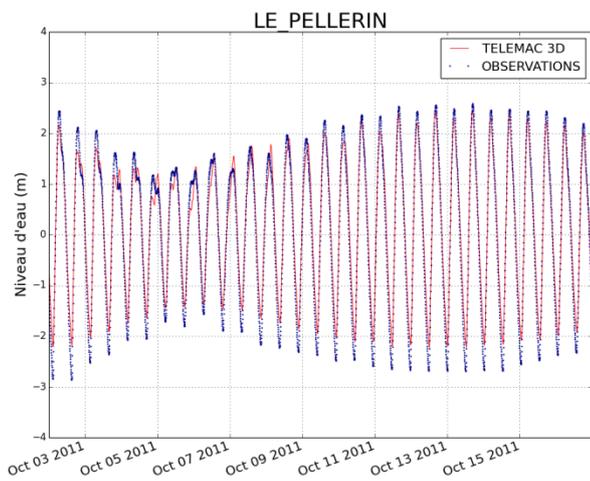
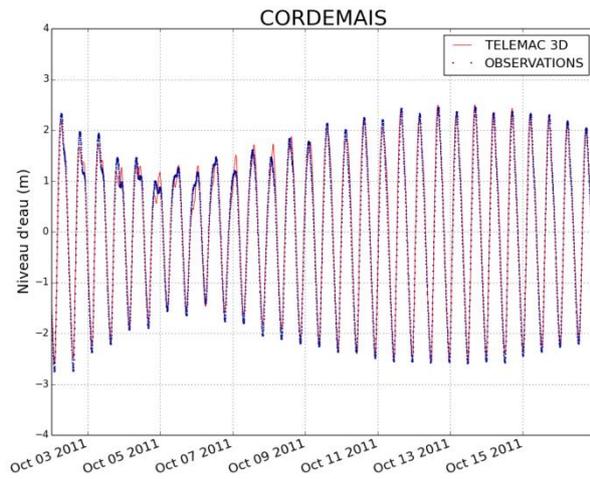
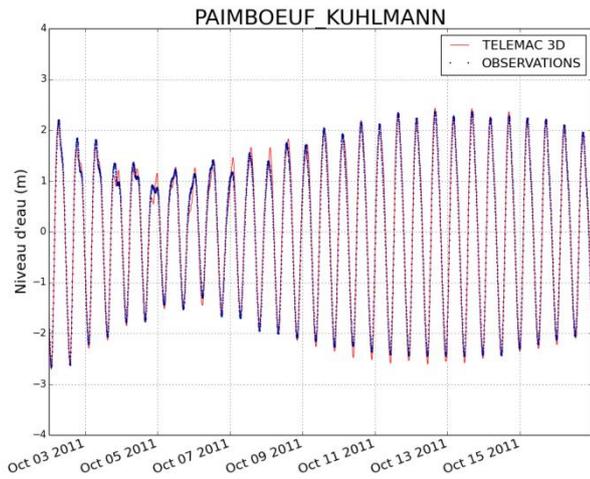
ANNEXE 7

Exemples de cartes de courants de marée issues de l'exploitation du modèle 55

ANNEXE 1

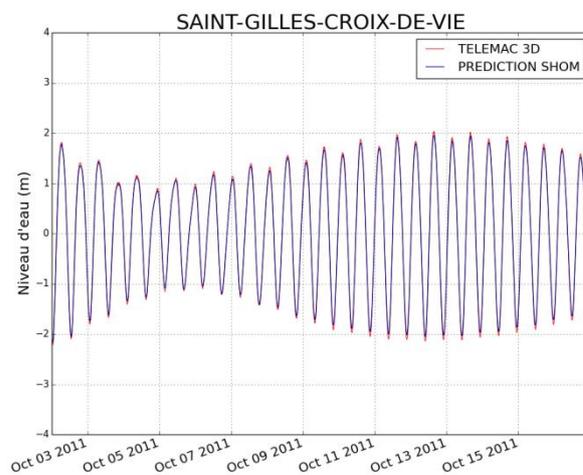
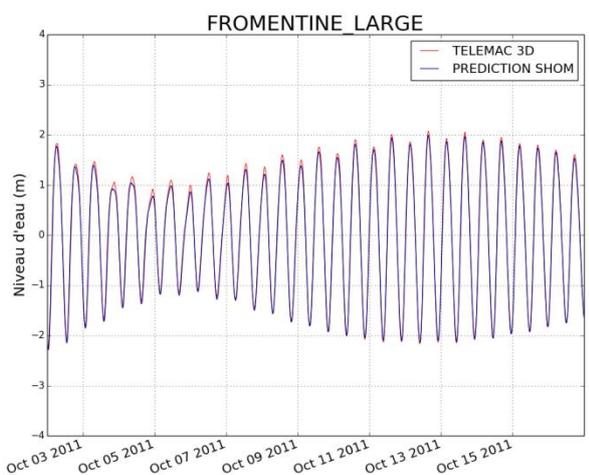
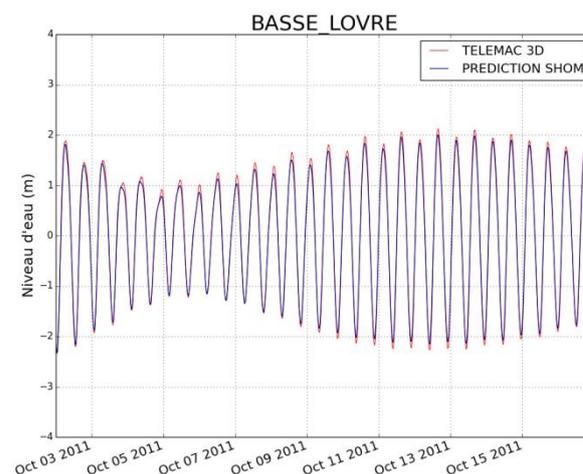
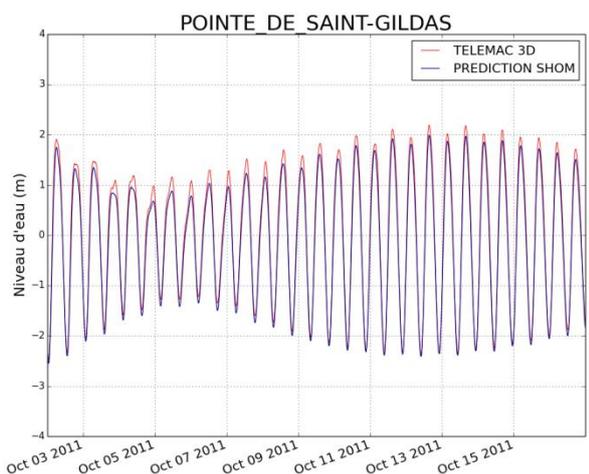
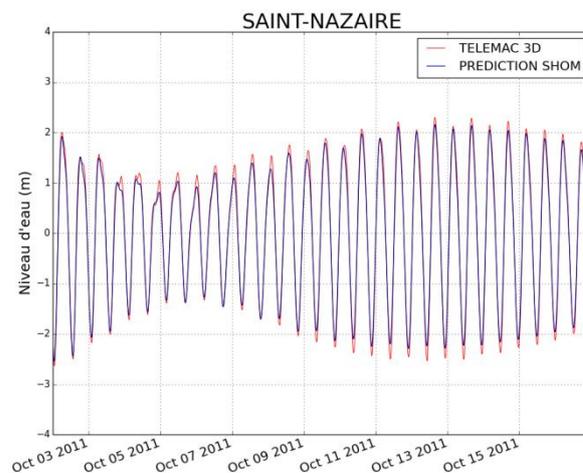
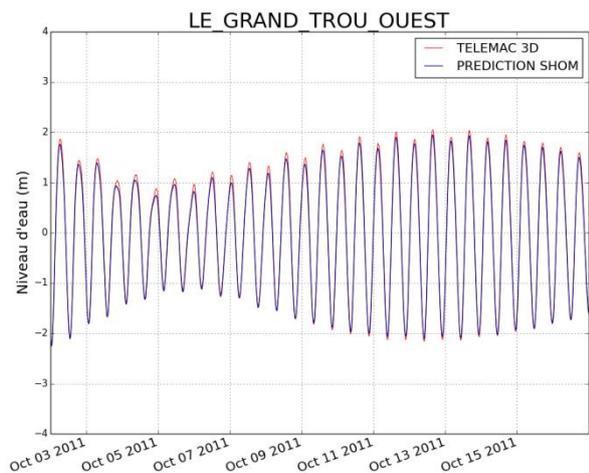
Comparaisons entre les observations de niveau d'eau et le modèle

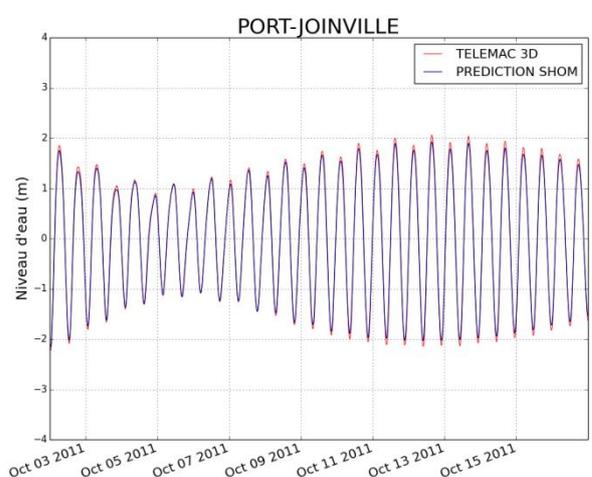
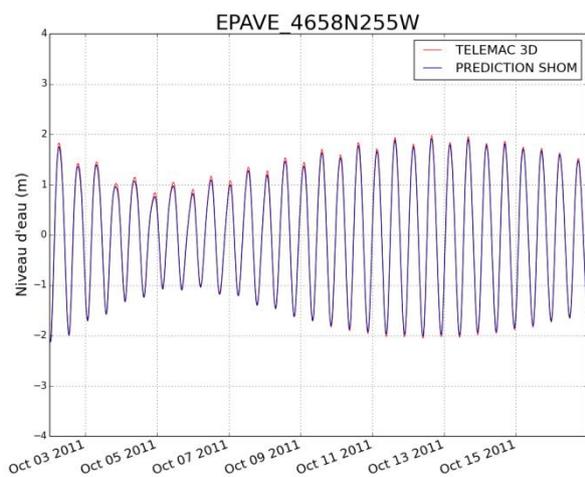
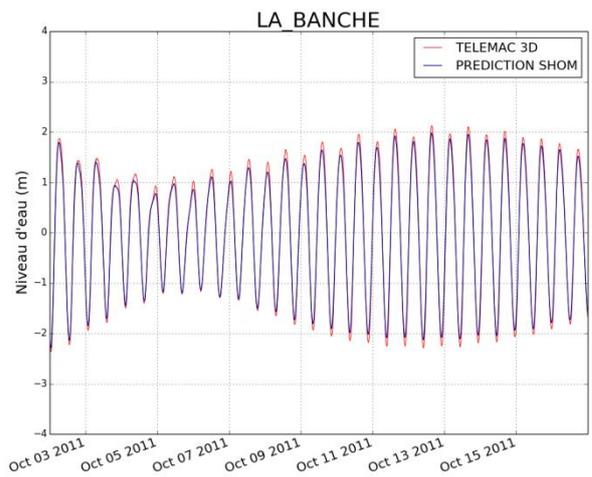
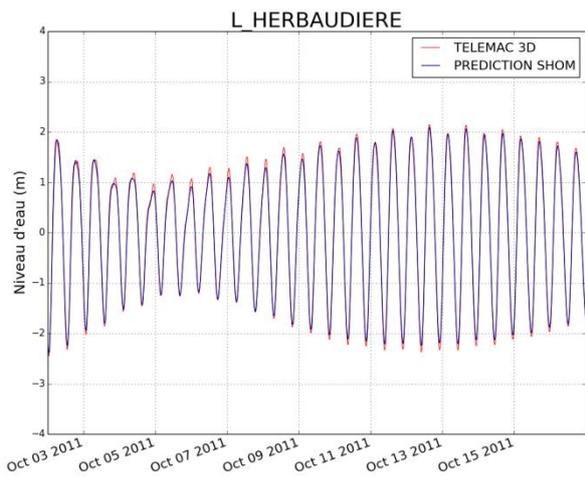
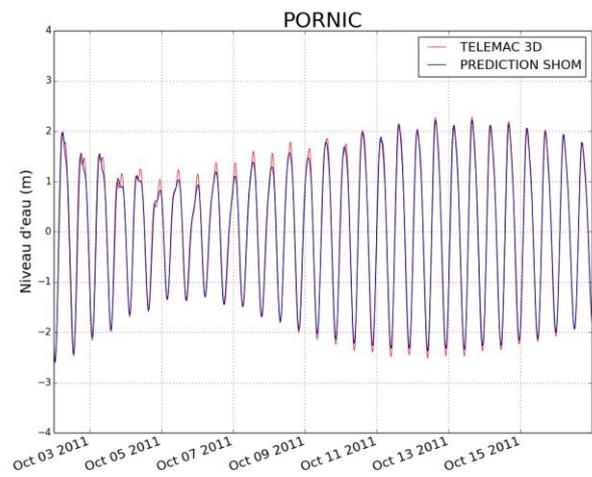
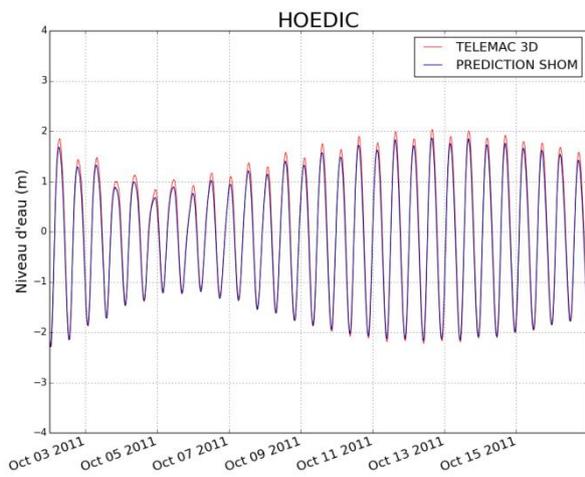




ANNEXE 2

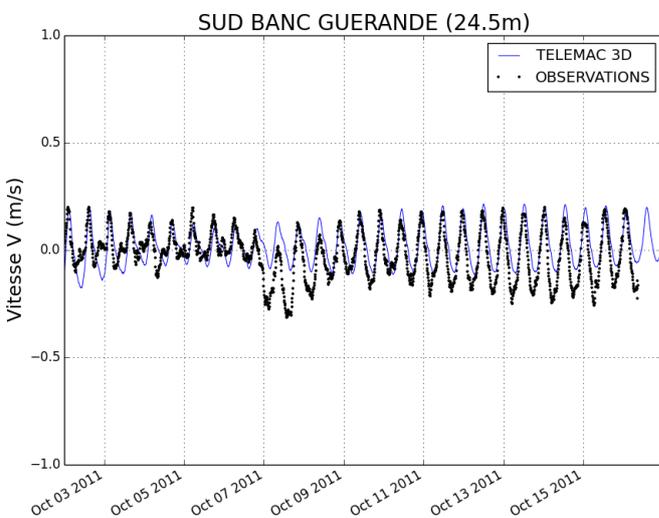
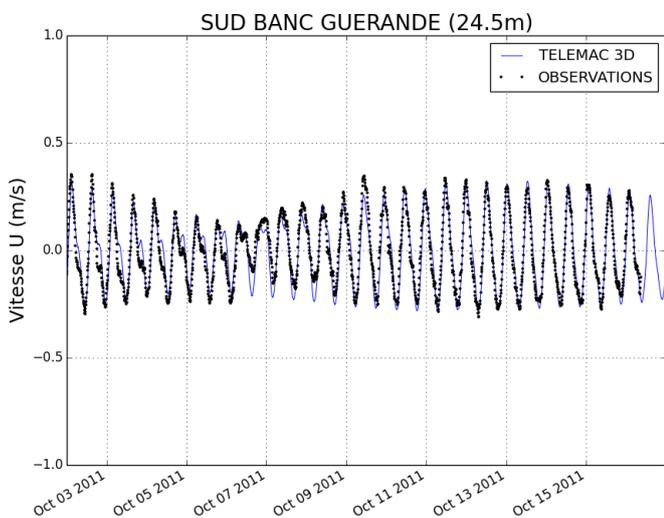
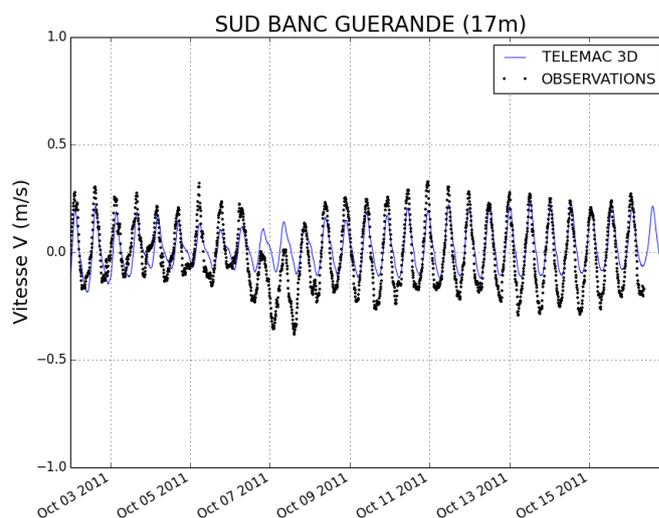
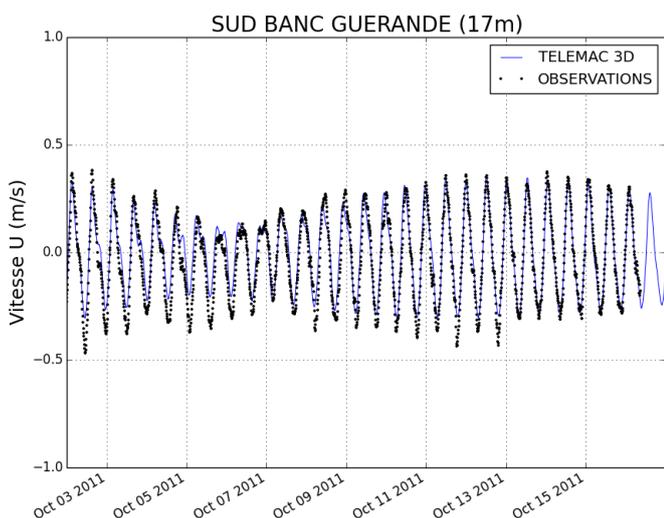
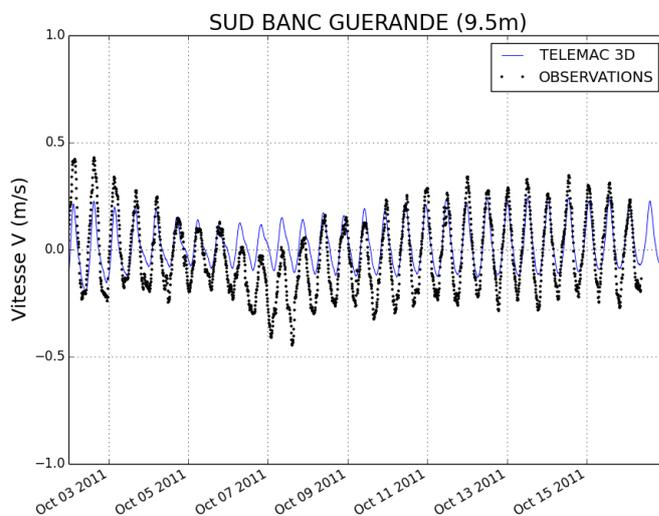
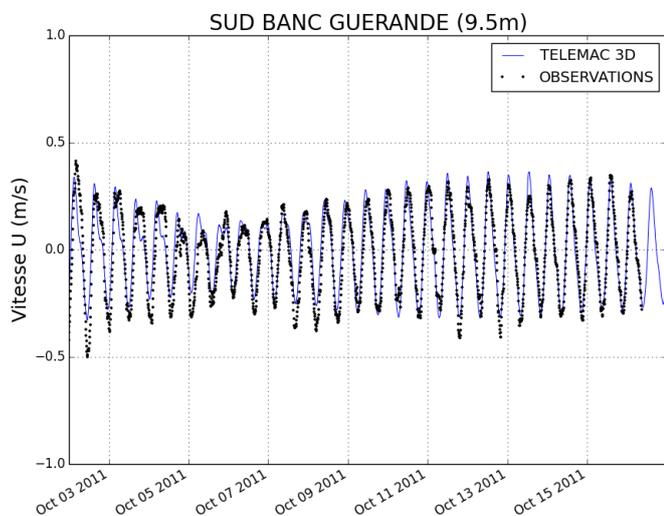
Comparaisons entre les prédictions SHOM et le modèle

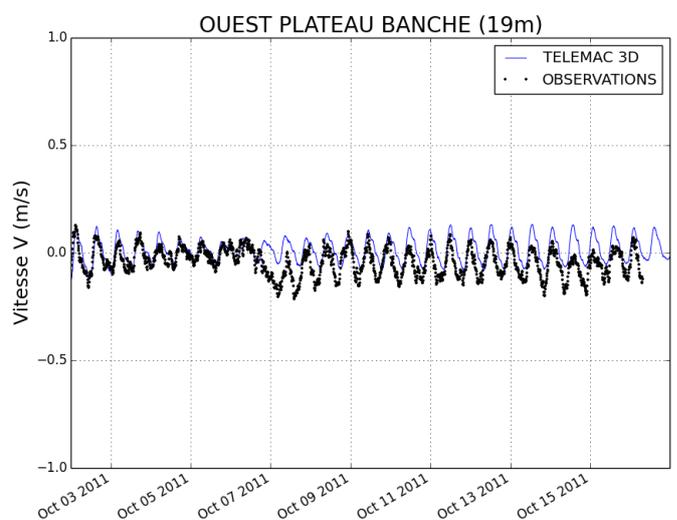
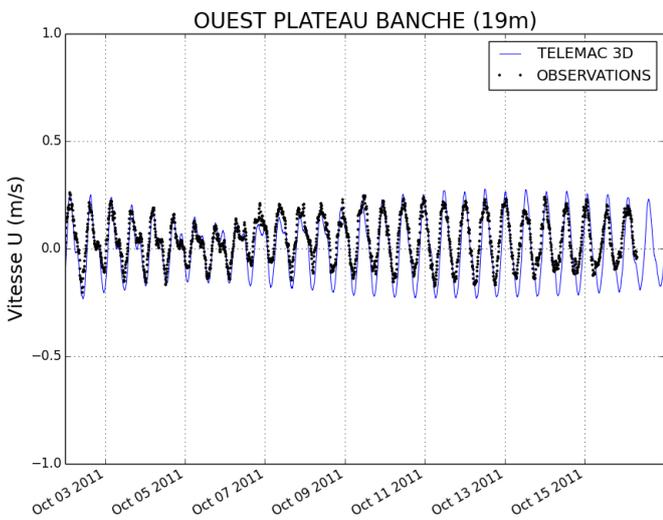
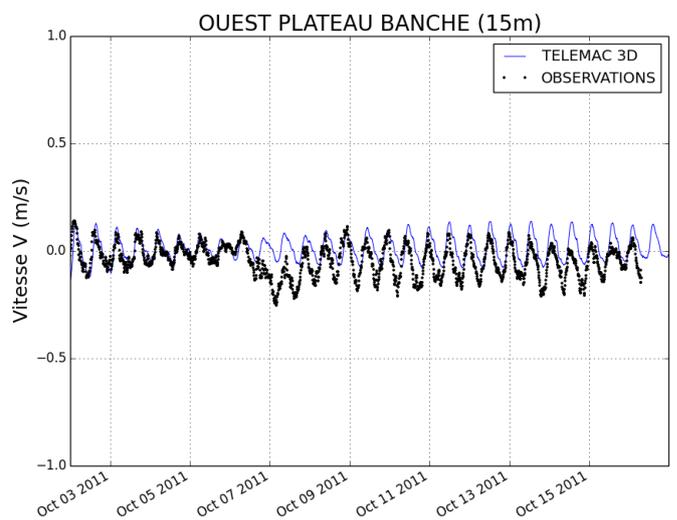
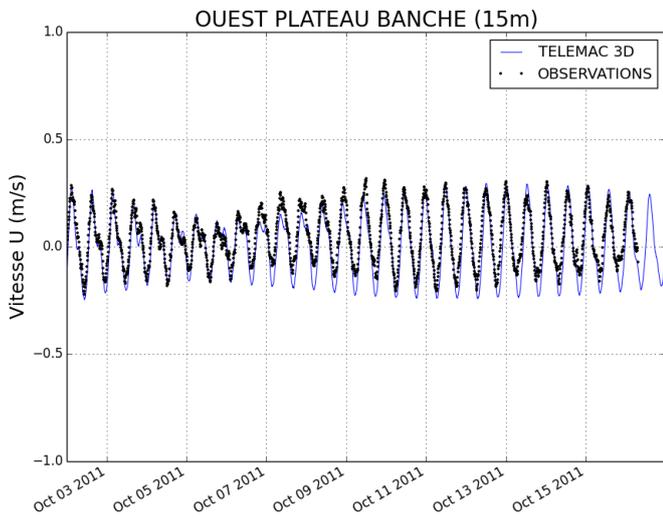
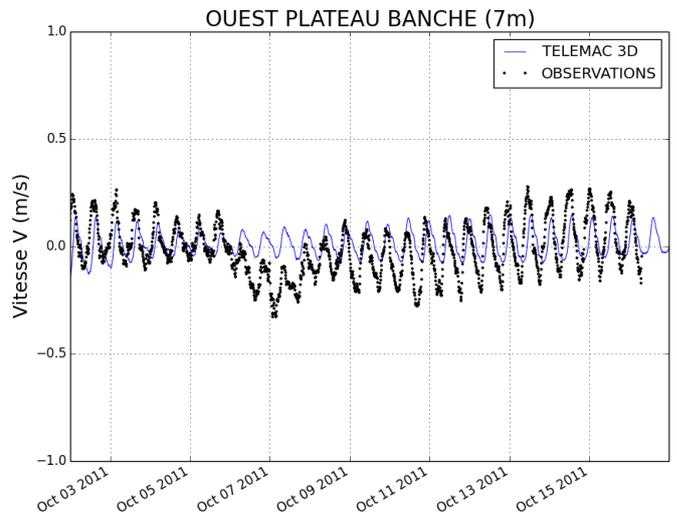
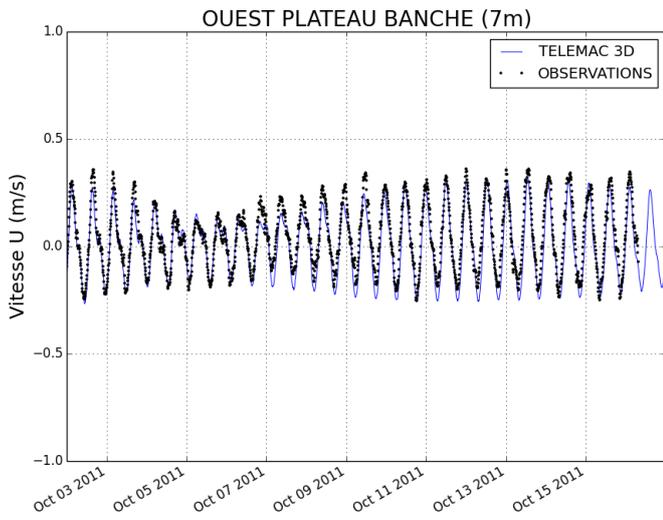




ANNEXE 3

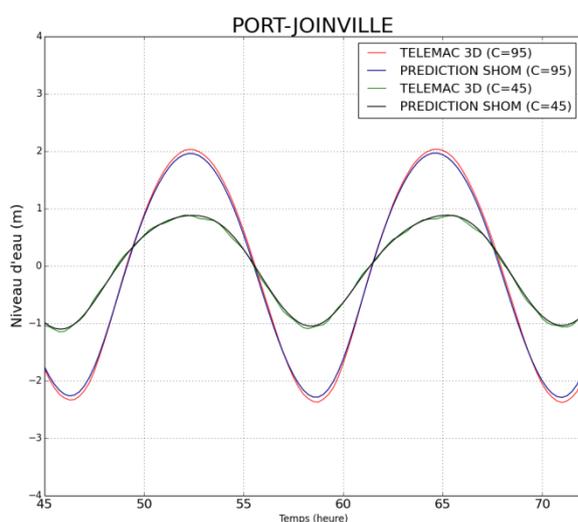
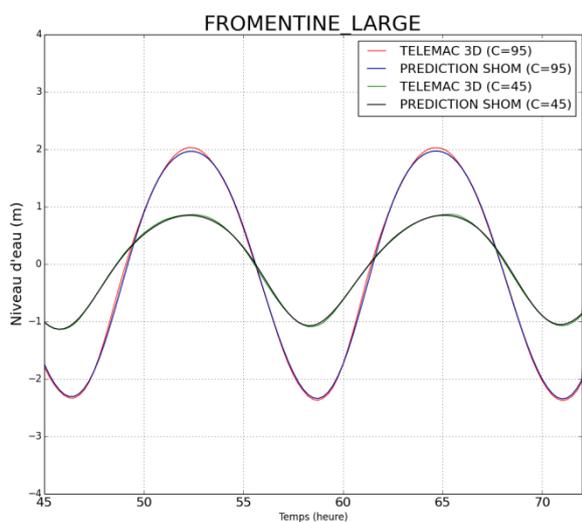
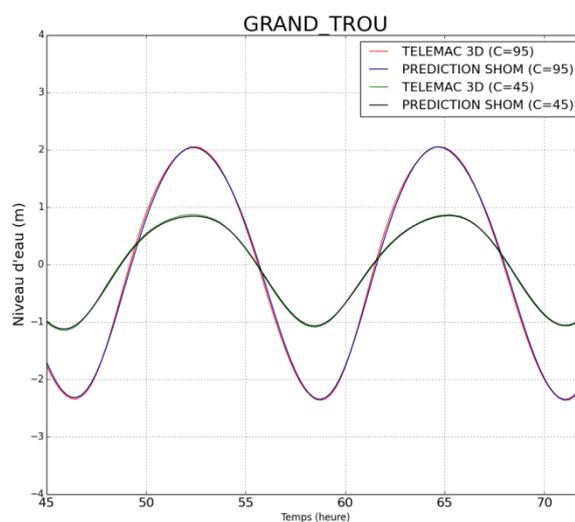
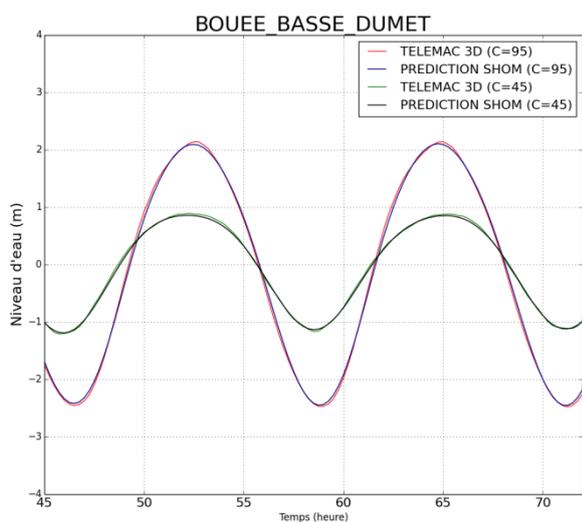
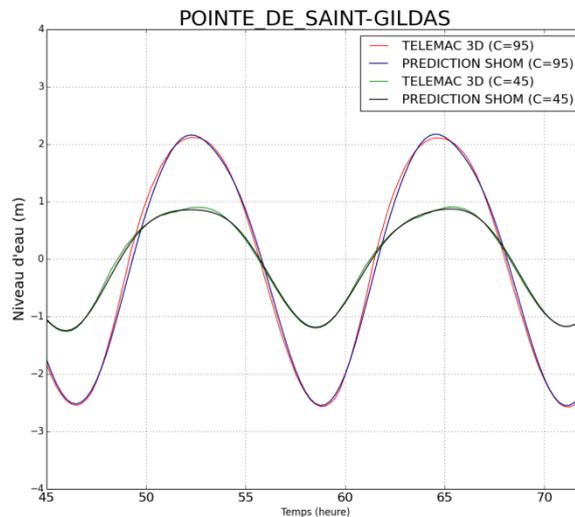
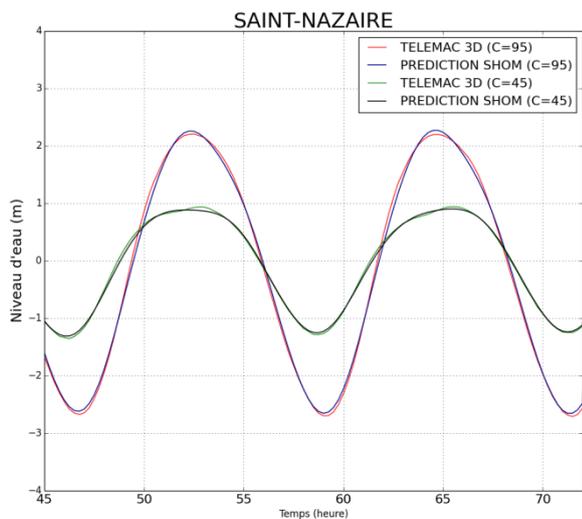
Comparaisons entre les mesures ADCP et le modèle

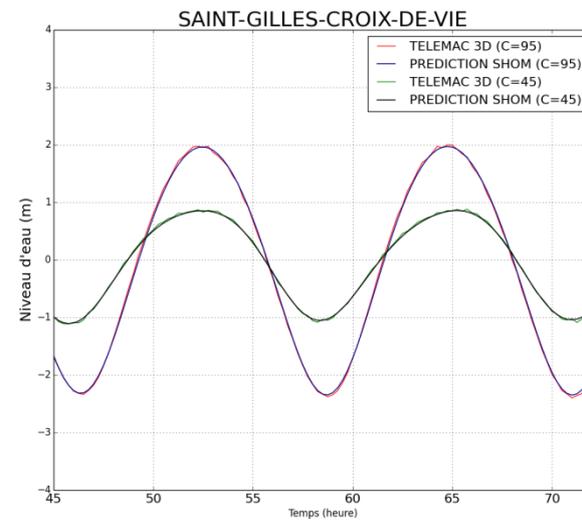
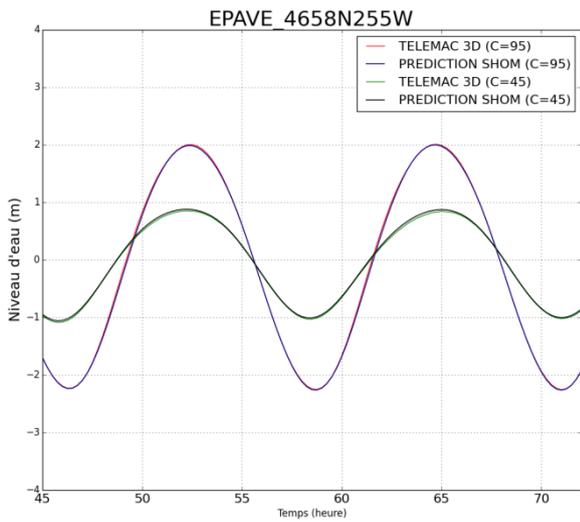
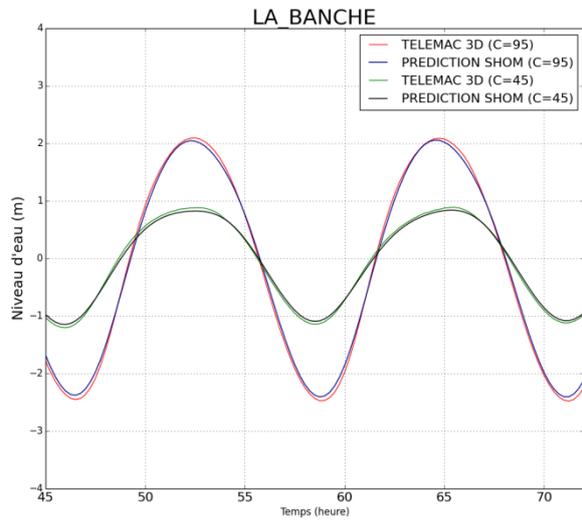
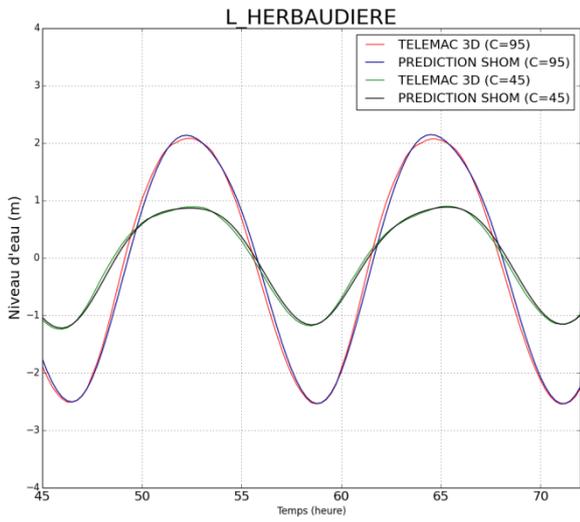
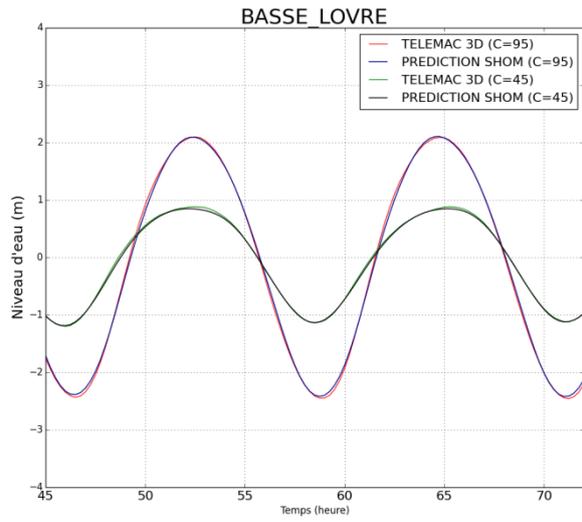
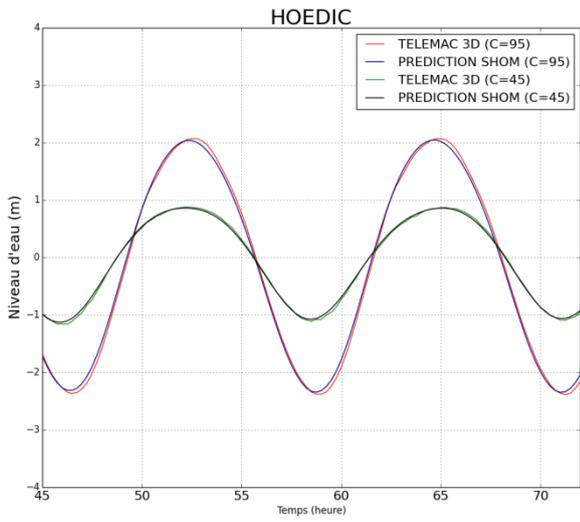




ANNEXE 4

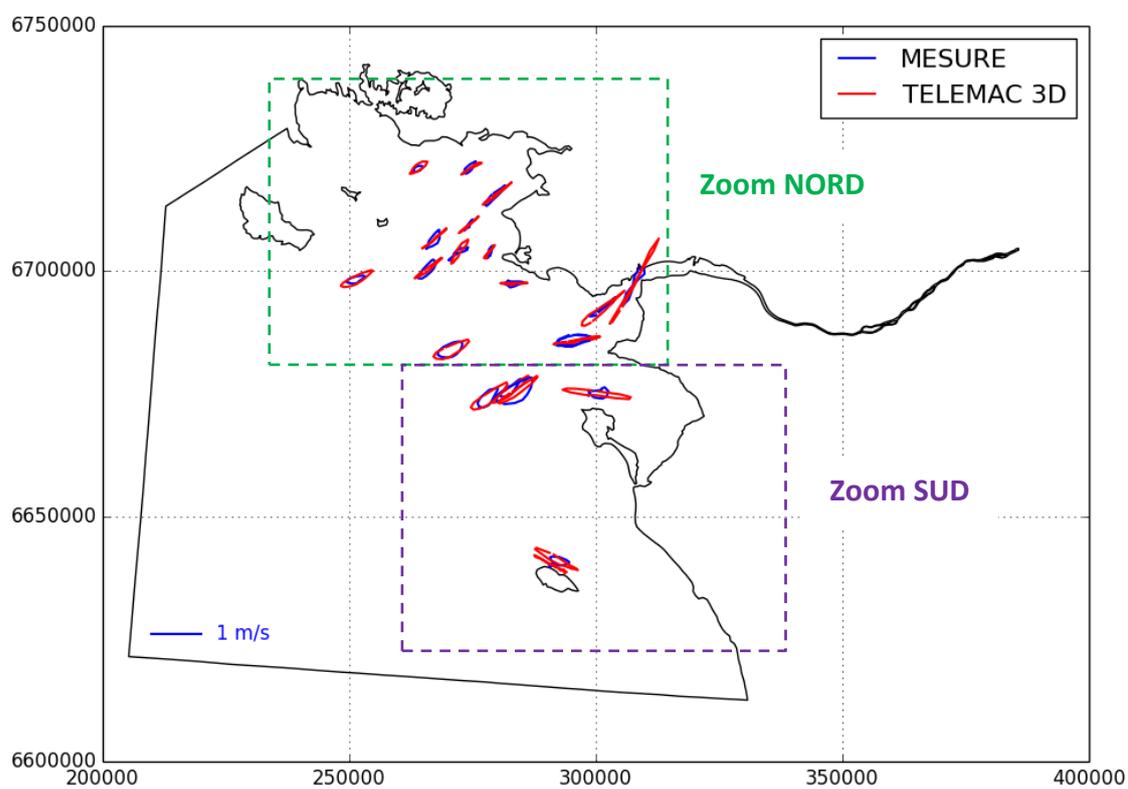
Comparaisons entre les prédictions du SHOM (coefficients 45 et 95) et le modèle



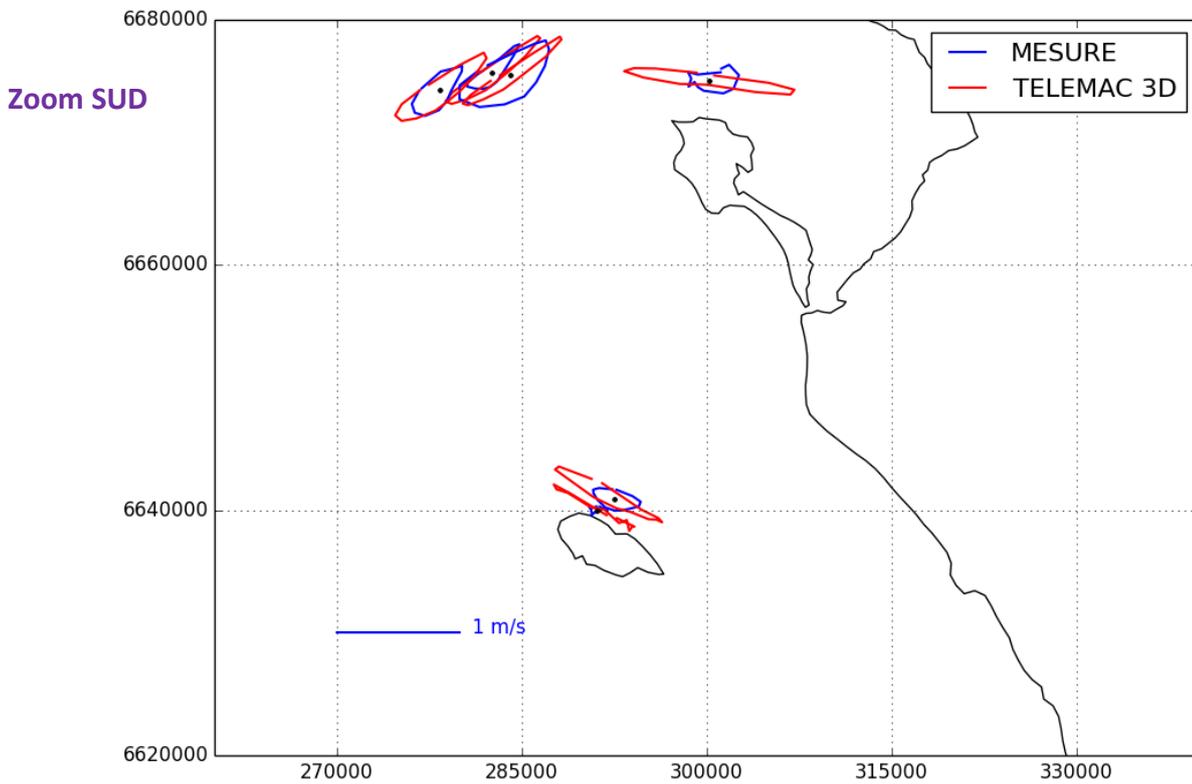
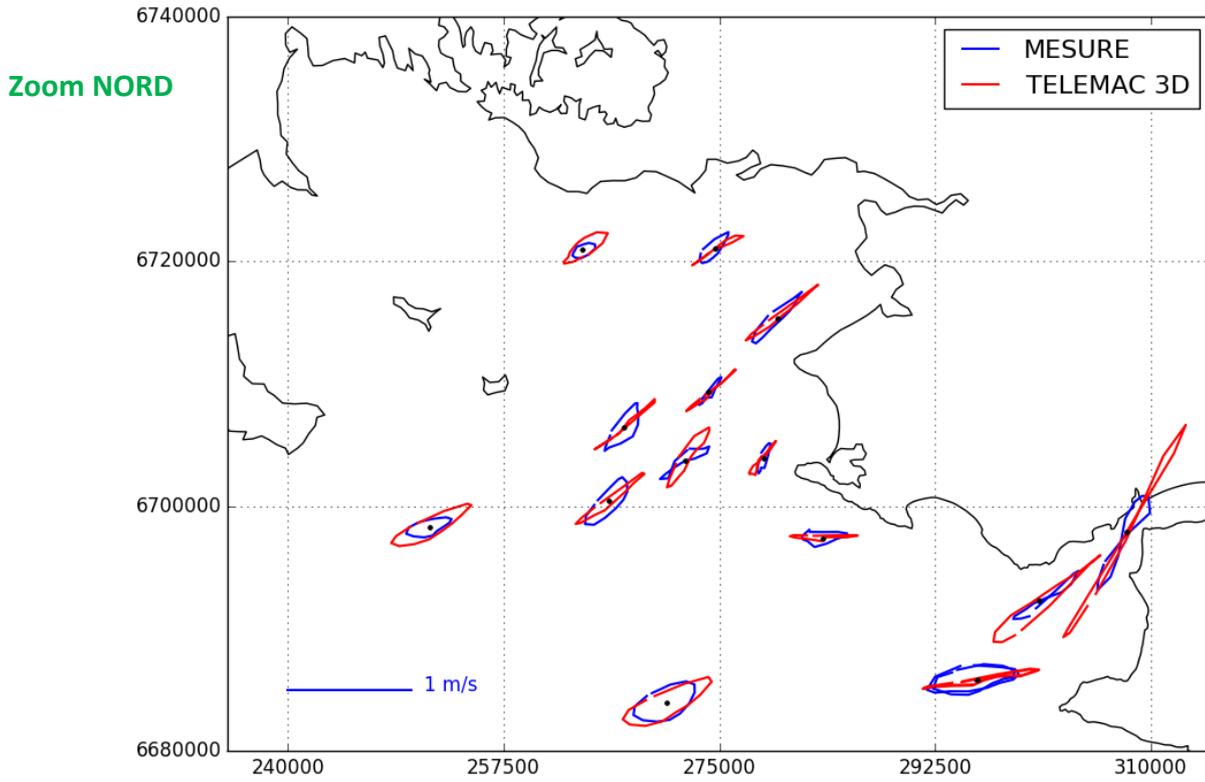


ANNEXE 5

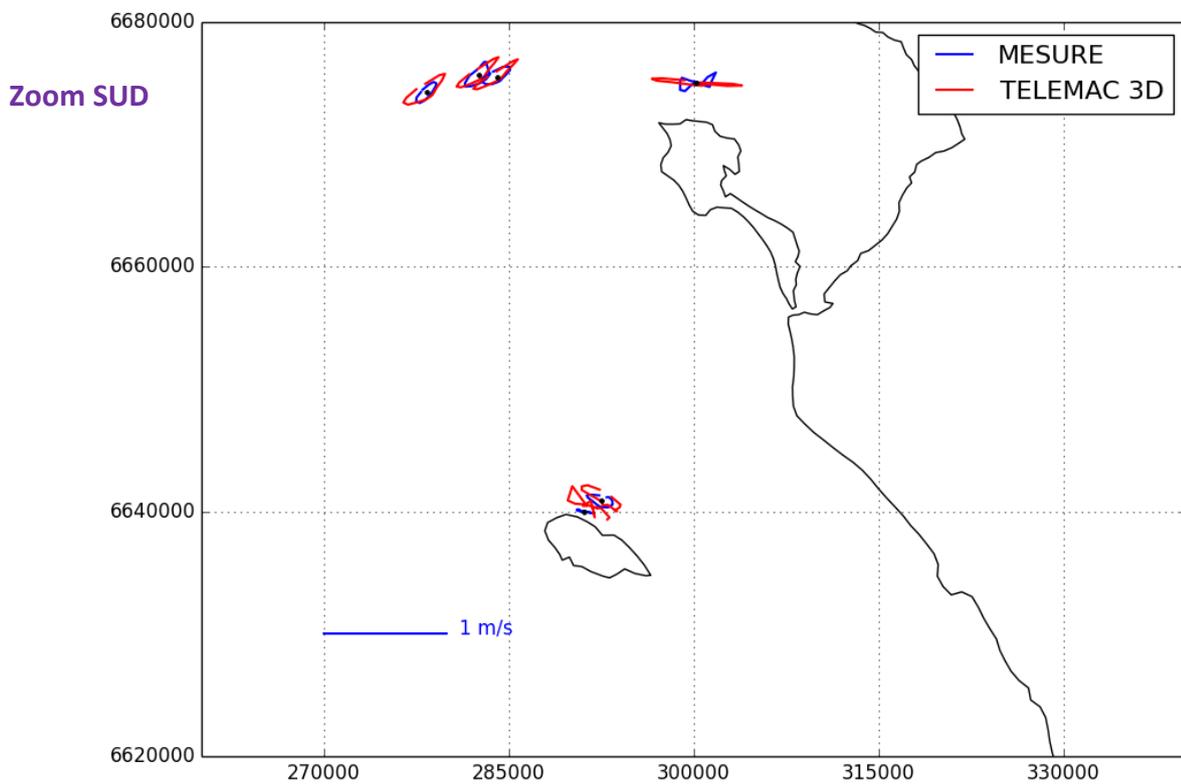
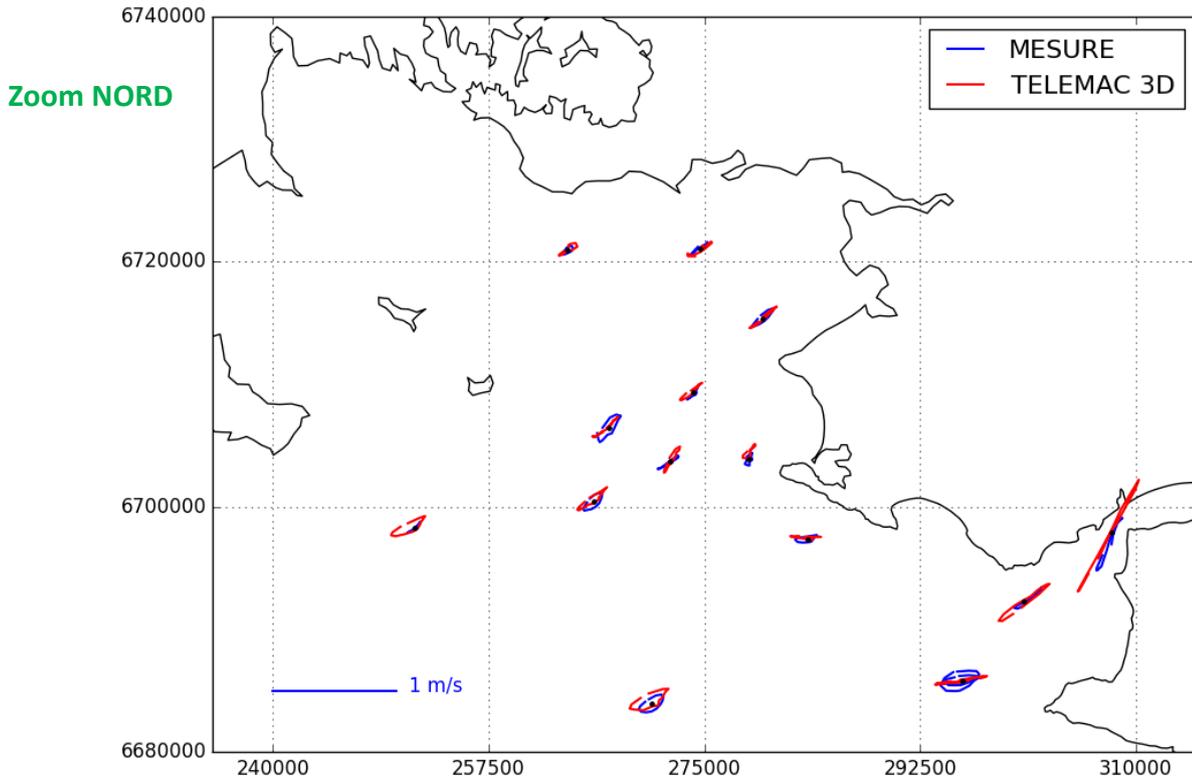
Zooms sur la comparaison entre les roses de courants issues des mesures et du modèle



Marée de type vive-eau moyenne (coefficient 95)



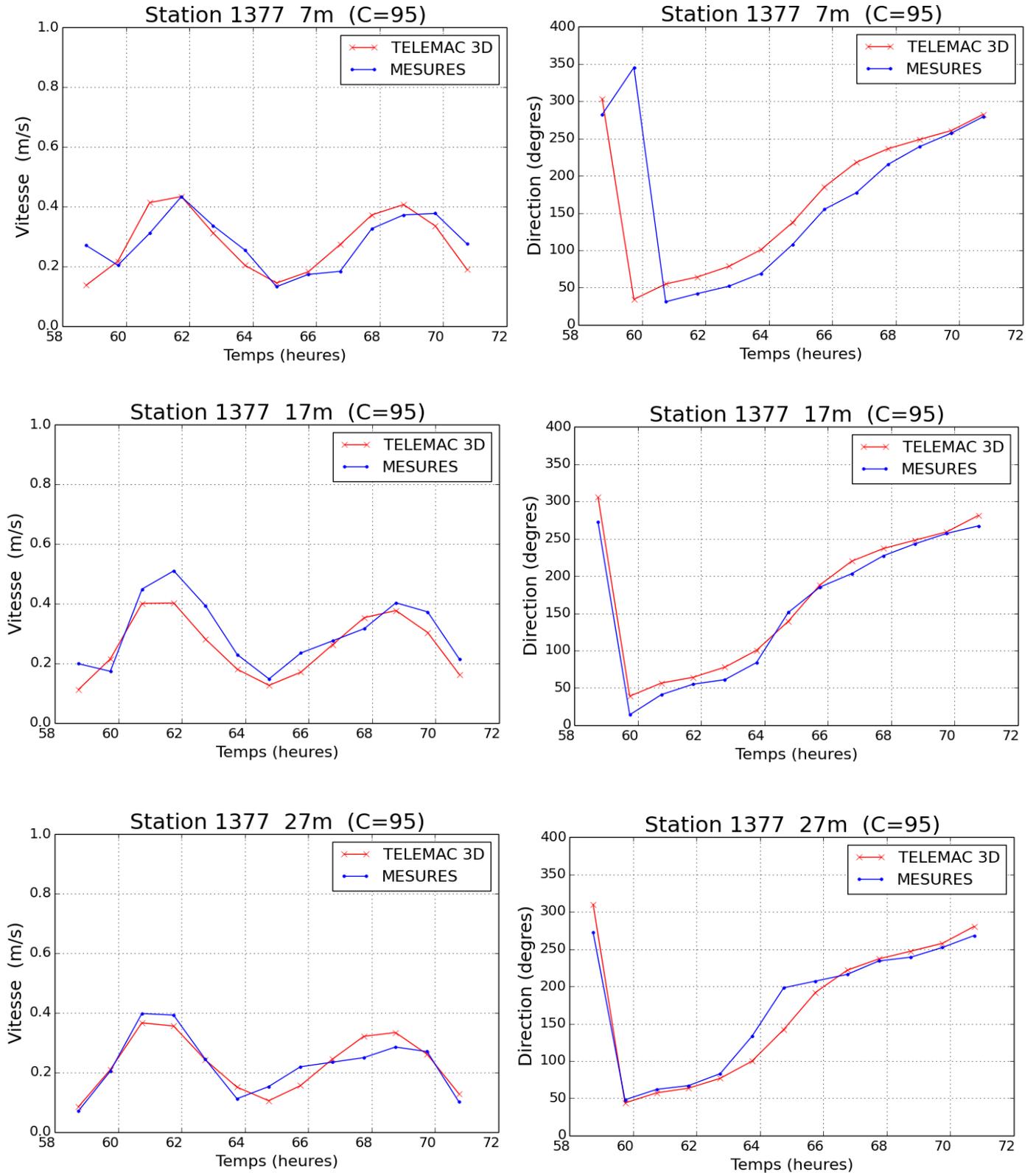
Marée de type morte-eau moyenne (coefficient 45)



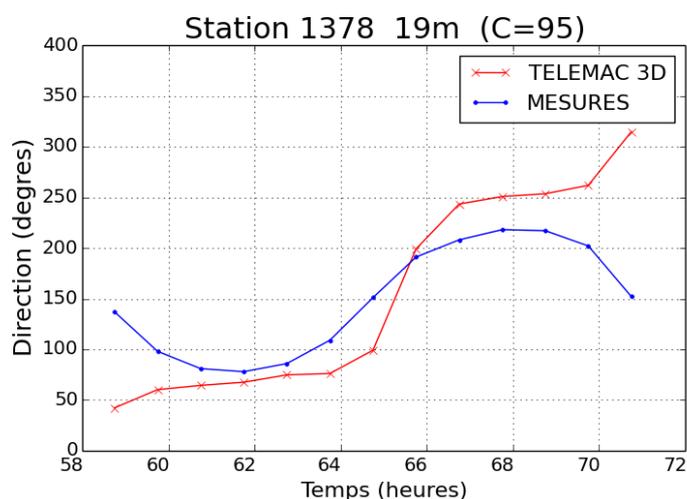
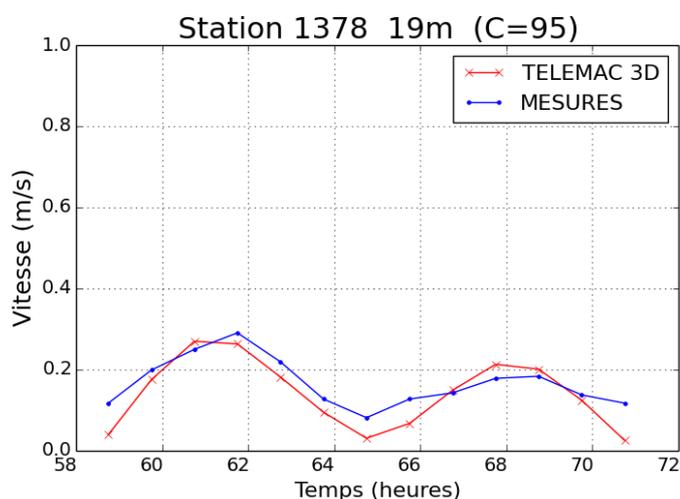
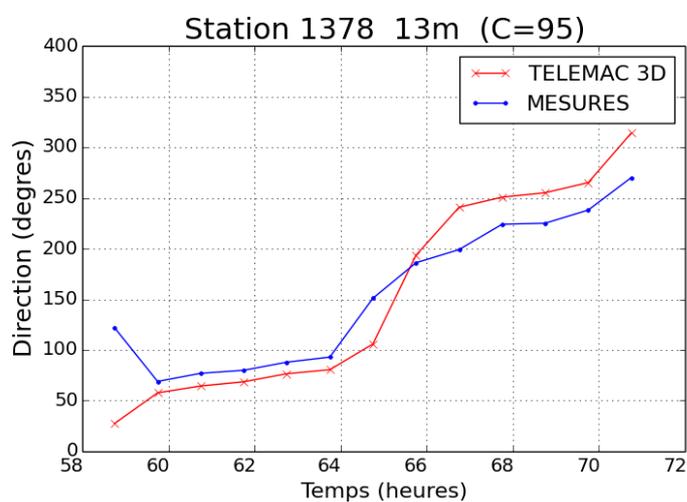
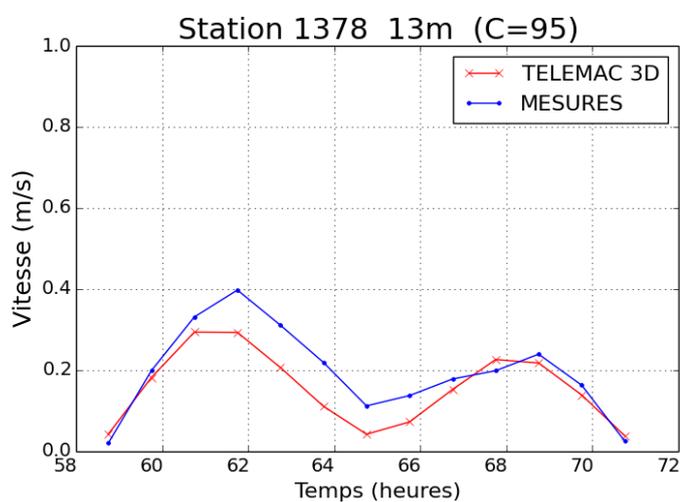
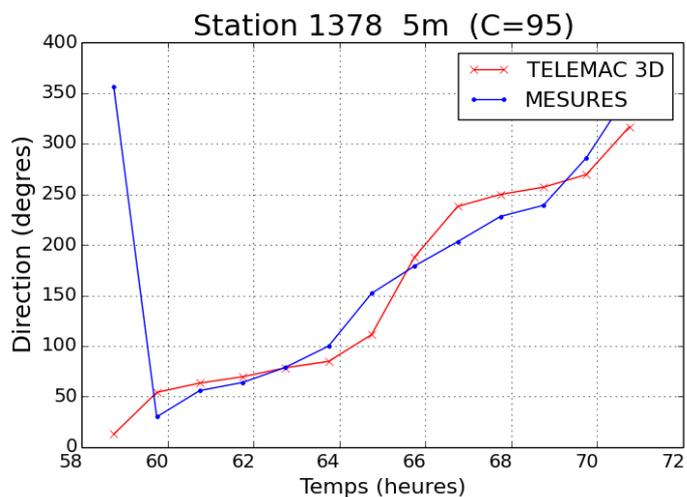
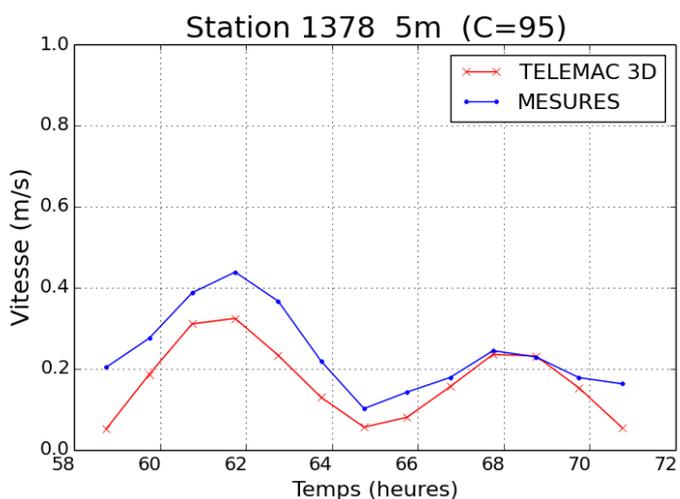
ANNEXE 6

Comparaisons entre les courants statistiques (ADCP profileur) et modélisés

Station 1377 « SUD BANC GUERANDE » couches à 7, 17 et 27 m en coefficient de VE moyenne



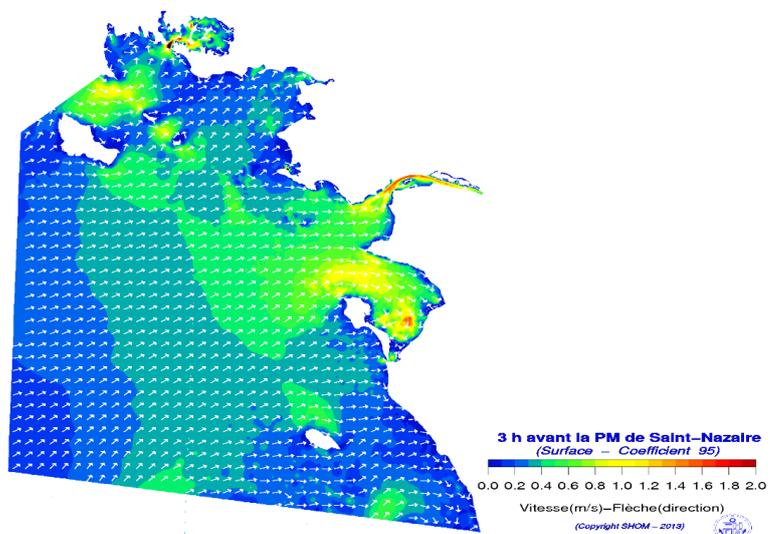
Station 1378 « OUEST PLATEAU BANCHE » couches à 5, 13 et 19 m en coefficient de VE moyenne



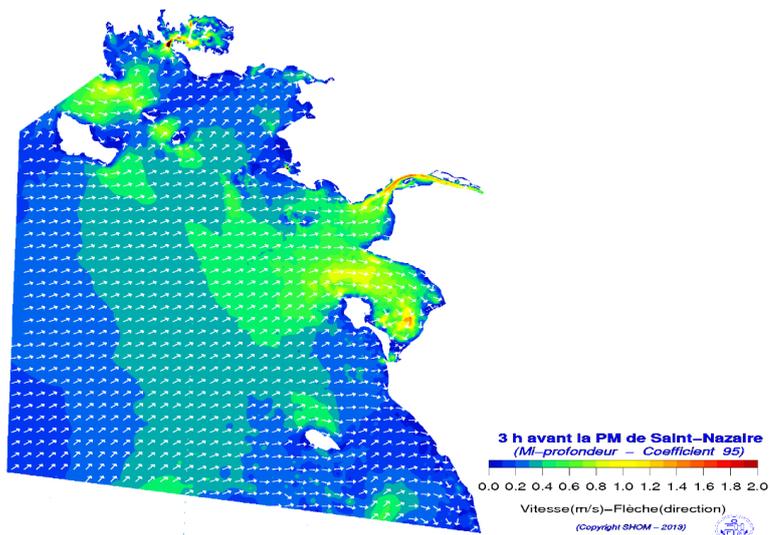
ANNEXE 7

Exemples de cartes de courants de marée issues de l'exploitation du modèle

Surface



Mi-profondeur



Fond

