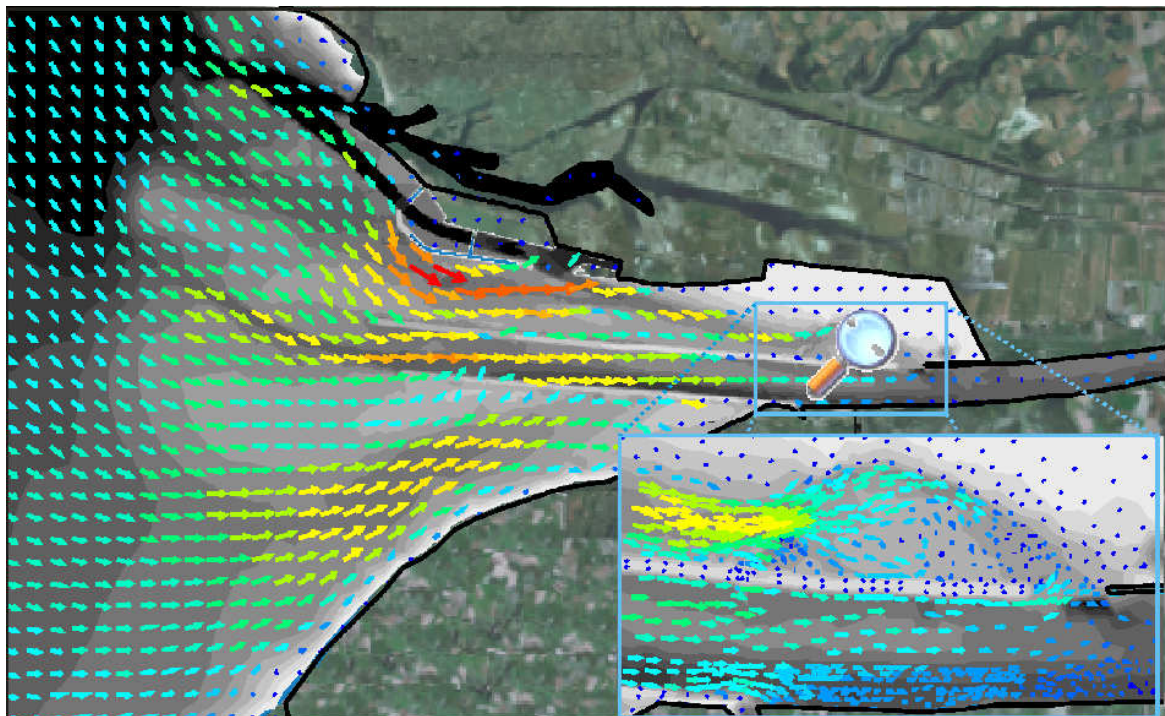




PROGRAMME D'AMELIORATION DES ACCES MARITIMES

Evaluation des impacts hydrodynamiques de l'amélioration des accès maritimes du port de Rouen

décembre 2007



Courants de Marée au pic de flot calculés par le Port Autonome de Rouen
modèle de l'estuaire de la Seine développé en collaboration avec SOGREAH (Grenoble, France)
Système TELEMAC - © EDF - Laboratoire National d'Hydraulique et Environnement

TABLE DES MATIERES

| | | |
|----------|---|-----------|
| 1 | CADRE ET OBJET DE L'ETUDE | 4 |
| 2 | PRESENTATION DE L'ETUDE | 5 |
| 2.1 | DESCRIPTION DE LA ZONE D'ETUDE | 5 |
| 2.2 | METHODE D'EVALUATION | 5 |
| 2.3 | PARAMETRES ANALYSES..... | 6 |
| 3 | METHODOLOGIE ADOPTEE..... | 6 |
| 3.1 | PRESENTATION DU MODELE UTILISE : TELEMAR-2D | 6 |
| 3.2 | MAILLAGE UTILISE | 6 |
| 3.3 | CONDITIONS PRISES EN COMPTE DANS LE MODELE | 9 |
| 3.4 | HYPOTHESES..... | 9 |
| 3.5 | CALAGE DU MODELE..... | 9 |
| 3.5.1 | <i>Courbe de marée</i> | 10 |
| 3.5.2 | <i>Courants</i> | 11 |
| 4 | PRESENTATION DES RESULTATS | 13 |
| 4.1 | LIGNE D'EAU | 13 |
| 4.1.1 | <i>Présentation des résultats</i> | 13 |
| 4.1.2 | <i>Analyse</i> | 15 |
| 4.2 | COURANTS..... | 16 |
| 4.2.1 | <i>Présentation des résultats</i> | 16 |
| 4.2.2 | <i>Analyse</i> | 17 |
| 5 | CONCLUSION | 18 |

TABLE DES FIGURES

| | |
|---|----|
| <i>Figure 1 : Emprise de l'étude</i> | 5 |
| <i>Figure 2 : Présentation du maillage utilisé</i> | 7 |
| <i>Figure 3 : Représentation des fonds dans le modèle numérique</i> | 8 |
| <i>Figure 4 : Localisation des marégraphes et points de référence</i> | 10 |
| <i>Figure 5 : Exemple de calage de courbes de marée</i> | 11 |
| <i>Figure 6 : Exemple de calage des courants</i> | 12 |
| <i>Figure 7 : Niveau moyen le long de la Seine</i> | 13 |
| <i>Figure 8 : Lieux des basses et pleines mers</i> | 14 |
| <i>Figure 9 : courbes de marée obtenues en trois points</i> | 15 |
| <i>Figure 10 : courbes de courants obtenus en trois points</i> | 16 |

1 CADRE ET OBJET DE L'ETUDE

Le Port Autonome de Rouen envisage d'améliorer les accès maritimes du port pour répondre à l'évolution de la flotte mondiale des navires vraquiers, qui va voir la génération de navires « Handymax » succéder aux navires de génération « Handymax ». Un mètre de capacité de tirant d'eau supplémentaire est nécessaire pour accueillir ces navires. Le tirant d'eau atteindrait ainsi 11m30 à la descente de Rouen vers la mer, et 11m70 à la montée jusqu'à Rouen, pour la quasi totalité des marées.

Avant de réaliser un tel projet, il convient d'étudier précisément les éventuels impacts hydrodynamiques. Ces impacts peuvent avoir des conséquences sur la navigation en Seine, les niveaux d'eau et la dynamique sédimentaire. Ils peuvent également avoir une incidence en terme de crues ou plus exactement en terme d'inondations (un calcul avec un fort débit combiné à une vive eau sera effectué en deuxième temps).

Pour répondre à ces interrogations, une étude a été menée par le Service de l'Environnement Maritime et du Chenal du Port Autonome. Cette étude a été réalisée à partir d'un modèle numérique de l'estuaire de la Seine, à l'aide du logiciel TELEMAC-2D. Ce modèle a été développé en collaboration avec le bureau d'études SOGREAH, sur la base des modèles mis en œuvre dans le cadre de Port 2000, et précisé pour rendre compte finement des impacts éventuels dans l'ensemble du bief fluvio-maritime de la Seine. Il a pour objet de quantifier dans différents scénarii la propagation de la marée dans l'estuaire avec les niveaux de marée associés, et de décrire les courants en tout point du modèle. C'est l'objet de ce rapport.

2 PRESENTATION DE L'ETUDE

2.1 Description de la zone d'étude

L'emprise des travaux projetés s'étend de Rouen jusqu'à l'estuaire de Seine. Cependant, afin de mesurer les éventuels impacts du projet sur les zones avoisinantes, et afin de garantir la fiabilité des résultats (en s'affranchissant des effets de bord), la zone d'étude est volontairement beaucoup plus importante.

L'emprise du modèle comprend donc l'ensemble de la partie maritime de la Seine et la totalité de la baie de Seine : la limite amont du modèle est constituée par le barrage de Poses, et la limite aval du modèle est une ligne Barfleury-Etretat, incluant toute la baie de Seine.



Figure 1 : Emprise de l'étude

2.2 Méthode d'évaluation

Pour mesurer l'impact du projet, deux situations ont été comparées : la situation actuelle et la situation future après approfondissement du chenal.

La configuration actuelle a été constituée à l'aide des relevés hydrographiques de 2005. La configuration future a été construite en arasant la configuration actuelle dans les zones à draguer pour atteindre la performance souhaitée.

Les conditions hydrodynamiques aux limites du modèle restent inchangées dans les deux situations, le projet n'ayant pas d'incidence sur la marée au large à cette distance du projet, ni sur le débit de la Seine. Ces deux paramètres constituent donc les « forçages » d'entrée du modèle.

On procédera donc dans un premier temps à un calcul représentatif de la situation actuelle, avec la bathymétrie mesurée. Ce calcul est comparé aux conditions mesurées de marée et de courant. Sont utilisées les mesures physiques de la marée à partir des stations de mesure automatiques du réseau marégraphique du Port Autonome de Rouen et des mesures de courants réalisées au cours des deux campagnes de l'année 2004. Cet état est dénommé « état initial ».

Dans un deuxième temps, en appliquant au modèle les mêmes forçages hydrodynamiques, le calcul est effectué en modifiant la bathymétrie pour représenter l'aboutissement du programme d'amélioration des accès maritimes ; dans le chenal de navigation, les sondes qui représentent un obstacle à la navigation des navires d'un mètre de tirant d'eau supplémentaire par rapport à la situation actuelle sont augmentées pour être portées à la valeur correspondant à la limite nécessaire. Cet état est dénommé « état final ».

Les résultats « état final » seront comparés à ceux du premier calcul, « état initial » ; l'analyse portera sur les modifications constatées. Ces « modifications » sont représentatives des écarts que l'on pourra constater sur le terrain, entre les situations avant et après le projet. Ces différences seront significatives des impacts du projet.

2.3 Paramètres analysés

Afin d'estimer l'impact entre les deux situations, les courbes de marées et les vitesses de courant en certains points de la zone d'étude seront extraites. Les interprétations de ces résultats permettront de répondre aux interrogations sur les conséquences hydro-dynamiques.

3 METHODOLOGIE ADOPTÉE

3.1 Présentation du modèle utilisé : Telemac-2D

La modélisation a été réalisée avec le logiciel [TELEMAC-2D \(Système TELEMAC - © EDF - Laboratoire National d'Hydraulique et Environnement\)](#). Le logiciel TELEMAC-2D résout les équations de Barré de Saint-Venant à deux dimensions d'espace horizontales. Les résultats principaux sont, en chaque point du maillage de résolution, la hauteur d'eau et la vitesse moyenne sur la verticale.

TELEMAC-2D trouve ses applications en hydraulique à surface libre, maritime ou fluviale. Les domaines d'application du logiciel sont nombreux. Dans le domaine maritime, on peut citer en particulier le dimensionnement d'ouvrages portuaires, l'étude de l'effet de la construction de digues submersibles ou de dragages, l'impact du rejet d'un émissaire côtier, l'étude des panaches thermiques. Dans le domaine fluvial, on peut également citer : l'étude de l'impact de la construction d'ouvrages (ponts, seuils, épis), les ruptures de barrages, les études d'inondation, le transport de traceurs conservatifs ou non. Utilisé dans le cadre de très nombreuses études partout dans le monde (plusieurs centaines à l'heure actuelle), il est devenu l'un des grands standards dans son domaine.

Les différents modules de simulation utilisent des algorithmes basés sur la méthode des éléments finis. L'espace est discrétisé sous forme de maillage non structuré à éléments triangulaires, ce qui permet en particulier de raffiner le maillage dans les zones présentant un intérêt particulier.

3.2 Maillage utilisé

Le Port Autonome dispose d'un modèle développé en collaboration avec SOGREAH (Grenoble, France). La zone décrite couvre pour sa partie maritime l'ensemble de la baie de Seine du Cotentin à la façade ouest du pays de Caux (ligne Barfleur-Etretat – cf : Figure 1). La limite amont du modèle a été établie au barrage de Poses afin de ne pas faire d'hypothèse sur les niveaux d'eau en amont, mais d'utiliser le débit de la Seine comme facteur en entrée.

La résolution spatiale du modèle varie de 5 km au large à 40 m pour les 170 km que compte la partie maritime de la Seine. La finesse des mailles est adaptée pour représenter avec suffisamment de précisions les variations bathymétriques de l'estuaire et du fleuve, les différents ouvrages, la morphologie du lit mineur. Ainsi les réponses pourront être pertinentes dans l'ensemble des secteurs d'étude, que ce soit le chenal de navigation, les parties latérales du lit, les fosses nord et sud et leurs aménagements.

C'est donc ce modèle « densifié » qui a été utilisé dans le cadre de cette étude. La figure ci-dessous illustre la finesse de description du maillage en 4 points de la Seine.

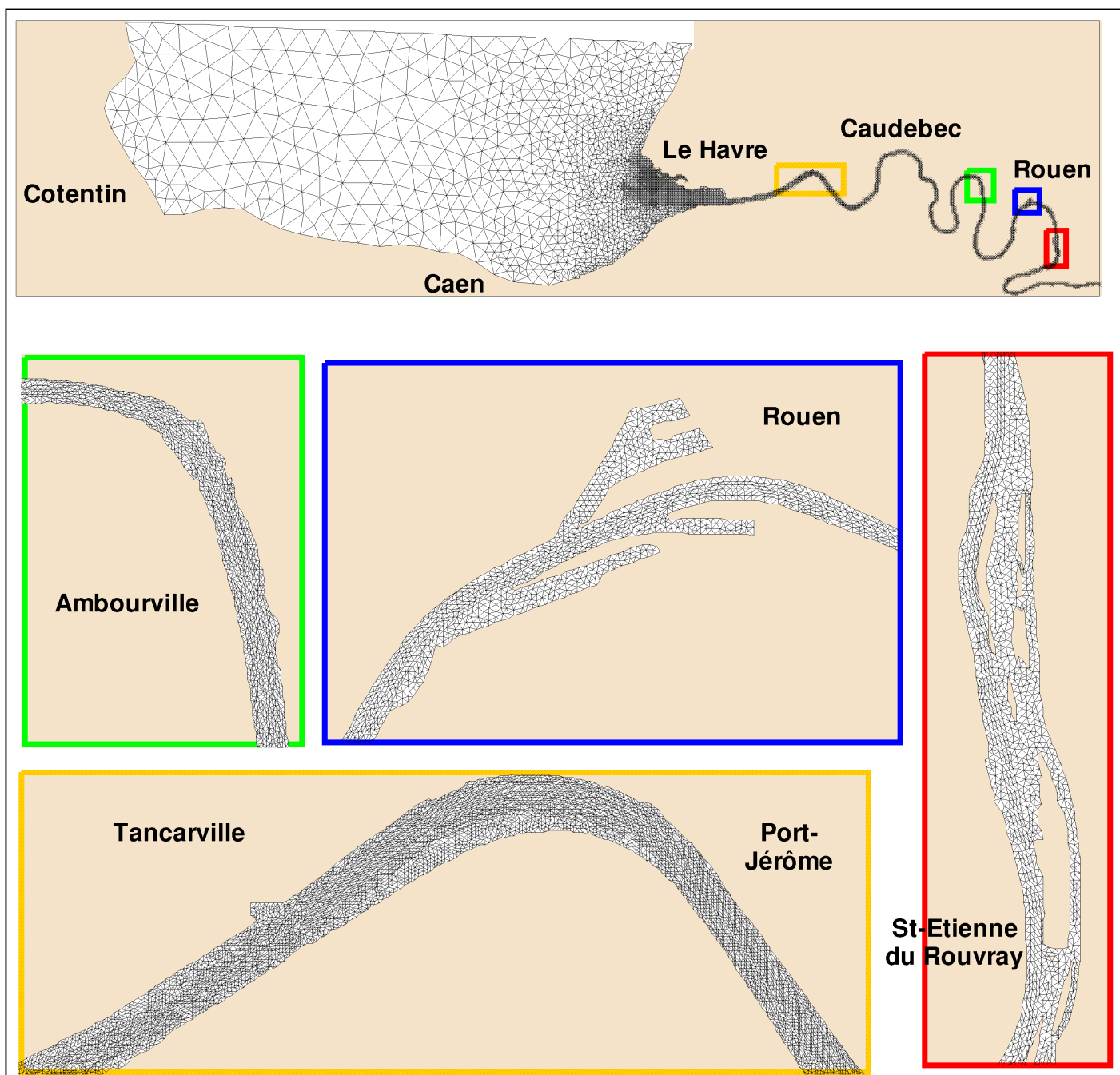


Figure 2 : Présentation du maillage utilisé

Le maillage est constitué de 49558 nœuds pour 91 887 mailles.

Chaque nœud du maillage est affecté d'une cote représentative des fonds calculée à partir des levés effectués par le Port de Rouen de l'estuaire jusqu'à Poses et complétés par les levés bathymétriques du Service Hydrographique et Océanique de la Marine (SHOM) pour la baie de Seine.

La bathymétrie retenue est celle de l'année 2005. En effet, les dernières campagnes de mesure de courant ont été réalisées cette année-là ; elles sont donc en parfaite conformité avec les niveaux bathymétriques du fleuve et de l'estuaire. La référence verticale est le 0 hydrographique des cartes marines du Havre (CMH).

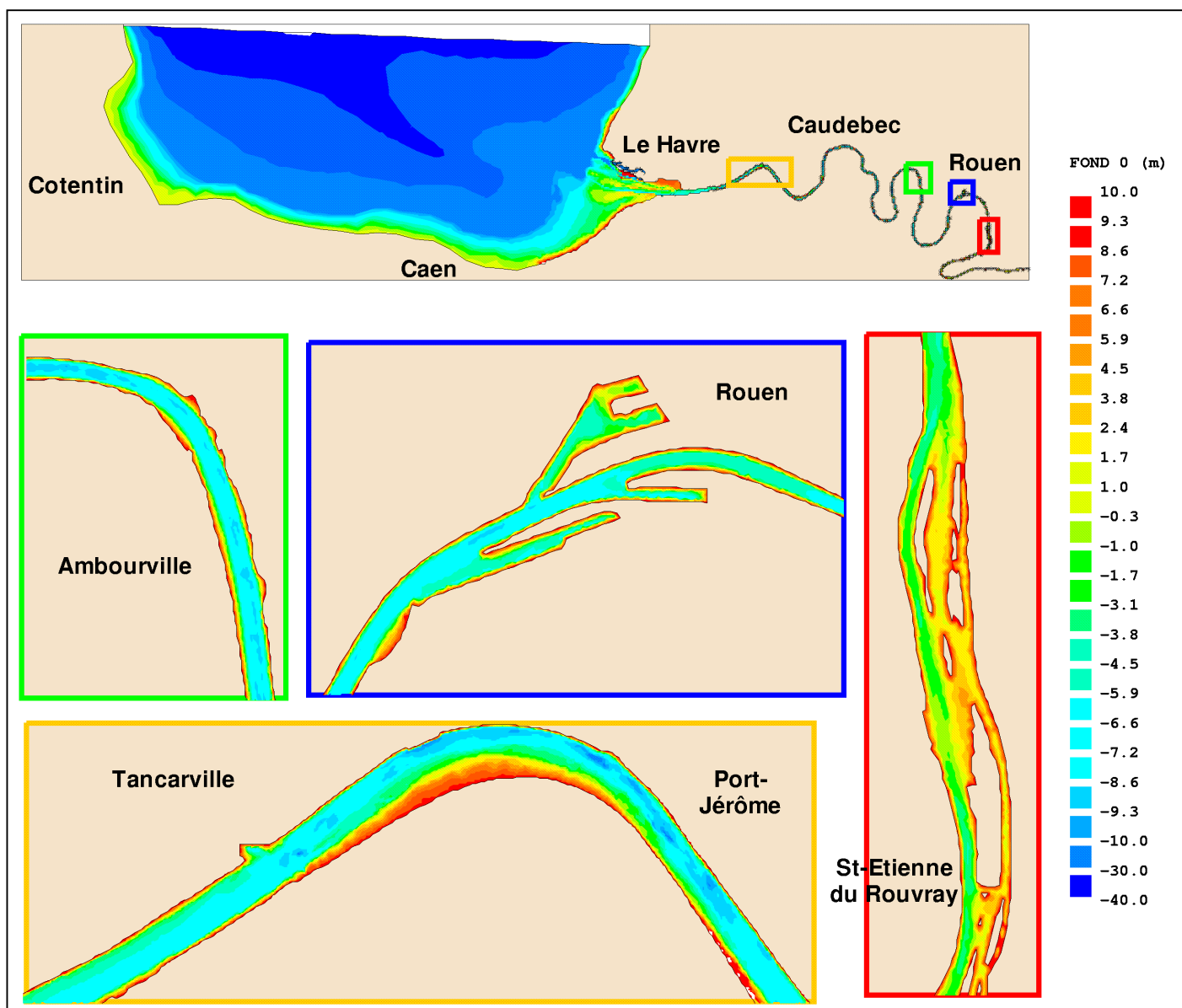


Figure 3 : Représentation des fonds dans le modèle numérique

En se basant sur cette bathymétrie représentative de l'« état initial », nous avons construit la bathymétrie de l'« état final » en arasant les points hauts dépassant les cotes définies par le programme d'approfondissement. Ces cotes ont été établies par tronçon kilométrique entre Rouen et l'estuaire sur la base d'un routier graphique qui permet de reproduire le transit des navires dans différentes conditions de marée.

Ainsi, pour gagner 1 mètre de tirant d'eau, il suffit d'araser les points hauts contraignants dans ce routier. La surface concernée est de 17% de la surface du fleuve entre Rouen et Tancarville, et 10% de la surface entre les digues à l'aval de Tancarville. Sur ces zones, la hauteur moyenne à draguer est de 40 cm.

3.3 Conditions prises en compte dans le modèle

Pour estimer l'impact du projet, les conditions de débit et de marée suivantes ont été prises en compte :

- Débit de la Seine à Poses : 250 m³/s, correspondant au débit le plus fréquent rencontré,
- Coefficient de marée : 92, coefficient de vive-eau moyenne.

3.4 Hypothèses

Les débits des affluents de la Seine ne sont pas pris en compte dans le modèle.

En effet, les affluents de la Seine en aval de Poses (Eure, Robec, Cailly, Austreberthe, Sainte Gertrude et Risle) ont un impact négligeable sur la ligne d'eau en Seine et en estuaire. Ceci du fait qu'en terme de volume de stockage au travers de leur débouché ou en terme de source de débit, ces affluents jouent un rôle non significatif par rapport à la Seine et surtout par rapport à l'influence de la marée de Manche sur le fleuve.

3.5 Calage du modèle

Le calage du modèle a été effectué en utilisant la bathymétrie 2005, les courbes de marée enregistrées aux 18 marégraphes dans la partie maritime de la Seine ainsi que les points de mesures de courant de la campagne 2004.

Les conditions aux limites (débit de la Seine et marée en Manche) et la bathymétrie étant fixées, le calage consiste à ajuster les coefficients de frottement sur le fond des différentes zones du modèle. Il s'agit ainsi de retrouver par le calcul les mesures in-situ réalisées.

La Figure 4 ci-dessous présente le réseau de marégraphes mis en place par le Port Autonome de Rouen depuis 1985 pour améliorer progressivement les connaissances sur l'hydrologie de la Seine. En jaune, figurent les points de référence au niveau desquels les résultats du calcul de « calage » et les résultats des calculs seront présentés.

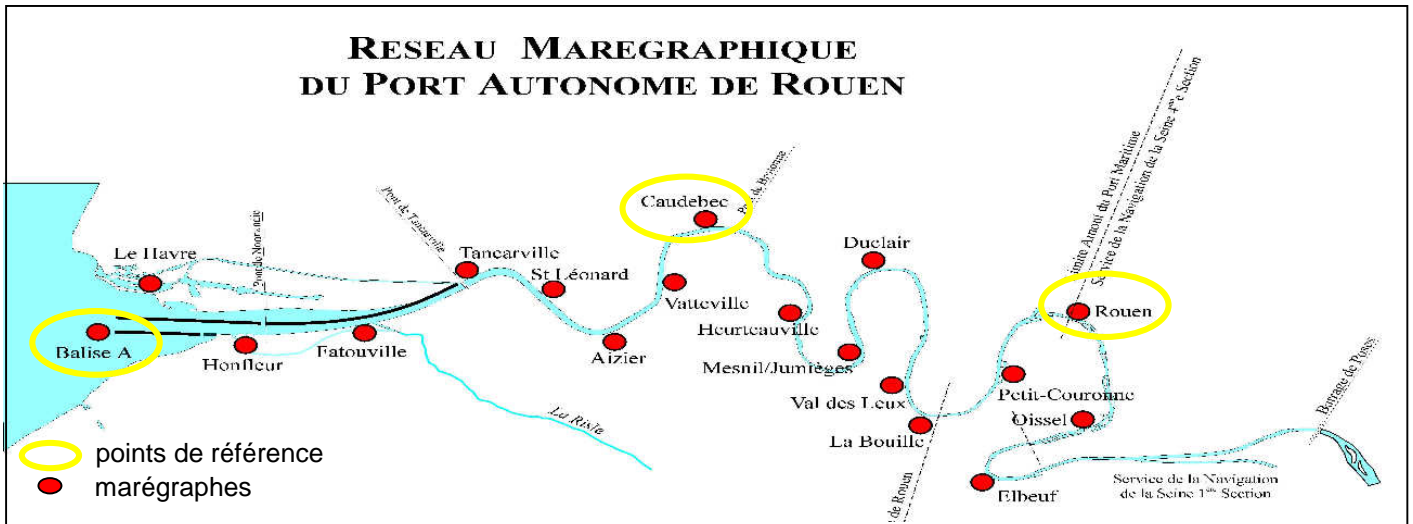
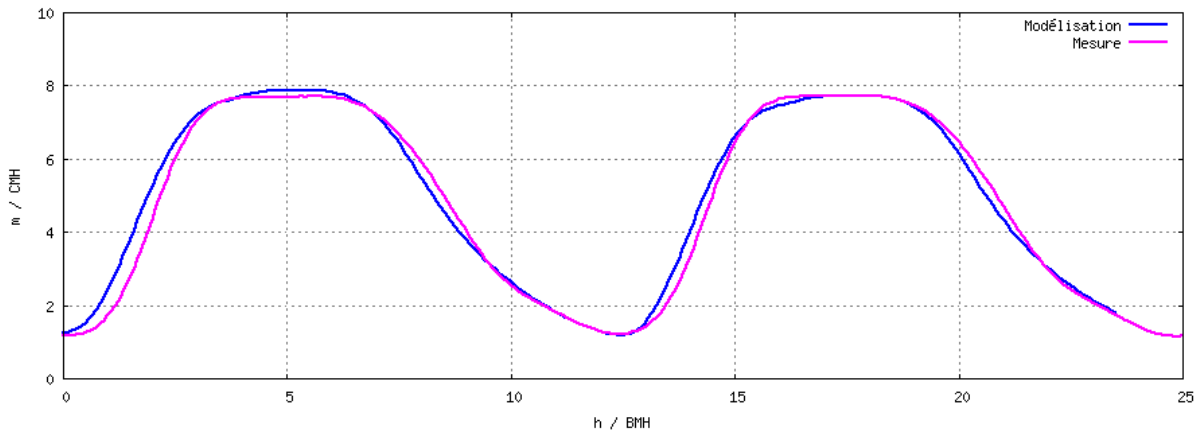


Figure 4 : Localisation des marégraphes et points de référence

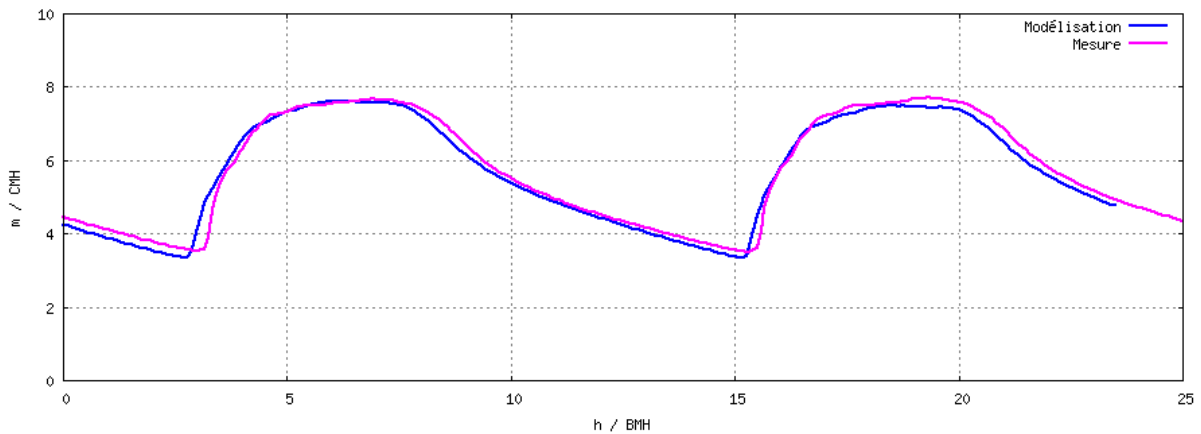
3.5.1 Courbe de marée

Les courbes ci-dessous représentent les simulations de hauteur d'eau en bleu en regard des mesures effectuées en rose.

Calage de la marée à Balise_A



Calage de la marée à Caudebec



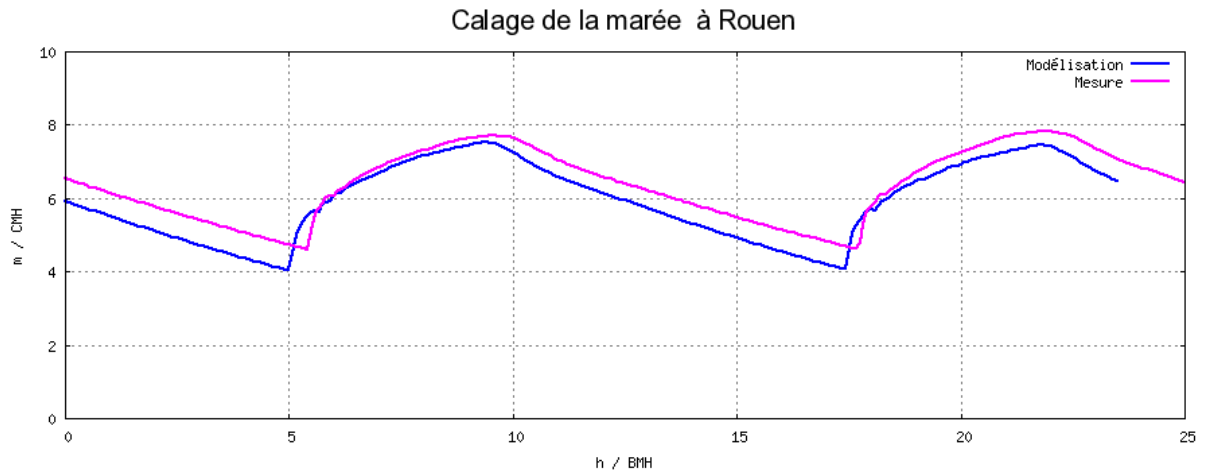
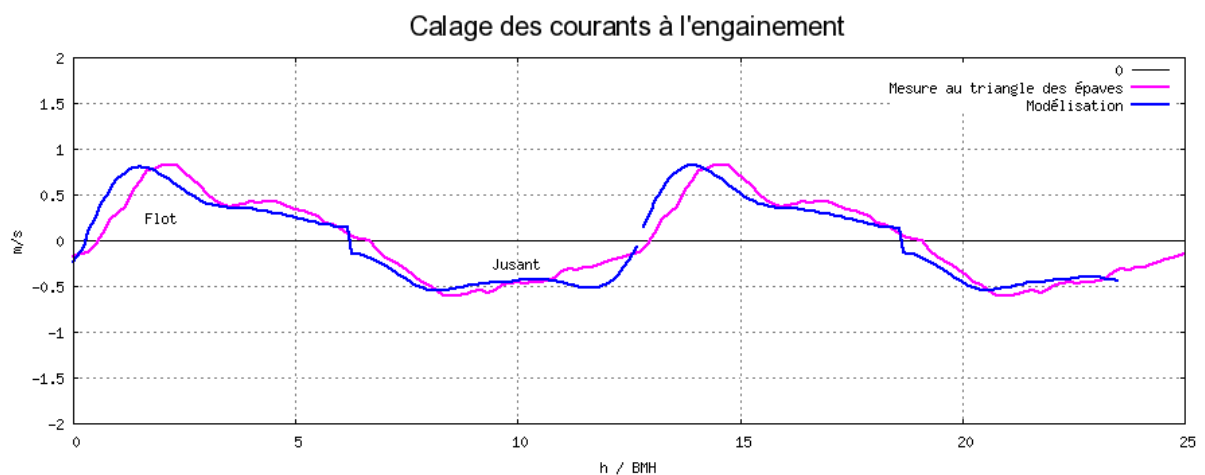


Figure 5 : Exemples de calage de courbes de marée

Ces figures illustrent la représentativité correcte du modèle vis-à-vis de la marée le long de la Seine en amplitude et en phase. Le niveau moyen autour duquel fluctue la marée est sous-estimé au fur et à mesure que l'on remonte en amont de Caudebec ; le décalage est sensiblement le même pour les basses mers que pour les pleines mers. Le décalage est au maximum de l'ordre de 50 cm, à comparer à une hauteur d'eau de 11m en moyenne. La méthode d'évaluation de l'impact du projet est fondée sur la comparaison de l'« état final » par rapport à l'« état initial ». C'est la différence des résultats de la modélisation qui est pertinente pour mesurer l'impact ; le décalage n'aura donc pas d'incidence significative sur les résultats.

3.5.2 Courants

Les comparaisons de courant ci-dessous ont été effectuées à des points où des mesures de courant sont disponibles en 2004, c'est pourquoi leurs localisations diffèrent des points de comparaison des hauteurs. L'esprit reste cependant le même avec un point en estuaire, un point à proximité de Rouen et un point intermédiaire.



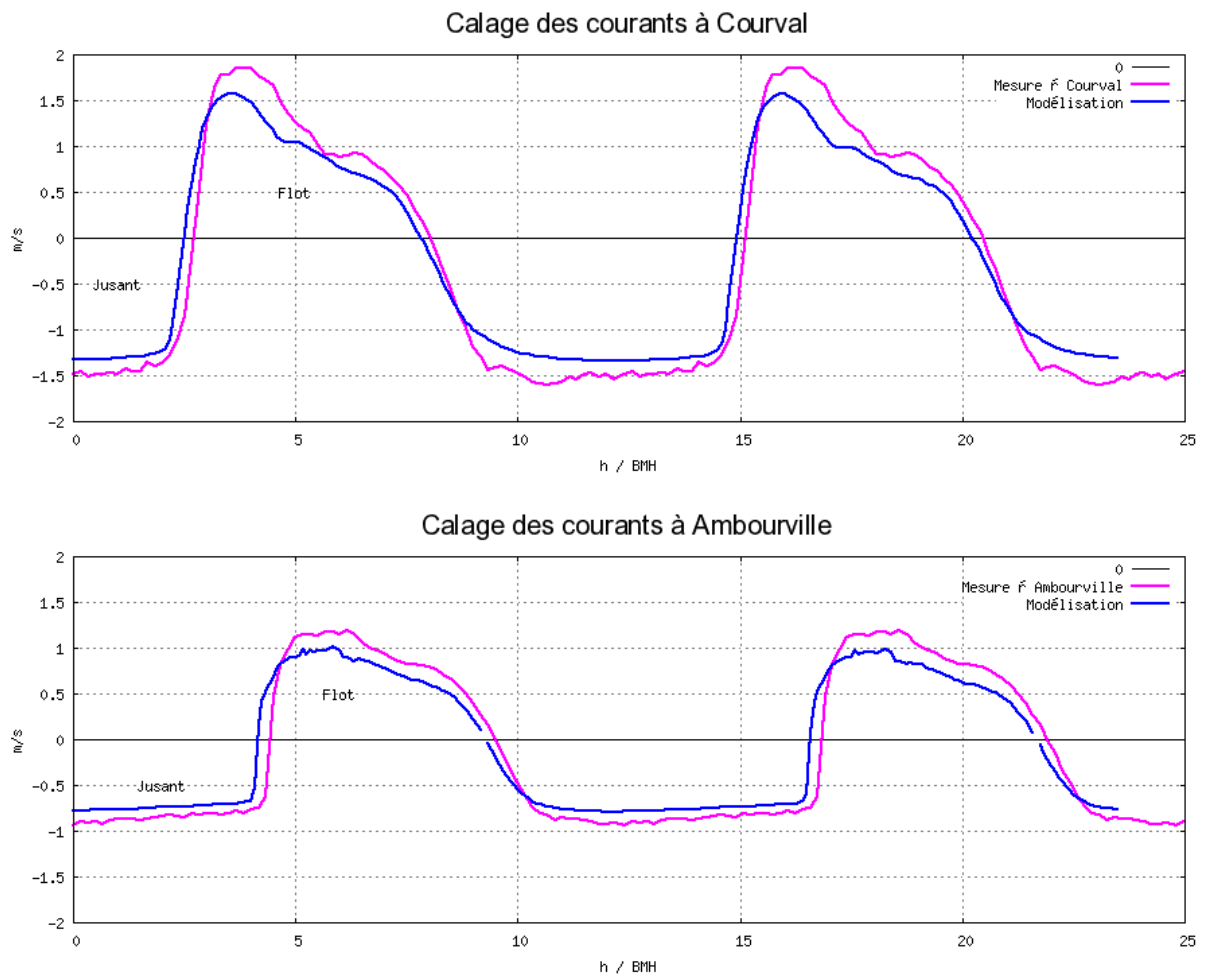


Figure 6 : Exemples de calage des courants

Le calage en courant est le plus délicat à obtenir. Le calage est considéré comme satisfaisant, car il représente bien l'évolution du courant au fil de la marée. De plus, le phasage et la durée des pics de flot et de jusant sont respectés.

Il convient également de préciser qu'étant donné que nous étudions un impact et donc que nous effectuons un calcul différentiel, les différences, modérées entre mesure in-situ et modélisation, ne sont pas préjudiciables pour notre étude.

4 PRESENTATION DES RESULTATS

4.1 Ligne d'eau

4.1.1 Présentation des résultats

Pour présenter et analyser les résultats du modèle, trois jeux de courbes ont été extraits, représentant les états avant et après le projet d'amélioration du chenal :

- Le niveau moyen en chaque point, présenté en figure 7,
- Le lieu des basses mers et celui des pleines mers, présentés en figure 8,
- Les courbes de marées en trois points : Balise A, Caudebec et Rouen en figure 9.

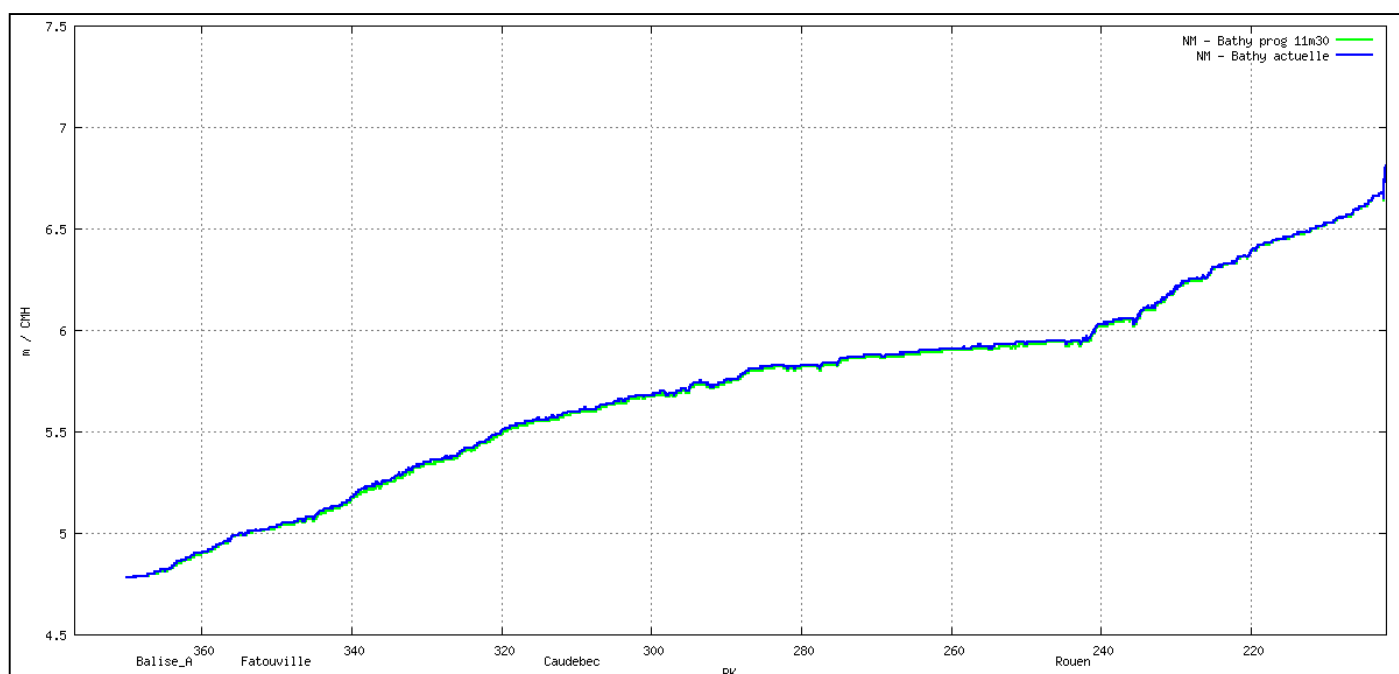


Figure 7 : Niveau moyen le long de la Seine

Le niveau moyen est calculé par intégration dans le temps du niveau instantané de la marée en chaque point. Il est représentatif des équilibres de pression avec la nappe alluvionnaire.

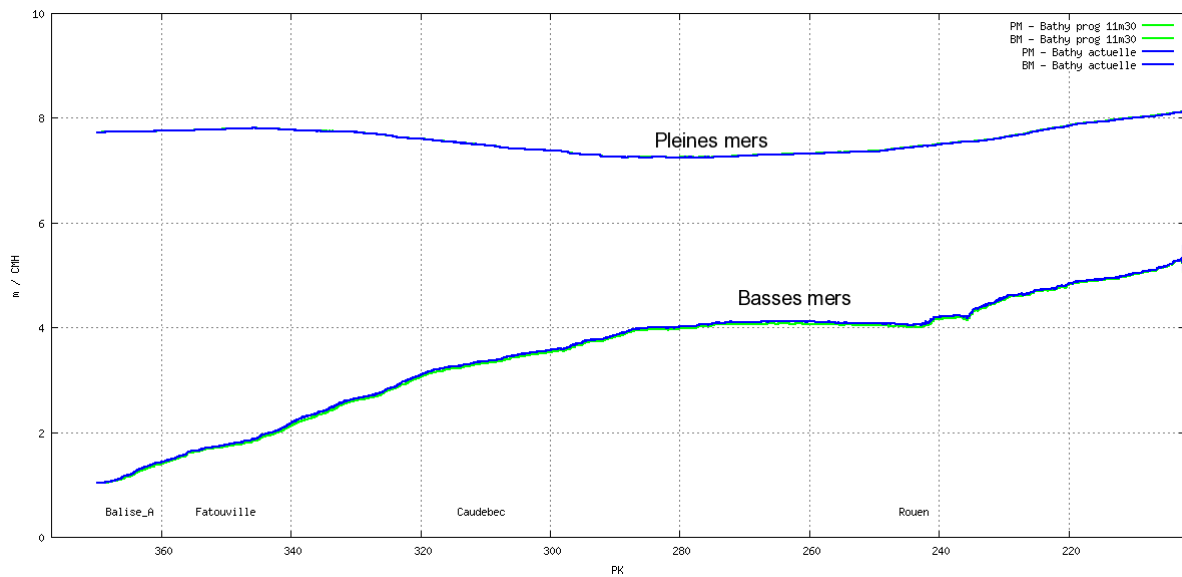
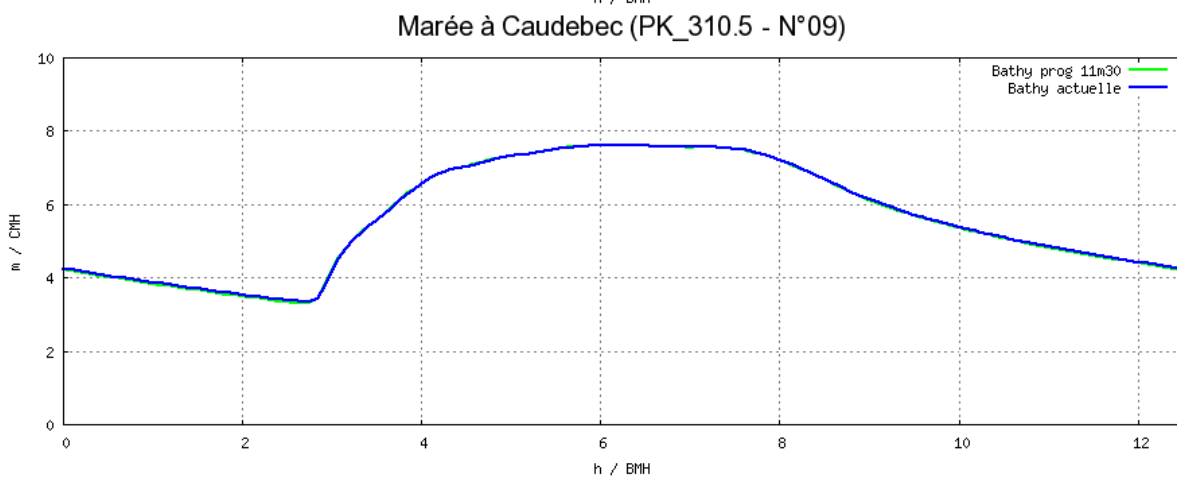
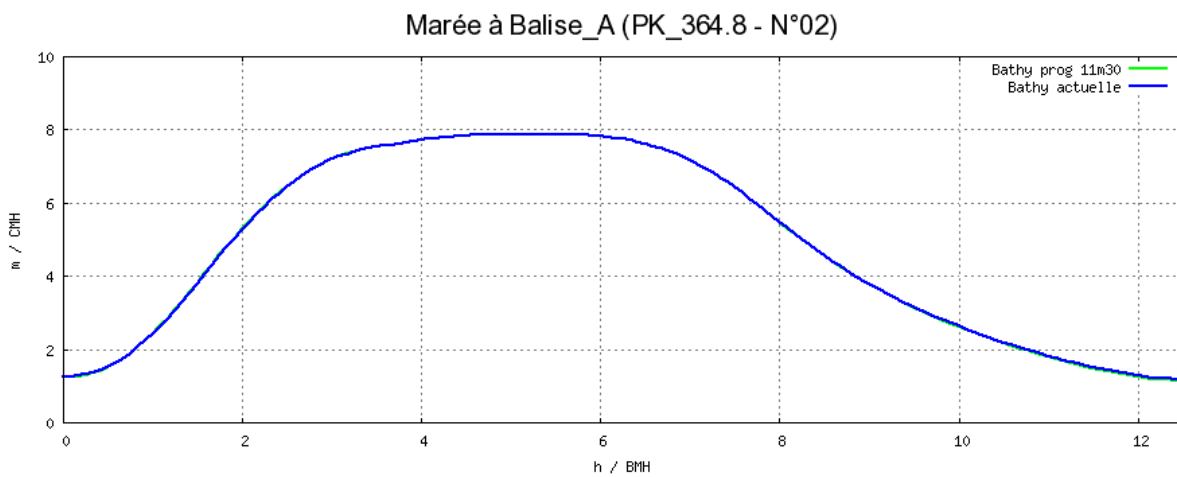


Figure 8 : Lieux des basses et pleines mers

Le lieu des pleines mers représente le niveau de la pleine mer locale en fonction de la localisation le long de la Seine. Il en est de même pour le lieu des basses mers.



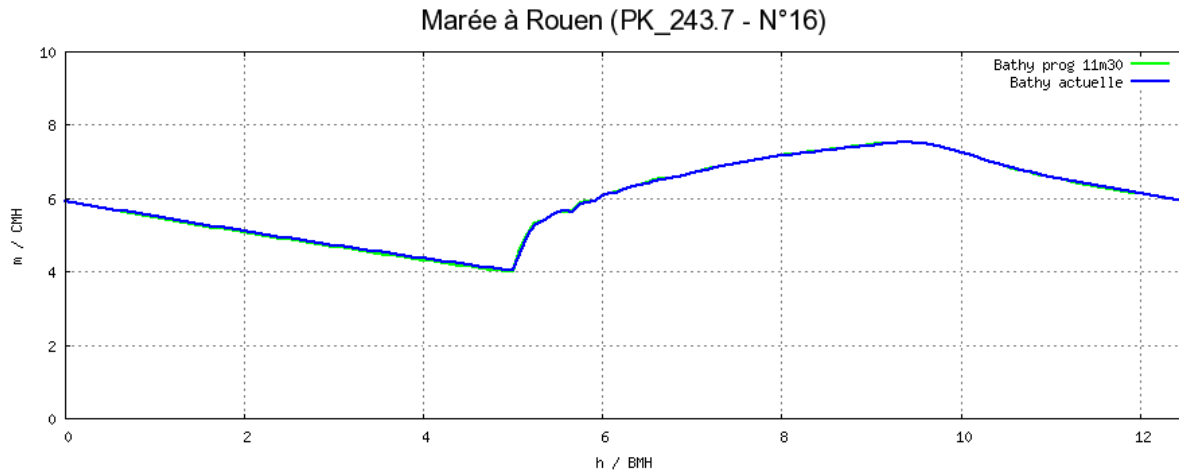


Figure 9 : Courbes de marée obtenues en trois points

4.1.2 Analyse

Les résultats issus du modèle montrent que le projet n'a pas d'impact significatif sur la ligne d'eau.

Les pleines mers ne sont pas affectées par le projet d'amélioration des accès maritimes. L'écart maximal calculé entre les deux situations est inférieur au centimètre ; il n'est donc pas significatif.

Les basses mers ne sont que très faiblement affectées, et ceci de façon localisée. L'écart présente un maximum de 5 cm dans la zone de Rouen. Cet écart par rapport à la situation actuelle diminue en amont et en aval de la zone de Rouen, et s'annule complètement à l'estuaire et à Poses.

Rappelons qu'à l'estuaire, le marnage, c'est-à-dire la différence de hauteur du plan d'eau entre la pleine mer et la basse mer pour un coefficient de 92 (condition des calculs) est de l'ordre de 7 mètres, à Rouen de l'ordre de 3,5 m. Rappelons également que les conditions météorologiques peuvent avoir, dans des conditions fréquentes, une incidence sur les niveaux de 20 à 30 cm, en conditions exceptionnelles jusqu'à plus d'1 m. Les débits de la Seine peuvent également faire varier les niveaux dans le fleuve, et à Rouen l'ordre de grandeur peut atteindre et dépasser assez souvent le mètre.

Le niveau moyen, calculé par intégration au cours du temps des niveaux instantanés, ne montre qu'une variation infime. Le calcul indique une variation de 2 cm, à la limite des possibilités d'interprétation des mesures sur site.

De plus, la comparaison des courbes de marées ne montre aucun déphasage des courbes : ceci montre que le projet ne modifie pas la propagation de l'onde de marée en rivière. Cette comparaison met également en relief la faiblesse des écarts de hauteur.

4.2 Courants

4.2.1 Présentation des résultats

Les courbes de courants sont comparées en trois points : Engainement, Caudebec et Rouen.

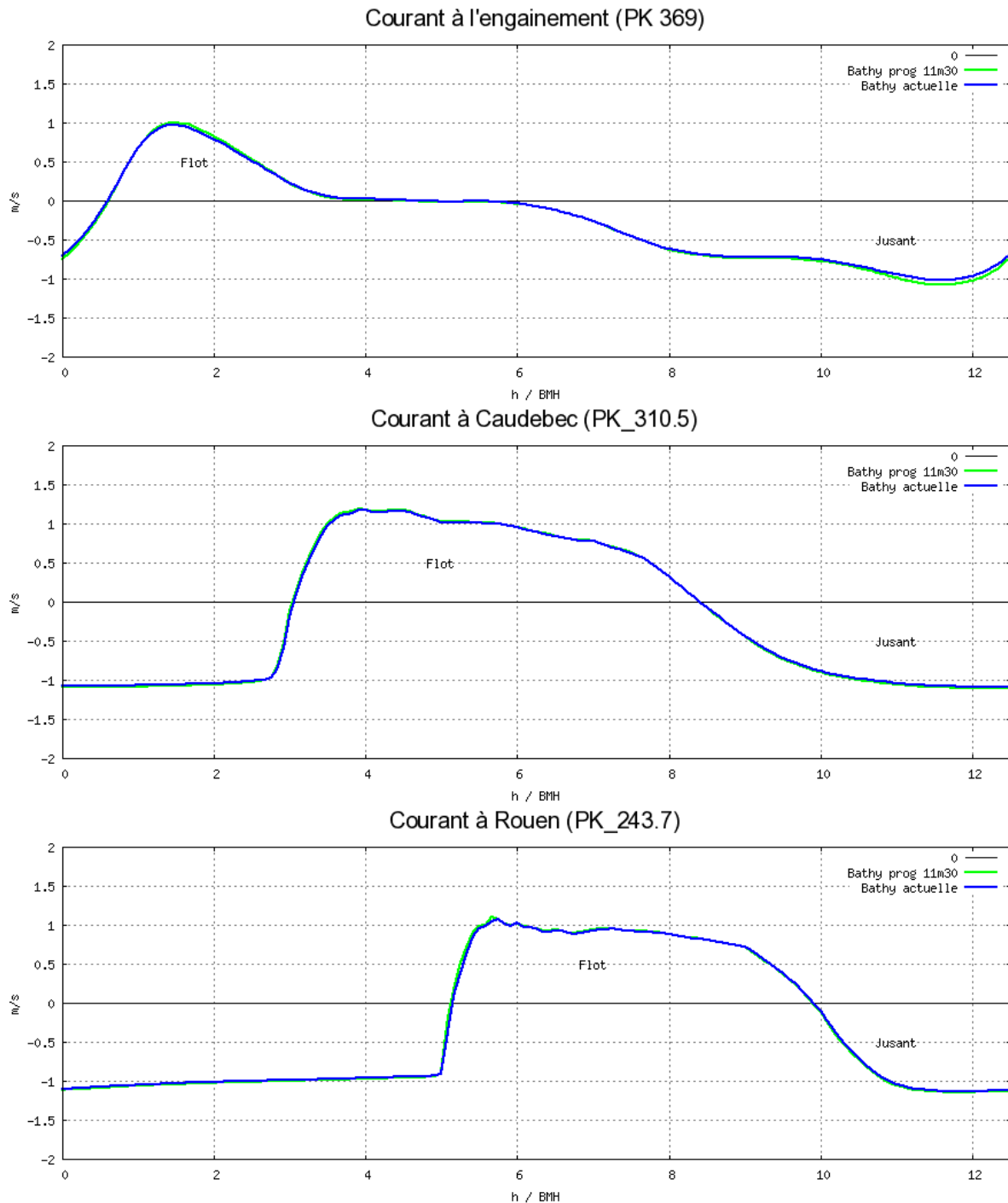


Figure 10 : Courbes de courants obtenus en trois points

4.2.2 Analyse

La comparaison des courbes obtenues montre un impact extrêmement faible du projet sur les maximums des courants de flot (marée montante) et de jusant (marée descendante).

L'impact maximal enregistré par le modèle est de l'ordre 0,15 m/s pour le pic de jusant à l'engainement, par rapport à une valeur de l'ordre de 1m/s. Il est ailleurs non significatif.

Cet impact à l'engainement est intéressant d'un point de vue hydro-sédimentaire puisqu'il va dans le sens du renforcement du jusant. Cela va donc légèrement renforcer l'action d'auto-dragage du courant de jusant, ce qui va dans un sens favorable à l'entretien du chenal.

En rivière, il n'est pas constaté de différence significative de vitesse de courant, et donc les conditions hydro-sédimentaires ne seront pas affectées. Notamment, il n'y aura pas de modification au niveau des parties latérales du lit mineur, et au droit des berges en particulier.

5 CONCLUSION

Le Port Autonome de Rouen a pour projet d'améliorer d'un mètre le chenal maritime d'accès à ses installations de l'estuaire jusqu'à Rouen.

L'objet de cette étude est de quantifier les impacts de ce projet sur la ligne d'eau et sur les courants par rapport à la situation actuelle. Le modèle numérique TELEMAC- 2D a été utilisé. Il a permis d'obtenir des résultats sur toute la zone d'étude.

Les résultats issus du modèle montrent que le projet n'a pas d'impact significatif sur la ligne d'eau ni sur les courants.

Les pleines mers ne sont pas affectées par le projet d'amélioration des accès maritimes. L'écart maximal calculé entre les deux situations est inférieur au centimètre ; il n'est donc pas significatif.

Le niveau moyen, calculé par intégration au cours du temps des niveaux instantanés, ne montre qu'une variation infime. Le calcul indique une variation de 2 cm, à la limite des possibilités d'interprétation des mesures sur site.

De plus, la comparaison des courbes de marées ne montre aucun déphasage des courbes : ceci montre que le projet ne modifie pas la propagation de l'onde de marée en rivière. Cette comparaison met également en relief la faiblesse des écarts de hauteur.

La comparaison des courbes de courants obtenues montre un impact extrêmement faible du projet sur les maximums des courants de flot (marée montante) et de jusant (marée descendante).

Le seul lieu où l'impact serait significatif est l'engainement avec une augmentation des valeurs du maximum de jusant est de l'ordre de 15%. Ceci est intéressant d'un point de vue hydro-sédimentaire dans la mesure où il va légèrement renforcer l'action d'auto-dragage du courant de jusant. Ceci va dans un sens favorable pour l'entretien du chenal de navigation.

En rivière, il n'est pas constaté de différence de vitesse de courant, et donc les conditions hydro-sédimentaires ne seront pas affectées. Notamment, il n'y aura pas de modification au niveau des parties latérales du lit mineur, et au droit des berges en particulier.

Annexes :

1. champs de courant à différentes heures dans l'estuaire et la rivière
2. mesures de courant (2004)
3. mesures marégraphiques en continu (enregistrement)
4. notice de présentation de TELEMAC 2D ou bibliographie
5. représentations bathymétriques estuaire et rivière
6. approche des débits des affluents et volumes de stockage
7. variations des niveaux en fonction des facteurs météorologiques et du débit de la Seine