

Université de Bretagne Sud - UFR Sciences et Sciences de l'Ingénieur  
Master 2 en Ingénierie Mathématique - Année 2010 - 2011

### Rapport de fin d'études

---

# Validation hydrodynamique du modèle curvilinéaire de l'estuaire de la Seine

---

Soutenance : 5 juillet 2011

**Auteur :** Emmanuel RENAULT

**Tuteur académique :**  
Sylvain BARRÉ, Maître de conférences

**Responsables scientifiques :**

Pierre LE HIR, Directeur de l'Unité  
Youen KERVELLA, Post-doctorant

# **Remerciements**

Je tiens à remercier tout particulièrement mes maîtres de stage, pour leur accueil chaleureux au sein du laboratoire, pour leur aide scientifique et leur suivi dans la réalisation de cette étude. Monsieur Pierre Le Hir, pour m'avoir fait découvrir son métier de chercheur et apporté son savoir en tant qu'hydrodynamicien et sédimentologue. Monsieur Youen Kervella, pour m'avoir apporté une aide constante et ses méthodes de travail en modélisation numérique.

Je remercie chaleureusement mon professeur de Mathématiques, Monsieur Sylvain Barré, pour avoir suivi mes travaux durant cette période de stage ; et de manière générale, pour m'avoir fait découvrir bien des aspects des mathématiques.

Je tiens également à remercier l'ensemble des personnes de l'unité, pour leur sympathie, leur écoute et pour m'avoir fait partager leur centre d'intérêt : l'Océanographie.

---

## Résumé

Ce rapport présente le travail effectué au cours de mon stage de fin d'études au sein de l'Institut Français de Recherche pour l'Exploitation de la Mer, au centre de Brest. Ce projet vise à simuler le fonctionnement hydrodynamique de l'estuaire de la Seine. La majeure partie de cette étude a consisté en la modélisation de différentes variables physiques intervenant dans les processus hydrodynamiques. Des données d'observation provenant de mesures marégraphiques et d'appareils acoustiques, ont contribué à la validation hydrodynamique du modèle. Une première approche du travail avait pour objectif d'identifier dans le code de calcul les différents paramètres mis en jeu dans la phase de calibrage (en particulier la longueur de rugosité sur le fond). Un travail de post-traitement des données a nécessité l'élaboration de routines Matlab permettant de valider les résultats des simulations, par confrontation avec des séries temporelles d'élévation de surface libre (signal de marée), de vitesses des courants (en termes d'intensité et de direction) et des cartes de valeurs de salinité. Enfin, une approche statistique a permis d'analyser et de quantifier ces résultats pour mettre en évidence le degré de performance du modèle. La description des méthodes employées pour la validation du modèle, ainsi que les principaux résultats obtenus, sont exposés dans ce rapport.

## Summary

This report presents the work carried out during my end-of-study internship at the French Research Institute for Exploitation of the Sea, in the centre of Brest. This project aims to simulate the hydrodynamic functioning of the Seine estuary. The major part of this study consisted in modelling different physical variables involved in the hydrodynamic processes. Observational data from tide gauge measurements and acoustic devices contributed to the hydrodynamic validation of the model. A first approach of the work was to identify in the calculation code the various parameters at stake in the calibration phase (in particular the length of roughness on the bottom). Post-processing of the data required the development of Matlab routines to validate the results of the simulations, by comparison with time series of free surface elevation (tidal signal), current velocities (in terms of intensity and direction) and maps of salinity values with the MODIS satellital instrument. Finally, a statistical approach made it possible to analyze and quantify these results to highlight the degree of performance of the model. A description of the methods used to validate the model, as well as the main results obtained, are presented in this report.

# Table des matières

<b>1</b>	<b>Introduction</b>	<b>3</b>
<b>2</b>	<b>Contexte scientifique</b>	<b>4</b>
2.1	Unité et laboratoire d'accueil . . . . .	4
2.2	Projets de rattachement . . . . .	4
2.3	Domaine d'étude . . . . .	4
2.4	Contexte hydrodynamique . . . . .	5
<b>3</b>	<b>Description du modèle</b>	<b>6</b>
3.1	Modèle hydrodynamique . . . . .	6
3.2	Modèle mathématiques . . . . .	6
3.3	Modèle numérique . . . . .	7
3.4	Niveaux Sigma . . . . .	8
3.5	Curvilinéarité . . . . .	9
<b>4</b>	<b>Construction du modèle</b>	<b>10</b>
4.1	Structure et Géométrie du maillage . . . . .	10
4.2	Bathymétrie . . . . .	12
4.3	Forcages hydrodynamiques . . . . .	14
<b>5</b>	<b>Calibrage hydrodynamique</b>	<b>15</b>
5.1	Configuration du modèle . . . . .	15
5.2	Contrainte de cisaillement sur le fond . . . . .	15
5.3	Mise en place des zones de viscosité . . . . .	17
<b>6</b>	<b>Validation hydrodynamique</b>	<b>18</b>
6.1	Onde de marée dans la baie . . . . .	18
6.2	Onde de marée dans l'estuaire . . . . .	22
6.3	Courants de marée . . . . .	26
6.4	Analyse courantologique dans l'estuaire . . . . .	32
<b>7</b>	<b>Approche quantitative du calibrage</b>	<b>33</b>
7.1	Indicateurs et Diagrammes . . . . .	33
7.2	Performance du modèle . . . . .	36
<b>8</b>	<b>Salinité</b>	<b>38</b>
8.1	Séries temporelles et Cartes . . . . .	38
<b>9</b>	<b>Conclusion et Perspectives</b>	<b>42</b>

# 1. INTRODUCTION

L'embouchure de l'estuaire de la Seine connaît des évolutions morphologiques et sédimentaires marquées, en raison de multiples forçages (marée, circulations liées aux vents, vagues, débit fluvial) et des aménagements portuaires (nouveau port du Havre, dragages). Un modèle numérique de simulation des processus hydrodynamiques et sédimentaires a été récemment développé dans le cadre du programme scientifique Seine-Aval : ce modèle rend compte des couplages entre évolutions morphologiques, transports sédimentaires et variations de la nature des sédiments superficiels. L'objet du travail de stage est de calibrer l'hydrodynamique du modèle via des mesures expérimentales pour la baie de Seine et pour le fleuve.

Dans ce rapport sont exposées successivement les différentes approches permettant au modèle de représenter de manière satisfaisante les observations et les résultats du calibrage, en termes d'élévation de surface libre de la mer, d'intensité et direction du courant sur la colonne d'eau puis en termes de salinité. Une partie statistique est également présentée afin de quantifier les écarts entre le modèle et les mesures afin d'estimer le degré de performance du modèle. Ce modèle sera par la suite utilisé hors du cadre de ce stage, pour reproduire le fonctionnement hydrosédimentaire des dernières décennies et notamment évaluer l'impact anthropique sur cette zone.

## **2. CONTEXTE SCIENTIFIQUE**

### **2.1 Unité et laboratoire d'accueil**

L'unité de recherche DYNECO (DYNAmiques de l'Environnement COtier) du centre IFREMER de Brest a pour rôle l'observation et la modélisation des dynamiques couplées de l'environnement côtier. Il regroupe deux services et trois laboratoires de recherche, dont le laboratoire PHYSED (Physique HYdrodynamique et SEDimentaire) auquel j'ai été intégré. Il a pour principales activités : La recherche et l'expertise des processus hydrodynamiques côtiers et leur impact sur les dynamiques environnementales. L'acquisition, l'analyse, le calibrage, la validation et l'assimilation de données d'observation (télédétection de mesures in situ). La modélisation et l'océanographie opérationnelle. La valorisation des mesures et des modèles par la conception de systèmes dédiés d'information et d'aide à la décision.

### **2.2 Projets de rattachement**

Cette étude s'inscrit dans le cadre de programmes scientifiques menés par le laboratoire PHYSED et par le Groupement d'Intérêt Public Seine-Aval de Rouen. A travers le projet MODEL, le laboratoire PHYSED cherche à analyser de manière rétrospective les réponses du système estuaire face à l'évolution de l'aménagement de l'embouchure de la Seine. D'autre part, Seine- Aval est un programme d'études et de recherches interdisciplinaires appliquée à l'estuaire de la Seine. Sa démarche opérationnelle s'appuie sur les axes de recherche suivants : Hydrodynamique et transport sédimentaire Microbiologie et oxygénéation Dynamique des contaminants Edifices biologiques Ces projets ont pour objectif commun la compréhension et la traduction des mécanismes mis en jeu dans l'écosystème estuaire de la Seine.

### **2.3 Domaine d'étude**

Le travail de modélisation porte sur la zone géographique composée de la baie de Seine, côte Normande qui s'étend d'ouest en est, entre la pointe de Barfleur (nord-est de la péninsule du Cotentin) et Fécamp. La zone couvre également l'ensemble de l'estuaire de la Seine sur une distance de 160 kilomètres (de la limite de marée dynamique au barrage de Poses, en amont de Rouen, jusqu'à l'embouchure de l'estuaire). Par ses dimensions, l'estuaire de la Seine est, après la Gironde et la Loire, le troisième estuaire français. Son aire et son volume limités lui confèrent une faible inertie vis-à-vis des activités humaines. Très tôt, ce long fleuve aux eaux calmes fut utilisé comme débouché maritime de l'Île de France, distante seulement de 300 km. Deux importantes agglomérations hors Paris ont pu ainsi bénéficier de cette voie naturelle de circulation : Rouen (400 000 habitants) et Le Havre (250 000 habitants).

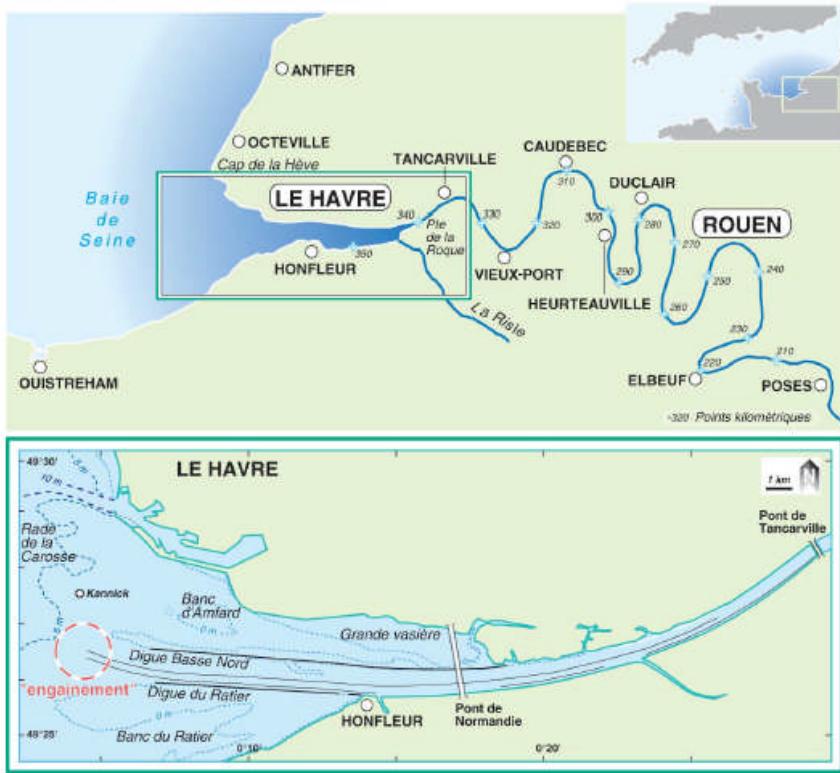


FIGURE 2.1 – L'estuaire de la Seine et son embouchure. (source : GIP Seine-Aval)

## 2.4 Contexte hydrodynamique

Malgré des variations interannuelles, le débit moyen annuel du fleuve reste modéré, de l'ordre de  $400 \text{ à } 480 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$ , mais avec d'importants écarts de débits instantanés :  $40 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$  en étiage sévère et  $2300 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$  lors de crues exceptionnelles. Au Havre, le marnage maximal est de 7,5 m et la courbe de la marée présente un aplatissement particulier à pleine mer, caractéristique de l'étalement qui peut durer deux à trois heures : c'est la "tenue du plein". Cette spécificité n'est pas étrangère à la création du port du Havre et à son développement commercial. Si la marée de salinité ne remonte plus qu'à 40 km à l'amont de l'embouchure, la marée dynamique est par contre encore ressentie à 160 km, limite imposée par le barrage de Poses.

Lors de sa pénétration dans l'estuaire, l'onde de marée est déformée : à un court montant de 4 à 5 heures, auquel correspondent les vitesses de courants élevées du "coup de flot", succède un long perdant de 7 à 8 heures, aux vitesses de jusant plus faibles. Les vitesses des courants de marée sont aussi modifiées par le débit du fleuve et la section du chenal ; comprises entre  $0,5$  et  $1 \text{ m.s}^{-1}$  à Rouen, elles peuvent atteindre et dépasser  $2 \text{ m.s}^{-1}$  en vive-eau dans l'estuaire aval endigué. Comme dans la plupart des estuaires, les houles du large, ici de secteur Ouest, sont considérablement amorties en abordant les hauts fonds de l'embouchure [9].

### **3. DESCRIPTION DU MODÈLE**

MARS (Model for Applications at Regional Scale) est un modèle pluridisciplinaire et communautaire, développé et diffusé par le laboratoire DYNECO/PHYSED de l'Ifremer de Brest [5].

#### **3.1 Modèle hydrodynamique**

Ce modèle est utilisé afin de reproduire la dynamique des masses d'eau par le biais de simulations de la circulation océanique aux échelles régionales et côtières. Il procède à des calculs instantanés et de synthèse (moyennes, extrema) des variables physiques liées aux processus hydrodynamiques. Il permet de modéliser notamment :

- L'élévation de la surface libre de l'eau.
- Les vitesses et directions des courants.
- La salinité.

MARS est également utilisé afin d'étudier la dynamique océanique passée ou pour prévoir son évolution dans un futur proche.

#### **3.2 Modèle mathématiques**

Il s'agit d'un modèle mathématique d'écoulement basé sur la discrétisation des équations primitives. Elles constituent une simplification des équations de Navier-Stokes sous certaines hypothèses :

- La pression est hydrostatique en tout point : le gradient de pression dépend de la pente de la surface libre et de la variation spatiale de la densité, et les accélérations sur la verticale sont négligées par rapport aux accélérations de la pesanteur.
- Le fluide est incompressible : les variations de masse volumique sont négligées hormis dans le terme de pression (approximation de Boussinesq).

Les lois qui décrivent le comportement physique du système se traduisent par un bilan de la quantité de mouvement (second principe de Newton) et par la conservation de la masse d'eau. L'accélération d'une particule fluide résulte de la somme des forces qu'elle subit, à savoir un gradient de pression, l'accélération de la pesanteur, la force de Coriolis (due à la rotation de la Terre) et les contraintes de frottement. Les frottements internes sont essentiellement d'origine turbulente, mais leur intégration selon la verticale se résume à l'entraînement par le vent en surface, et à la réaction de la paroi sur le fluide au fond. Ces termes de frottements sur le fond constituent l'intérêt principal de cette étude. De plus, ce système tient compte d'un terme d'advection de quantité de mouvement.

D'autre part, l'équation de conservation de la masse d'eau (équation linéaire de continuité ou d'incompressibilité) affirme que pour un écoulement à surface libre, la résultante des flux traversant les limites d'une colonne d'eau quelconque, compense exactement la variation de volume de cette colonne liée à la variation de la côte de la surface libre. Ainsi, pour un volume donné, la somme des flux entrant et sortant de celui-ci est nulle. C'est donc la pente de la surface libre qui va engendrer le déplacement des masses d'eau et par conséquent créer des vitesses.

Le code MARS-3D utilise un mode *externe* qui permet de construire un modèle barotrope spécifique, en intégrant les équations de Saint-Venant sur l'axe vertical, à partir du fond. En négligeant certains termes, les lois décrites précédemment sont exprimées par le système d'équations barotropes suivant :

$$\frac{\partial \bar{\mathbf{u}}_i}{\partial t} + \bar{\mathbf{u}}^j \frac{\partial \bar{\mathbf{u}}_i}{\partial x^j} = -\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial \zeta}{\partial x_i} + v_i \nabla^2 \bar{\mathbf{u}}_i + \epsilon_{ij} \mathbf{f} \bar{\mathbf{u}}_i + \frac{1}{\rho_0 H} (\tau_s^{x_i} - \tau_b^{x_i}) \quad (3.1)$$

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{\partial (H \bar{\mathbf{u}}^j)}{\partial x^j} = \mathbf{0} \quad (3.2)$$

En (2.1), on retrouve les termes d'advection dans le membre de gauche, et les termes de diffusion horizontale dans le membre de droite. En (2.2), il s'agit de l'équation de continuité.

On a utilisé ici la convention de sommation d'Einstein et on a introduit les notations suivantes :  $(\bar{\mathbf{u}}, \bar{\mathbf{v}})$  sont les composantes zonale et méridienne du champs de vitesse horizontal, dans les directions  $\mathbf{x}$  et  $\mathbf{y}$ , moyennées sur la colonne d'eau.  $(\mathbf{x}, \mathbf{y})$  sont les coordonnées cartésiennes orthogonales.  $\zeta$  représente le paramètre d'élévation de surface libre (signal de marée).  $\mathbf{H}$  est définie comme étant la hauteur d'eau instantanée, qui dépend de la bathymétrie (côte du fond). On a en effet  $\mathbf{H} = \zeta + \mathbf{H}_0$ . Les termes  $\mathbf{f}$ ,  $\rho_0$  et  $\mathbf{g}$  sont respectivement le coefficient de la force de Coriolis, la densité moyenne de l'eau, et l'accélération de la pesanteur. Le terme  $\epsilon_{ij}$  représente le symbole de Lévi-Civita en dimension 2.  $v$  est la viscosité cinématique turbulente horizontale.

Les termes  $(\tau_s, \tau_b)$  sont respectivement les contraintes de cisaillement horizontaux de surface et de fond (*bottom*).  $\tau_s$  correspond à l'entrainement par le vent en surface, et  $\tau_b$  à la contrainte de Reynolds associée à la turbulence. Nous nous intéressons dans cette étude aux frottements sur le fond, car ils sont à l'origine, dans une large mesure, de la dissipation d'énergie de l'onde de marée se propageant dans l'estuaire de la Seine. Ils sont exprimés de manière plus détaillée au chapitre 5 [4].

### 3.3 Modèle numérique

MARS est un algorithme de calcul en différences finies. Il résout ces équations sur le plan horizontal, à l'aide d'une grille structurée et décentrée de type C dans la classification d'Arakawa (Figure 3.1).

Cette grille est représentative de la distribution spatiale des inconnues du système de Saint-Venant. La discréttisation temporelle est de type semi-implicite en directions alternées [3]. Le pas de temps est divisé en deux demi-pas de temps durant lesquels sont résolues alternativement les équations de conservation de la quantité de mouvement, selon la composante zonale, puis selon la composante méridienne. L'équation de continuité est résolue à chaque demi-pas de temps.

L'élévation de la surface libre ( $\zeta$ ), la bathymétrie (position du fond notée  $\mathbf{H}_0$ ) ainsi que différents marqueurs (salinité dans notre cas) sont calculés au centre des mailles de la grille. En revanche, les composantes du champ de vitesse sont déterminées au centre des bords Est et Nord de chaque maille, dirigées selon l'axe Ouest-Est pour la composante zonale ( $\mathbf{u}$ ) puis selon l'axe Sud-Nord pour la composante méridienne ( $\mathbf{v}$ ).

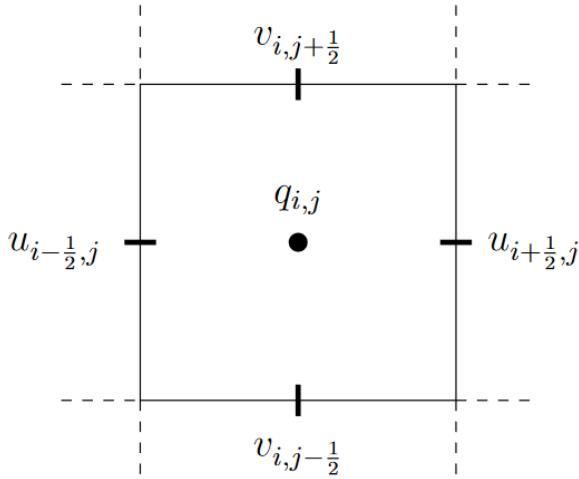


FIGURE 3.1 – Grille horizontale Arakawa-C et indexation

### 3.4 Niveaux Sigma

En ce qui concerne la résolution verticale du schéma numérique, le modèle intègre un changement de coordonnées afin d'obtenir une meilleure discrétisation des équations sur la verticale. Dans notre cas, la répartition des niveaux est constante et nous imposons un nombre maximum de dix couches sur la colonne d'eau. La figure ci-dessous illustre, à titre d'exemple, une configuration possible d'un maillage vertical (Figure 3.2).

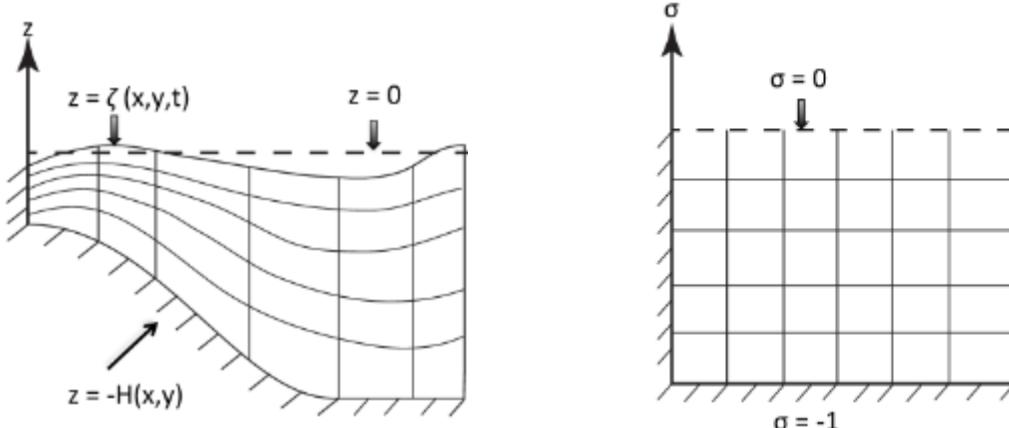


FIGURE 3.2 – Systèmes de coordonnées verticales

Pour incorporer la topographie d'un site dans un modèle barotrope, on peut effectuer un changement de coordonnées en fonction de la variable  $\mathbf{z}$  (coordonnée cartésienne de la profondeur sur la verticale), puis normaliser par la hauteur totale du fluide. On définit ainsi une nouvelle coordonnée *sigma* que l'on exprime par :

$$\sigma = \frac{\mathbf{z} - \zeta}{\mathbf{H} + \zeta} = \begin{cases} 0 & \text{si } \mathbf{z} = \zeta \\ -1 & \text{si } \mathbf{z} = -\mathbf{H} \end{cases}$$

En considérant la subdivision ( $-1 \leq \sigma_1 < \sigma_2 < \dots < \sigma_{k\max} \leq 0$ ), pour  $k\max = 10$  dans notre cas et une répartition constante sur la colonne d'eau, on peut définir pour chaque niveau  $\sigma_k$ , une *tranche d'eau*  $\Delta\sigma_k$ , satisfaisant la condition :  $\sum_{k=1}^{k\max} \Delta\sigma_k = 1$ . Les niveaux  $\sigma_k$  sont distribués aux points de densité  $\rho_k$  des centres des mailles, à l'instar des hauteurs instantanées sur la grille horizontale. En revanche, la discréétisation verticale des termes de frottement se fait aux bords des mailles, selon le même principe. Ils s'expriment sous la forme :  $\tau_{x,k-\frac{1}{2}}$  et  $\tau_{y,k-\frac{1}{2}}$ . Ces termes correspondent aux frottements horizontaux au fond de la cellule  $k$  d'épaisseur  $\Delta\sigma_k$ .

### 3.5 Curvilinéarité

Afin de rendre compte de la curvilinéarité de l'espace physique, des coefficients de déformation ont été introduits dans les équations du modèle MARS [2]. Cette transformation requiert, lors de l'élaboration des routines de post-traitement, d'effectuer la transformation inverse de manière à obtenir les valeurs réelles des vitesses dans un repère cartésien ou géographique.

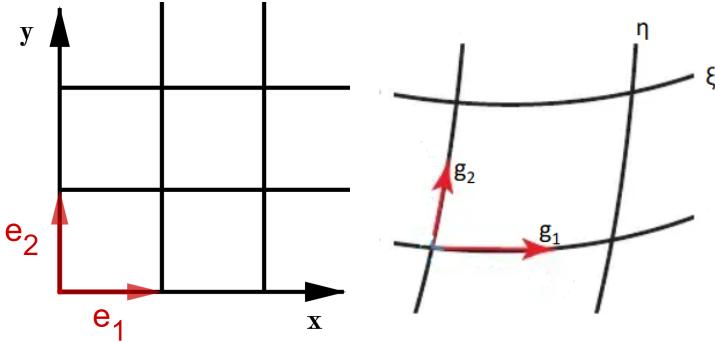


FIGURE 3.3 – Maillages cartésien (gauche) et curvilinéaire (droite).

La matrice de passage des coordonnées curvilignes aux coordonnées cartésiennes, est la matrice Jacobienne, notée  $\mathbf{J}$ , définie par les coefficients :

$$\mathbf{e}_k = \frac{\partial \xi^i}{\partial \mathbf{x}_k} \mathbf{g}_i \quad \mathbf{J} = \begin{pmatrix} \frac{\partial \xi}{\partial \mathbf{x}} & \frac{\partial \eta}{\partial \mathbf{x}} \\ \frac{\partial \xi}{\partial \mathbf{y}} & \frac{\partial \eta}{\partial \mathbf{y}} \end{pmatrix}$$

En utilisant la convention de sommation d'Einstein, le tenseur fondamental est défini par :

$$\mathbf{g}_{ij} = \mathbf{g}_i \cdot \mathbf{g}_j = \frac{\partial \xi^i}{\partial \mathbf{x}^i} \cdot \frac{\partial \xi^j}{\partial \mathbf{x}^j} \quad \text{pour } i, j \in [1, 2]^2$$

On représente le tenseur d'ordre 2, associé à la matrice des coefficients de la métrique ci-dessus, de la manière suivante :

$$\mathbf{g} = \begin{pmatrix} \mathbf{g}_{11} & \mathbf{g}_{12} \\ \mathbf{g}_{21} & \mathbf{g}_{22} \end{pmatrix} \quad \text{avec} \quad \det \mathbf{J} = \sqrt{\det \mathbf{g}}$$

$$\text{On exprime alors le tenseur inverse par : } \mathbf{g}^{-1} = \frac{1}{\sqrt{\det \mathbf{g}}} \begin{pmatrix} \mathbf{g}_{22} & -\mathbf{g}_{21} \\ -\mathbf{g}_{12} & \mathbf{g}_{11} \end{pmatrix}$$

On obtient ainsi l'expression analytique de la transformation inverse, nécessaire au calcul des coefficients de déformation.

## 4. CONSTRUCTION DU MODÈLE

### 4.1 Structure et Géométrie du maillage

Le laboratoire PHYSED a élaboré un maillage curvilinéaire structuré non-orthogonal à deux dimensions du domaine d'étude. Il se substitue ainsi à un précédent maillage cartésien. Cette nouvelle configuration présente plusieurs avantages. Elle permet l'extension des conditions aux limites marines due à l'élargissement de l'emprise du modèle, d'orienter la courbure des mailles dans les directions privilégiées de l'écoulement et d'obtenir un raffinement des mailles situées sur la zone principale d'étude : l'embouchure de l'estuaire de la Seine. La modélisation des fleuves et de leurs méandres peut être également réalisée dès lors que la bathymétrie a été renseignée. Leur représentation est indispensable à l'étude des échanges, en termes de dynamique sédimentaire, entre chenaux et berges.

Représenté sous sa forme bidimensionnelle, le maillage compte 20 821 mailles. Présenté dans son intégralité (Figure 4.1), il couvre la baie de Seine de Cherbourg à Fécamp, avec au nord une frontière courbée permettant la quasi-orthogonalité des mailles. Ces mailles à la limite nord ont été volontairement agrandies de manière à limiter le temps de calcul. Les mailles sont disposées

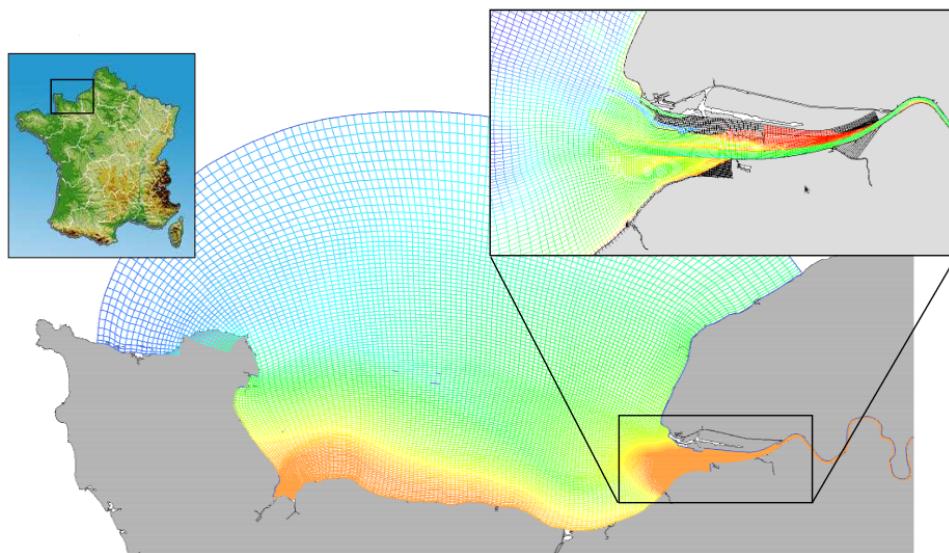


FIGURE 4.1 – Maillage curvilinéaire de la zone d'étude (source : GIP Seine-Aval)

de manière à suivre le trait de côte, ce qui permet de respecter le sens de l'écoulement des principaux courants côtiers longitudinaux. La zone de l'embouchure est cependant plus complexe. La configuration du maillage doit prendre en compte la bathymétrie du chenal de navigation délimité plus en amont par la présence de digues submersibles. Cela nous conduit à allonger la longueur des mailles dans le sens principal du courant de marée. Toutefois, il faut prendre en compte la possibilité d'occurrence de courants transversaux engendrés par le vent.

La réalisation du maillage de l'estuaire et de ses méandres est délicate. L'aspect du fleuve peut être modifié par un rétrécissement du canal (par remontée du fond ou réduction de la largeur). Le maillage est composé, selon les sections, de 3 à 8 mailles dans sa dimension transversale pour une largeur de l'ordre de 100m et plus de 500 mailles dans sa dimension longitudinale (de Honfleur à Poses) pour une longueur de l'ordre de 300m.

L'utilisation d'un schéma aux différences finies implique l'incorporation d'une grille structurée complète. Cependant, la matrice des coordonnées géographiques des points d'interpolation sur laquelle nous travaillons est à l'origine incomplète. En effet, elle ne comporte que des points situés « en eau » pour le calcul hydrodynamique. C'est la raison pour laquelle il nous faut introduire des points positionnés « à terre » de manière à conserver le caractère structuré de la matrice. Le maillage comporte ainsi 79800 mailles dont un quart sont situées « en eau ». Les allocations de matrices sont réalisées pour l'ensemble du maillage, mais les calculs hydrodynamiques sont effectués uniquement pour ces mailles « en eau ».

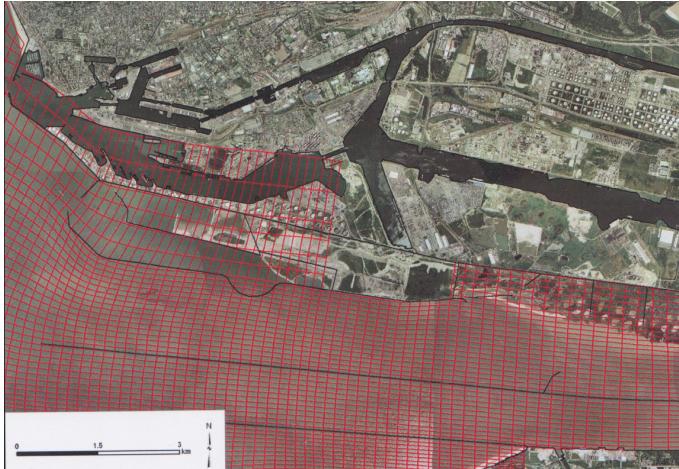


FIGURE 4.2 – Structure du maillage à l'embouchure.

Le maillage curviligne comportant différentes tailles de maille, leurs dimensions doivent être adaptées aux vitesses de courant susceptibles d'être rencontrées, afin de maintenir un pas de temps de calcul adapté. Le schéma numérique doit alors respecter le critère de stabilité CFL (Courant Friedrichs-Levy) qui limite le pas de temps utilisé. Ainsi, la distance parcourue par l'écoulement selon un champ de courant ( $\mathbf{u}, \mathbf{v}$ ) doit être inférieure aux dimensions des mailles utilisées. Dans notre cas, pour une maille de longueur  $\Delta x$  et de largeur  $\Delta y$ , la condition de stabilité est définie dans notre étude par :

$$CFL = \text{Max} \left( \frac{u\Delta t}{\Delta x}, \frac{v\Delta t}{\Delta y} \right) \leq C_{max} \quad \text{avec } C_{max} = 0.7$$

Une des étapes de la validation des résultats consiste à analyser le rendu de ces simulations. La représentation de l'élévation de la surface libre peut présenter des anomalies en terme d'intensité, liés à des gradients de vitesses trop élevées. Ces artefacts sont associés à une diminution trop rapide de la taille des mailles dans certaines zones du maillage (estuaire, méandres, etc.) Dans certains cas, des problèmes similaires peuvent être engendrés par une mauvaise définition de la bathymétrie de la zone concernée. De même, le modèle calcule alors des gradients trop importants et affiche des résultats incohérents.

Une des parties du travail consiste à analyser en détail les points où nous obtenons des incohérences du modèle, à retoucher ponctuellement la bathymétrie du maillage afin d'obtenir une version plus stable du code.

## 4.2 Bathymétrie

La modélisation des processus hydrodynamiques est toujours dépendante de la variation de la topographie du domaine. La connaissance des fonds marins permet de mieux appréhender la géométrie d'une zone côtière et de comprendre les mouvements des masses d'eau associés. La préparation de la bathymétrie est donc essentielle à la qualité des résultats fournis par le modèle. En l'occurrence, le modèle est capable de reproduire toute forme de fond comme par exemple les chenaux, les estran ou les phénomènes de bancs découvrant.

La bathymétrie du modèle (Figure 4.3) est reconstituée à l'aide du logiciel BMGTOOLS (Bathy-MeshGrid Tools) développé par l'IFREMER. Elle est calculée à partir des données de sondes du SHOM et de l'IFREMER, et de données issues de modèles numériques de terrain, d'une résolution de 100 mètres.

Pour l'embouchure de la Seine, nous utilisons des données de décembre 2009 fournies par le port maritime de Rouen, établies sur une grille de 10m x 10m jusqu'à Tancarville, ainsi que des données LIDAR (Light Detection And Ranging) autour du port du Havre. Pour le reste du fleuve, des données de 2008 sous forme de grille de 5m x 5m entre Tancarville et Rouen (source : GIP Seine-Aval) et des données de 2005 sous forme de grille de 1m x 1m acquises à l'aide de sondeurs mono et multifaisceaux entre Rouen et Poses sont utilisées.

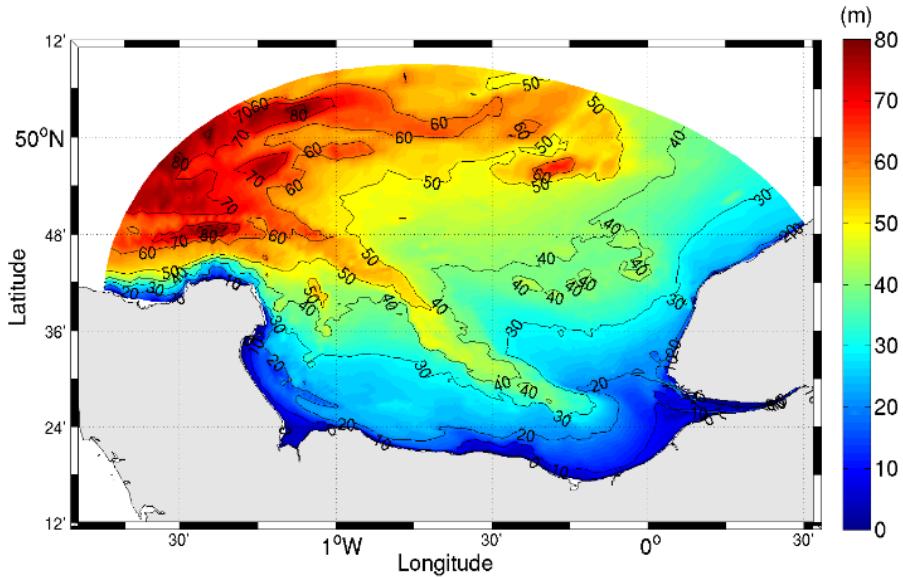


FIGURE 4.3 – Bathymétrie de la baie de Seine et isobathes obtenues avec BMGTools.

A partir des séries de points avec leurs coordonnées géographiques et leur profondeur, dont la densité peut varier d'une région à l'autre selon la disponibilité des données, une interpolation est effectuée en faisant intervenir une recherche de voisins pour chaque point de grille de notre maillage curvilinéaire (la recherche s'effectue uniquement sur nos points « en eau »).

L'algorithme utilisé pour l'interpolation est l'algorithme « CARGEN » (Caillaud, 2010) et les composantes horizontales de hauteur d'eau  $H_x$  et  $H_y$  (Figure 3.1) correspondent en fait à des hauteurs par rapport au zéro hydrographique défini comme le niveau atteint par les plus basses mers (marée astronomique de coefficient 120).

Le marnage étant important sur notre zone, il convient de considérer aussi le niveau moyen qui est interpolé au centre de chaque maille (Figure 4.4). Ce niveau représente la hauteur moyenne des mers au-dessus du niveau de plus basse mer astronomique (PBMA, données SHOM).

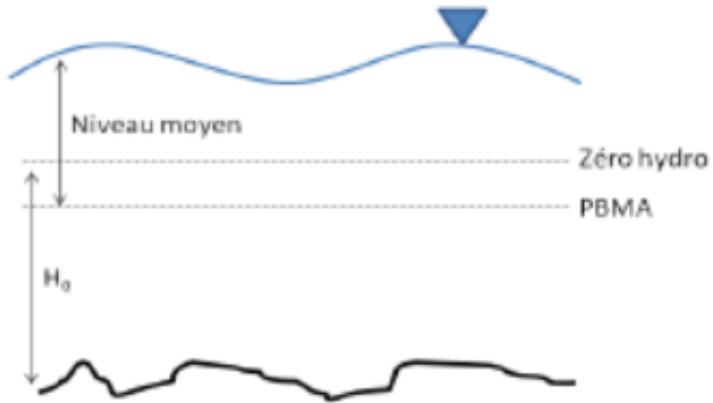


FIGURE 4.4 – Bathymétrie, niveaux verticaux de référence et niveau moyen.

Cette bathymétrie est ensuite retouchée à la main, toujours à l'aide du logiciel BMGTOOLS, et les hauteurs  $\mathbf{H}_x$  et  $\mathbf{H}_y$  nous permettent alors de prendre en compte des ouvrages tels que Port 2000 ou les digues submersibles. La retouche de la bathymétrie est une étape à laquelle nous avons contribué, notamment dans le fleuve, après analyse des sorties des simulations.

La figure 4.5 présente une superposition du maillage et du jeu de sondes bathymétriques  $\mathbf{H}_x$  et  $\mathbf{H}_y$  à l'embouchure de la Seine. La bathymétrie obtenue pour l'ensemble de la baie de Seine à l'aide de BMGTOOLS est montrée en figure 4.3.

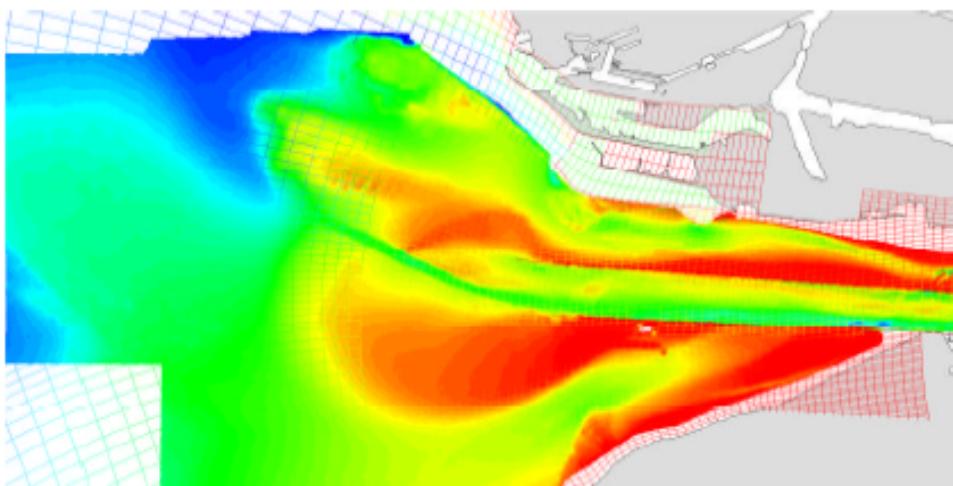


FIGURE 4.5 – Superposition du maillage et du jeu de sondes bathymétriques (source : GIP Seine-Aval) à l'embouchure de la Seine.

### 4.3 Forcages hydrodynamiques

Une fois la bathymétrie obtenue, il convient de prendre en compte le plus finement possible, à partir de données réalistes, les forçages agissant sur les limites de notre modèle.

Dans notre cas, les forçages sont les mécanismes physiques engendrant la dynamique des masses d'eau : Ils sont caractérisés en surface par l'onde de marée et par l'effet du vent (forçages externes). Les apports d'eau douce sont en revanche assimilés à des forçages internes (plus un débit variant quotidiennement). Ils sont caractérisés par des écarts de densité liés aux différences de température et de salinité entre l'eau douce et l'eau de mer. Cet écart se traduit par une pression de la colonne d'eau plus importante en aval de l'estuaire qu'en amont et provoque donc un déplacement des masses d'eau. La combinaison de ces trois types de forçages caractérise l'hydrodynamique de l'estuaire de la Seine.

Notre modèle est donc forcé en sa limite nord (appelée limite ouverte) par des hauteurs d'eau (composition harmonique) provenant du modèle CST-France (SHOM) : il s'agit d'un modèle à deux dimensions corrigé par des mesures de hauteurs d'eau (marégraphes). C'est actuellement le modèle le plus pertinent en termes de fournitures de hauteurs d'eau sur les côtes françaises.

Les sorties de ce modèle sont interpolées en chaque maille de notre frontière courbe au nord de la baie de Seine (Figure 4.6). Nous pouvons noter la déformation de l'onde de marée avec un minimum de hauteur correspondant au point amphidromique proche de la côte sud de l'Angleterre, et un maximum de hauteur à l'est de l'entrée de la baie, près de Fécamp. Le modèle est également forcé par un apport d'eau douce au niveau du barrage de Poses en respectant le débit réel de la Seine (périodes de crue, d'étiage). Le débit de la Risle (près de Honfleur) est également prescrit. En ce qui concerne les forçages atmosphériques, les sorties du modèle ARPEGE de Météo-France (15 km de résolution) sont utilisées et fournissent les vitesses du vent à 10 m de hauteur ainsi que les variations de pression atmosphérique.

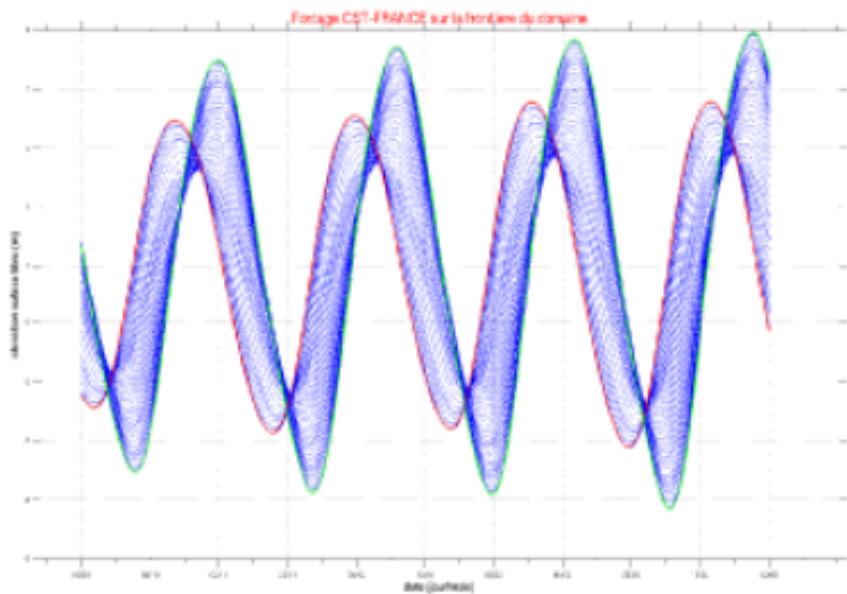


FIGURE 4.6 – Forçage par des hauteurs d'eau issu du modèle CST-France du SHOM à la frontière nord du domaine (du point le plus à l'ouest en rouge, au point situé le plus à l'est en vert).

## 5. CALIBRAGE HYDRODYNAMIQUE

### 5.1 Configuration du modèle

Afin d'obtenir une représentation satisfaisante du signal de marée dans l'estuaire, nous agissons sur les frottements sur le fond - la géométrie étant déjà fixée par la bathymétrie - pour dissiper plus ou moins l'énergie de l'onde de marée et par conséquent de faire varier son amplitude.

Pour ce faire, nous travaillons à partir de mesures de marégraphes positionnés tout au long du fleuve (Figure 16 en annexe). En ce qui concerne la baie, les frottements sur le fond agissent dans une moindre mesure, la hauteur d'eau totale étant plus forte. Les hauteurs définies par la bathymétrie et les niveaux moyens, ainsi que les forçages, ont des contributions plus importantes.

### 5.2 Contrainte de cisaillement sur le fond

La contrainte de cisaillement sur le fond est caractérisée par un frottement visqueux du fluide, dû à un courant le long d'une paroi. La prise en compte de cette force de frottement dans l'équation de conservation de la quantité de mouvement, permet d'établir une expression analytique de la contrainte de Reynolds [6].

Pour cela, on peut considérer un écoulement plan pour les vitesses  $(\mathbf{u}, \mathbf{w})$ , selon les directions  $(\mathbf{x}, \mathbf{z})$ , en présence d'une paroi horizontale, au fond (en  $\mathbf{z} = -H$ ) et délimité en haut par la surface libre. Sous hypothèse d'incompressibilité, en négligeant la force de Coriolis, on obtient la relation suivante :

$$\rho_0 \left( \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + \mathbf{u} \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial \mathbf{x}} + \mathbf{w} \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial \mathbf{z}} \right) = - \frac{\partial \zeta}{\partial \mathbf{x}} + \frac{\partial}{\partial \mathbf{z}} \left( \rho_0 \nu \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial \mathbf{z}} \right) \quad (5.1)$$

On remarque tout d'abord que le terme  $\mathbf{u} \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial \mathbf{x}}$  est nul, par continuité. D'autre part, afin de rendre compte de la turbulence de l'écoulement, on introduit des termes de fluctuation provenant de la décomposition de Reynolds. On peut alors montrer que :

$$\overline{\mathbf{u}\mathbf{w}} = \bar{\mathbf{u}} \bar{\mathbf{w}} + \overline{\mathbf{u}'\mathbf{w}'} \quad (5.2)$$

Ainsi, on peut écrire :  $\mathbf{w} \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial \mathbf{z}} = \frac{\partial(\mathbf{u}\mathbf{w})}{\partial \mathbf{z}}$  par continuité.

De plus,  $\frac{\partial(\overline{\mathbf{u}\mathbf{w}})}{\partial \mathbf{z}} = \frac{\partial(\bar{\mathbf{u}} \bar{\mathbf{w}})}{\partial \mathbf{z}} + \frac{\partial(\overline{\mathbf{u}'\mathbf{w}'})}{\partial \mathbf{z}} = \frac{\partial(\overline{\mathbf{u}'\mathbf{w}'})}{\partial \mathbf{z}}$ , puisque  $\mathbf{w}$  est négligeable devant  $\mathbf{u}$ .

Par conséquent :

$$\rho_0 \frac{\partial \bar{\mathbf{u}}}{\partial t} = - \frac{\partial \bar{\zeta}}{\partial \mathbf{x}} + \frac{\partial}{\partial \mathbf{z}} \left( \rho_0 \nu \frac{\partial \bar{\mathbf{u}}}{\partial \mathbf{z}} - \rho_0 \overline{\mathbf{u}'\mathbf{w}'} \right) \quad (5.3)$$

On a mis en évidence dans l'équation de Reynolds, les forces de frottement internes au fluide, comme étant la somme de contraintes visqueuse et turbulente.

Dans notre étude, les frottements turbulents sont dominants, car ils sont dûs à une rugosité du fond plus importante. On définit alors le cisaillement sur le fond par l'expression de la contrainte de Reynolds :

$$\tau_b^{xz} = - \rho_0 \overline{\mathbf{u}' \mathbf{w}'} \quad (5.4)$$

On peut ainsi établir la relation suivante :

$$\sqrt{\frac{\tau_b}{\rho_0}} \approx \sqrt{-\overline{\mathbf{u}' \mathbf{w}'}}.$$

Ce terme peut être assimilé à une vitesse de frottement, notée  $\mathbf{u}^*$ , qui correspond à l'intensité des mouvements turbulents (tourbillons). Cette approximation est justifiée si l'on considère, d'une part, une fluctuation de la vitesse verticale  $w' < 0$  vers la paroi, et d'autre part, une fluctuation de la vitesse horizontale  $\mathbf{u}' > 0$ , puisque la masse d'eau provient d'une couche où la vitesse zonale  $\mathbf{u}$  est plus intense (et inversement).

La contrainte de cisaillement sur le fond  $\tau_b$ , peut alors être exprimée en fonction de la vitesse de friction  $\mathbf{u}^*$  par :

$$\tau_b = \rho_0 \mathbf{u}^{*2} \quad (5.5)$$

En introduisant le concept de longueur de mélange (théorie de Prandtl), on peut montrer par analyse dimensionnelle, que ces fluctuations sont équivalentes. La longueur de mélange, notée  $L$ , est définie en fonction de la distance  $z$ , à la paroi du fond.

$$\mathbf{u}' = L \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial z} \quad \text{et} \quad |\mathbf{u}'| \simeq |w'| \quad \text{avec} \quad L = \kappa z \quad (\kappa : \text{constante de Von Kármán})$$

Dans la configuration d'un écoulement des masses d'eau, caractérisé sur la verticale par un profil de vitesse logarithmique [6], comme illustré sur la figure ci-dessous, on peut en déduire l'expression de la vitesse moyenne  $\bar{u}$ , intégrée sur la colonne d'eau.

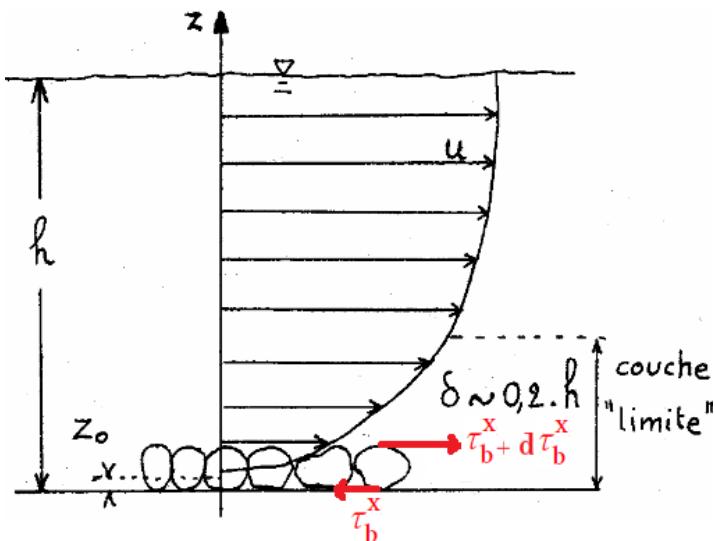


FIGURE 5.1 – Profile logarithmique des vitesses dans un écoulement plan.

La grandeur  $z_0$  est la distance, en mètre, symbolisant la hauteur à laquelle la vitesse de l'écoulement est nulle.

En posant :  $\mathbf{u}^* = \kappa \mathbf{z} \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial \mathbf{z}}$  on obtient :  $\mathbf{u}(\mathbf{z}) = \frac{\mathbf{u}^*}{\kappa} \ln \left( \frac{\mathbf{z}}{\mathbf{z}_0} \right)$ .

On intègre cette vitesse locale instantanée sur la colonne d'eau, pour obtenir une vitesse moyenne :

$$\bar{\mathbf{u}} = \frac{\mathbf{u}^*}{\kappa} \ln \left( \frac{\mathbf{H}}{e \mathbf{z}_0} \right) \quad (5.6)$$

avec  $\mathbf{z}_0$  la longueur de rugosité sur le fond et  $e$  la base du logarithme naturel. L'expression de la vitesse de frottement peut être alors obtenue à partir de la vitesse moyenne, ce qui permet d'exprimer les frottements sur le fond à partir de cette vitesse moyenne :

$$\tau_{bx} = \rho_0 \frac{\kappa^2}{\left( \ln \left( \frac{\mathbf{H}}{e \mathbf{z}_0} \right) \right)^2} \bar{\mathbf{u}}^2 \quad (5.7)$$

La longueur de rugosité  $\mathbf{z}_0$  paramétrée pour l'écoulement, est définie comme étant une rugosité de forme (rugosité macroscopique). Il s'agit d'une constante d'intégration au sens mathématique, et n'est pas une grandeur physique. Il faut calibrer ce paramètre afin d'obtenir les frottements adéquats et par conséquent, un signal de marée en estuaire satisfaisant en termes d'amplitude et de phase.

### 5.3 Mise en place des zones de viscosité

C'est la partie à laquelle nous avons consacré le plus de temps durant ce stage : modification de la longueur de rugosité dans le code, compilation, simulation et post-traitement des résultats. Toutes ces étapes ont été réalisées plusieurs centaines de fois jusqu'à obtenir configuration optimale.

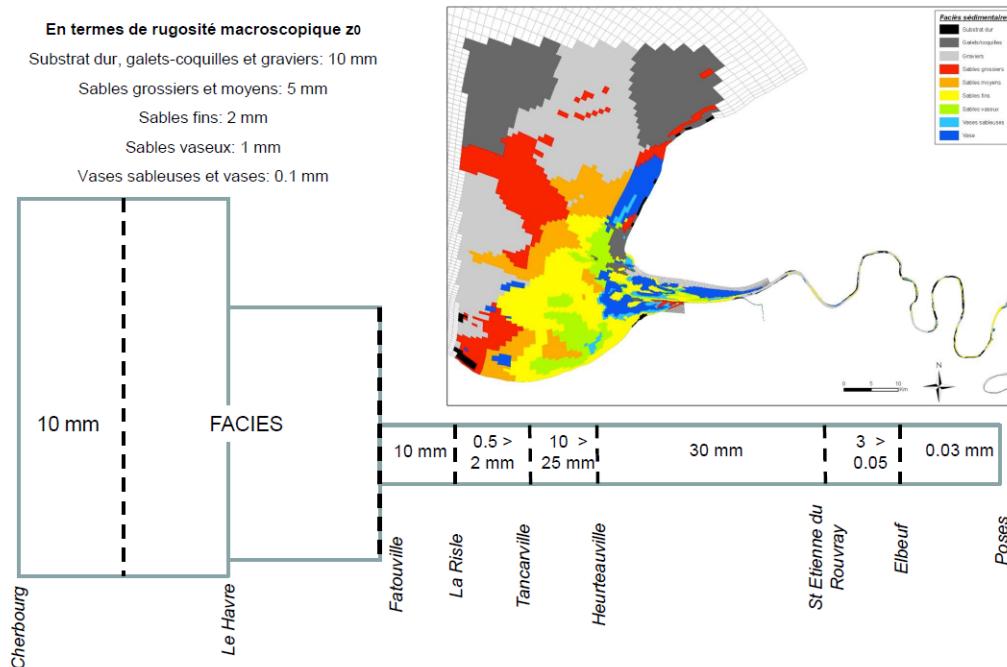


FIGURE 5.2 – Longueurs de rugosité introduites dans MARS 3D

Une longueur de rugosité constante de 10 mm a été fixée de manière uniforme dans la baie. Une cartographie de longueur de rugosité a été établie pour l'embouchure en se basant sur une cartographie des faciès sédimentaires (nature des sédiments de surface) : nous avons affecté une valeur (réaliste) de 10 mm aux galets et graviers, 5 mm aux sables grossiers et moyens, 2 mm aux sables fins, jusqu'à atteindre 0.1 mm pour les vases.

Nous avons donc rendu compte de l'hétérogénéité de la nature du fond en termes de frottements dans le modèle, et les résultats sont très satisfaisants. Le fleuve a ensuite été divisé en plusieurs parties présentant des longueurs de rugosité différentes mais progressives afin de caler au mieux le signal de marée du modèle par rapport aux données des marégraphes. Ce fut un travail très délicat à réaliser car les résultats obtenus à l'amont du fleuve sont dépendants des résultats obtenus à l'embouchure et dans la baie et réciproquement (principe des vases communicants).

## 6. VALIDATION HYDRODYNAMIQUE

La marée est un phénomène physique caractérisé par un mouvement oscillatoire périodique du niveau de la mer. C'est la réponse de l'océan aux variations périodiques des forces gravitationnelles exercées par la Lune, à une distance faible de la Terre, et le Soleil, à cause de sa masse. Ces forces induisent une déformation de la surface terrestre et génèrent des ondes liées à la variation de la surface libre de la mer. La position de ces trois astres détermine les cycles de marée. Un alignement selon l'axe Terre-Lune-Soleil engendre une marée de vive-eau de forte amplitude. Lorsque la Lune et le Soleil sont en quadrature par rapport à la Terre, il s'agit d'une marée de morte-eau où l'amplitude est plus faible.

A l'embouchure de l'estuaire, la vitesse de propagation et l'amplitude de l'onde marée sont fonction de la hauteur d'eau, de la géométrie du lit du fleuve (décrise par la bathymétrie) et du débit du fleuve. En progressant vers l'amont du fleuve (jusqu'à Poses dans notre cas), l'amplitude de l'onde de marée est modifiée, soit diminuée par frottement sur le fond et sur les berges, soit augmentée par la réduction de la section d'écoulement.

### 6.1 Onde de marée dans la baie

Le nord de la baie est une zone soumise à d'importantes variations de hauteurs d'eau. Ce phénomène est dû à la réflexion de l'onde de marée sur la péninsule du Cotentin (Cherbourg, Barfleur), amplifiée par l'action de la force de Coriolis qui tend à déplacer les particules d'eau dans la direction de propagation de cette onde.

De fait, on désigne la baie de Seine comme étant une zone macrotidale. L'une des particularités de la propagation de l'onde de marée en baie de Seine est le prolongement des étages de pleine mer. Il s'agit d'une période où la variation du niveau de la mer est minimale. La marée au Havre est d'ailleurs caractérisée par sa « tenue du plein » de plus de deux heures. Cette particularité s'explique du fait de la déformation de l'onde de marée en baie de Seine et de l'interaction entre l'onde lunaire et solaire sous la forme d'une oscillation transversale entre l'estuaire de la Seine et les côtes anglaises (Le Provost et al., 1986).

La validation hydrodynamique du modèle à l'échelle de la baie est obtenue par confrontation des simulations d'élévation de surface libre, avec les données calculées à partir des composantes harmoniques du SHOM. Afin de mettre en évidence la difficulté de reproduire précisément, pour des modèles prédictifs, la propagation de l'onde de marée, des comparaisons de hauteurs d'eau en termes d'amplitudes et de phases sont illustrées sur la figure suivante.

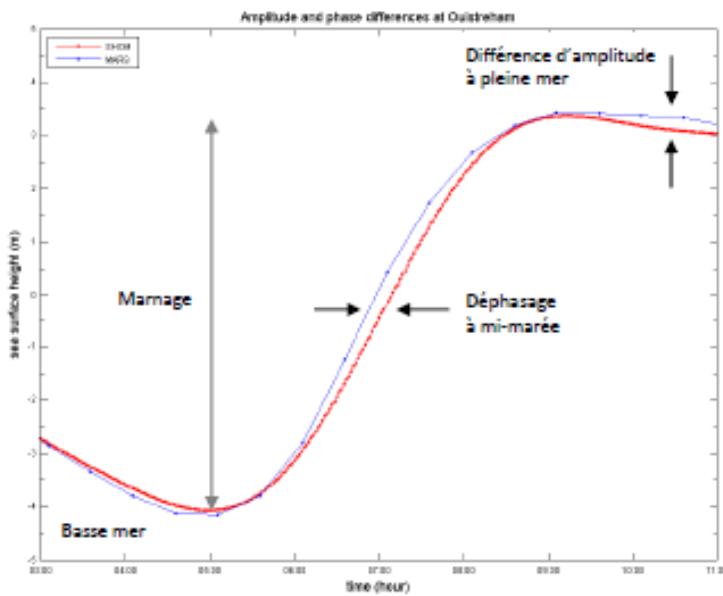


FIGURE 6.1 – Différences en amplitude et en phase entre les marées simulées par MARS (courbe bleue) et par le modèle CST-France du SHOM (courbe rouge) à Ouistreham, sur une période de 8 heures.

Cette figure nous renseigne, à titre d'exemple, sur la manière d'interpréter les résultats issus des simulations en comparaison avec des mesures. Nous observons une période de basse mer à 5h atteignant une hauteur d'eau minimale d'environ 4m en dessous du niveau de mi-marée (évoluant au voisinage de 0). La pleine mer s'étend sur une période plus élevée (environ de 2 heures) et atteint une hauteur d'eau maximale de 3m50 par rapport au niveau de mi-marée, vers 9h.

Cette différence de hauteur d'eau entre pleine mer et basse mer consécutive est ce que l'on appelle le marnage : il est ici de 7m50. Le passage de la basse mer à la pleine mer est appelé le flot (augmentation du niveau de l'eau) et celui de la pleine mer à la basse mer, le jusant (diminution du niveau de l'eau).

On définit en outre l'amplitude de la marée comme la moitié de la valeur du marnage. Il apparaît vers 7h un décalage temporel entre les deux courbes au moment de la mi-marée en flot (flèches horizontales). On en déduit que la courbe bleue simulée par notre modèle est en avance dans le temps par rapport à la courbe rouge de référence. D'autre part, la différence d'amplitude observée en pleine mer indique que notre modèle a tendance à surestimer légèrement la hauteur d'eau de référence (en rouge).



FIGURE 6.2 – Représentation de la baie de Seine

Les figures 6.3 à 6.5 présentent la comparaison entre les sorties du modèle CST-France (SHOM : courbe rouge) et le modèle MARS (courbe cyan) pour les trois points de la baie (en rouge). Le forçage de marée imposé aux conditions limites ainsi que le débit réel de la Seine sont pris en compte. En revanche, pour ces deux modèles, les forçages externes liés au vent et les surcotes n'interviennent pas pour ces simulations. Nous avons choisi d'illustrer nos résultats sur une période de 8 jours (du 18 au 26 avril 2007) afin de rendre compte de l'alternance des cycles de vive-eau et de morte-eau.

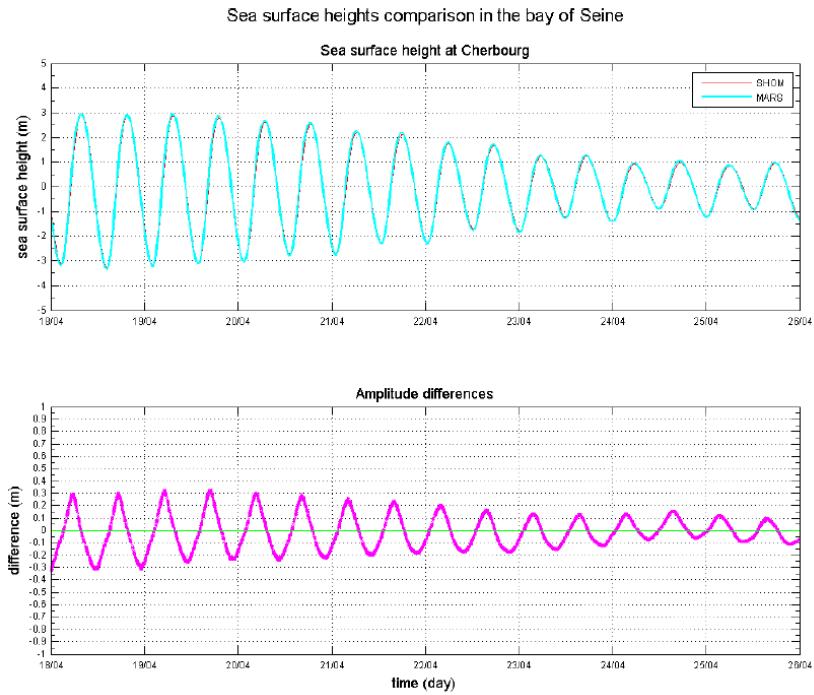


FIGURE 6.3 – Comparaison des élévations de surface libre (en mètre) à Cherbourg (en haut) et différence d'amplitude (en mètre) entre ces deux courbes (en bas).

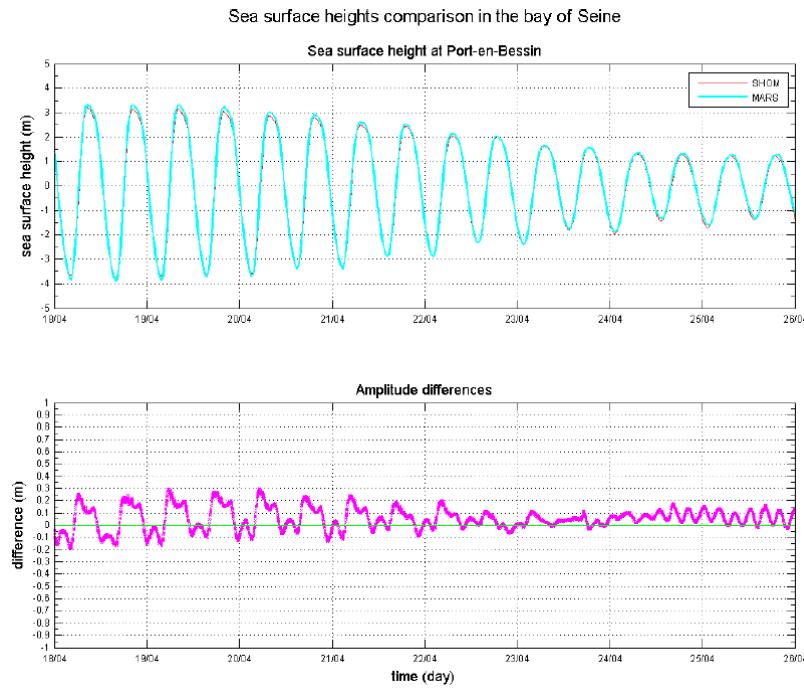


FIGURE 6.4 – Comparaison des élévations de surface libre (en mètre) à Port-en-Bessin (en haut) et différence d'amplitude (en mètre) entre ces deux courbes (en bas).

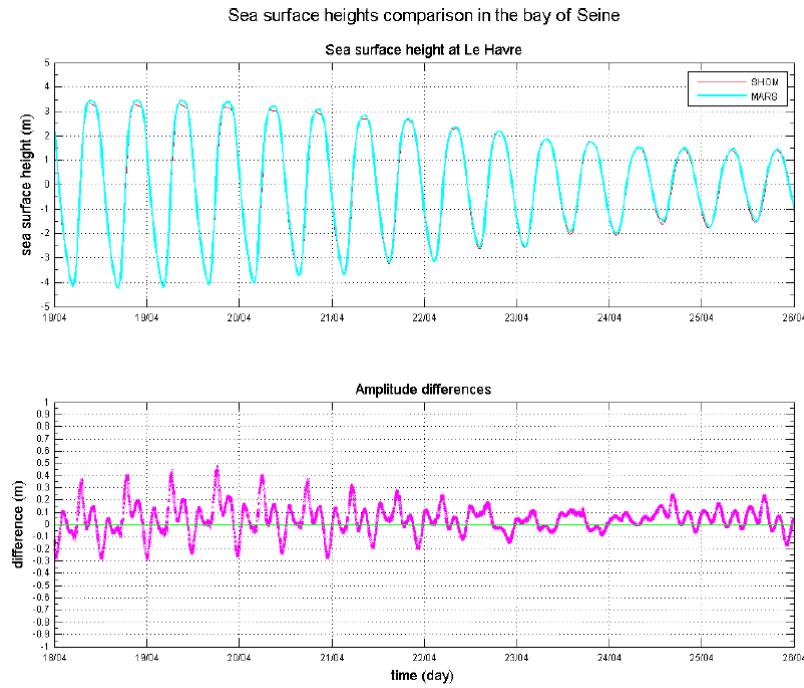


FIGURE 6.5 – Comparaison des élévations de surface libre (en mètre) au Havre (en haut) et différence d'amplitude (en mètre) entre ces deux courbes (en bas).

Afin d'évaluer de manière quantitative les résultats obtenus, nous avons tracé une courbe représentant les différences d'amplitude entre les deux signaux de marée (en bas).

A Cherbourg (Figure 6.3), on peut noter que les différences maximales d'amplitude sont de l'ordre d'une trentaine de centimètres en période de vive-eau, pour décroître à des valeurs comprises entre 15cm et 20cm en période de morte-eau. Ces écarts sont provoqués par un léger décalage temporel : les extrema de la courbe des différences d'amplitude correspondent aux périodes de flot et de jusant, plus particulièrement lors de la mi-marée. D'autre part, l'amplitude du signal est bien reproduite pour les périodes identifiées aux étales de pleine mer et de basse mer, puisque les écarts constatés sont quasiment nuls.

A Port-en-Bessin (Figure 6.4), on s'aperçoit que l'amplitude des oscillations est plus importante : le marnage, de plus de 7m en moyenne pour la période de vive-eau, est supérieur à celui observé à Cherbourg. On note également une légère déformation dans le temps de la courbe en étale de pleine mer de vive-eau. Les différences maximales d'amplitude observées en vive-eau correspondent à des écarts de l'ordre de 25cm à 30cm en flot, et de l'ordre de 10cm à 15cm en jusant. Ces différences d'amplitude en période de morte-eau diminuent légèrement à l'étale de pleine mer, de l'ordre de 15cm, et atteignent une valeur d'environ 10cm pour les étales de basse mer.

Au Havre (Figure 6.5), les différences d'amplitude sont maximales en flot et en jusant, atteignant respectivement des valeurs proches de 45cm entre les 19 et 20 avril. Elles traduisent un décalage temporel de l'onde de marée plus élevé à l'embouchure de l'estuaire. Par ailleurs, nous observons des écarts d'amplitude de 10cm à 15cm aux étales de basse mer, et de l'ordre de 20cm pour les étales de pleine mer.

Nous pouvons donc constater de manière générale que les périodes de vive-eau et de morte-eau sont correctement décrites par le modèle. L'évolution des courbes de marée présente une allure très proche d'une sinusoïde, avec une pleine mer légèrement allongée au sud de la baie.

## 6.2 Onde de marée dans l'estuaire

La validation hydrodynamique de la zone estuarienne a été réalisée à partir des données de hauteurs d'eau fournies par le G.I.P. Seine-Aval de Rouen et le port maritime de Rouen. Les mesures marégraphiques ont été effectuées à différents niveaux le long du fleuve, afin d'y étudier la dissipation de l'onde de marée. La carte ci-dessous permet de situer la position géographique des seize marégraphes (points rouges) à l'aide desquels nous effectuons nos comparaisons.



FIGURE 6.6 – Carte de l'estuaire de la Seine. (source : GIP Seine-Aval)

De manière analogue aux comparaisons effectuées pour la validation du modèle en baie de Seine, nous allons décrire les phénomènes liés à la propagation de la marée dans l'estuaire. Les résultats des simulations sont présentés depuis la partie aval du fleuve, à l'entrée du chenal de navigation délimité par la balise A (zone d'engainement (Figure1), pour remonter la rivière en amont jusqu'au marégraphe de Pont de l'Arche (point kilométrique (pk) 156). Pour plus de légèreté, seulement 4 points sont présentés dans le corps de ce rapport, les autres figurant en annexe.

La calibration hydrodynamique du modèle s'effectue par comparaison des variations d'élévation de surface libre pour différents points de notre maillage, sur la période du 16 au 26 avril 2007. Les figures 6.7 à 6.10 illustrent l'évolution temporelle du signal de marée en termes d'amplitude et de phase.

Une première comparaison des courbes de marée est effectuée à l'entrée de l'embouchure de la Seine (Figure 6.7). Les différences d'amplitude peuvent atteindre un maximum de 25cm. Les hauteurs d'eau simulées sont quelque peu surestimées et de légers décalages en temps apparaissent à l' de pleine mer en période de vive-eau. Ces écarts sont également visibles lors de la transition des phases de vive-eau et morte-eau, où une différence d'amplitude de l'ordre de 50cm apparaît à la mi-marée de reflux, entre le 21 avril et le 22 avril.

Pour chacune des quatres figures suivantes, nous représentons de la même manière, en haut, la comparaison des élévations de surface libre (en mètre) entre le modèle MARS-3D (courbe bleue) et les mesures (points rouges). Sur la partie du bas est illustré le signal correspondant à la différence d'amplitude (en mètre) entre le modèle et les observations (courbe magenta).

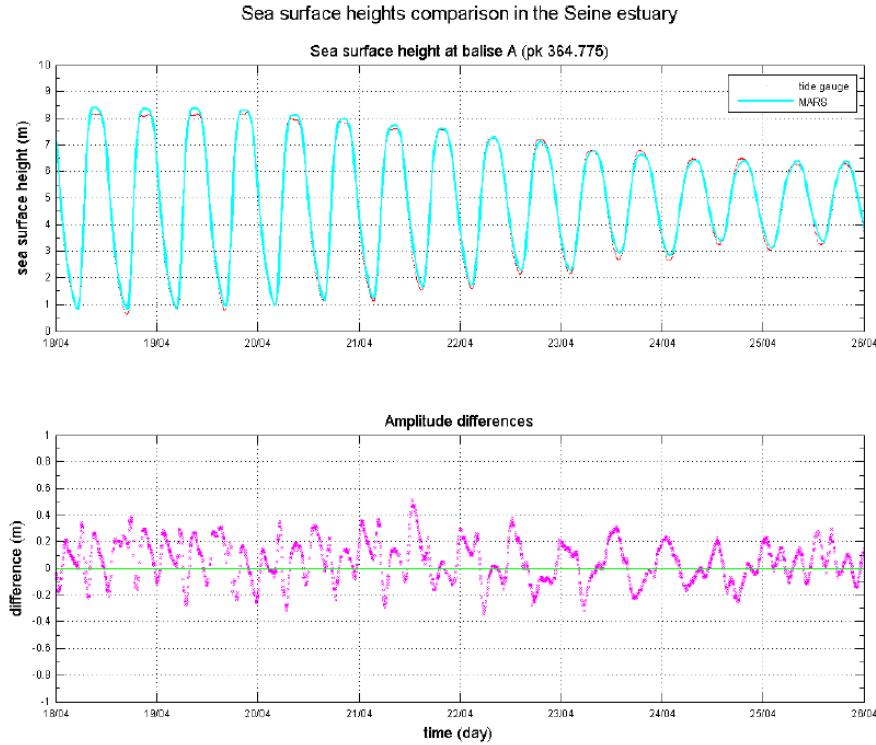


FIGURE 6.7 – Comparaison du signal de marée entre le modèle et la Balise A.

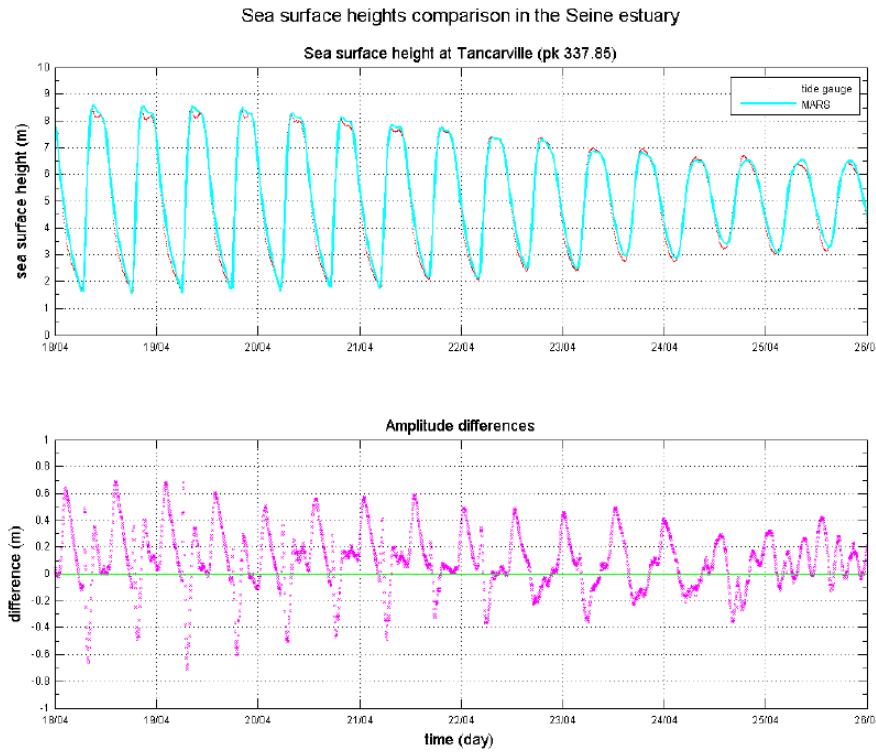


FIGURE 6.8 – Comparaison du signal de marée entre le modèle et le marégraphe de Tancarville.

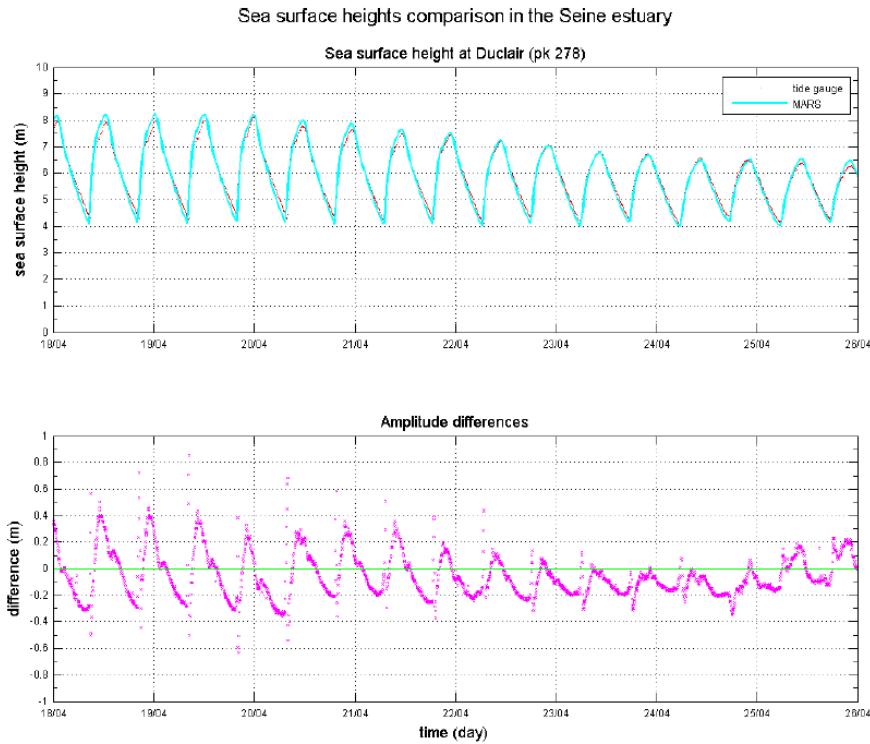


FIGURE 6.9 – Comparaison du signal de marée entre le modèle et le marégraphe de Duclair.

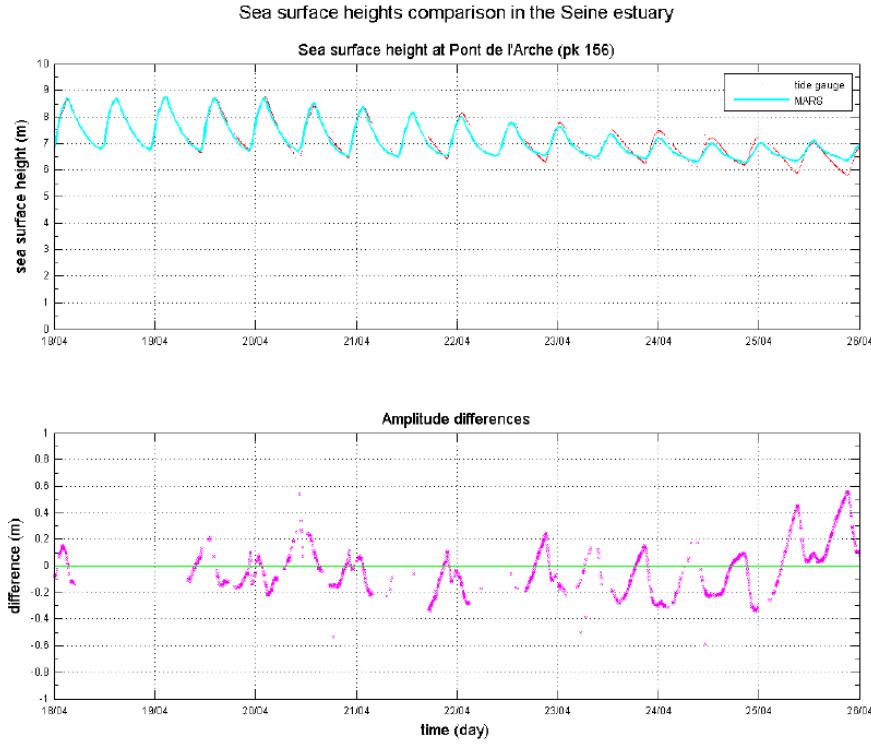


FIGURE 6.10 – Comparaison du signal de marée entre le modèle et le marégraphe de Pont De L'Arche.

Sur les figures 6.7 à 6.10, nous observons à première vue une déformation de l'onde de marée dans l'estuaire de la Seine. En effet, Il est établi qu'une onde de surface en eau peu profonde se propage avec une célérité proportionnelle à la racine carrée de la hauteur d'eau. Par conséquent, la vitesse de propagation de l'onde de marée dynamique le long du chenal connaît un ralentissement, d'autant plus accentué qu'il y a une forte dissipation d'énergie du signal en estuaire (frottement sur le fond). L'allure asymétrique des courbes est causée par une augmentation rapide de la hauteur d'eau lors du flot (phase de la marée montante). Cette variation de vitesse de propagation de l'onde entraîne un certain « ratrappage » de la pleine mer sur la basse mer qui précède. Nous observons ainsi un raidissement du profil de l'onde de marée.

A Tancarville (Figure 6.8), des écarts allant de 60cm à 65cm indiquent un déphasage d'amplitude en jusant pour la période de vive-eau. Notons également une tenue du plein légèrement allongée en pleine mer.

A Duclair (Figure 6.9), des différences d'amplitude de plus de 40cm en flot et de 30cm en jusant entraînent un décalage des courbes aux périodes de pleine et basse mer. Ces écarts ont tendance à diminuer en morte-eau. L'allure générale est malgré tout satisfaisante.

A Pont de l'Arche (Figure 6.10), malgré un léger déphasage et une amplitude un peu faible en période de morte-eau, la capacité du modèle à reproduire le profil de marée est considérée comme très satisfaisante. Ces résultats sont certainement liés à la configuration « réaliste » de notre maillage qui tient compte des méandres du fleuve, des îles et des bras morts (jamais réalisé auparavant), et qui permet de pallier au manque d'efficacité (sections de l'écoulement difficiles à décrire précisément) des modèles « classiques » (cartésiens) dans la partie amont du fleuve [14].

### 6.3 Courants de marée

Les mesures de courant sont un moyen d'évaluer la circulation des masses d'eau sur des distances et des échelles de temps relativement élevées (plusieurs dizaines de mètres et quelques heures). Le mouvement horizontal de la marée génère au large d'importants volumes d'eau, créant ainsi des courants initialement faibles et dirigés dans le sens de propagation de l'onde. Les courants de surface sont également influencés par le vent en surface.

L'étude courantologique du secteur de l'embouchure de la Seine va permettre de vérifier la capacité du modèle à reproduire les intensités et les directions des vitesses des courants de surface ainsi que leur distribution verticale dans la colonne d'eau. Afin de mettre en évidence la modification des champs de courant dans la partie aval de l'estuaire de la Seine, la société IXSURVEY a effectué une campagne de mesure de courantométrie en Seine.

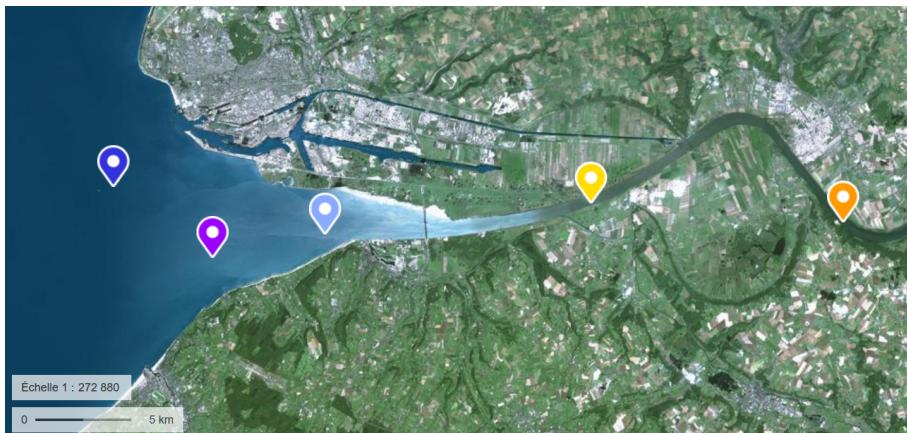


FIGURE 6.11 – Positions des cinq points de mesures.

Toutes les mesures sont réalisées à l'aide d'ADCP (Acoustic Doppler Current Profiler). La vitesse du courant est déterminée à partir de la différence de fréquence induite par la vitesse des particules en suspension dans l'eau. La colonne d'eau est découpée en couches uniformes (10 couches dans notre étude), et pour chacune d'elle, la direction et la valeur moyennée de la vitesse sont déterminées. La mesure de vitesse dans les différentes couches est obtenue en appliquant un retard temporel entre l'instant d'émission et celui de réception. Les figures 6.12 à 6.21 comparent simultanément les résultats du modèle avec les mesures ADCP pour :

- Les intensités des vitesses des courants moyennées sur la colonne d'eau (croix rouges MARS).
- Les intensités des vitesses distribuées sur toute la colonne d'eau (MARS et ADCP).
- Les directions du courant moyennées sur la colonne d'eau (croix rouges : MARS).
- Les directions du courant dans la colonne d'eau (MARS et ADCP).

La validation hydrodynamique du modèle pour l'étude du courant est effectuée sur une période de vive-eau du 12 au 14 novembre 2004. Les graphiques illustrant les effets du courant de marée sur la verticale, sont établis de manière à pouvoir comparer les mesures acquises par l'ADCP, depuis le fond à partir d'une hauteur de 3.25m (liée à la taille de l'appareil et à sa fauchée) jusqu'à 0.5m en dessous de la surface libre représentée par un trait continu noir (portée). Des lignes blanches tracées en trait continu et discontinu sur le graphique du modèle, délimitent le volume de la colonne d'eau nécessaire à la confrontation des données avec les résultats du modèle. Les résultats sont présentés en fonction des couleurs des points (Figure 6.11).

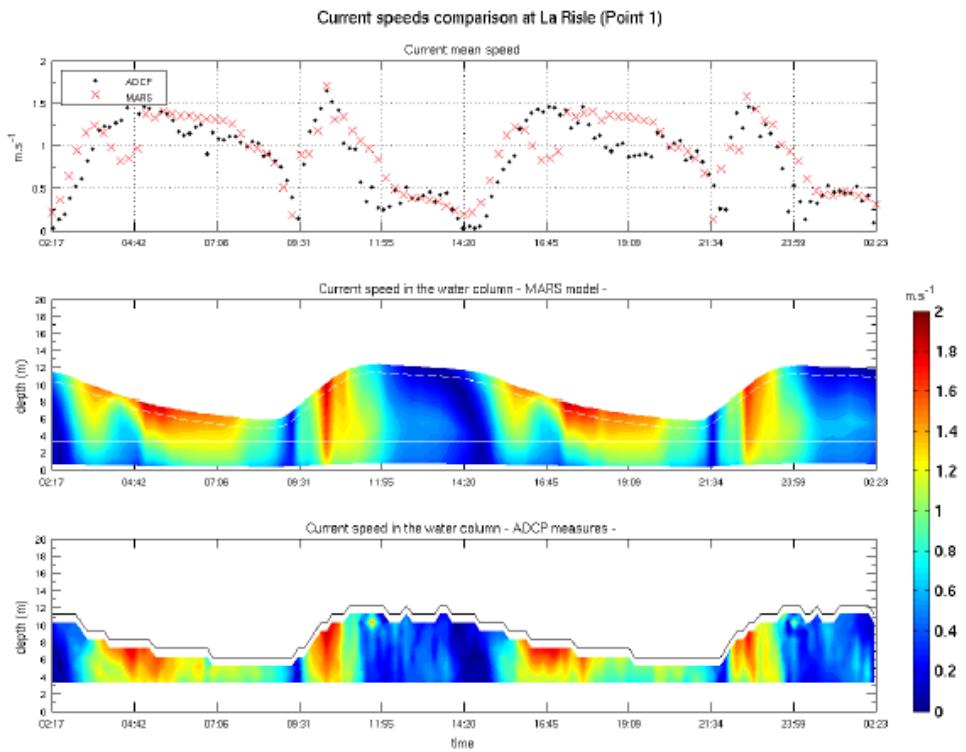


FIGURE 6.12 – Intensités des vitesses de courant à La Risle (point jaune).

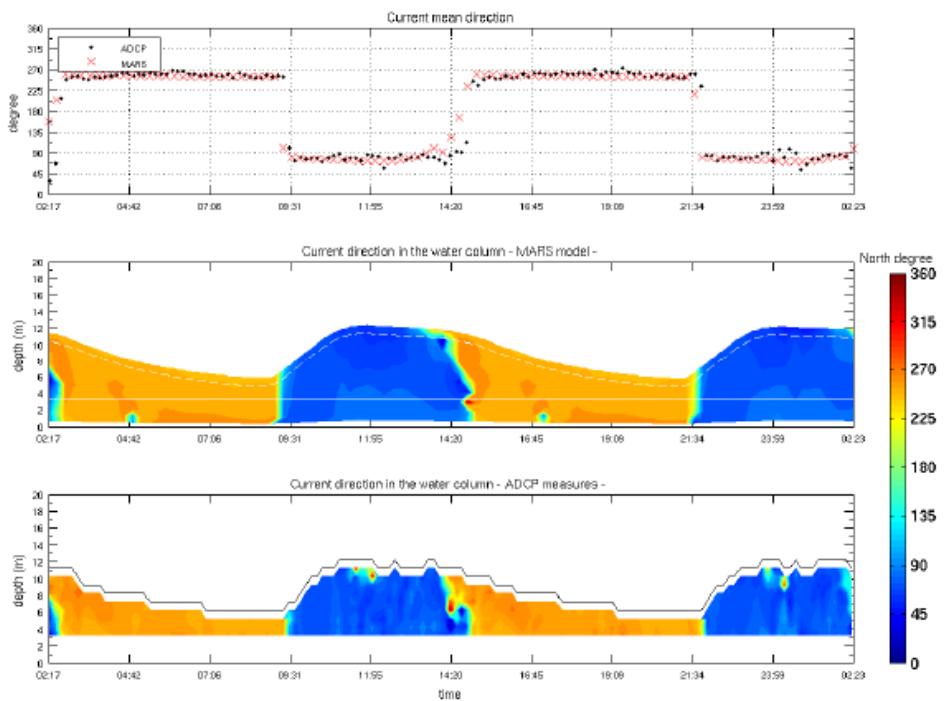


FIGURE 6.13 – Directions des vitesses de courant à La Risle (point jaune).

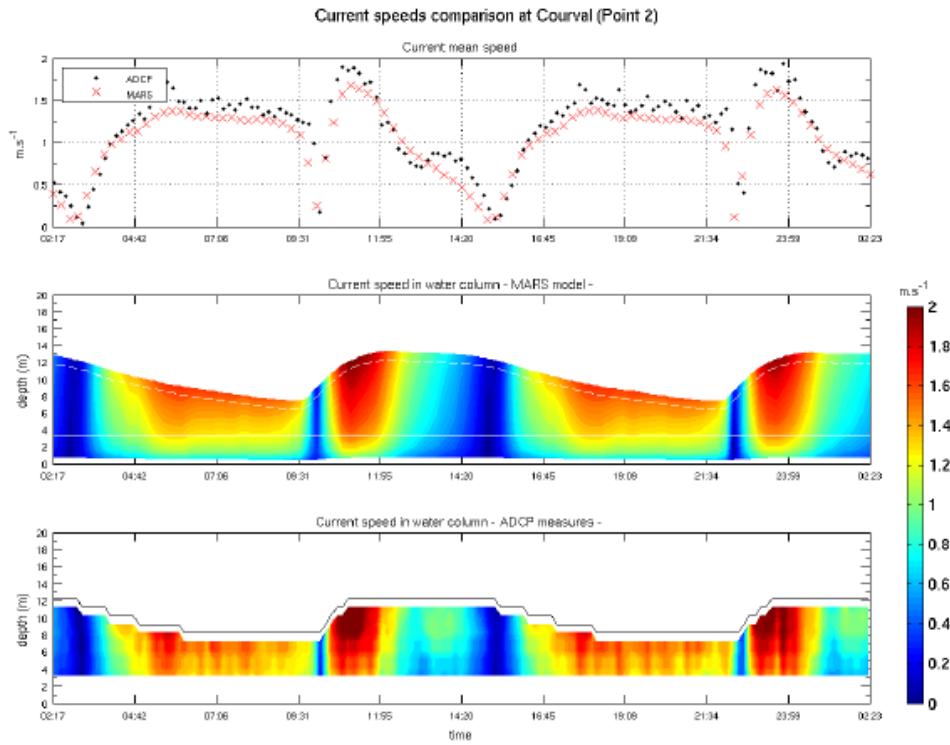


FIGURE 6.14 – Intensités des vitesses de courant à Courval (point orange).

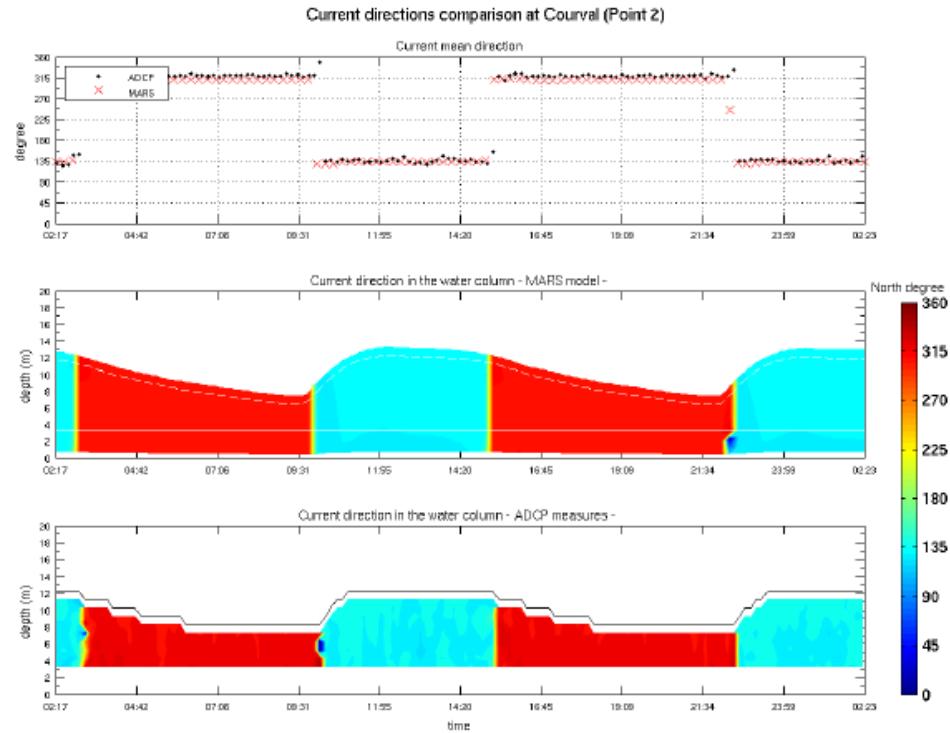


FIGURE 6.15 – Directions des vitesses de courant à Courval (point orange).

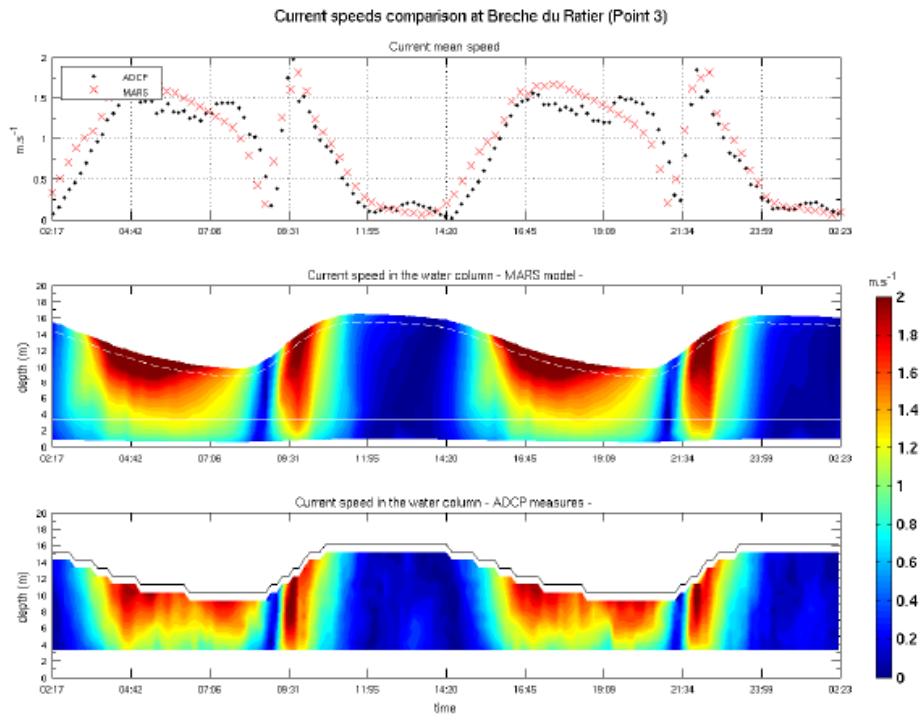


FIGURE 6.16 – Intensités des vitesses de courant à la brèche du Ratier (point gris).

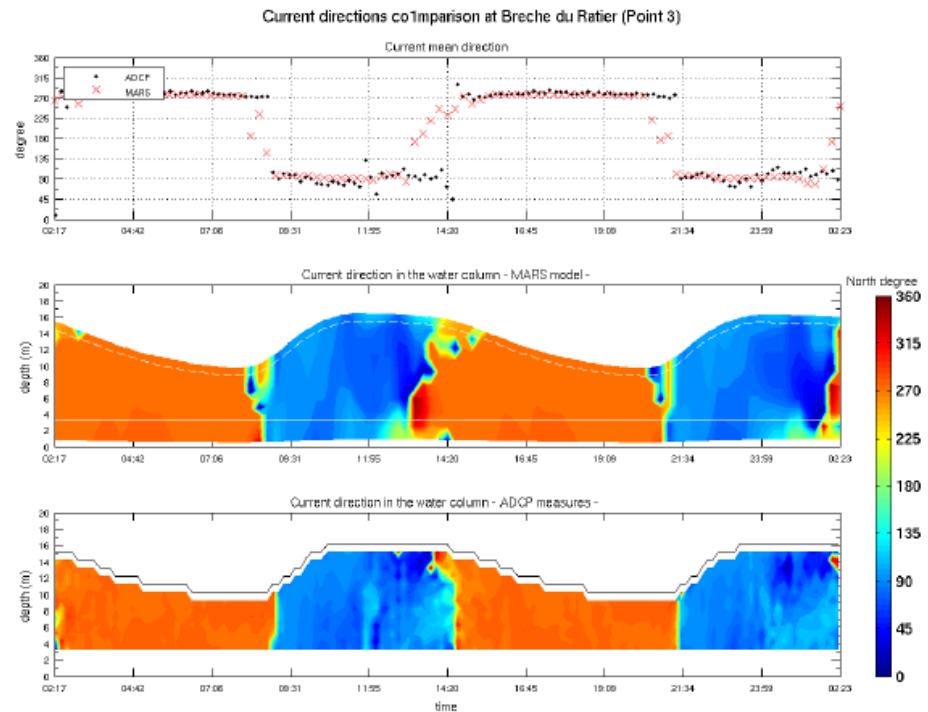


FIGURE 6.17 – Directions des vitesses de courant à la brèche du Ratier (point gris).

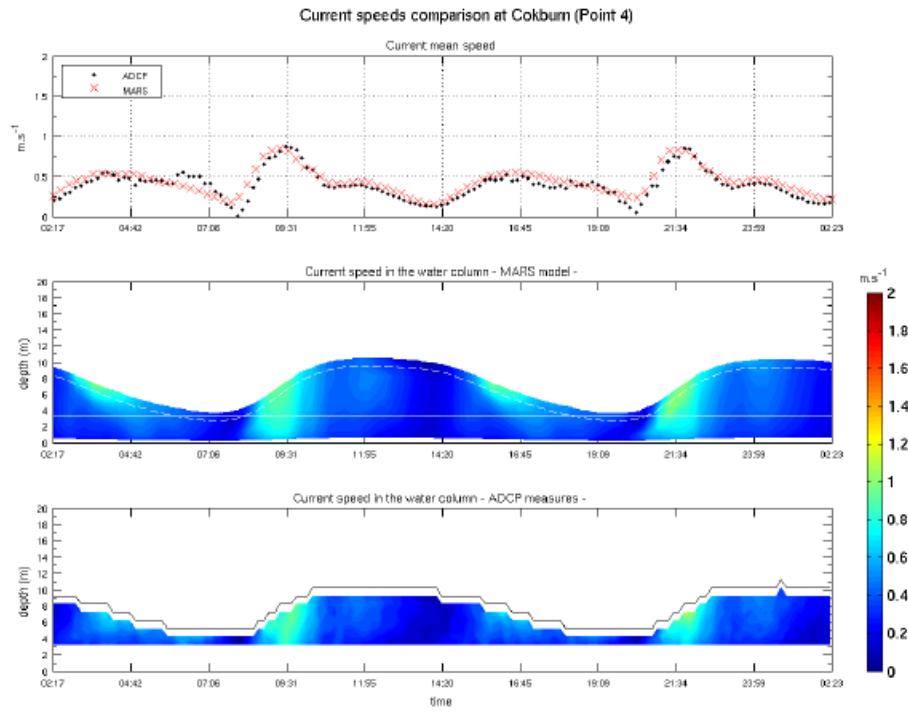


FIGURE 6.18 – Intensités des vitesses de courant à Cockburn (point bleu).

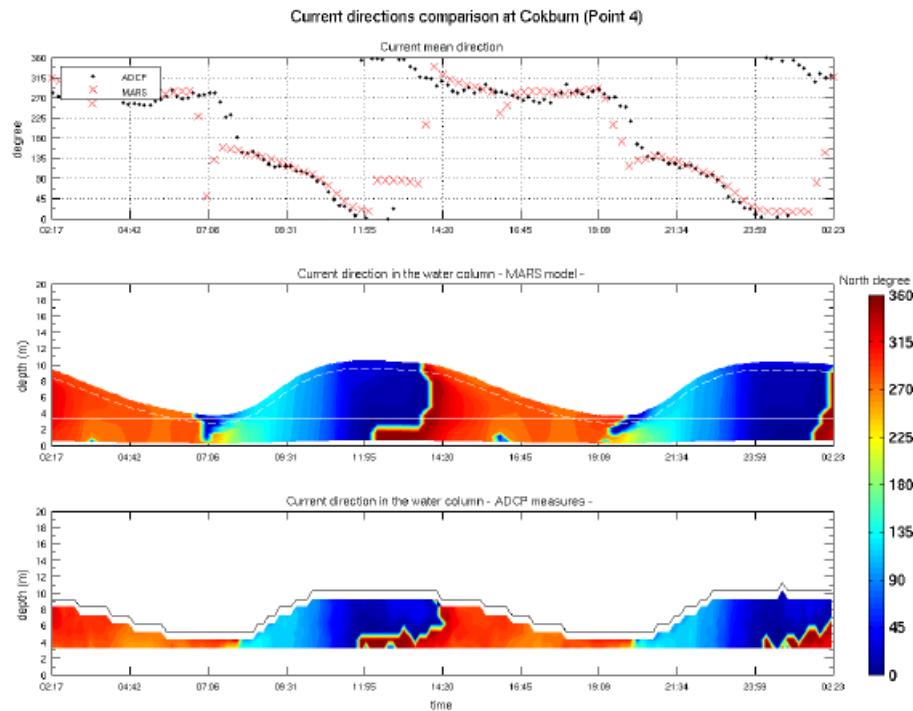


FIGURE 6.19 – Directions des vitesses de courant à Cockburn (point bleu).

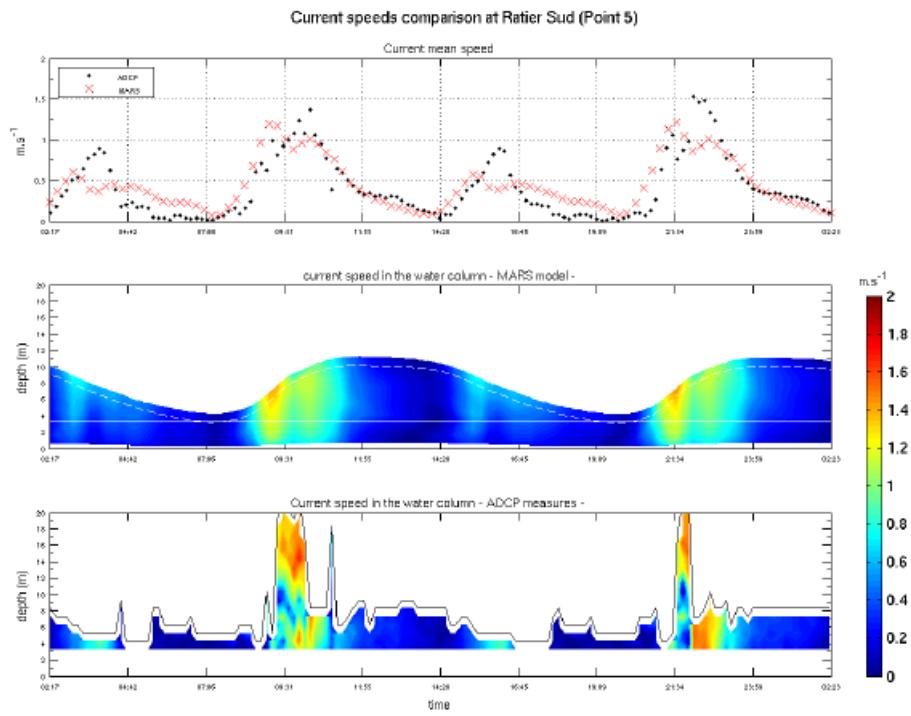


FIGURE 6.20 – Intensités des vitesses de courant au Ratier Sud (point violet).

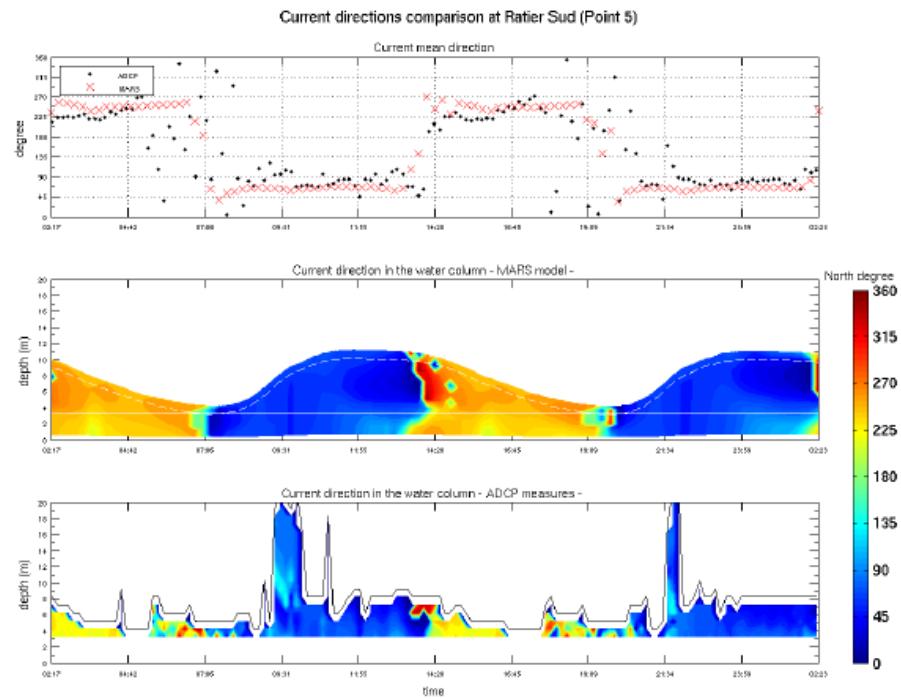


FIGURE 6.21 – Directions des vitesses de courant au Ratier Sud (point violet).

## 6.4 Analyse courantologique dans l'estuaire

Au point 1 (La Risle), la comparaison des vitesses moyennes en surface permet d'affirmer que le modèle reproduit correctement les intensités en flot et en jusant, qui atteignent une valeur maximale de ( $1.75m.s^{-1}$ ) aux étages de pleine mer. D'autre part, les renverses de courant sont elles aussi bien reproduites. On note cependant des écarts d'intensité d'environ ( $0.9m.s^{-1}$ ) en début de jusant, très probablement liés à la définition de la bathymétrie dans cette zone.

Le point 2 (Courval) se situe dans le premier méandre du fleuve. Les vitesses calculées par le modèle atteignent jusqu'à ( $2m.s^{-1}$ ) en fin de jusant, et correspondent ainsi aux intensités mesurées. Nous constatons globalement une très légère sous-estimation des intensités reproduite par le modèle. Les changements de direction (renverses de courant) s'opèrent de manière identique sur toute la colonne d'eau. Ils correspondent parfaitement aux observations.

Le point 3 (Brèche du Ratier) est situé dans la zone d'endiguement à l'embouchure du fleuve. Nous pouvons constater une augmentation de la profondeur à cet endroit, liée à la présence du chenal de navigation. Les courants de jusant sont aussi forts en termes d'intensité ( $2m.s^{-1}$ ) que ceux de flot. Ce phénomène s'explique par une élévation de la hauteur d'eau en période de vive-eau qui submerge les digues, favorisant ainsi l'écoulement sur toute la section de l'embouchure. Lorsque la renverse des courants se produit, l'écoulement est de nouveau contenu à l'intérieur des digues, et conduit à une augmentation des vitesses. Les intensités de vitesse et changements de direction sont dans l'ensemble correctement reproduits par le modèle.

Le point 4 (Cokburn) est situé à l'entrée de l'embouchure. L'intensité des vitesses du courant, de l'ordre de ( $0.5m.s^{-1}$ ) en jusant et de ( $1m.s^{-1}$ ) en flot, est bien reproduite par le modèle. Cette différence de vitesse est caractéristique de la propagation de l'onde de marée en estuaire. Les changements de directions sont bien reproduits.

Les mesures effectuées par l'ADCP au point 5 (Ratier Sud) présentent des anomalies (hauteurs d'eau incohérentes et données manquantes). Effectuer une comparaison en termes d'intensités et de directions entre le modèle et les observations n'a pas de sens. Toutefois, en émettant l'hypothèse que notre modèle hydrodynamique est suffisamment proche de la réalité, on observerait donc des vitesses de courant plus élevées en flot ( $1.5m.s^{-1}$ ) qu'en jusant ( $1m.s^{-1}$ ).

Globalement, le modèle reproduit de façon très satisfaisante les vitesses de courant (en termes d'intensité et de direction sur la colonne d'eau) mesurées par les ADCP en différents points de l'estuaire.

Il s'agit désormais de comprendre les relations existantes entre les variables modélisées par MARS et les données d'observation. Les mesures sont essentielles à l'évaluation de la performance d'un modèle. En dehors du fait qu'elles puissent être « manquantes », voire même de présenter des incohérences (Figure 6.16), une validation des résultats du modèle est nécessaire afin de déterminer son degré de performance.

## 7. APPROCHE QUANTITATIVE DU CALIBRAGE

Une simple comparaison graphique des mesures avec les valeurs simulées par le modèle, fournit un premier critère de validation des résultats. Cette approche est cependant insuffisante car il est nécessaire de quantifier les risques d'erreurs commis par le modèle. Nous décrivons cinq méthodes statistiques afin de définir le degré de performance d'un modèle.

### 7.1 Indicateurs et Diagrammes

Ces méthodes permettent d'une part, de mesurer les écarts de valeurs entre différents jeu de données eulériennes (*in situ*), de comparer deux modèles entre eux (intercomparaison), ou encore de comparer les sorties d'un modèle avec un jeu de données. La précision des résultats dépend de la densité du réseau de points de mesures.

Dans notre cas, la comparaison s'effectue entre le modèle MARS de l'Ifremer, et le modèle CST-France du SHOM, pour des valeurs du signale de marée dans la zone de la baie de Seine. Les indicateurs, ou scores, sont définis à partir des notations ci-dessous. On considère un nombre maximal de valeurs, égal à  $N$ , tel que  $1 \leq i \leq N$ .

$x_i$  : Données d'observation

$\bar{x}_i$  : Moyenne empirique des données d'observation

$y_i$  : Valeurs du modèle

$\bar{y}_i$  : Moyenne empirique des valeurs du modèle

- Efficacité du modèle [12]

Il s'agit d'une grandeur sans dimension qui détermine la proportion d'erreur du modèle (variance résiduelle ou bruit) par rapport à la variabilité des données d'observation. Elle est définie par :

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (x_i - y_i)^2}{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x}_i)^2} \quad (7.1)$$

$NSE \in ]\infty; 1]$

$NSE = 1$  est une valeur optimale et traduit l'excellence du modèle.

$NSE \in [0; 1]$  signifie que le niveau de performance du modèle est acceptable.

$NSE \leq 0$  indique que la valeur moyenne observée est un meilleur prédicteur que les valeurs simulées. Le modèle n'est donc pas performant.

Les résultats que nous obtenons sont fondés toutefois sur des critères plus restrictifs [10].

- Pourcentage d'erreur

Ce pourcentage donne une valeur de la surestimation ou de la sous-estimation du modèle par rapport aux données d'observation. Il mesure donc la tendance moyenne des valeurs simulées à être plus grandes ou plus petites que celles observées.

$$PBias = \frac{\sum_{i=1}^N (y_i - x_i)^2}{\sum_{i=1}^N x_i} \times 100 \quad (7.2)$$

- Coefficient de corrélation linéaire (Bravais-Pearson)

On suppose que les écarts-types du modèle et des données sont non nuls, alors ce dernier est définie par :

$$R = \frac{\sum_{i=1}^N (y_i - \bar{y}_i) (x_i - \bar{x}_i)}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (y_i - \bar{y}_i)^2} \sqrt{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x}_i)^2}} \quad (7.3)$$

- Erreur quadratique moyenne

Il s'agit d'un moyen précis de mesure de l'amplitude des écarts entre les valeurs prédictes par le modèle et les valeurs observées. Le modèle s'avère être d'autant plus performant que les erreurs résiduelles (issues des différences termes à termes) sont faibles. Par conséquent, plus l'erreur quadratique est proche de 0, plus le degré de performance du modèle est élevé.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - y_i)^2} \quad (7.4)$$

- Erreur quadratique moyenne centrée

Il s'agit d'une variante de la RMSE : le terme  $\bar{x}_i - \bar{y}_i$  étant pris en compte dans le calcul.

$$CRMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N ((y_i - \bar{y}_i) - (x_i - \bar{x}_i))^2} \quad (7.5)$$

Le diagramme de Taylor [13] est un outil statistique permettant de comparer visuellement la correspondance entre les résultats du modèle et les données d'observations. Il offre la possibilité de regrouper sur un même graphique des informations statistiques telles que :

- La variabilité des écarts-types des données et du modèle.
- L'amplitude des différences ( $RMSE$ ).
- Le degré de dépendance entre les variables modélisées et les mesures, défini par le coefficient de corrélation linéaire ( $R$ ).

En outre, il existe une relation géométrique reliant ces trois critères, basée sur la loi des cosinus (Théorème d'Al-Kashi) :

$$E'^2 = \sigma_M^2 + \sigma_D^2 + 2\sigma_M\sigma_D R \quad (7.6)$$

où  $E'$  désigne l'erreur quadratique moyenne centrée,  $\sigma_M$  l'écart-type du modèle,  $\sigma_D$  l'écart-type des données d'observation. Cette relation est intégrée, à titre d'exemple, sur le diagramme de Taylor ci-dessous :

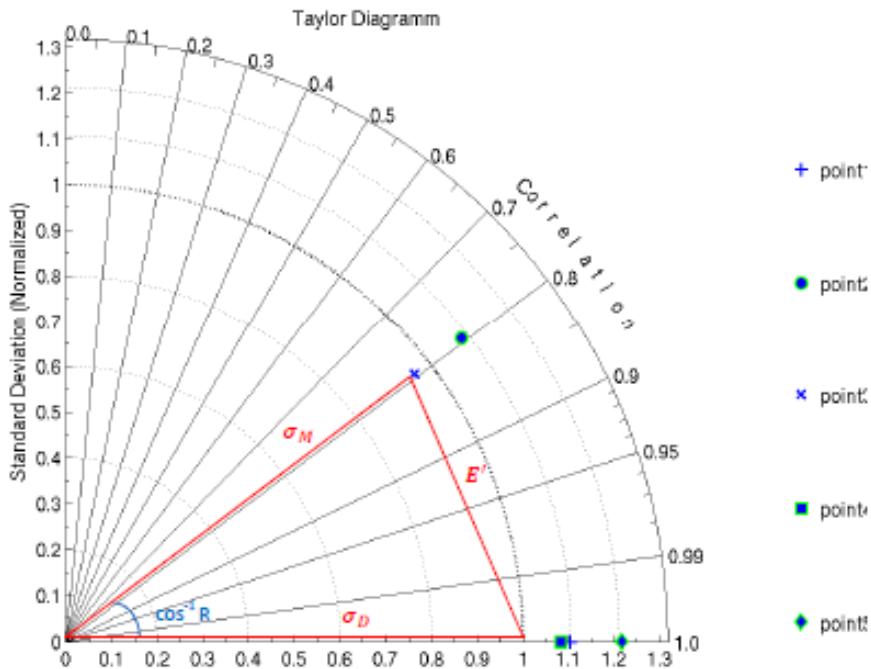


FIGURE 7.1 – Diagramme de Taylor reliant les quatre paramètres statistiques.

Sur cette figure, un point est repéré par ses coordonnées polaires : la distance de ce point à l'origine du repère est égale à l'écart-type du modèle, et le cosinus de l'angle formé par les vecteurs centrés des écarts-types (position azimutale) nous donne la valeur du coefficient de corrélation linéaire ( $R$ ). En ce qui concerne l'erreur quadratique moyenne centrée, elle est proportionnelle à la distance avec le point représentant les observations. Plus cette distance est faible, plus l'erreur ( $E'$ ) l'est aussi, et meilleure sera la performance du modèle. La représentation graphique de l'erreur quadratique moyenne centrée sur ce diagramme n'apparaît pas, pour plus de lisibilité.

## 7.2 Performance du modèle

- En baie de Seine

Dans cette partie, nous analysons de manière quantitative la capacité du modèle à représenter l'ensemble des données caractérisant l'évolution temporelle de l'élévation de la surface libre. Le diagramme de Taylor présenté ci-dessous (Figure 5.2) illustre les corrélations des 8 points issus de notre modélisation, avec les données issues du modèle CST-France du SHOM. Nous sommes donc en mesure de comparer ces deux modèles entre eux, en termes de corrélation (i.e. phasage/-déphasage des courbes de marée) et en termes d'écart-types (i.e. amplitude de l'onde de marée).

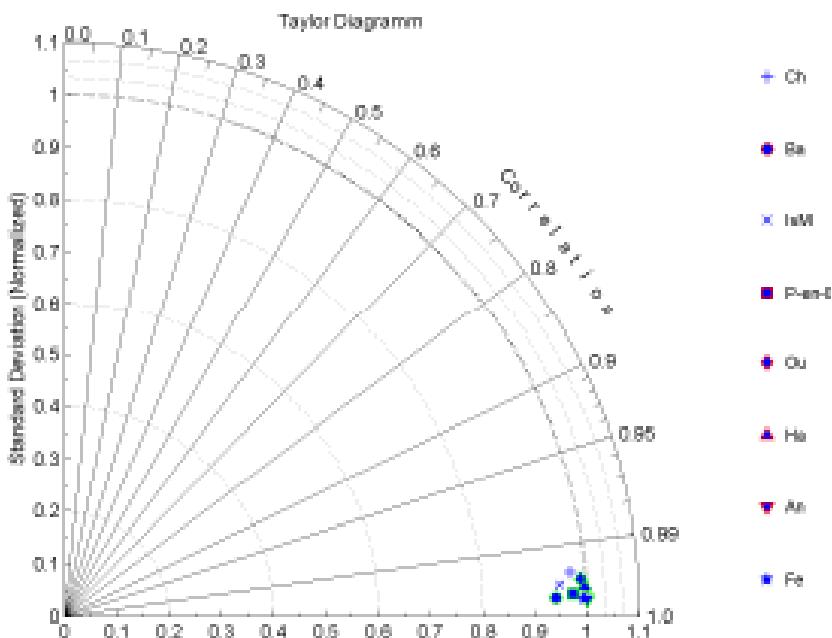


FIGURE 7.2 – Diagramme de Taylor.

Si nous nous référons au tableau statistique de la zone d'étude (Annexe), il apparaît de manière générale que toutes les valeurs de ce coefficient sont très proches de 1 (dans une large mesure). Par conséquent, il y a une forte corrélation entre les variables des séries temporelles issues de MARS et celles du modèle CST-France, notamment pour les points situés dans la partie nord de la baie. C'est le cas d'Antifer (triangle inversé bleu) et de Fécamp (étoile bleue), dont les coefficients de corrélation ont pour valeur 0.9996.

- En Estuaire

De manière analogue, le diagramme de Taylor ci-après (Figure 7.3) présente le degré de corrélation du modèle en termes d'élévation de surface libre, par rapport aux mesures marégraphiques. Nous pouvons voir de manière générale que le nuage de points est plus dispersé que celui observé pour le diagramme de Taylor précédent (Figure 7.2).

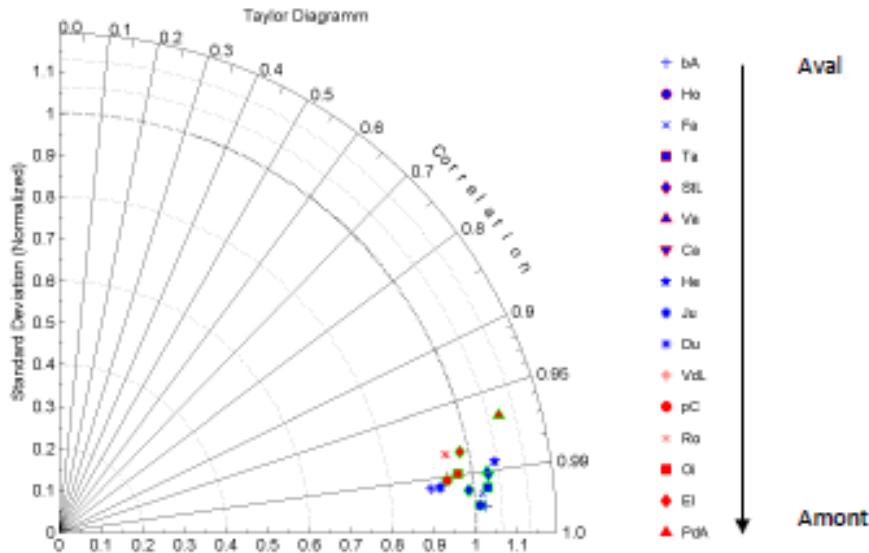


FIGURE 7.3 – Diagramme de Taylor.

Les points figurant en rouge correspondent dans notre maillage à la partie amont de l'estuaire. Ces derniers sont, dans l'ensemble, bien corrélés. Nous observons que le point correspondant à Pont de l'Arche (triangle rouge identifié par les initiales PdA) se distingue des autres points, et que la valeur du coefficient de corrélation associée à ce point est 0.8125 (Annexe). Ce résultat, par comparaison avec ceux observés pour les autres points, reste cohérent. En effet, si l'on se réfère à la courbe de marée reproduite par le modèle MARS pour cette partie de l'estuaire (Figure 6.9), la position de ce point sur le diagramme correspond au léger déphasage indiqué. Toutefois, le modèle rend parfaitement compte des données d'observation. Le critère NSE indique également des résultats très satisfaisants. Nous pouvons synthétiser les corrélations sur les deux figures suivantes :

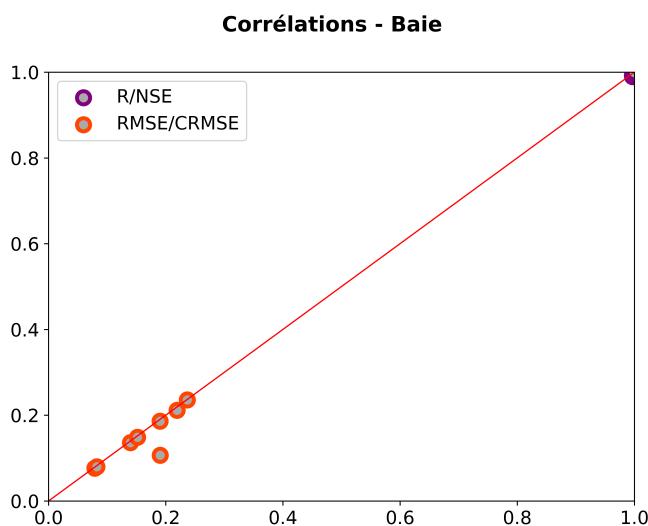


FIGURE 7.4 – Corrélations entre les indicateurs statistiques.

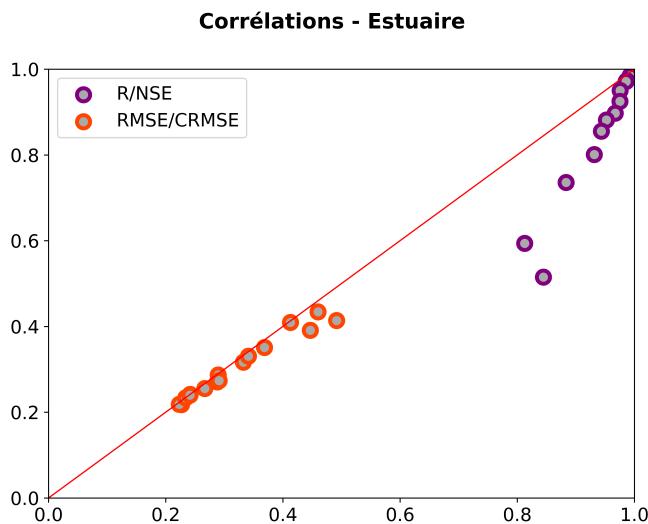


FIGURE 7.5 – Corrélations entre les indicateurs statistiques.

Les corrélations entre les critères RMSE et CRMSE indiquent un faible biais moyen entre les sorties du modèle et les mesures. Les deux indicateurs ont une corrélation forte, avec des valeurs cohérentes selon la zone d'étude. D'autre part, les corrélations entre les critères R et NSE indiquent des résultats différents plus "marqués" selon la zone d'étude : les écarts-types (amplitude du signal) étant plus bien plus élevés en estuaire, entre le modèle et les mesures. On peut constater avec les résultats indiqués en Annexe, que le critère NSE semble plus discriminant que le critère de corrélation R, notamment en estuaire.

## 8. SALINITÉ

### 8.1 Séries temporelles et Cartes

Le calibrage et la validation du modèle MARS-3D étant réalisés pour le paramètre d'élévation de surface libre, une autre étape peut consister à comparer les sorties du modèle pour le traçeur de salinité. Nous utilisons à cet effet les données ponctuelles et continues de salinité provenant de la station de mesures MAREL-Honfleur (Mesures Automatisées en Réseau pour l'Environnement Littoral), sur différentes périodes.

Nous pouvons observer que le modèle reproduit de manière tout à fait satisfaisante les variations de salinité à Honfleur (Figure 8.1). Il convient néanmoins de réaliser plusieurs comparaisons entre d'autres points de la baie ou de l'estuaire afin de vérifier cette cohérence entre modèle et mesures disponibles. Il est également nécessaire de comparer la salinité de notre modèle aux mesures réalisées sur toute la colonne d'eau afin de constater si l'allure de notre profil de salinité (du fond à la surface) est correcte. Ainsi, nous serons en mesure de dire si nous avons un bon mélange sur la verticale et de bonnes stratifications. Ce travail est en cours de réalisation et sera terminé prochainement dans le cadre du post-doctorat de Youen Kervella.

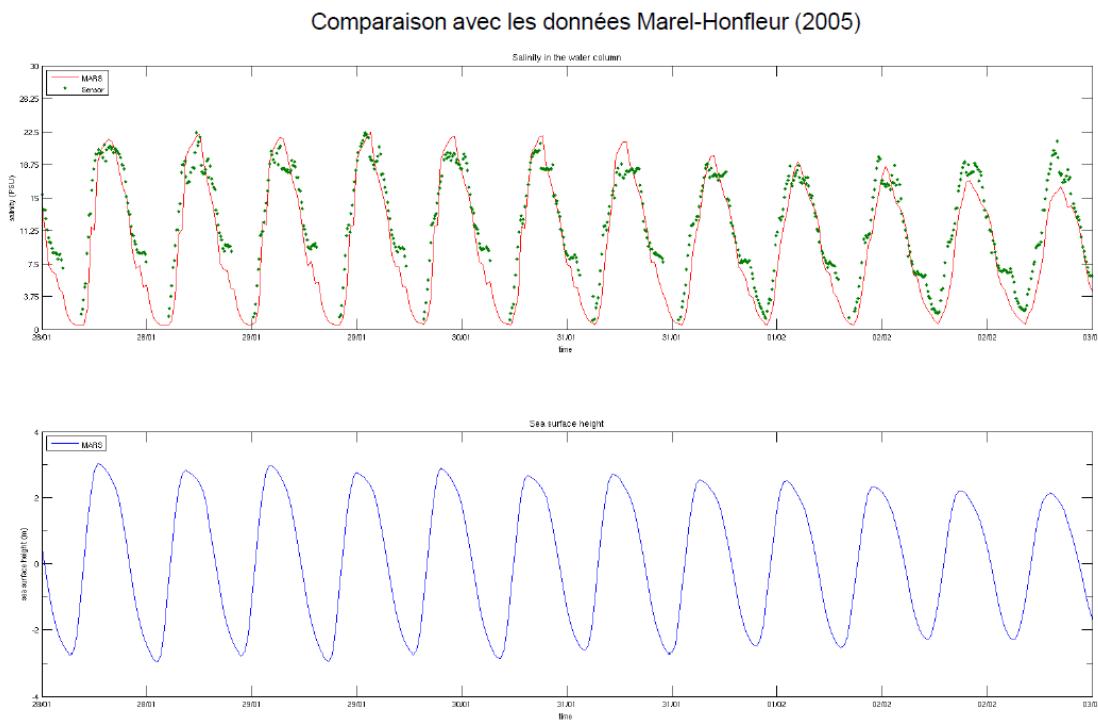


FIGURE 8.1 – Comparaison des valeurs de salinité entre le modèle MARS-3D et la station MAREL-Honfleur, sur une période de 10 jours entre fin janvier et début février 2005.

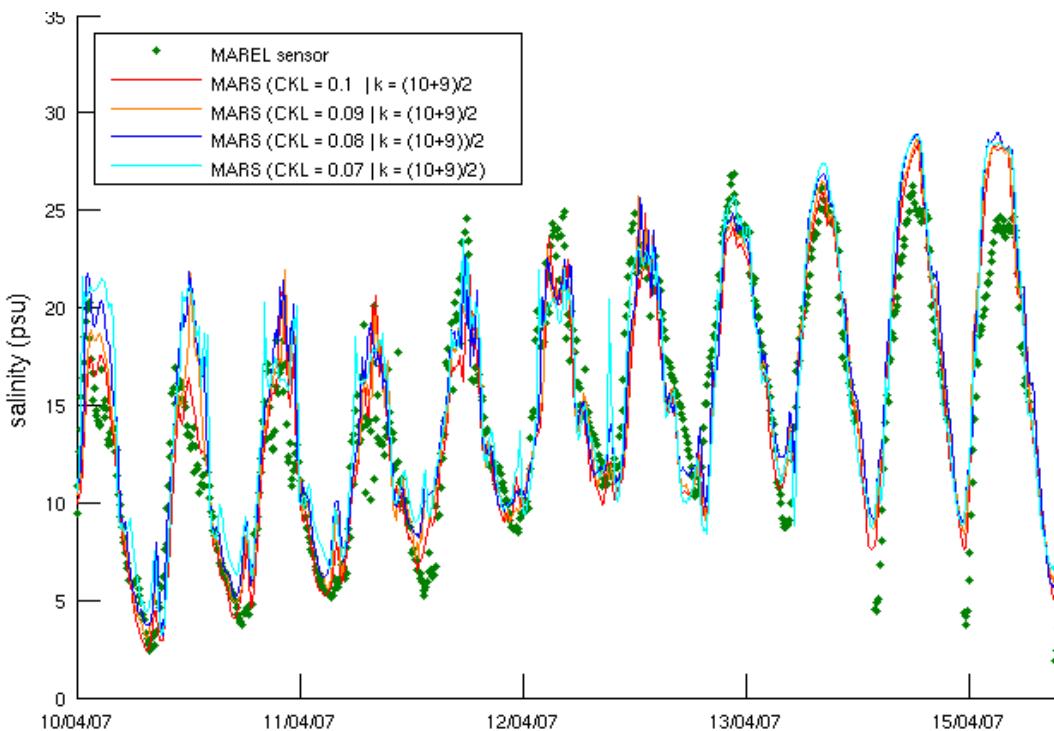


FIGURE 8.2 – Comparaison des valeurs de salinité pour différents paramétrage du modèle MARS-3D, avec les observations de la station MAREL-Honfleur.

On observe sur la figure 8.2 que les signaux simulés par le modèle ne sont pas ajustés de manière assez satisfaisante par rapport aux observations. Il est alors nécessaire d'effectuer différents cas test afin de comparer les résultats obtenus, et en particulier sur une période plus longue afin de constater si les fluctuations lors du cycle de vive-eau et morte-eau est cohérent avec le profil temporel du débit de la Seine. Dès lors, on pourra lier les similitudes entre valeurs calculées et mesurées aux zones de gradient vertical de densité.

D'autre part, la réalisation de cartographies 2D permet d'avoir une vision spatialisée des champs de salinité et par conséquent, cette fois, de constater des gradients horizontaux de densité. Les figures illustrées ci-dessous sont des vues du champ de salinité. Les valeurs calculées par le modèle sont extraites au niveau de la couche la plus basse, au fond, puis au niveau de la couche de surface.

La zone retenue pour simuler ces champs de salinité correspond l'embouchure de l'estuaire de la Seine, pour deux journées de l'année 2005 bien distinctes sur le plan hydrodynamique. Le 19 février est en effet en période de mortes-eaux (coefficients 35) mais qui présente un débit soutenu de la Seine ( $840 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ), alors que le 28 février se situe dans une période présentant un coefficient de marée plus important (85) pour un débit moyen de la Seine ( $485 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ).

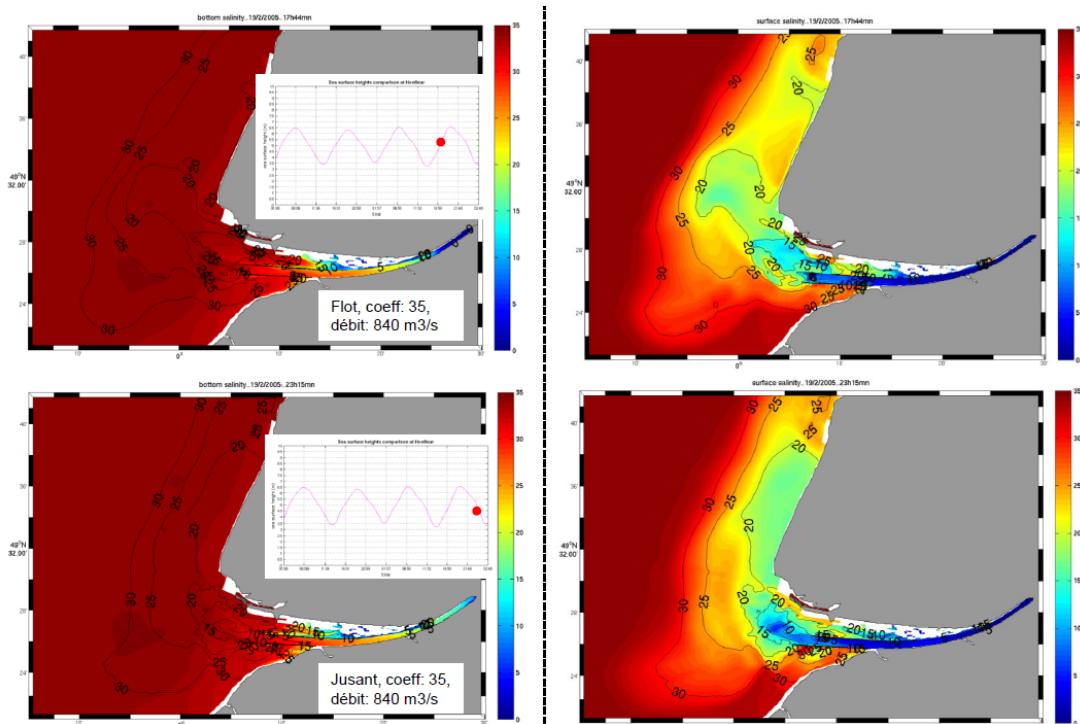


FIGURE 8.3 – Cartographies 2D du panache de salinité. Champs de valeurs de la couche du fond (à gauche) et de surface (à droite). Journée du 19/02/2005.

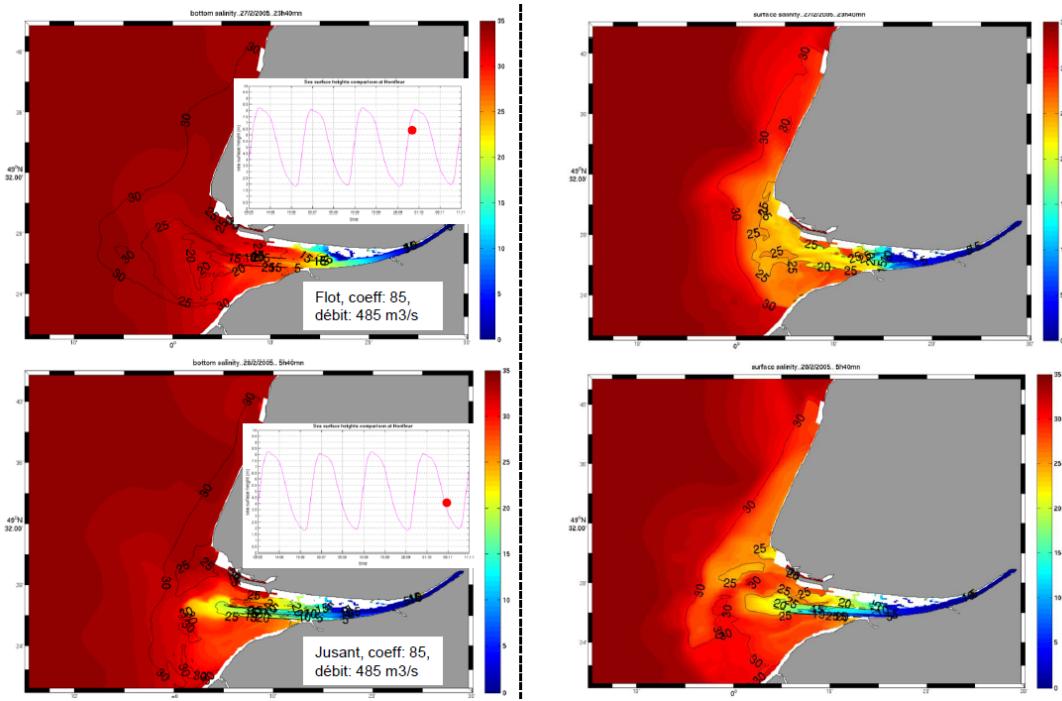


FIGURE 8.4 – Cartographies 2D du panache de salinité. Champs de valeurs de la couche du fond (à gauche) et de surface (à droite). Journée du 28/02/2005.

Nous voyons tout d'abord qu'il existe une très grande différence de salinité entre le fond et la surface, notamment par fort débit de la Seine (journée du 19 février).

L'influence des courants de marée est aussi mise en avant (notamment le 28 février) par la différenciation entre le flot et le jusant en termes de salinité : le courant de jusant permet une « expulsion » de l'eau douce du fleuve vers l'ouest (salinité de 10 PSU en surface à l'aval du chenal) et cette langue d'eau douce est ensuite transportée vers le nord, alors qu'en flot l'eau douce pénètre moins dans la baie et s'échappe plus rapidement par le nord de l'embouchure. Nous voyons également l'influence du chenal de navigation qui oriente les gradients de salinité dans la direction est-ouest à la sortie du fleuve.

D'autres simulations (validées), notamment en période de crue et d'étiage de la Seine, seront nécessaires afin d'avoir un point de vue global du bon fonctionnement du modèle en termes de salinité.

## **9. CONCLUSION ET PERSPECTIVES**

Ce stage avait pour finalité la validation du modèle hydrodynamique régional appliqué à l'estuaire de la Seine. Des routines de post-traitement ont été élaborées afin de caler par des réajustements au sein du code, la propagation de l'onde de marée dans le modèle, ainsi que les vitesses de courants associés sur la colonne d'eau.

Des calculs statistiques ont également été effectués afin d'évaluer le degré de performance du modèle, et ce en différents points du domaine d'étude. La modélisation de la salinité a également été abordée et présente des premiers résultats encourageants.

A travers cette étude, nous avons donc démontré que le modèle MARS 3D à coordonnées curviligne appliquée à la baie de Seine et au fleuve de la Seine, représentait de manière tout à fait satisfaisante l'hydrodynamique locale.

La prochaine étape, déjà en cours de réalisation, est d'inclure dans ce modèle un module sédimентаire multiclasses (Le Hir et al., 2011) pour mettre en évidence le fonctionnement hydrosédimentaire de la zone. Des simulations morphologiques sur plusieurs décennies seront par ailleurs envisageables afin de reproduire des situations antérieures ou même de prévenir les situations futures.

# Bibliographie

- [1] ALLEN, I. User guide and report outlining validation methodology. Marine Ecosystem Evolution in a Changing Environment, Août 2009.
- [2] GOURRION, J. Hydrodynamique bidimensionnelle en coordonnées curvilignes non-orthogonales. Rapport de Post-Doctorat, IFREMER, 2005.
- [3] J, LEENDERSTEJ, E. G. A water-quality simulation model for well-mixed estuaries and coastal seas. Volume 2 : Computational procedures, Rand Corporation, R-708-NYC, 53pp, 1971.
- [4] KERVELLA, Y. Impact des installations ostréicoles sur l'hydrodynamique et la dynamique sédimentaire : mesures *in-situ*, modélisation expérimentale, modélisation numérique. Thèse de doctorat, Université de Caen, France, Directeur : Pr. Patrick Lesueur, 325p, 2006.
- [5] LAZURE, P. An external-internal mode coupling for a 3d hydrodynamical model for applications at regional scale (mars). Advances in Water Ressources, 31, p233-250, 2008.
- [6] LE HIR, P. Aide mémoire de dynamique sédimentaire. 7ème édition, Novembre 2008.
- [7] LE HIR, P. Dynamics of sand and mud mixtures : a multiprocess-based modeling strategy. Continental Shelf Research, 2011. doi :10.1016/j.csr.2010.12.009.
- [8] LE HIR, P. Programme scientifique seine-aval. Fasicule 2 : Courants, vagues et marées : les mouvements de l'eau, 2001.
- [9] LESUEUR, P. Rapport sur La Manche. GIP Seine-Aval, 2002.
- [10] MARECHAL, D. A soil-based approach to rainfall-runoff modeling in ungauged catchments for england and wales. Ph.D, Cranfield University, 157p.
- [11] MORIASI, D. Model Evaluation Guidelines for Systematic Quantification of Accuracy in Watershed Simulations. Transactions of the ASABE, 50 (3), 885-900, 2007.
- [12] NASH, J.E., S. J. River flow forecasting through conceptual models. Part 1 - A discussion of principle, Journal of Hydrology, 10 : p282-290.
- [13] TAYLOR, K. Summarizing multiple aspects of model performance in a single diagram. Journal of Geophysical Research, 106 : p7183-7192, 2001.
- [14] WAELES, B. Modélisation morphodynamique de l'embouchure de la seine. Thèse de Doctorat, Université de Caen, France, Directeur : Pr. Patrick Lesueur, 230p, 2005.

# Glossaire

**Barotrope** résulte d'un gradient de pression uniforme sur la verticale (pente de la surface libre).

**Bathymétrie** description du relief immergé à l'aide de mesures de profondeurs.

**Densité (courants de)** mouvement généré par des gradients de densité (ex. liés à des différences de température ou de salinité).

**Engainement** secteur de l'embouchure de la Seine, correspondant à l'extrémité du chenal de navigation, en aval des digues submersibles.

**Estran** étendue de terrain pouvant être couverte d'eau ou découverte en fonction de la marée.

**Flot** courant dans le sens de la propagation de la marée, en général celui de la marée montante.

**Forçage** processus physique agissant sur le milieu et provoquant des mouvements ou des changements d'état.

**Gradient** taux de variation en fonction de la distance.

**Jusant** courant en sens opposé à la propagation de la marée, en général celui de la marée descendante.

**Marnage** différence entre le niveau de pleine mer et le niveau de basse mer.

**Morte-eau** marée de faible amplitude (se produit deux fois par mois, lors des premier et dernier quartiers de lune).

**pk** point kilométrique permettant un positionnement le long du cours d'eau de la Seine, depuis la référence amont pk0, située à l'ancienne écluse de la Monnaie à Paris.

**Renverse** période d'inversion du courant de marée (entre flot et jusant).

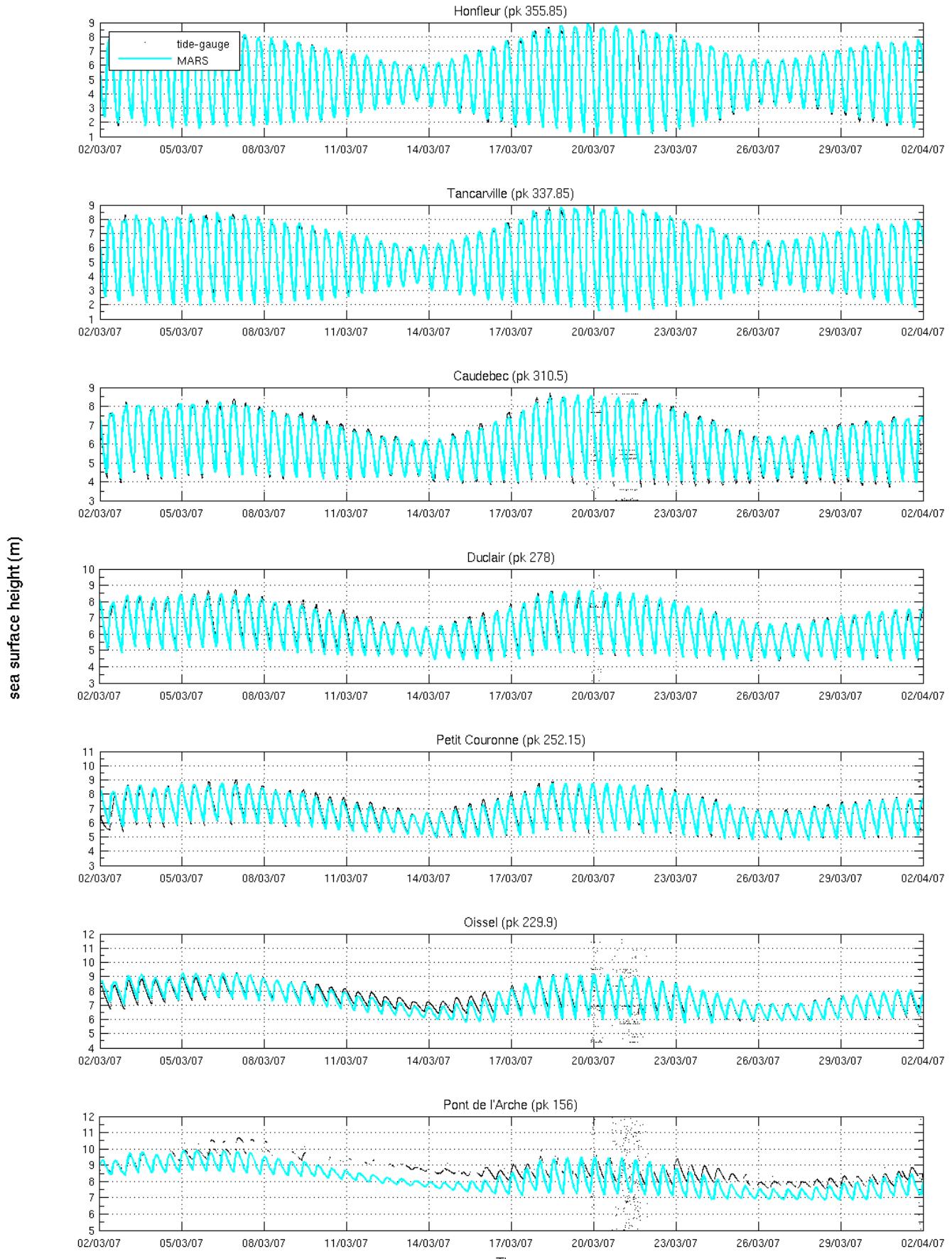
**Surcote** augmentation du niveau de la surface libre.

**Surface libre** surface de l'eau, mer ou rivière, en contact avec l'air (non limitée par un obstacle..).

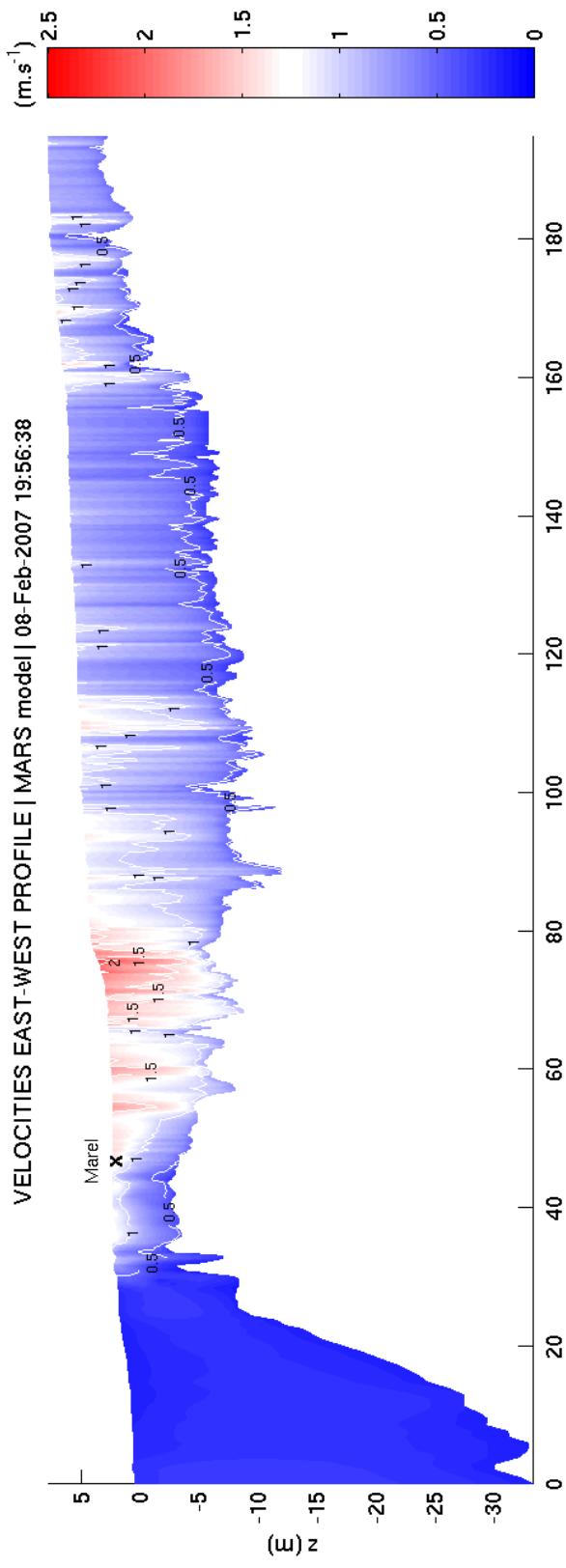
**Vive-eau** marée de forte amplitude (se produit deux fois par mois, lors des périodes de pleine et nouvelle lune).

# **FIGURES ANNEXES**

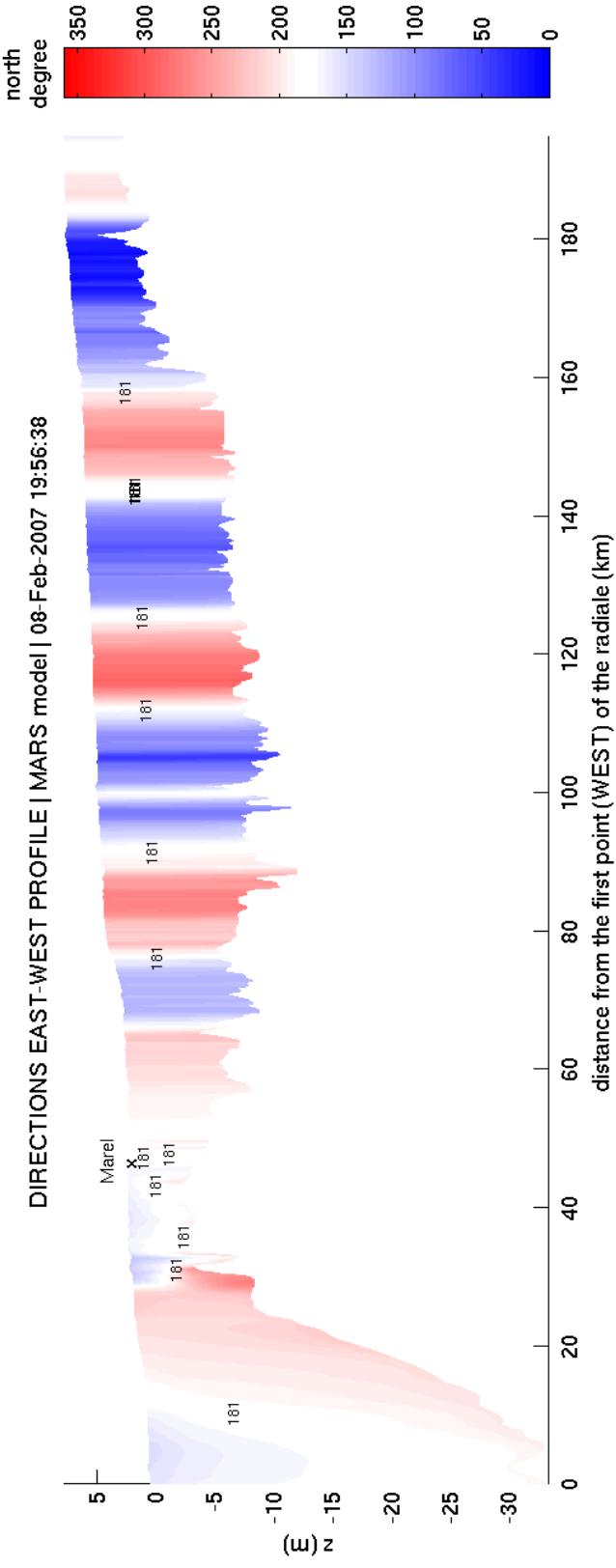
# Propagation of the tidal wave in the Seine estuary



### VELOCITIES EAST-WEST PROFILE | MARS model | 08-Feb-2007 19:56:38



### DIRECTIONS EAST-WEST PROFILE | MARS model | 08-Feb-2007 19:56:38



[ simulation file : velocities\_2DVprofile\_hydro18.nc ]

---

## BAIE DE SEINE

---

	NSE	R	RMSE	CRMSE
▪ Cherbourg	0.9924	0.9966	0.1903	0.1862
▪ Pointe de Barfleur	0.9922	0.9998	0.1906	0.1067
▪ St-Marcouf	0.9896	0.9969	0.2367	0.2360
▪ Port-en-Bessin	0.9970	0.9992	0.1397	0.1360
▪ Ouistreham	0.9936	0.9974	0.2194	0.2117
▪ Le Havre	0.9970	0.9987	0.1520	0.1488
▪ Cap d'Antifer	0.9992	0.9996	0.0791	0.0764
▪ Fécamp	0.9991	0.9996	0.0826	0.0797

---

## ESTUAIRE DE LA SEINE

---

	NSE	R	RMSE	CRMSE
▪ Balise A	0.9903	0.9959	0.2270	0.2177
▪ Honfleur	0.9900	0.9953	0.2231	0.2184
▪ Fatouville	0.9857	0.9937	0.2666	0.2552
▪ Tancarville	0.9816	0.9923	0.2881	0.2707
▪ Saint-Léonard	0.9847	0.9925	0.2342	0.2337
▪ Vatteville	0.9736	0.9868	0.2417	0.2417
▪ Caudebec	0.9713	0.9858	0.2415	0.2398
▪ Heurteauville	0.9505	0.9755	0.2895	0.2870
▪ Mesnil-sous-Jumièges	0.9251	0.9754	0.2912	0.2736
▪ Duclair	0.8975	0.9673	0.3325	0.3168
▪ Val-des-Leux	0.8814	0.9522	0.3412	0.3307
▪ Petit-Couronne	0.8555	0.9435	0.3686	0.3509
▪ Rouen	0.8008	0.9315	0.4468	0.3910
▪ Oissel	0.7357	0.8832	0.4130	0.4095
▪ Elbeuf	0.5152	0.8446	0.4916	0.4140
▪ Pont-de-l'Arche	0.5940	0.8125	0.4600	0.4342

## Baliseage de la Seine, de l'Estuaire à Roscoff

