

Rapport Seine-Aval 4



MODEL

Modélisation validée de l'hydro-morpho-sédimentologie, base physique d'une modélisation environnementale de l'estuaire de la Seine.



Le Hir P., Lafite R.



Octobre 2012



GIP Seine-Aval
Pôle Régional des Savoirs
115 Bd de l'Europe
76 100 - Rouen

tel : 02 35 08 37 64
<http://www.seine-aval.fr>

Contributions

Ont contribué à ce projet de recherche :

Equipe 1 : IFREMER- Centre de Brest, unité de recherche DYNECO :

laboratoire PHYSED/Physed, Pelagos) :

Philippe Bassoulet (coordination campagnes de terrain, mesures de turbidité)

Philippe Cann (participation aux campagnes de terrain)

Hervé Jestin (expérimentations in situ),

Youen Kervella (post-doctorant, chargé de la mise en place du nouveau modèle)

David Le Berre (préparation campagnes de terrain, expérimentations in situ, analyses de laboratoire)

Pierre Le Hir (coordination, modélisation, analyse des mesures),

Bénédicte Thouvenin (modélisation),

Romarc Verney (expérimentations in situ, analyse de données,

Florent Grasso (simulation des apports de MES à Poses)

laboratoire PELAGOS : Francis Gohin, (télédétection satellitale, « couleur de l'eau »), avec la contribution de Caroline Petus, post-doctorante

Avec le soutien logistique du service RDT (Michel Répécaud et son équipe de plongeurs Ifremer (centres de Brest et Boulogne).

Equipe 2 : Université de Rouen (Laboratoire M2C) :

- Robert Lafite (coordination),

- Julien Deloffre (analyses de données),

- Michel Simon

- Maxence Lemoine (Thésard)

Avec le soutien d'Antoine Cuvilliez, du laboratoire LOMC, Université du Havre)

Contribution du GIP Seine-Aval : Jean-Philippe Lemoine a participé au développement du modèle, en particulier pour la paramétrisation des frottements, et a mis en place l'initialisation sédimentaire du modèle.

Les équipes du GPM de Rouen (en particulier Patrice Tournier et Olivier Macur), de la Cellule de Suivi du Littoral Normand et du Laboratoire M2C de l'Université sont remerciées pour leur concours au bon déroulement des opérations en mer.

Sommaire

1- Introduction : objectifs et stratégie du projet MODEL	p.5
La modélisation hydrosédimentaire dans Seine-Aval I, II et III, et ses applications	p.5
Objectifs initiaux du projet MODEL	p.5
Les deux phases du projet MODEL	p.6
Stratégie mise en œuvre dans le projet MODEL	p.7
2- Synthèse des données de turbidité dans l'estuaire amont	p.11
2.1 Variabilité des apports particuliers à Poses	p.11
2.2 Variabilité des concentrations de MES en estuaire de Seine	p.17
2.3 les échanges solides avec un affluent intra-estuarien, la Risle	p.19
3- Mesures d'hydrologie et de turbidité : campagnes MODEL	p.28
3.1 Campagne MODEL1 2008-2009	p.28
3.2 Campagne MODEL2 2010-2011	p.32
3.3 Présentation et analyse des résultats	p.37
4- Distribution des turbidités de surface déduites des images satellite MODIS (NASA) à 250 m, et fusion avec les images à 1 km	p.61
4.1 Méthodologie utilisée pour le traitement des images satellites et la constitution d'une base de données	p.61
4.2 Présentation d'une collection d'images de MES MODIS	p.66
5- Harmonisation des modèles Seine-Aval	p.83
6- Exploitation du modèle hydrosédimentaire Seine-Aval III	p.88

7- Développement d'un nouveau modèle hydro-sédimentaire pour Seine-Aval	p.93
7.1 Le code MARS 3D et sa version curvilinéaire	p.93
7.2 Création du maillage	p.94
7.3 Reconstitution de la bathymétrie du modèle	p.97
7.4 Forçages du modèle	p.99
7.5 Calibrage hydrodynamique et caractérisation des rugosités de fond	p.100
7.6 Validation du modèle hydrodynamique	p.104
7.7 Validation de l'hydrologie (salinité)	p.117
7.8 Modélisation des vagues	p.122
7.9 Evaluation des apports amont	p.124
7.10 Modélisation sédimentaire	p.127
8- Synthèse et perspectives	p.136
9- Références et publications	p.140

Annexes (volume à part, 552 pages)

A1.1 : calibration des sondes de turbidité et missions de contrôle de la représentativité des mesures en stations fixes

A1.2 : Turbidité à la station Fosse Nord (fond) en 2008-2009

A1.3 : Turbidité à Honfleur et Fatouville (fond) et salinité à Fatouville (fond) en 2008-2009

A1.4 : Turbidité et salinité (surface et fond) à Fatouville en 2010-2011

A1.5 : Turbidité à La Carosse (surface) en 2009

A1.6 : Turbidité au Ratier (surface) en 2010-2011

A 2.1 Tableau récapitulatif de l'ensemble des images et des paramètres d'environnement

A 2.2 Catalogue des images de distribution en surface des concentrations en MES en baie de Seine et dans l'embouchure de l'estuaire, issues d'assemblages de données des satellites MODIS (NASA) à 1 km et 250 m de résolution, entre janvier 2003 et novembre 2010

A 3 : Mesures d'altimétrie et d'érodabilité COLMATAGE-MODEL à l'embouchure de la Seine

A 4.1 Création d'un maillage curviligne avec ICEM CFD 12.1

1- Introduction : objectifs et stratégie du projet MODEL

La modélisation hydrosédimentaire dans Seine-Aval I, II et III, et ses applications

Un modèle morphosédimentaire de l'estuaire de la Seine a été développé dans le cadre des programmes Seine-Aval I, II et III. Le modèle simule les courants 3D, les salinités et le panache du fleuve, les turbidités et le bouchon vaseux, les transports de sable fin et de vase pour toutes conditions de forçage réalistes (marée, vent, débit du fleuve) (Brenon et Le Hir, 1999a et 1999b ; Le Hir et al., 2001). Il est validé en marée, courant, salinité, incomplètement validé en turbidité et mouvements résiduels de sédiments. Le couplage morphodynamique est opérationnel, mais n'a été confronté à la réalité (avec un succès raisonnable) que sur une durée de 2-5 ans (Waeles et al., 2007 et 2008). Avec sa résolution actuelle (maillage variable dont la résolution la plus fine est de 300 m longitudinal par 100 m transversal devant Honfleur), le modèle a été implanté sur la bathy 1999 et sur la bathy 2005 (bathymétrie de l'après Port 2000).

Parmi les applications étudiées, on peut relever la simulation des dragages en condition « réaliste » : reconstitution des ordres de grandeur des quantités draguées dans la réalité et des proportions de sable et de vase correspondantes, avec pour seule condition le non-dépassement de la cote nominale du plafond du chenal (Waeles et Le Hir, 2006). Toutefois, les dragages à l'engainement sont sous-estimés au profit des dragages amont devant la brèche, surestimés quant à eux.

Le modèle a été récemment (hiver 2008) « upgradé » grâce à un changement des conditions aux limites de marée (devenues opérationnelles) et un nouveau calcul des vagues (nettement plus complet, mais pas encore utilisé en routine).

Au sein du Programme Seine-Aval ce code de calcul hydrosédimentaire sert de base physique pour la modélisation environnementale, obtenue en lui couplant des modules optionnels décrivant les processus biogéochimiques (au sens large), par exemple la dynamique bactérienne, la production primaire, la dynamique de la matière organique et des sels nutritifs, de l'oxygène, et enfin la dynamique des contaminants chimiques métalliques et organiques. Ainsi le cycle de la matière organique et du carbone est décrit par le modèle SiAM-3D/RIVE (Even et al, 2007), le devenir des coliformes fécaux est traité par la version CF-SIAM-3D (Servais et al, 2007), tandis que le modèle MET&OR (issu de MOCO et de MORGAN) décrit les processus chimiques affectant les contaminants métalliques et organiques. Ce module a été couplé à SiAM-3D et appliqué pour le Cd, Ni, Hg, Pb, deux PCB et deux HAP (Thouvenin et al, 2007)

Objectifs initiaux du projet MODEL

Lors de la réflexion prospective préalable à Seine-Aval IV, nous avons suggéré plusieurs actions relatives à la modélisation hydrosédimentaire :

- réactualiser la validation du modèle hydrosédimentaire en s'assurant de sa capacité à simuler les structures turbides dans l'estuaire, en particulier le bouchon vaseux
- faire évoluer le modèle morphodynamique en un modèle d'habitat qui prenne en compte certains couplages entre écologie benthique, dynamique des sédiments et mécanismes hydrodynamiques,
- poursuivre la validation du modèle morphodynamique en simulant des évolutions passées de l'estuaire,
- raffiner le maillage, tant dans le secteur d'embouchure (vasière Nord par exemple) qu'en amont de Rouen, profitant de l'amélioration des performances des ordinateurs
- exploiter le modèle en simulant des scénarios prospectifs.

Pour profiter de la rapidité offerte par le calcul parallèle, il était envisagé de changer de plateforme de calcul courantologique en utilisant le code hydrodynamique MARS également développé à l'Ifremer, convergeant ainsi vers un modèle hydrosédimentaire MARS-SIAM.

Les deux phases du projet MODEL

Une première phase de cet ambitieux projet a été décidée en 2008, consistant principalement à valider le modèle hydrosédimentaire de l'estuaire dans la configuration actuelle (après Port 2000). Cela nécessitait d'acquérir de nouvelles données in situ calibrées. En outre, les capacités et limites de la modélisation hydrosédimentaire devaient être évaluées par comparaison aux données et au moyen d'une étude de sensibilité au paramétrage.

Par ailleurs, il était prévu d'harmoniser les versions du modèle utilisées, pour l'hydrosédimentaire d'une part, l'écologie et la contamination chimique d'autre part.

En 2010, une demande de soutien complémentaire a été faite au GIP Seine-Aval, pour aller au-delà des objectifs de la phase 1, en respectant la réflexion prospective de Seine-Aval IV. Les préoccupations récentes relatives à l'impact du changement climatique, à la caractérisation des habitats et leur évolution et enfin à la recherche de solutions alternatives aux pratiques actuelles de dragage des GPM (Rouen en particulier), renouvellent le besoin de connaître l'avenir à moyen terme de l'estuaire, ce qui suppose la capacité à prédire les évolutions morphodynamiques de l'estuaire et de son embouchure. Cela nécessite de fermer le bilan sédimentaire de l'embouchure, et finalement peut conduire à la mise en place d'un outil de gestion des sédiments, tel que préconisé par l'étude prospective de l'estuaire conduite par le SGAR de Haute-Normandie. Ainsi, la phase 2 du projet MODEL reprend les ambitions initiales listées plus haut, et a pour objectif de :

- conforter la validité du modèle hydrosédimentaire concernant les matières en suspension (en particulier autour de la fosse Sud) et les évolutions sédimentaires,
- upgrader la résolution du modèle de façon substantielle pour permettre des simulations morphodynamiques dans les secteurs à chenaux (ex. vasière Nord et fosse Nord), en raffinant à la fois la description spatiale et la discrétisation en classes sédimentaires,
- évaluer la capacité du modèle à reconstituer les évolutions morphosédimentaires passées,
- planifier l'exploitation du modèle à des fins morphosédimentaires, mais aussi comme outil de description du système susceptible de produire des indicateurs de comportement.

Stratégie mise en œuvre dans le projet MODEL

Pour répondre aux objectifs ci-dessus, deux approches ont été mises en œuvre : observations (in situ ou par télédétection satellitaire) et modélisation mathématique.

a) Observations in situ

Depuis de nombreuses années, et en particulier la construction de Port2000, la connaissance « de terrain » du bouchon vaseux de la Seine n'avait pas été réactualisée. Les approches de modélisation étaient confrontées à des données anciennes et ignoraient les possibles réajustement des structures turbides intervenues au cours des évolutions morphologiques récentes, en particulier celles découlant de la construction de Port 2000. Il a donc été décidé de mettre en place des instruments de mesures en continu, dont certains pouvaient préfigurer les stations pérennes qui sont envisagées dans le cadre de la surveillance environnementale de l'estuaire de la Seine. Depuis toujours, les efforts de mesures de turbidité/concentration dans l'eau ont été portés presque exclusivement dans le chenal de navigation, de telle sorte que les teneurs en matières en suspension (MES) dans les fosses nord et sud n'étaient pas connues : cette incertitude était d'autant plus gênante que le modèle hydro-sédimentaire mis en place dans Seine-Aval III révélait une ambiguïté dans le secteur d'embouchure, avec un positionnement tantôt nord tantôt sud des structures turbides, selon le paramétrage utilisé. Des instruments ont donc été placés dans les fosses nord et sud, en conservant un contrôle dans le chenal de navigation. Pour ce dernier, en raison de l'inaccessibilité de la passerelle de Honfleur et donc l'impossibilité de réutiliser le système MAREL, l'appontement de Fatouville, sur la rive sud en amont du Pont de Normandie, a été choisi pour sa facilité d'accès et la possibilité de maintenir un instrument immergé en permanence, même à basse mer, qui soit très proche du chenal de navigation. Lors de la première campagne de mesures (automne 2008-hiver 2009), il a été décidé de remettre un turbidimètre à proximité immédiate du site de MAREL-Honfleur, fixé depuis l'estran sur le même appontement, de façon à pouvoir relier les nouvelles mesures aux longues séries acquises par le passé à MAREL-Honfleur. De même, la bouée MAREL « La Carosse » a été temporairement rééquipée d'une sonde multiparamètre en surface, pour caractériser la masse d'eau en bordure ouest de l'embouchure de la Seine. Enfin, dans ce secteur d'embouchure, il était important de relier les resuspensions observées dans la colonne d'eau à des érosions / dépôts intervenant sur les fonds sablo-vaseux soumis à des courants de marée intenses mais aussi à des vagues générant des contraintes fortes sur les fonds de faible profondeur. Deux campagnes de mesures altimétriques (2008-2009 et 2010-2011) ont été réalisées, à la fois supportées par le projet MODEL et le projet COLMATAGE de Seine-Aval IV. Les résultats de ces campagnes ont été fournis dans le rapport final COLMATAGE, et seule une synthèse est restituée dans le présent rapport.

Il est aussi apparu nécessaire de synthétiser les données antérieures de turbidité acquises dans l'estuaire amont depuis Poses jusqu'à l'amont de Honfleur, et tout particulièrement les apports de matières en suspension dans le système, à Poses. Ce travail a été réalisé par l'équipe 2 (M2C, Université de Rouen) qui a pu intégrer dans cette synthèse des données de MES dans l'estuaire de la Risle, acquises dans le cadre du projet Seine-Aval IV FLASH.

b) Observations satellitaires

Pour lever les ambiguïtés sur le positionnement du bouchon vaseux lorsqu'il « sort » de l'estuaire, caractériser l'expansion des structures turbides en baie de Seine et pouvoir les relier aux forçages météo-océaniques (vent/vagues), une synthèse des images obtenues en « couleur de l'eau » depuis des plate-formes satellites a été proposée. Pendant de nombreuses années, la piste satellitaire avait été considérée un peu limitée, car les images de résolution kilométrique acquises quotidiennement étaient très vite saturées dans la gamme de concentration des MES à l'embouchure, tandis que les images à haute résolution de type Spot n'offraient pas une cadence d'acquisition suffisante pour des informations pertinentes relatives au milieu marin pélagique. Par contre la mise en orbite des satellites MODIS (américain) et MERIS (européen) depuis 2003, avec un passage quotidien en milieu de journée et l'acquisition d'images de résolution intermédiaire (250 et 300m) a largement modifié les opportunités. Une étude de faisabilité avait été tentée dans le cadre de Seine-Aval III, et il nous a paru utile de rassembler un maximum d'images acquises depuis 2003, pour en évaluer l'intérêt voire envisager un traitement statistique permettant de fournir une information exhaustive sur les turbidités en baie de Seine. Pour des raisons de coût (accès gratuit à la donnée MERIS, pas à la donnée MODIS), nous nous sommes focalisés sur les images MERIS. Le travail a été sous-traité à la société HOCER, pour l'essentiel.

c) Modélisation mathématique

Lors de la présentation des objectifs initiaux du projet, il a été rappelé la nécessité de raffiner le maillage du modèle hydro-sédimentaire Seine-Aval, en particulier pour accroître la pertinence des réponses morphodynamiques du système estuaire et embouchure de Seine, et ce faisant l'opportunité de basculer sur la plateforme de modélisation MARS, qui bénéficie à Ifremer d'un effort de parallélisation qui permet des performances de calcul nettement meilleures. Cette refonte complète du code hydro-sédimentaire est donc l'action majeure du projet, constituant un « investissement » pour plusieurs années et donc, de notre point de vue, un outil pouvant/devant être valorisé au-delà de Seine-Aval IV.

Les caractéristiques essentielles du nouveau modèle mis en place sont les suivantes :

- code de base MARS à la place de SiAM concernant la courantologie : résolution tridimensionnelle (3D) des équations de Navier-Stokes sous approximation hydrostatique et de Boussinesq),
- mise en place d'une nouvelle grille de calcul, curvilinéaire, conciliant (1) une résolution « raisonnable » à l'embouchure (de l'ordre de 100 m), (2) un raffinement dans la section transversale dans les biefs amont de l'estuaire jusqu'à Poses, avec intégration des îles en amont de Rouen, (3) un respect des méandres, (4) une emprise étendue de Cherbourg à Fécamp englobant l'ensemble de la baie de Seine, (5) un raffinement le long de la côte du Calvados et jusqu'à la baie des Veys permettant de considérer l'impact de la Seine sur le littoral et de traiter des problèmes spécifiques à cette côte sans compromettre les temps de calcul du modèle d'ensemble
- semi-couplage avec un modèle de génération/propagation/dissipation des vagues de type Wave Watch 3 sur une grille de calcul non structurée compatible avec la grille du modèle courantologique 3D,

- intégration d'un nouveau module de calcul des évolutions sédimentaires, permettant de traiter le transport simultané d'un nombre quelconque de classes de sable et de vase, développé récemment et appliqué au bassin de Marennes-Oléron (Le Hir et al., 2011 ; Kervella),
- ensemble des codes et modules de calcul programmés en calcul parallèle, pour une réduction des temps de simulations, en particulier des simulations avec couplage morphodynamique sur le moyen terme (5-20 ans).

Cependant, certaines actions de modélisation ont été réalisées pour ne pas suspendre l'exploitation du modèle en attendant la nouvelle version. Ainsi, le modèle SiAM-3D a été confronté aux mesures acquises au cours de la 1^{ère} campagne du projet MODEL (2008-2009), ce même modèle a été utilisé pour commencer un exercice d'évaluation des incertitudes de la modélisation (Le Hir, 2009), qu'il sera important de poursuivre avec les nouveaux modèles. Enfin, le modèle a été exploité pour rechercher des indicateurs d' « état HydroMorphoSédimentaire » des estuaires, faisant écho aux réflexions parallèles menées par un groupe de travail ad hoc au sein du projet LITEAU BEEST : ainsi une préfiguration de certains indicateurs morphologique, hydrodynamique, sédimentaire ou hydrologique a pu être proposée en utilisant le modèle SiAM3D de l'estuaire de la Seine pour les évaluer et les illustrer dans le cas de la Seine. A noter aussi que le code SiAM-3D a été exploité dans le cadre du projet Seine-Aval IV FLUMES portant sur les processus de floculation et le comportement des particules dans l'eau, et dont les développements pourront être exploités intégralement dans le nouveau modèle hydrosédimentaire mis en place dans le cadre de MODEL, avec une compatibilité parfaitement assurée.

Le travail d'harmonisation des codes de calcul utilisés pour l'hydrosédimentaire d'une part et pour la biogéochimie ou le devenir des contaminants d'autre part, tel que proposé initialement, a été mené sur les versions du code SiAM3D, de façon à préparer la tâche analogue à venir concernant le modèle MARS-SiAM 3D et à permettre d'identifier des priorités dans le cas de difficultés liées aux temps de calcul.

Synthèse sur la stratégie

La stratégie du projet MODEL peut donc se résumer ainsi : mise en place d'une nouvelle modélisation hydrosédimentaire de la Seine et de la baie de Seine, réunissant tous les ingrédients du modèle Seine-Aval III mais aux capacités étendues en termes de classes de sédiments considérées, en terme de modélisation du comportement des sédiments mixtes, et aux performances accrues par un raffinement du maillage (y compris dans l'estuaire et ses méandres), sans compromettre les performances de calcul et en autorisant donc les simulations pluriannuelles, grâce à l'utilisation de techniques de calcul parallèle.

Pour parvenir à une modélisation validée nous rendant confiants dans l'utilisation du modèle en mode prédiction (morphodynamique en particulier), il est nécessaire de disposer de données hydrologiques et sédimentaires réactualisées depuis la construction de Port2000. Des campagnes de mesures ont été organisées, structurées autour de l'acquisition de séries continues pour révéler les influences respectives des différents forçages du système, la marée et ses variations d'amplitude, les débits liquide et solide de la Seine, le vent et les vagues, dont l'influence est majeure à l'embouchure. Ces mesures sont de nature hydrologique (température et salinité) et sédimentaire (turbidité et érosion/dépôt) : la pression a souvent été mesurée, conduisant à des données de surcote/décote dans des secteurs peu souvent investigués, mais surtout à des données

de vagues, et parfois de spectre de vagues, en particulier sur les bancs d'embouchure jamais instrumentés, apportant ainsi à la communauté scientifique ou d'ingénierie des données de base pour la calibration et la validation des modèles, au-delà de Seine-Aval. Enfin, il a été proposé de rassembler les données de turbidité de surface issues des satellites « couleur de l'eau », susceptibles d'apporter une information pertinente sur les structures turbides en surface et leurs variabilités, très complémentaires des évolutions mesurées localement en stations fixes : le survol quotidien du secteur par des satellites à moyenne résolution depuis 2003 pourrait conduire à une analyse statistique de cette variabilité, et apporter une validation complémentaire des modèles.

Ces différents items sont traités successivement dans le rapport, dont le sommaire devrait ainsi mieux se comprendre. Le projet MODEL prévoyait aussi la calibration complète du modèle et son exploitation en termes de morphodynamique. Ce programme était trop ambitieux, et la calibration des structures sédimentaires n'est qu'ébauchée, tandis que l'exploitation du modèle morphodynamique n'a pas encore pu être menée.

2- Synthèse des données de turbidité dans l'estuaire amont

Ce travail, qui prend en compte l'ensemble des mesures en continu depuis 1996 en dehors des données MAREL et de celles acquises dans le cadre du projet MODEL, a été réalisé par le laboratoire M2C de l'Université de Rouen. Il est rappelé ici que le CETMEF a réalisé une série d'analyse des données du réseau MAREL-Baie de Seine, dans le cadre du suivi scientifique de Port 2000.

L'étude de la variabilité hydrologique de la Seine met en évidence des cycles climatiques pluriannuels (Massei *et al.*, 2009). Ce travail a pour but de décrire la variabilité pluriannuelle et interannuelle des concentrations en MES en estuaire de Seine.

Les données analysées proviennent de différentes sources :

- des chroniques de sondes multi-paramètres mises en place par l'Agence de l'Eau Seine-Normandie et le Port Autonome de Rouen ; trois sites ont été instrumentés (Poses, Rouen, Caudebec-en-Caux), de 1996 à 2004 (Lafite *et al.*, 2001).
- des valeurs ponctuelles bimensuelles de concentration en MES, au niveau de 21 stations le long d'un transect allant de l'amont du barrage de Poses (pk 201) à Honfleur (pk 355) ; les mesures ont été réalisées de 1971 à 2011, de façon plus ou moins régulière ; les prélèvements d'eau sont effectués durant l'étalement de basse-mer puis filtrés pour avoir la concentration en MES.
- des mesures de turbidité en Risle, un affluent intra-estuarien, étudié dans le cadre du programme Seine-Aval FLASH, sur les transferts de contaminants biologiques et chimiques.
- d'autres données de mesures de turbidités, aussi bien ponctuelles que sur le long terme existent, notamment les acquisitions réalisées dans le cadre du réseau de surveillance MAREL et plus particulièrement, la station de mesure de Honfleur (qui a fonctionné entre 1997 et 2004) mais elles ne sont pas intégrées dans l'analyse.

2.1 Variabilité des apports particuliers à Poses

Les mesures de MES effectuées par prélèvements à Poses depuis 1971 permettent de voir l'évolution de la concentration en MES par rapport au débit de la Seine. Les concentrations les plus importantes sont atteintes lors des périodes de crue (débits $> 1000 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$).

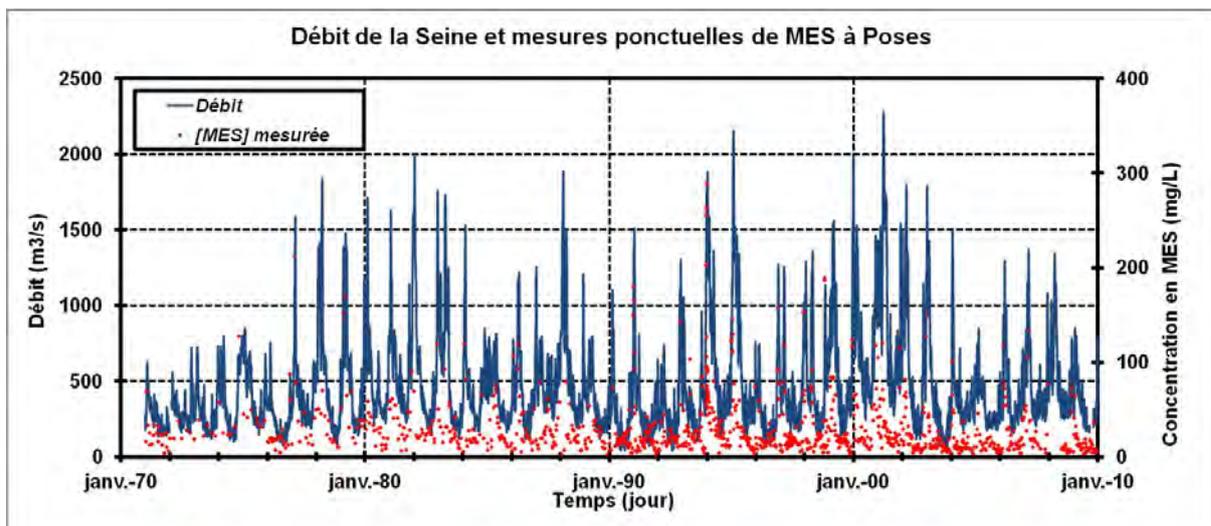


Figure 1. Evolution des débits liquides et des concentrations en MES mesurées par prélèvements (données SNS)

La figure 2 représente deux relations entre les débits liquides et les concentrations en MES (données SNS). Cette figure montre qu'il y a bien une relation entre ces deux paramètres. La relation de type exponentielle (2) semble plus représentative que la relation de type linéaire (1). Cette relation semble assez forte en période d'étiage (débits $< 800 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$). Au delà de $800 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, en période de crue, débit et concentration amont sont beaucoup moins corrélés. Il est à noter que ces relations varient de celles trouvées par Avoine (1986).

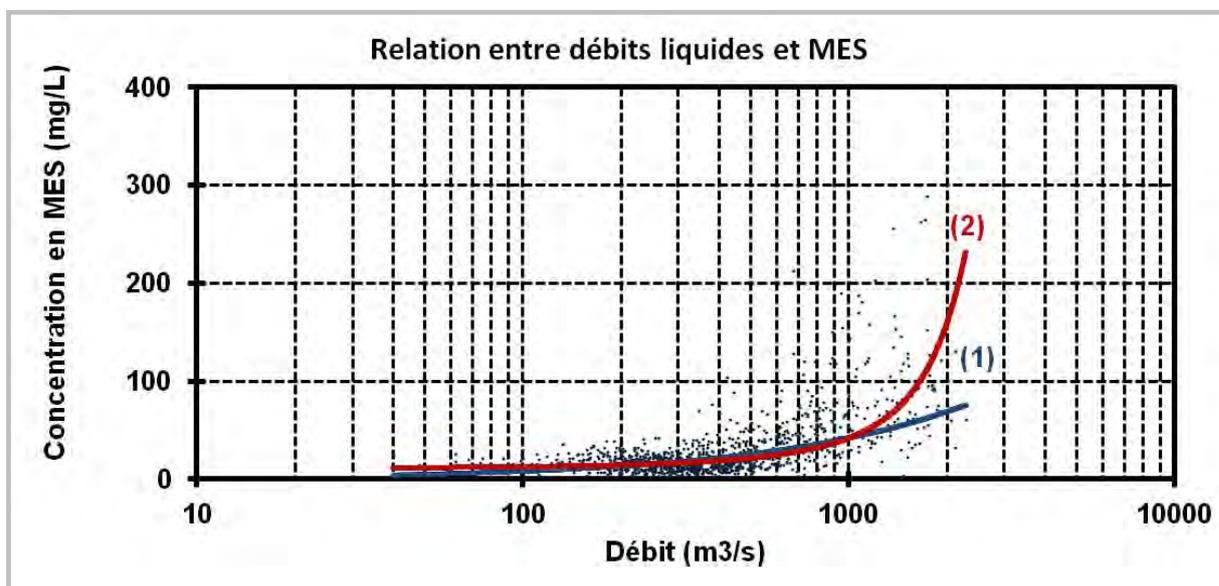


Figure 2 : concentrations en MES (prélèvements ponctuels) en fonction des débits liquides au barrage de Poses (données SNS) / (1) relation linéaire $[MES] = (0,0058 \cdot Q) + 2,661$ avec $R^2 = 0,45$ / (2) relation exponentielle $[MES] = 11,13 \exp(0,0013 \cdot Q)$ avec $R^2 = 0,43$

Le site de Poses (2 km en amont du barrage) a été instrumenté par l'Agence de l'Eau Seine-Normandie avec une sonde multi-paramètre YSI 6000 entre le 21 Mai 1996 et le 12 Février 2004 (Lafite *et al.*, 2001). La figure 3 montre les mesures de turbidité avec le débit. Cette période d'acquisition englobe une période de forte variabilité hydrologique avec des crues de faibles

intensités ($1200 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$) et des crues exceptionnelles (débit max de $2300 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$). Les mesures acquises par mesures optiques des sondes puis calibrées par filtrations (Dupont *et al.*, 2001), sont représentatives des concentrations en MES en Seine (Fig. 3), avec une bonne corrélation entre les deux mesures (Fig. 4).

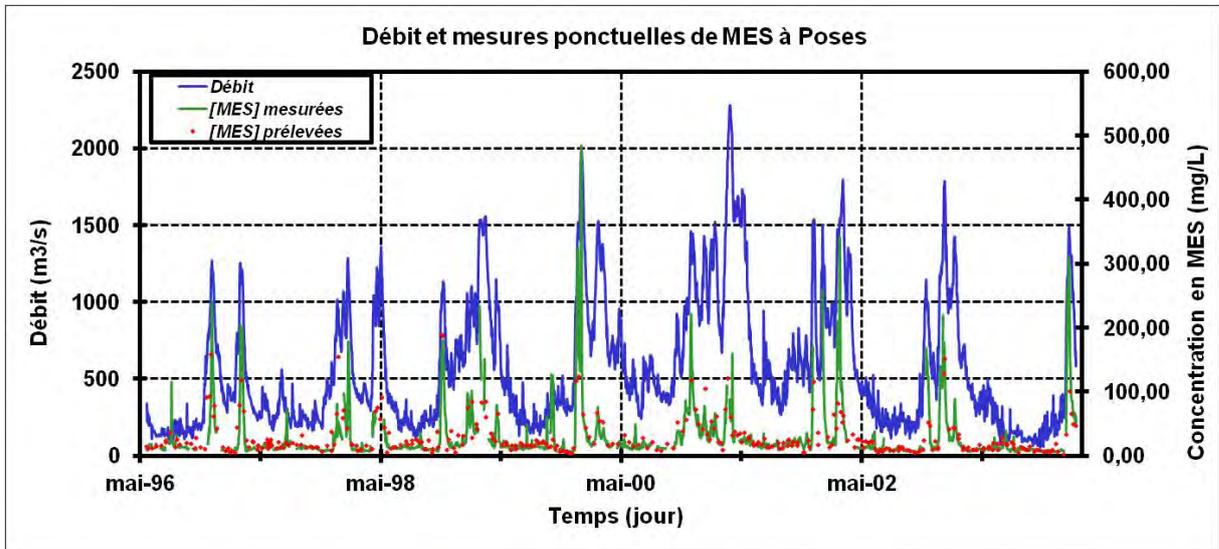


Figure 3 : Comparaison entre les mesures de MES effectuées par prélèvements et par la sonde (données SNS) et le débit de la Seine

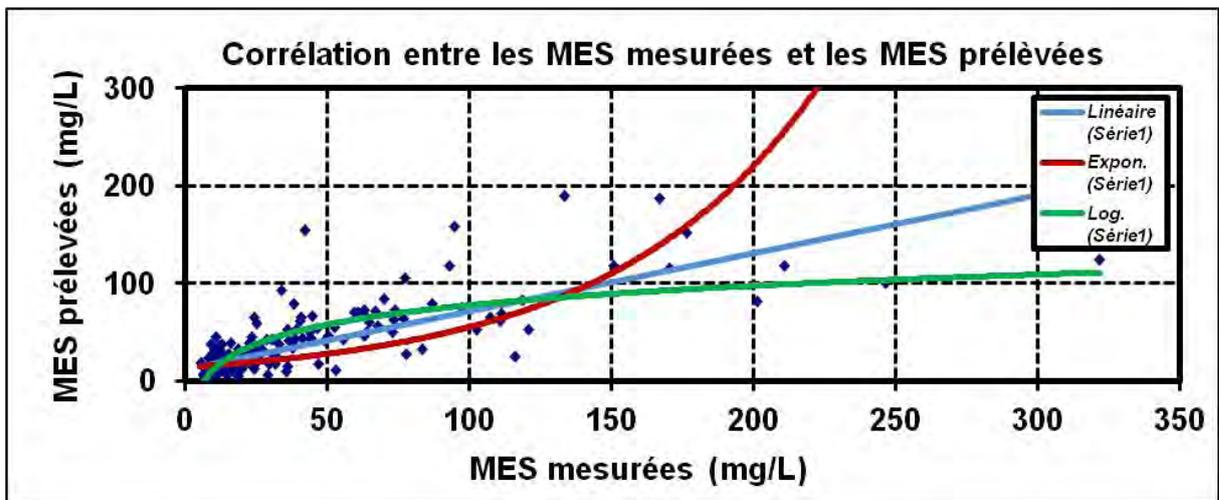


Figure 4 : Corrélations entre les MES mesurées par la sonde et les MES prélevées (données SNS // linéaire $Y = 0,5955 \cdot X + 11,589$ avec $R^2 = 0,62$ // exp $Y = 13,735 \exp(0,0139 \cdot X)$ avec $R^2 = 0,47$ // log $Y = 28,66 \cdot \ln(X) - 54,656$ avec $R^2 = 0,65$)

Avoine, en 1986, établit deux relations entre la charge solide et les débits liquides en fonction du comportement hydrologique de la Seine :

- en phase ascendante de crue : $C_{\text{MES}} = 10^{-3} \cdot Q^{1,66}$
- en phase descendante de crue et en étiage : $C_{\text{MES}} = 0,0344 \cdot Q + 7,797$

Sur la figure 5, sont représentées les MES mesurées par la sonde et les MES extrapolées, basées sur les équations d'Avoine.

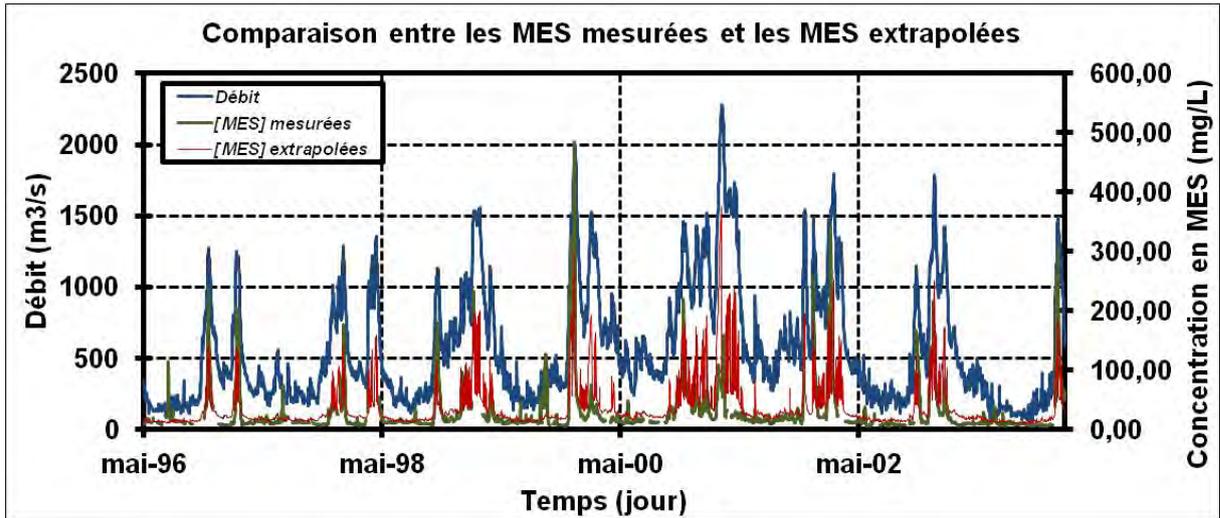


Figure 5 : Comparaison entre les concentrations en MES mesurées et les valeurs extrapolées à partir de Avoine (1986)

Plusieurs comportements sont observés lors des périodes de crue, comme le rappelle la figure 6 ci-dessous reproduite de la thèse de Guezennec (1999). En particulier les premières crues hivernales montrent un hystérésis favorable à la montée de crue (concentrations plus élevées) lorsque celle-ci est intense (lessivage instantané des sols), tandis que les crues suivantes connaîtraient un hystérésis opposé, avec des concentrations plus élevées en descente de crue, provoquées par un relessivage après le pic de crue). Cette variabilité de comportement explique en partie les différences entre les données mesurées et les données modélisées. En effet, les équations employées plus haut font état d'une relation entre charge solide et débit liquide pour des années hydrologiques moyennes et ne prennent pas en compte ces différents comportements exceptionnels.

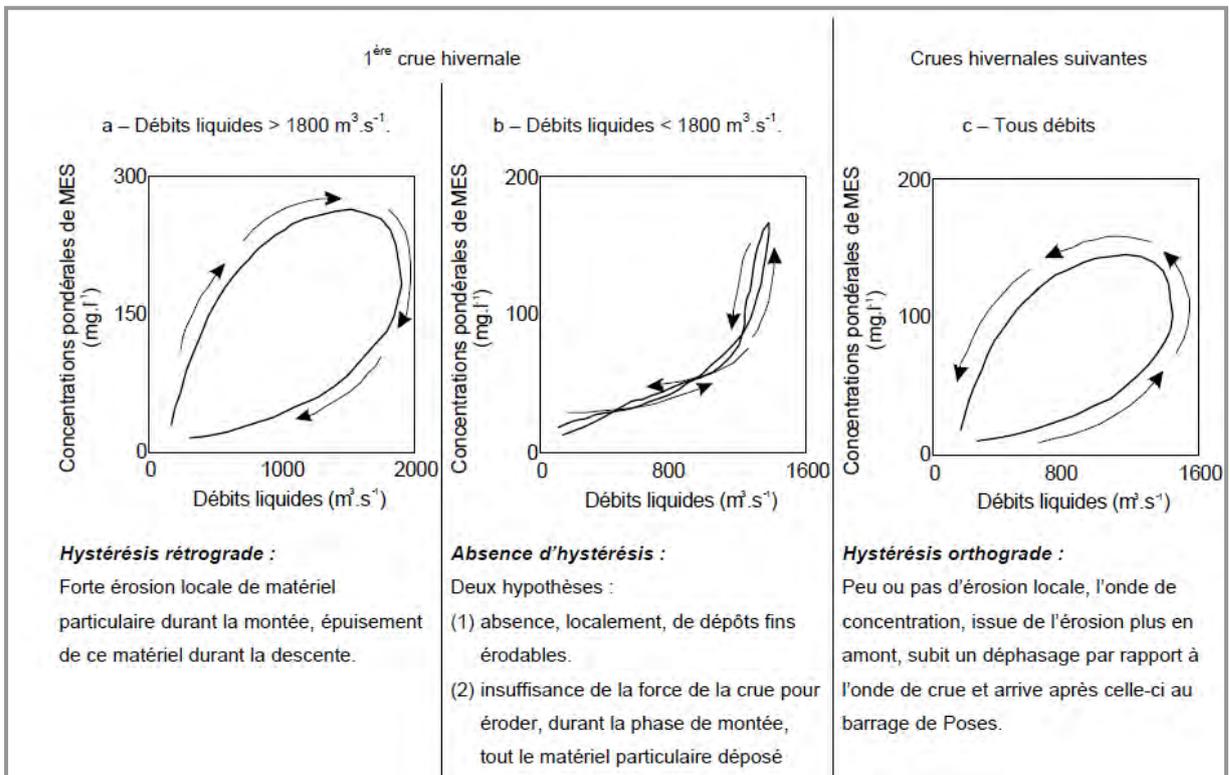


Figure 6 : Comparaison des différentes relations débits liquides/débits solides à Poses (Guézennec, 1999)

Les valeurs extrapolées ont tendance à surestimer légèrement les concentrations en MES en période d'étiage (Fig. 7). En revanche, en période de crue, les valeurs extrapolées sous-estiment les concentrations en MES. Les différences majeures de valeurs ont principalement lieu lors des crues, en particulier la crue de 2001, exceptionnellement intense. Les faibles concentrations observées lors de cette crue peuvent être expliquées par la forte contribution de la nappe. Les MES sont diluées par des eaux de nappes faiblement chargées. Les équations habituellement employées pour étudier la relation entre les débits liquides et les débits solides ne sont pas adaptées lors des périodes de crues exceptionnelles, des processus tels que la contribution de la nappe ne sont pas quantifiés et donc ne sont pas pris en compte.

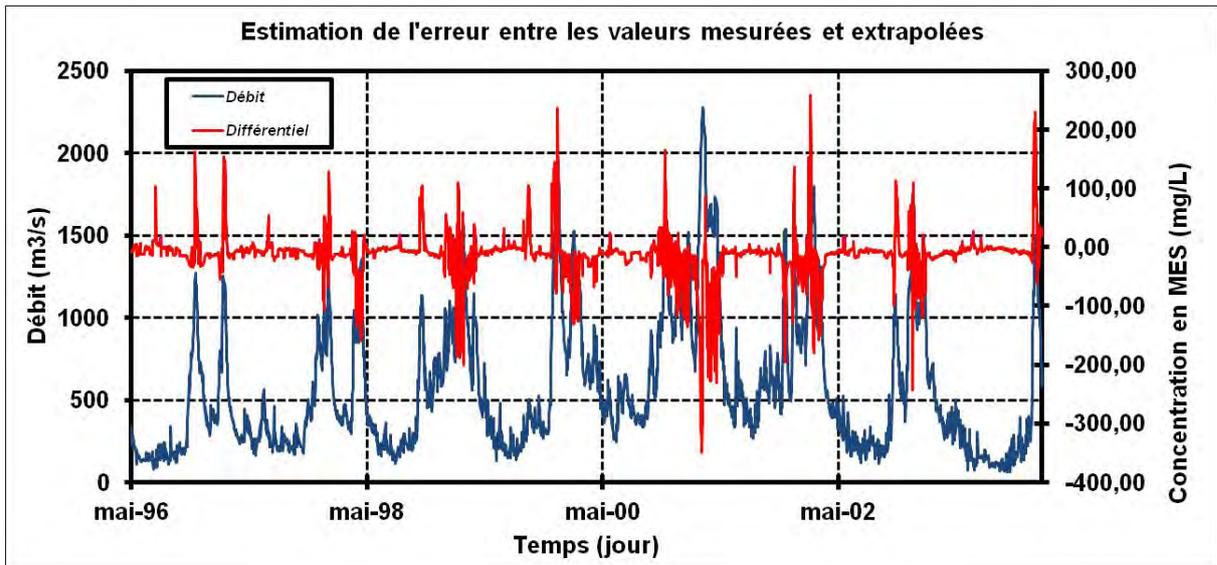


Figure 7 : Différentiel entre les valeurs mesurées et les valeurs extrapolées

En résumé, on peut considérer que les corrélations débit/MES fonctionnent bien en étiage, mais beaucoup moins en période de crue. Il est à noter que dans le cadre du projet SYNAPSES, en partenariat avec le GIPSA, il a été convenu de rééquiper la mesure amont au barrage de Poses. Ces nouvelles mesures devraient permettre d'avancer dans l'établissement de meilleures relations débit/MES en crue.

Le tableau 1 regroupe les valeurs des flux de MES annuels sur la période d'acquisition de la sonde. Ces flux annuels mesurés sont compris entre 430 000 et 1 300 000 tonnes. L'erreur entre le flux mesuré et le flux extrapolé est d'autant plus importante lorsque l'on s'éloigne du fonctionnement hydrologique moyen. La crue exceptionnelle de 2001 sort de ce schéma avec une estimation fautive. Il apparaît que les équations utilisées par la communauté scientifique restent correctes pour des années hydrologiques moyennes. Pour des périodes de crues de faibles intensités, l'erreur d'estimation est proche de 10 %, ce qui reste acceptable. En revanche, pour des années de crues exceptionnellement fortes, ces équations ne sont plus valables et ne peuvent être employées. La complexité des processus mis en jeu rend difficile la mise au jour de nouvelles équations de relation entre la charge solide et le débit liquide.

Période*	Flux Calculé	Flux Mesuré**	% Erreur***
1996-1997	430 000	518 000	17
1997-1998	525 000	503 000	4
1998-1999	923 000	887 000	4
1999-2000	1 202 000	1 077 000	12
2000-2001	2 511 738	1 297 648	94
2001-2002	1 184 000	1 289 000	8
2002-2003	780 000	731 000	7

* Année hydrologie du 01/09 au 31/08

** Les données manquantes ont été interpolées

*** Flux mesurés comme référence

Tableau 1 : Evaluation des flux calculés à partir des relations de Ficht/Avoine et des mesures SNS pour la période 1996-2003

Si l'on fait abstraction de l'erreur liée aux crues exceptionnelles, bien que très importante, il est possible d'extrapoler une chronique de concentration en MES, basée sur les équations d'Avoine et les débits de la Seine (Fig. 8).

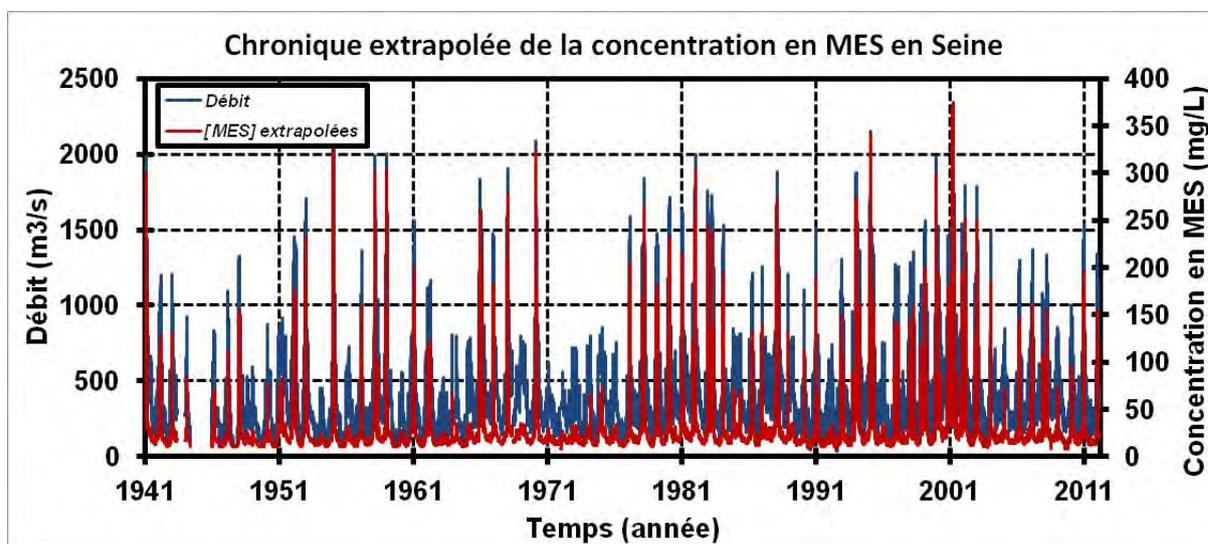


Figure 8 : Extrapolation de la chronique de concentration en MES sur la chronique des débits de la Seine, basée sur les équations d'Avoine (1986)

La quantification des apports en MES lors des crues est de 75 à 80 % (Meybeck *et al.*, 1998), dont la majeure partie est transférée lors de la phase ascendante de crue (Dupont *et al.*, 2001).

2.2 Variabilité des concentrations de MES en estuaire de Seine

La figure 9 montre le profil longitudinal de la turbidité en estuaire de Seine lors d'une *étale* de basse-mer. Un gradient croissant amont-aval de la turbidité est bien visible et marqué par la présence du bouchon vaseux en aval de Caudebec-en-Caux.

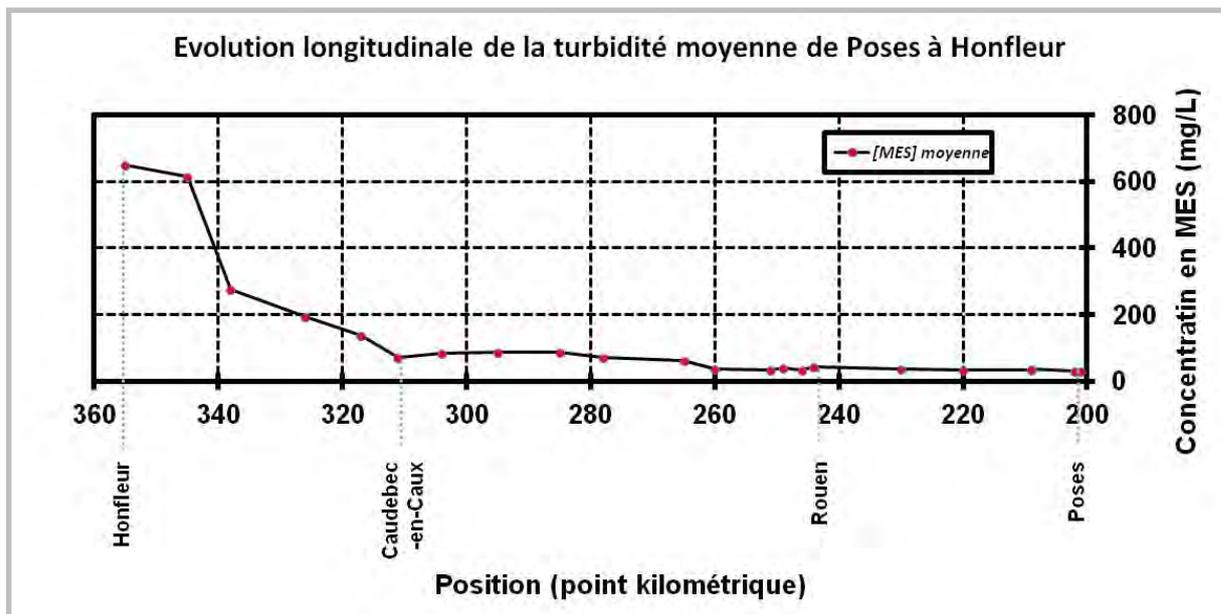


Figure 9 : Transect longitudinal de la turbidité en Seine (données SNS)

Les sondes posées par l'AESN permettent de tracer les chroniques de concentration en MES à Rouen et Caudebec-en-Caux (Fig. 10 et 11).

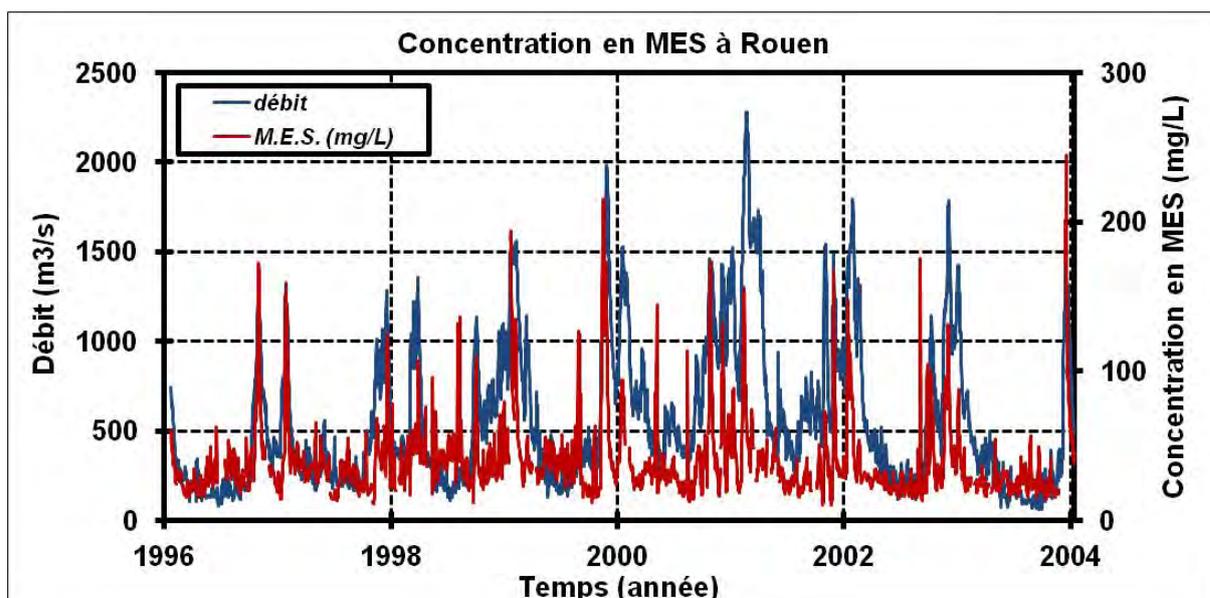


Figure 10 : Concentrations en MES à Rouen de 1996 à 2004 (données SNS)

A Rouen, la variabilité des MES liée au cycle hydrologique est toujours très marquée, avec des valeurs importantes en crue et des valeurs faibles en période d'étiage. A l'aval, l'influence du cycle hydrologique est plus faible. Contrairement à l'amont, les périodes de fortes concentrations en MES correspondent aux périodes de faibles débits. Les MES ne proviennent pas des apports continentaux, mais de la remontée en amont du bouchon vaseux. C'est ce phénomène qui se produit en 2003 avec un étiage particulièrement marqué et des concentrations en MES cinq à dix fois plus importantes que lors d'un étiage moyen. En période de forts débits, alors que les apports amont sont plus importants, une diminution des concentrations en MES est observée, avec une expulsion du bouchon vaseux, localisé dans le secteur.

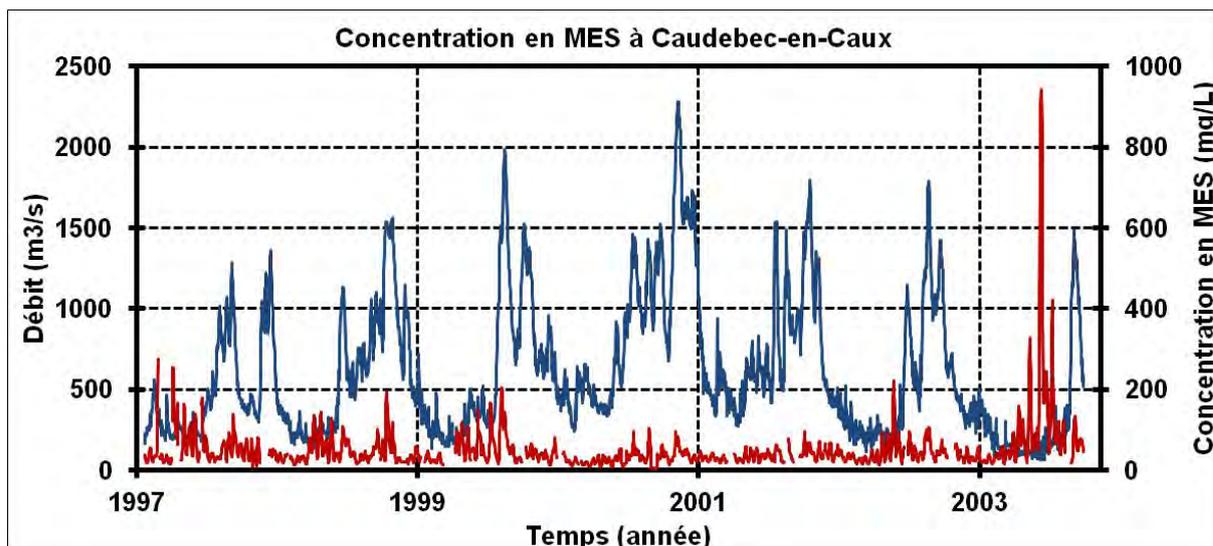


Figure 11 : Concentrations en MES à Caudebec-en-Caux de 1997 à 2004 (données SNS)

Durant un cycle hydrologique, en période de crue, les concentrations en MES sont plus élevées à l'amont (Poses) qu'au niveau de Rouen (Fig. 12).

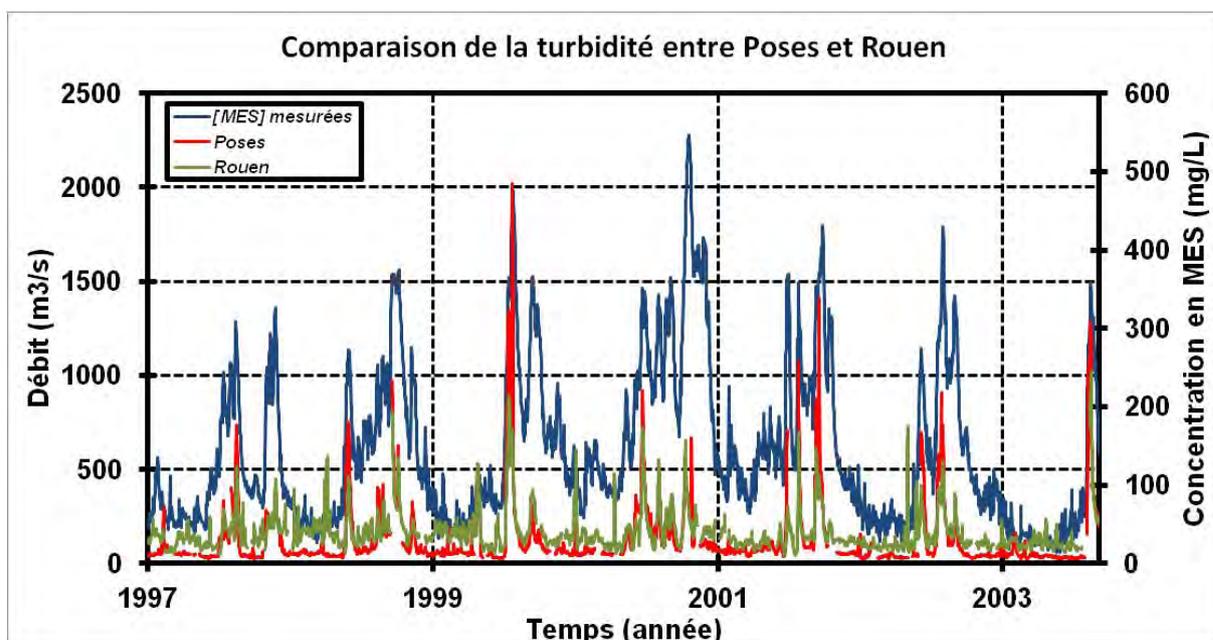


Figure 12 : Comparaison des concentrations en MES entre Poses et Rouen (en bleu : débit de la Seine).

Il y a donc un piégeage des particules entre les deux secteurs. Ce piégeage s'opère au niveau du secteur des îles amont, identifié lors de l'étude de la vase de Oissel (Deloffre *et al.*, 2005). A l'inverse, un relargage en particules a lieu en période d'étiage, causé par l'érosion de ces zones de dépôts intertidaux (Fig. 13).

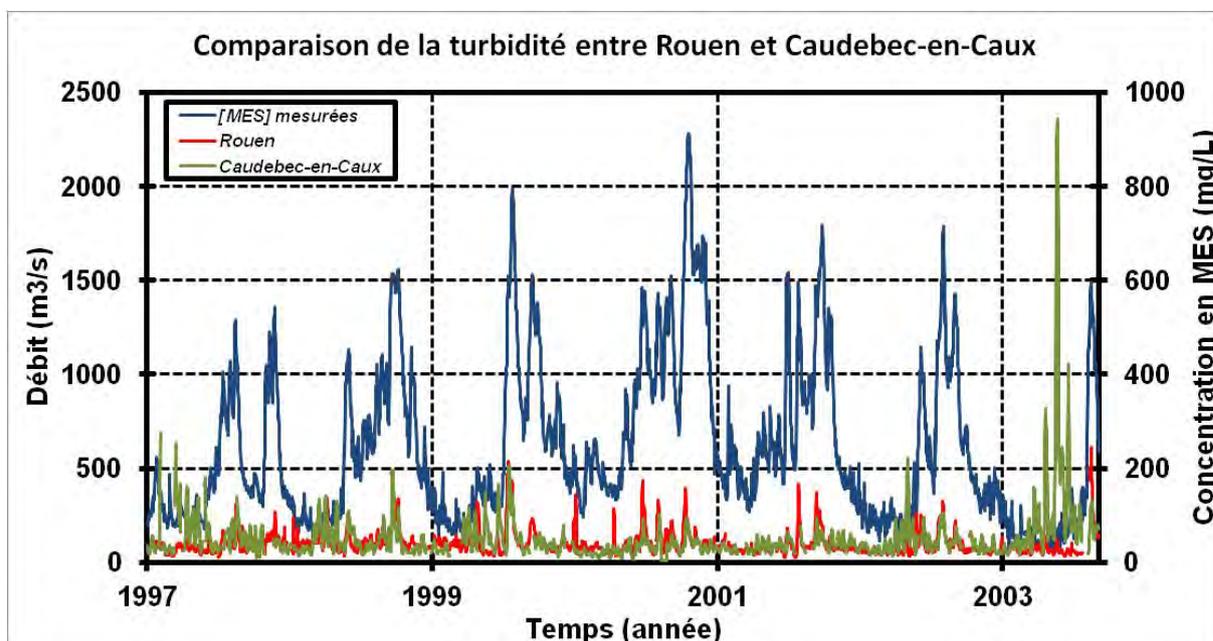


Figure 13 : Comparaison des concentrations en MES entre Rouen et Caudebec-en-Caux

2.3 Les échanges solides avec un affluent intra-estuarien, la Risle

De façon à proposer un regard le plus exhaustif possible sur les matières en suspension dans l'ensemble du système estuaire et embouchure de la Seine, il est apparu utile d'indiquer les éléments de connaissance disponibles sur les MES dans l'estuaire de la Risle, connecté à l'estuaire de la Seine à proximité de son bouchon vaseux.

La Risle est divisée en deux secteurs, la partie fluviale en amont du barrage de Pont-Audemer et la partie maritime, ou intra-estuarienne, en aval du barrage. La partie entre Pont-Audemer et Foulbec peut être considérée comme un estuaire fluvial sous influence tidale mais principalement contrôlée par les apports liquides du bassin versant de la Risle. L'aval de Foulbec possède un fonctionnement de type estuaire moyen avec une influence importante de la marée (oscillation de la turbidité et de la salinité contrôlées par les cycles de marées) avec un contrôle également lié au débit de la Risle, principalement lors des crues de forte intensité en Risle (débit $> 100 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$).

Dans le cadre du programme Seine-Aval IV FLASH, plusieurs sites ont été instrumentés dans la partie maritime de la Risle (Fig. 14): la limite de la marée dynamique (Pont-Audemer, à 16 km de la confluence entre la Seine et la Risle) et la limite de l'intrusion saline (Foulbec, à 7 km de la confluence). confluence entre la Seine et la Risle) et la limite de l'intrusion saline (Foulbec, à 7 km de la confluence).

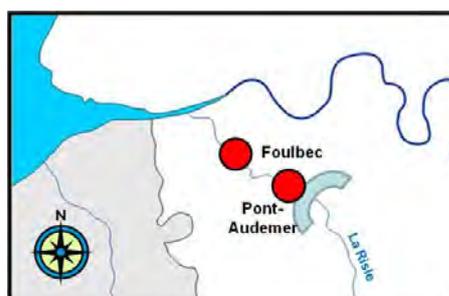


Figure 14 : localisation des sondes de turbidités dans la partie maritime de la Risle

Une dynamique amont principalement influencée par les apports liquides et solides du bassin versant de la Risle

La mesure dans la partie amont, au niveau de Pont-Audemer, ne permet pas une exploitation actuellement des acquisitions. A cause du couvert végétal dans le secteur, la mesure optique de la turbidité empêche toute mesure fiable (obstruction des capteurs, encrassement rapide...). Le suivi d'un cycle tidal en période de vives-eaux montre une absence de contrôle tidal de la turbidité dans la partie amont de la Risle maritime (entre Foulbec et Pont-Audemer). Des prélèvements bimensuels réalisés à l'amont de la Risle permettent de corrélérer l'évolution de la concentration en MES en fonction du débit (Fig. 15), qui est typiquement compris entre 5 et 200 m³.s⁻¹.

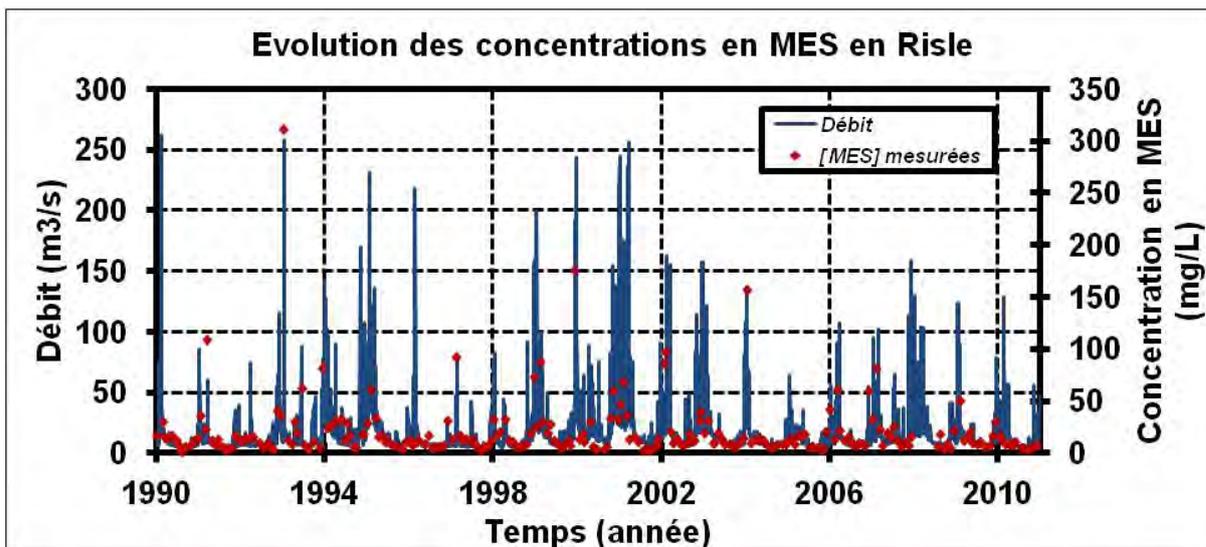


Figure 15 : Concentrations en MES en Risle au niveau de Pont-Audemer (données DREAL)

Une corrélation entre les débits liquides et les concentrations de matières en suspension de la Risle est établie (Fig. 16). Il apparaît une relation linéaire simple entre ces deux paramètres, contrairement en Seine où il faut diviser le cycle hydrologique en plusieurs phases.

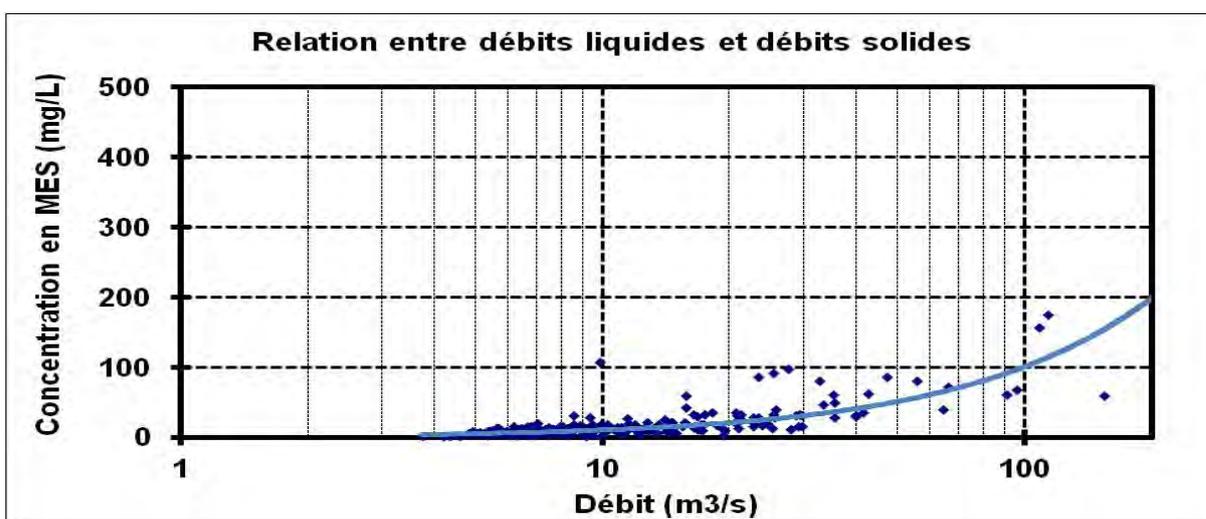


Figure 16 : relation linéaire entre les débits liquides et les débits solides avec $C_{MES} = 1,0605*Q + 2,1863$ avec $R^2 = 0,73$

En se basant sur la relation linéaire entre les débits liquides et les concentrations en Risle, il est possible de reconstituer une chronique de turbidité dans la partie amont de la Risle (Fig. 17). Contrairement à la Seine, les plus fortes concentrations en MES ont lieu lors des fortes crues. Cette différence est expliquée par la différence d'inertie entre le bassin versant de la Seine, d'une surface beaucoup plus importante que celui de la Risle, ce dernier étant donc plus réactif.

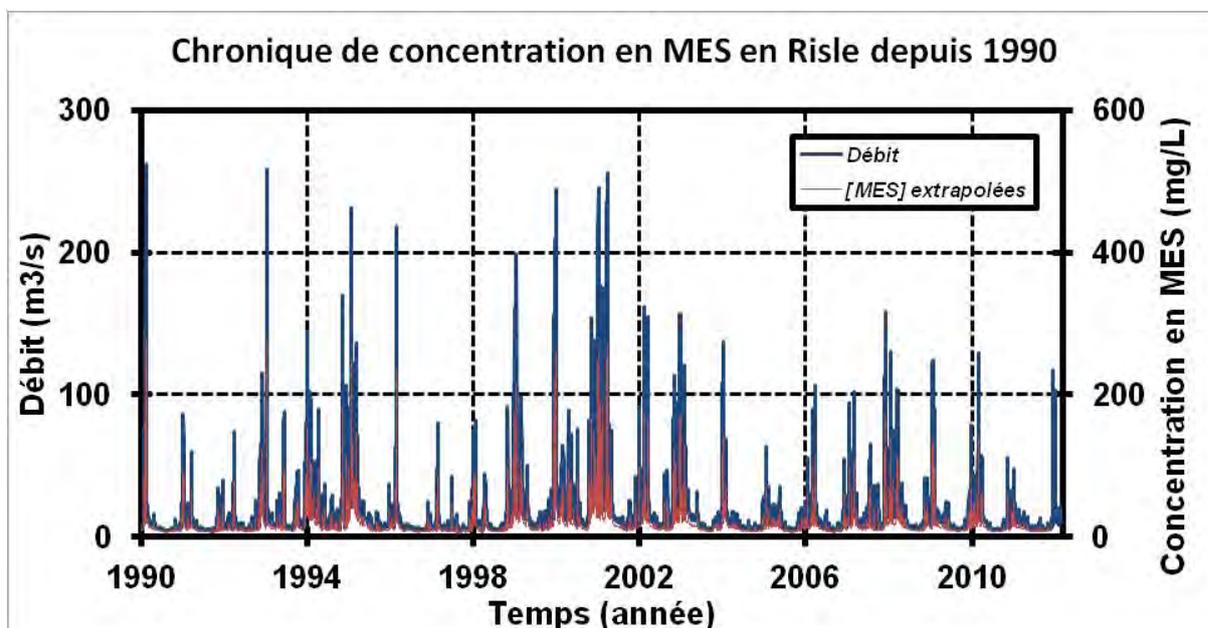


Figure 17 : Modélisation des concentrations en MES en Risle à partir de la corrélation entre les débits liquides et les débits solides

Cette chronique permet l'extraction de flux annuel en Risle (Tab. 2). Les volumes exportés les plus importants sont rencontrés en période de crues de forte intensité. Ces années coïncident avec les années où le flux annuel de MES est le maximum en Seine (e.g. l'année hydrologique 2000-2001). La contribution de la Risle peut atteindre 6 % des apports en MES à Poses, la majeure partie de ces apports étant réalisée en période de crue à hauteur de 80 %.

Période*	Flux calculé en Risle	Flux calculé en Seine	Flux mesuré en Seine**	% Contribution de la Risle
1996-1997	4 200	430 000	518 000	0,8
1997-1998	7 900	525 000	503 000	1,6
1998-1999	29 000	923 000	887 000	3,3
1999-2000	50 000	1 202 000	1 077 000	4,6
2000-2001	77 000	2 511 738	1 297 648	5,9
2001-2002	17 000	1 184 000	1 289 000	1,3
2002-2003	30 000	780 000	731 000	4,1

Tableau 2 : Flux annuels en tonnes de MES par an en Risle et contribution par rapport aux apports particuliers de la Risle

*Flux annuel calculé du 01/09 au 31/08

**Les données manquantes ont été extrapolées

L'aval de la Risle maritime, une dynamique contrôlée par la marée

Les mesures de turbidité en Risle montrent l'influence des apports liquides, avec des concentrations en MES faibles en période de crue (de l'ordre du mg/L) et des valeurs beaucoup plus importantes en période d'étiage avec des concentrations pouvant atteindre 6 g.L^{-1} . Durant la période 2011/2012, la période de crue n'a concerné que la période décembre/janvier (Figure 18a et c). Les concentrations en MES ne sont pas comparables aux valeurs rencontrées à l'amont, qui ne dépassent pas les 300 mg.L^{-1} même en période de crue. Cette masse turbide enregistrée est à mettre en relation avec la présence du bouchon vaseux à proximité de la confluence entre la Risle et la Seine. L'augmentation de la turbidité lors du flot est révélatrice de l'empreinte d'une partie du bouchon vaseux dans la Risle (Fig. 18b). A l'inverse, lors du jusant, la Risle expulse cette portion du bouchon vaseux. Les fortes valeurs de concentration en MES apparaissent en périodes de vives-eaux, la pénétration du bouchon vaseux vers l'amont étant plus importante, le piégeage en Risle l'est également. A l'inverse, en période de morte-eau, le déplacement du bouchon vaseux n'est pas assez conséquent pour permettre une pénétration en Risle, d'où des turbidités faibles. Il est possible d'expliquer ainsi les impacts de la crue, avec le débit élevé de la Risle qui empêche cette pénétration du bouchon vaseux dans la rivière, tout en favorisant l'exportation du matériel sédimentaire.

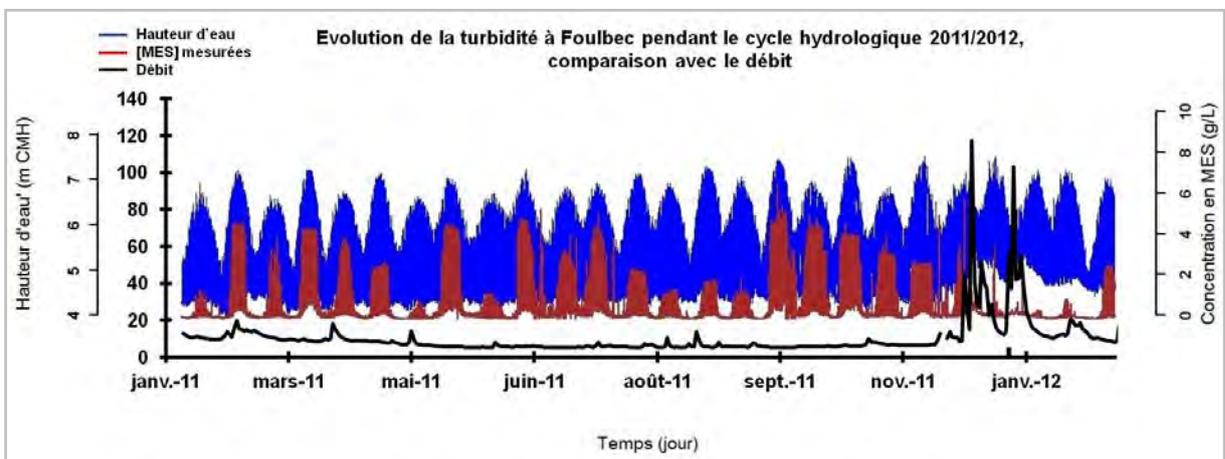


Figure 18a : Contrôle saisonnier de la turbidité en Risle

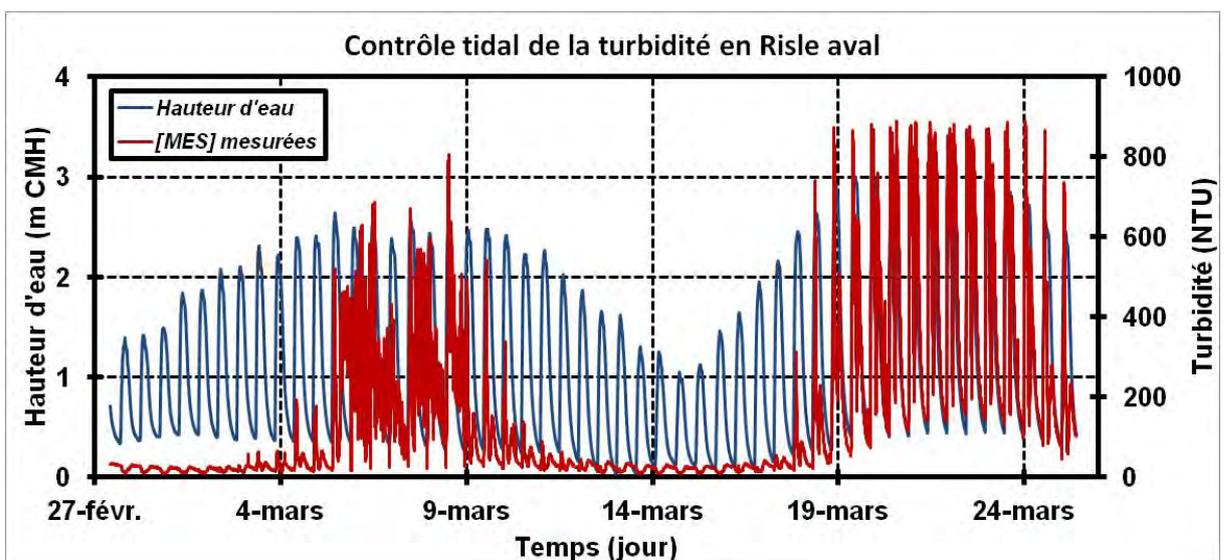


Figure 18b : Contrôle tidal de la turbidité dans le secteur aval de la Risle maritime (pour un débit moyen en Seine de $400 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)

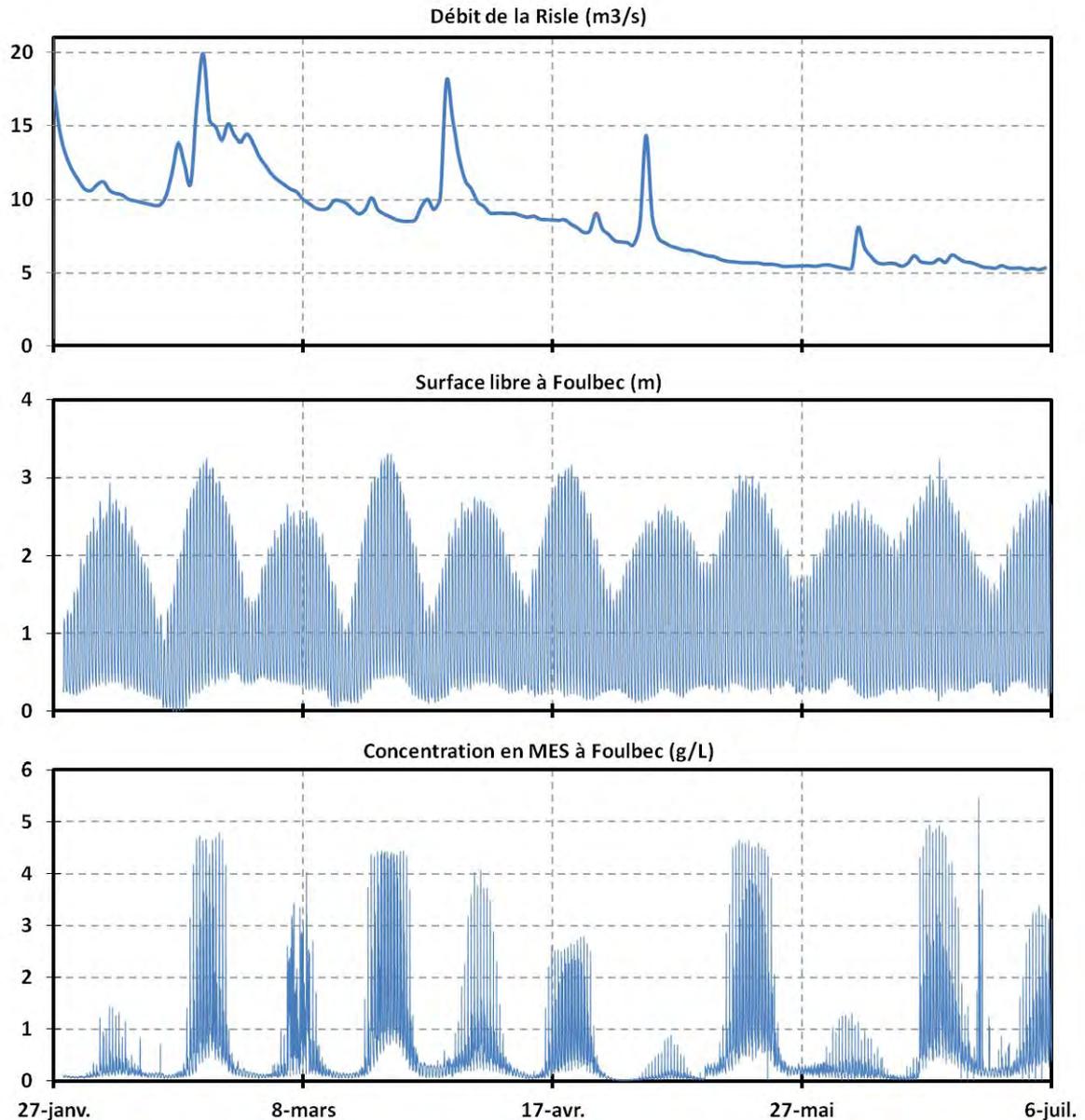
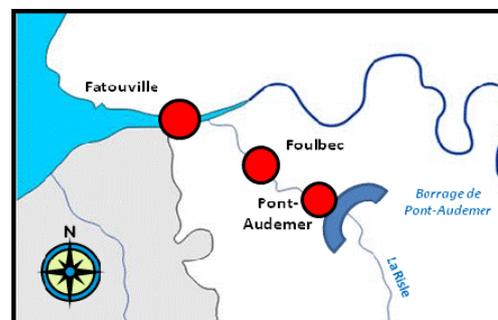


Figure 18c : zoom de la figure 18a, montrant la relation entre resuspensions en Risle (mesures à Foulbec) et amplitude de la marée

Dans la suite seront décrites des mesures de turbidité nouvellement acquises dans le cadre du projet MODEL. Il peut être intéressant de comparer les mesures effectuées dans la Risle à Foulbec (7 km en amont de la confluence avec la Seine) et celles effectuées simultanément à Fatouville (§ 3.2) en rive sud de la Seine, 4 km en aval de la confluence de la Risle. C'est l'objet des figures 19 a, b et c, en situation de décrue (débit de $1500 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ en janvier, $500 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ vers le 20 février 2011).



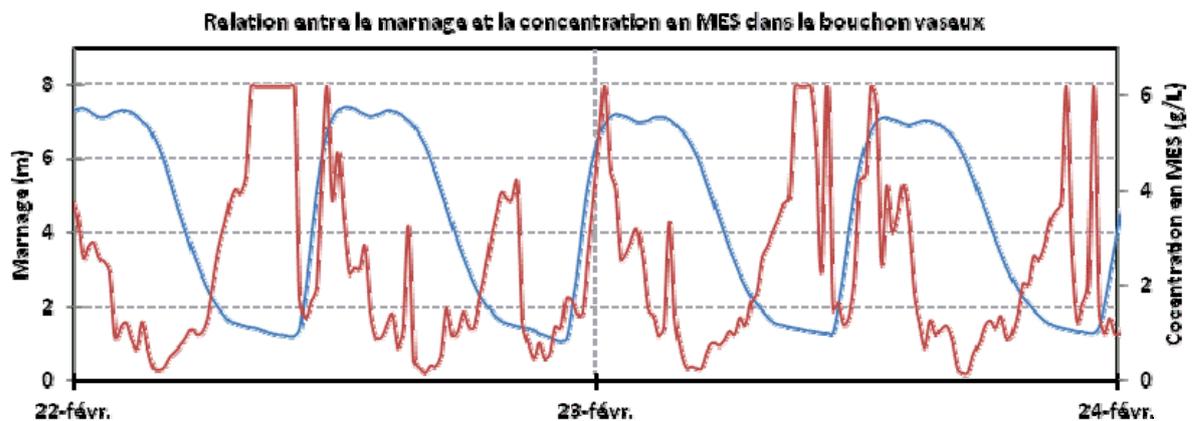
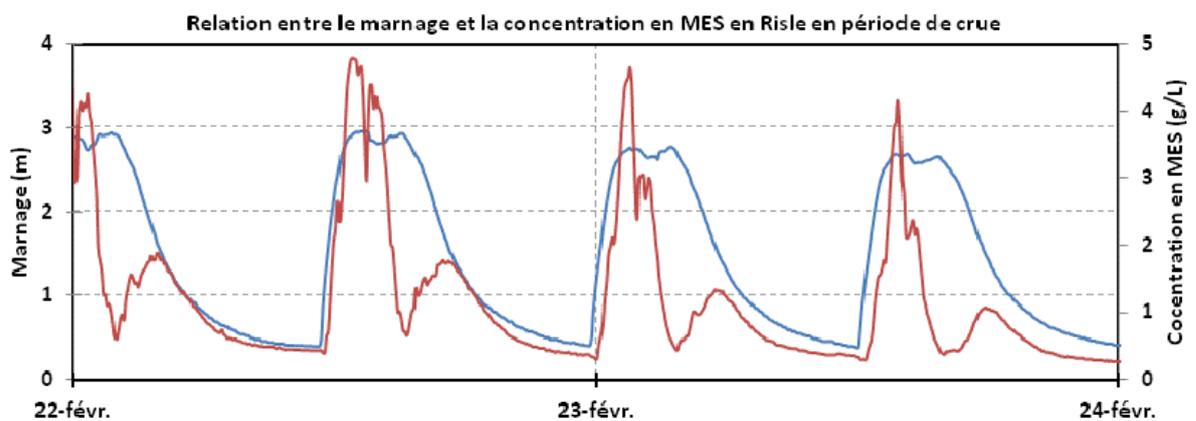
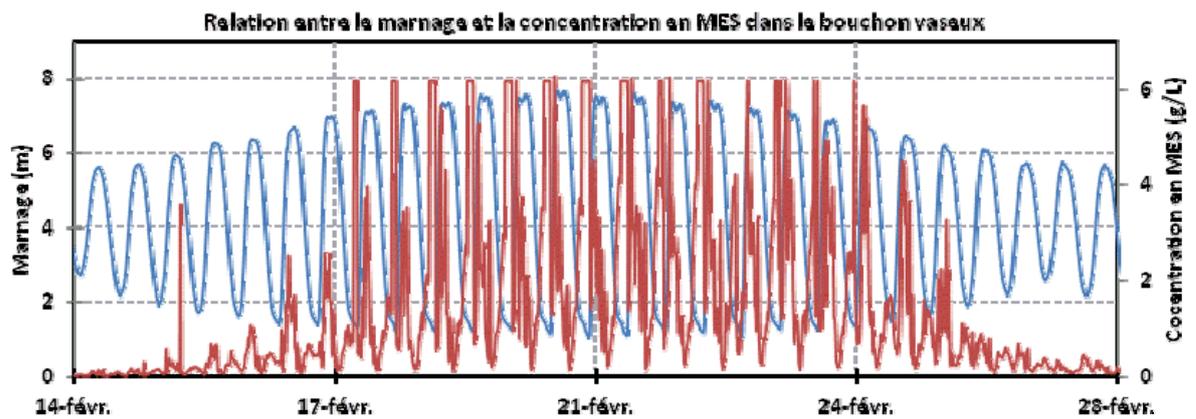
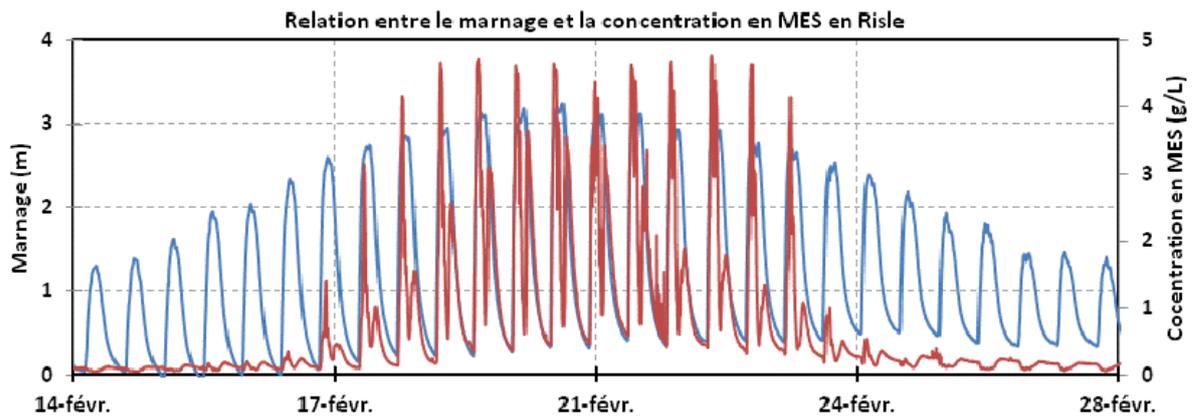


Figure 19a : comparaison entre marée et MES mesurées simultanément à Foulbec (dans la Risle, 7 km en amont de la confluence avec la Seine) et à Fatouville (en Seine, 4 km en aval de la confluence)

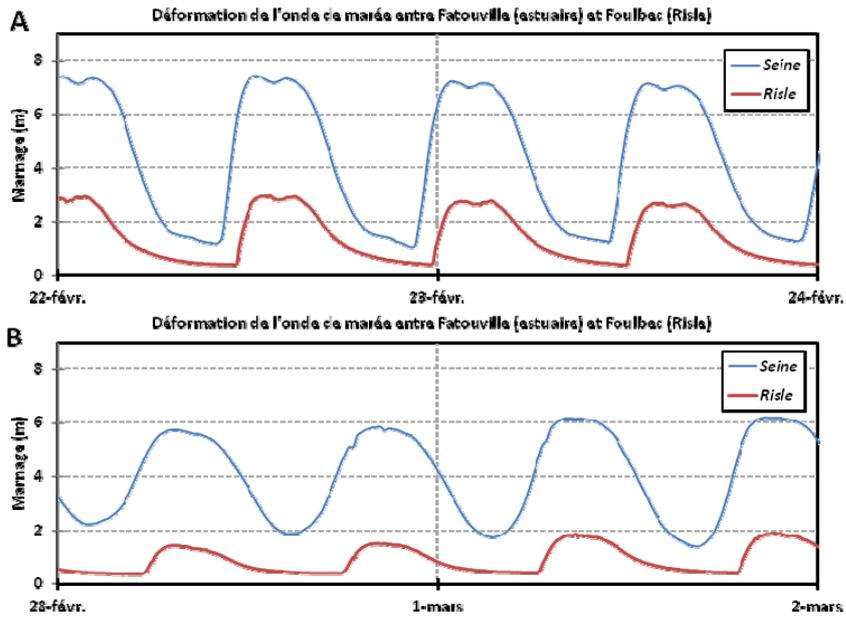


Figure 19 b : comparaison entre marée et MES mesurées simultanément à Foulbec (dans la Risle, 7 km en amont de la confluence avec la Seine) et à Fatouville (en Seine, 4 km en aval de la confluence), en vive eau (en haut) et en morte eau (en bas).

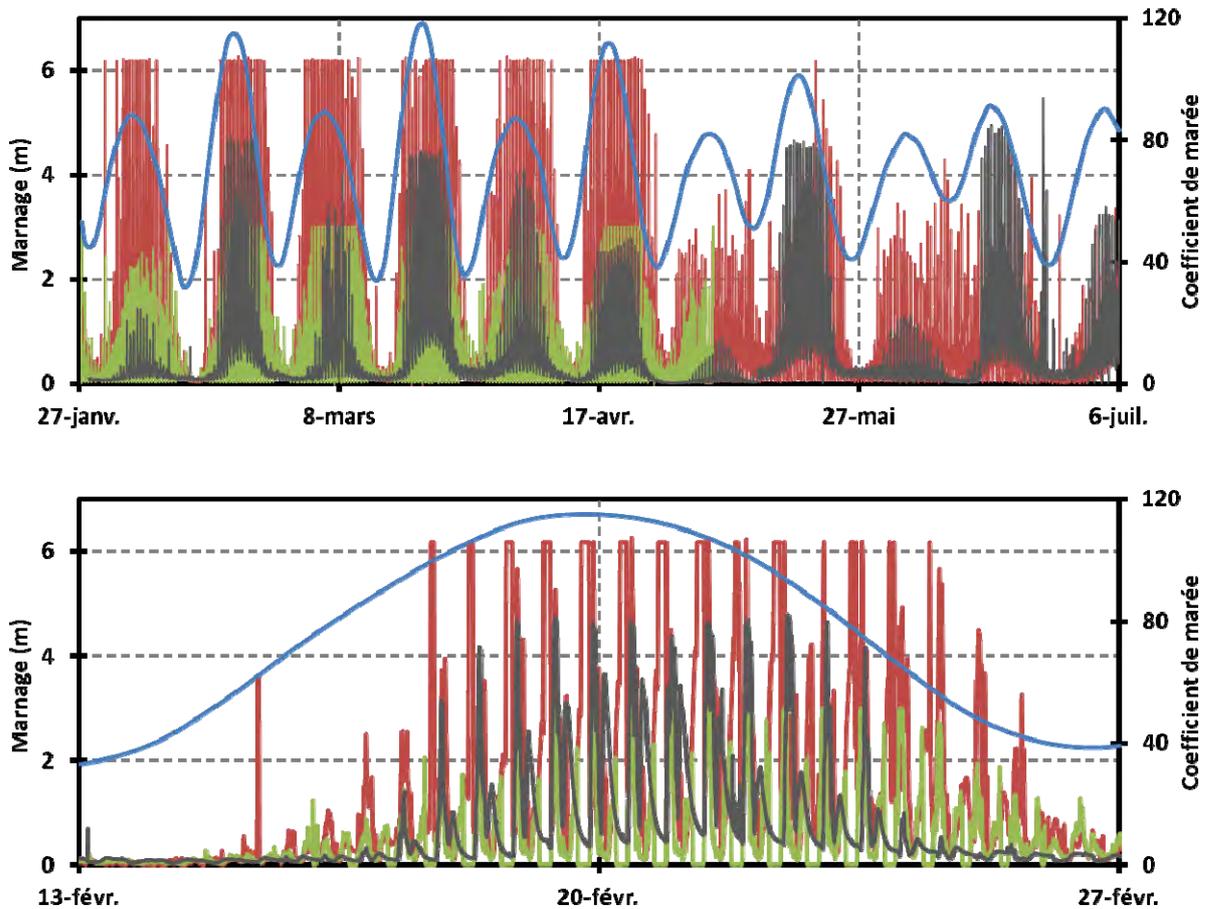


Figure 19 c : évolution comparée de la turbidité dans la Risle à Foulbec (noir) et en Seine à Fatouville (vert : en surface, rouge près du fond); en bleu : coefficient de marée.

On observe que la marée (Fig. 19 b) est à peu près en phase à pleine mer (une onde se propageant par 12 m d'eau mettrait 15 minutes à parcourir la distance), mais qu'à basse mer la marée en Risle est très en retard, du fait des faibles hauteurs d'eau. On note aussi que la courbe de marée reste très asymétrique en morte eau dans la Risle (le point est "au milieu" de l'estuaire), alors qu'elle l'est moins en Seine (en ce point très en aval).

Les concentrations en MES sont du même ordre de grandeur à Fatouville et dans la Risle. Les pics de flot sont presque synchrones, et il est difficile de faire la part entre l'advection éventuelle d'un maximum de turbidité lié au bouchon vaseux et la resuspension locale, qui dans les deux cas est importante compte tenu de l'importance des courants. En jusant, les évolutions se distinguent bien (fig. 19a). Alors que dans la Risle un maximum de turbidité se produit à mi-jusant, correspondant sans doute à un maximum de vitesse et donc à une resuspension de sédiments fluides déposés lors de la longue étale de pleine mer, à Fatouville le maximum apparaît plus tard en fin de jusant, et correspondrait à l'advection vers l'aval du bouchon vaseux de la Seine (voir § 3.3). Compte tenu de la configuration des courants, le transport vers l'aval en jusant du bouchon vaseux de la Seine ne peut concerner la Risle, par contre, en flot, la remontée du bouchon vaseux est susceptible d'envahir la Risle, en lui apportant une forte charge en suspension. Une question à laquelle on s'attachera à répondre à l'aide du modèle hydrosédimentaire validé est d'évaluer la part de MES dans la Risle en provenance du bouchon vaseux de la Seine, à comparer aux resuspensions locales qui de toute façon génèrent un maximum de turbidité, comme dans tous les estuaires macrotidaux de faible longueur (exemple des rias bretonnes). En même temps, ces resuspensions locales se produisent à un taux qui dépend de la quantité de vase piégée dans le système, et donc ne sont pas indépendantes d'un éventuel apport par le bouchon vaseux de la Seine.

Reprenant les conclusions de l'étude du comportement hydro-sédimentaire de la Risle réalisée dans le cadre du projet FLASH, on peut tenter d'établir un bilan des échanges de sédiments fins entre la Seine et l'estuaire de la Risle. Pendant la période d'étude, (2009-2012), les apports solides de l'amont ont été relativement faibles (5700 tonnes par an), en lien avec des années hydrologiques de faible débit moyen. Des érosions de berges vaseuses ont été observées au cours du cycle 2011/2012, et estimées à 10 000 tonnes par an. Il y aurait donc un apport de la Risle à la Seine de l'ordre de 15000 tonnes pour cette année là, à mettre en regard de la masse turbide mobile contenue dans l'estuaire de la Risle en vive eau estimée à 25 000 tonnes. Il reste cependant à évaluer pour cette masse turbide en suspension la part provenant du bouchon vaseux de la Seine et celle liée à des remises en suspension dans l'estuaire de la Risle. Une étude comparative des concentrations observées dans la Risle pour des amplitudes de marée équivalente mais des débits de Seine très contrastés, se traduisant par un positionnement différent du bouchon vaseux de la Seine par rapport à la confluence de la Risle, permettra peut-être de le préciser. De façon complémentaire, la modélisation mathématique des transports sédimentaires pourra aussi apporter des éléments de réponse, après validation par ces mesures nouvellement réalisées.

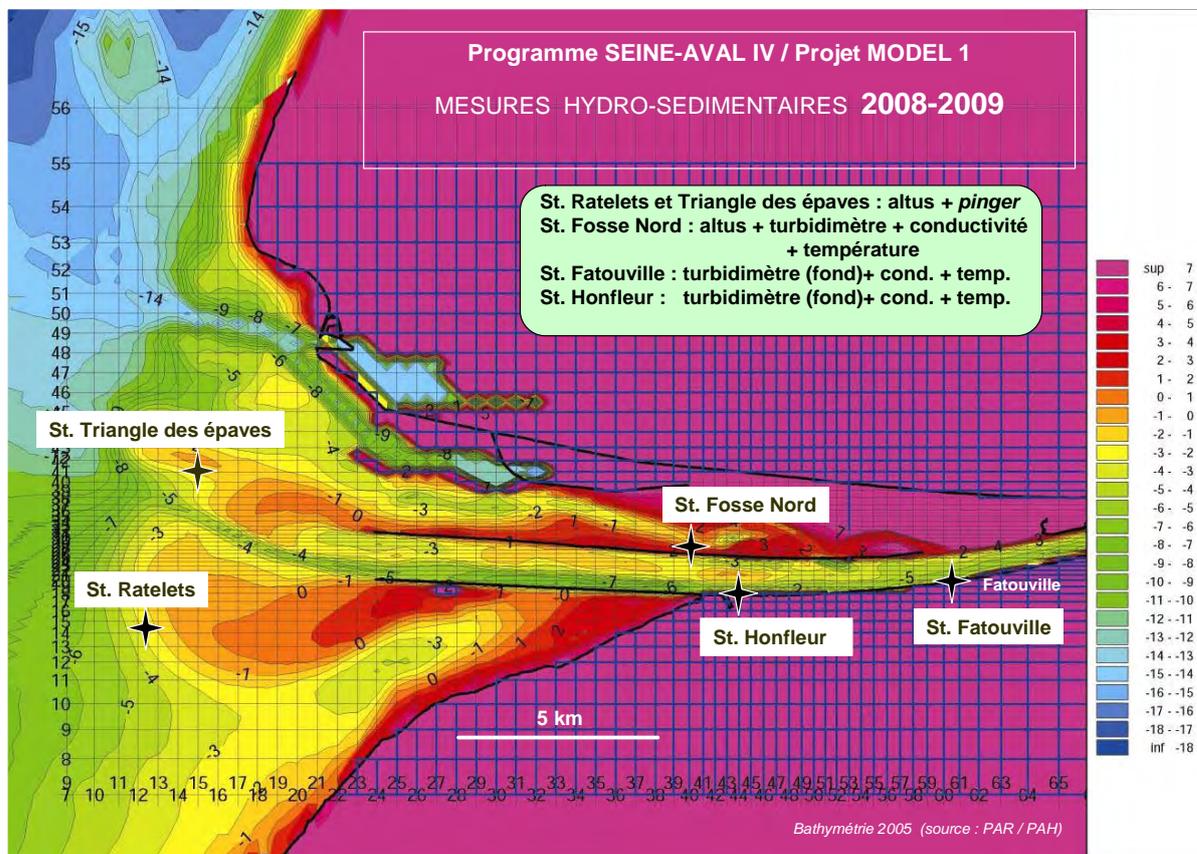
En synthèse de cette première partie sur l'analyse des données de turbidité dans l'estuaire amont, on peut retenir les éléments suivants:

- a) En situation d'étiage ou de débit moyen, la relation entre le débit de la Seine et la charge en MES arrivant à l'amont (Poses) a pu être précisée. Par contre en crue la relation est encore largement améliorable, en essayant de mieux modéliser l'hysteresis antérieurement mis en évidence. Une quantification des apports solides de la Seine est proposée, variant de 500000 t à 1.3 Mt, avec une erreur de l'estimation issue de la relation paramétrique de l'ordre de 5-10% pour les années sèches, mais s'élevant à 100% pour les années exceptionnellement humides (2001).
- b) Dans l'estuaire amont, et jusqu'en aval de Rouen les concentrations sont supérieures en crue, mais diminuent par rapport à celles mesurées à Poses, révélant un piégeage dans le secteur des îles. Une partie de ces sédiments piégés peut être reprise en étiage.
- c) Les turbidités à Caudebec sont généralement très proches de celles mesurées à Rouen, sauf par condition d'étiage prononcé en vive eau, où la remontée du bouchon vaseux peut générer des concentrations temporairement élevées.
- d) En couplage avec le projet Seine-Aval FLASH, des observations fines de propagation de la marée et de turbidité ont été réalisées dans l'estuaire de la Risle. Les charges en suspension sont du même ordre qu'en Seine au cours du flot. La masse turbide mobile contenue dans l'estuaire de la Risle est estimée à 25000 tonnes, à comparer à un apport amont de 5700 t par an et à des érosions de berges vaseuses estimées à 10000 t au cours du cycle 2011/2012. L'apport de la Risle à l'estuaire de la Seine pourrait être de l'ordre de 15000 t pour cette année-là, mais l'alimentation du système Risle par le bouchon vaseux de la Seine reste encore à quantifier, ce qui sera plus aisé en s'aidant de la modélisation hydrosédimentaire.

3- Mesures d'hydrologie et de turbidité : campagnes MODEL

Les mesures de turbidité et de paramètres hydrologiques effectués pour le projet MODEL se sont déroulées en deux campagnes, le plus souvent possible conjointement aux campagnes en mer réalisées pour le projet COLMATAGE (e.g. mise en place et relève d'ALTUS pour mesurer les variations de niveau de fond et les vagues). Le déroulé de ces deux campagnes est d'abord décrit, puis les mesures sont analysées à la lumière des forçages hydro-météo qui sont préalablement rappelés.

3.1 Campagne MODEL1 2008-2009



Stations	Latitude (WGS 84)	Longitude (WGS 84)
Ratelets	49° 25', 280 N	00° 01', 850 E
Triangle des épaves	49° 27', 250 N	00° 02', 850 E
Fosse Nord	49° 26', 395 N	00° 12', 925 E
Marel Honfleur	49° 25', 690 N	00° 14', 000 E
Fatouville	49° 25', 975 N	00° 19', 000 E

Figure 20 : Emplacement des stations de mesure 2008 – 2009 et types de sondes selon ces stations

Pour le choix des points de mesures des turbidités, deux objectifs précis étaient poursuivis : réactualiser les connaissances sur le positionnement du bouchon vaseux dans le chenal de navigation, et comparer les concentrations dans ce chenal à celles de la fosse Nord, très peu investiguée alors que certaines versions du modèle (selon paramétrage) y simulaient des concentrations élevées. Des sondes avec capteur de turbidité ont été déployées à proximité du fond :

- à Honfleur (en remplacement du système MAREL arrêté à cause de l'inaccessibilité de la passerelle) (Fig. 21) et à Fatouville (Fig. 22), en amont du pont de Normandie rive gauche : cet appontement du GPMR est équipé d'une passerelle très pratique, offrant la possibilité de mesurer à toute heure marée) en ce qui concerne le chenal de navigation,
- en aval de l'épi plongeant, au nord de la Digue Basse Nord, pour la fosse Nord, où un altimètre ALTUS, mesurant niveau de sédiment et vagues était également placé,
- en outre, la bouée Marel de la Carrosse a été rééquipée de son système de mesure en subsurface.

Les stations de mesures des érosions/dépôts étaient quant à elles positionnées sur le versant ouest des bancs d'embouchure, en des points « protégés » par un balisage officiel mais suffisamment exposés pour illustrer la réponse du système au forçage des vagues : il s'agit des stations Ratelets et Triangle des épaves, équipées dans le cadre du projet COLMATAGE.



Figure 21a : positionnement du turbidimètre de fond à Honfleur, à proximité du système « Marel »



Figure 22 : emplacement de la sonde multiparamètres (turbidité, température, conductivité) à Fatouville.

Déroulé de la campagne

Les mesures devaient durer 5 mois et consistaient à acquérir des séries continues de turbidité afin de balayer diverses conditions de marée, de vent et de vagues, et si possible de débit fluvial (Tableau 3). En chaque station, la conductivité, la température et la pression (signal de marée) étaient enregistrées. En fait, les mesures de Fatouville et Fosse Nord n'ont duré que 2 mois en raison d'un dysfonctionnement des sondes.

La représentativité de ces mesures localisées a été vérifiée au moyen de campagnes courtes (cycles de marée de 12 h) sur petites embarcations et au cours desquelles des profils verticaux de turbidité étaient mesurés au voisinage des sondes turbidimétriques en place (Tableau 4). Des prélèvements d'eau à la bouteille Niskin, visant à couvrir la gamme des turbidités, complétaient le dispositif à des fins de calibration.

Lieu	Dates		Type de sonde	Programmation des sondes	Distance capteur / sédiment	Problèmes particuliers
	Du	Au				
Ratelets	08/10/08	02/04/09	ALTUS	Vagues : bursts de 260 sec à 2 Hz chaque 20 min Altimétrie : 4 mesures / 20 min	25 cm	
	07/05/09	24/06/09	ALTUS			
Triangle des Epaves	09/10/08	03/04/09	ALTUS	Vagues : bursts de 260 sec à 2 Hz chaque 20 min Altimétrie : 4 mesures / 20 min	26.5 cm	Données erronées à compter du 15/02/09 (station chalutée)
Fosse Nord	19/09/08	12/02/09	Turbidimètre (fond) TROLL 9500	1 mesure / 2 min	37 cm	Problème sur le capteur à compter du 18/11/2008
Fosse Nord	19/09/08	24/06/09	ALTUS	Vagues : bursts de 260 sec à 2 Hz chaque 20 min Altimétrie : 4 mesures / 20 min	30 cm	Données erronées du 14/01/09 au 12/02/09 (station déséquilibrée)
Honfleur	18/09/08	12/02/09	Turbidimètre (fond) TROLL 9500	1 mesure / 2 min	50 cm	
Fatouville	17/09/08	09/11/08	Turbidimètre (fond) Hydrolab - OTT MS 5	1 mesure / 15 min	De l'ordre de 3 m	Batterie défectueuse à compter du 10/11/2008
Marel La Carosse			Sonde turbidité température			

Tableau 3 : Mesures effectuées par site, type de sondes et dates des enregistrements de la campagne MODEL1.

Lieu	Date	Embarcation	Débit fluvial	Coef.marée	Travaux effectués
Chenal/ Face MAREL- Honfleur	30/10/2008	« Maïmiti »	320 m ³ /s	85	Profils verticaux avec sonde multi-paramètres + prélèvements d'eau sur cycle de 12 h
Fosse Nord	30/10/2008	« Flipper »	320 m ³ /s	85	Profils verticaux avec sonde multi-paramètres + prélèvements d'eau sur cycle de 12 h
Fatouville	29/01/2009	Ponton GPM Rouen	770 m ³ /s	85	Profils verticaux avec sonde multi-paramètres + prélèvements d'eau sur 8 h
Chenal/ Face MAREL- Honfleur	30/01/2009	« Maïmiti »	700 m ³ /s	83	Profils verticaux avec sonde multi-paramètres + prélèvements d'eau sur cycle de 12 h
Fosse Nord	30/01/2009	« L'Eclat »	700 m ³ /s	83	Profils verticaux avec sonde multi-paramètres + prélèvements d'eau sur cycle de 12 h

Tableau 4: Missions de validation des turbidités et calibration des sondes pour la campagne MODEL1

3.2 Campagne MODEL2 2010-2011

A la suite de la campagne MODEL1, il a été proposé de renouveler des mesures en continu, avec les objectifs suivants : (1) essayer de cibler un épisode de crue, (2) acquérir des mesures simultanées en surface et au fond, car la comparaison entre les mesures acquises pendant plusieurs années à Honfleur au moyen d'une crépine asservie à un flotteur, donc en subsurface, et les mesures de fond de la campagne MODEL1 acquises 2 ans plus tard, s'est avérée difficile et (3) compléter les observations par des mesures dans la fosse sud, totalement inexistantes. Finalement, les turbidités ont été enregistrées en 2 stations, Fatouville et Ratier SE (Fig. 23 ci-dessous), tandis que des stations de mesures ALTUS complémentaires étaient mises en place au Ratier SE et aux Ratelets, pour décrire les conditions de forçage vagues et la réponse locale du fond (érosions/dépôts). Ces mesures ALTUS sont décrites dans le rapport COLMATAGE, et seulement la synthèse en est reproduite dans le présent rapport.

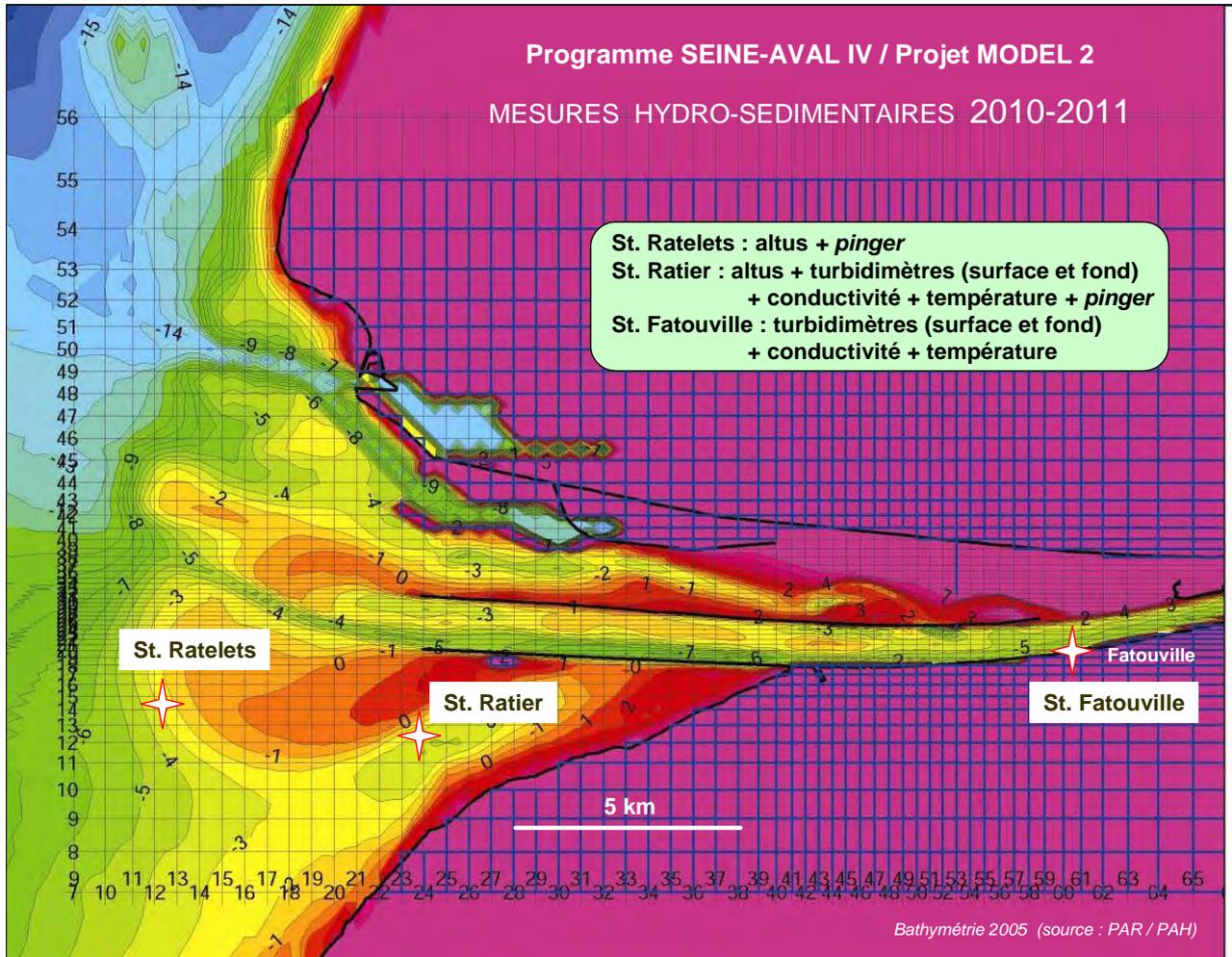


Fig. 25 : Emplacement des stations de mesure 2010 – 2011 et types de sondes selon ces stations

Positions des stations de mesure 2010-2011 :

Stations	Latitude (WGS 84)	Longitude (WGS 84)
Ratelets	49° 25', 263 N	00° 01', 944 E
Ratier	49° 24', 836 N	00° 06', 514 E
Fatouville	49° 25', 975 N	00° 19', 000 E

La mesure de surface au Ratier est obtenue à l'aide d'une sonde fixée sur la queue de la bouée de balisage (Fig. 24a). Le système de fixation, original, permet à un plongeur de démonter la sonde pour une récupération des données (ou un remplacement de piles) sans nécessité de relever la bouée (Fig. 24b).

La mesure de surface sur le site de Fatouville à partir de la passerelle est elle aussi originale : la sonde est solidaire d'un flotteur qui coulisse le long d'un câble fortement lesté suspendu à la passerelle (Fig. 25).



Fig. 24a : Bouée de balisage de la station du ratier



Fig. 24b : Système de montage/démontage de la sonde turbidimétrique sur la queue de la bouée de balisage

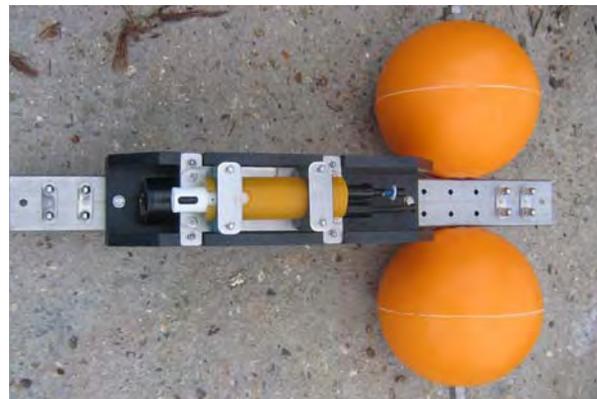


Fig. 25 : Mise à l'eau du turbidimètre de surface, sur système de va-et-vient, à la station Fatouville. Le zoom en haut à droite montre le turbidimètre WetLabs, couplé à une sonde Salinité, Température et Pression. En bas à droite, le système au moment de l'étape de pleine mer.

Déroulé des opérations

Lieu	Dates		Type de sonde	Programmation des sondes	Hauteur capteur / sédiment	Problèmes particuliers
	Du	Au				
Ratelets	08/09/10	11/05/11	ALTUS	Vagues : bursts de 280 sec à 2 Hz chaque 35 min ; Altimétrie : 4 mesures / 35 min	33 cm	Données erronées à compter du : 02/04/2011 (fouling trop important sur le transducteur)
Ratier	09/10/10	11/05/11	ALTUS	Vagues : bursts de 140 sec à 2 Hz chaque 38 min ; Altimétrie : 2 mesures / 38 min	33 cm	Données erronées à compter du : 02/04/2011 (fouling trop important sur le transducteur)
Ratier [1^{ère} période]	09/09/10 09/09/10	09/12/10 09/12/10	Turbidimètre (Fond) TROLL 9500 Turbidimètre (Surf- 0.50m) TROLL 9500	1 mesure / 2 min 1 mesure / 2 min	35 cm	Mesures erronées du 05 au 22/10/10 et du 26/10 au 09/12/2010 (Pb d'alimentation)
Ratier [2^{ème} période]	26/01/11 26/01/11	11/05/11 11/05/11	Turbidimètre (Fond) TROLL 9500 Turbidimètre (Surf-0.50m) TROLL 9500	1 mesure / 2 min 1 mesure / 2 min	35 cm	Mesures erronées à compter du 06/02/11
Fatouville [1^{ère} période]	09/09/10 09/09/10	08/12/10 10/12/10	Turbidimètre (Fond) MS 5 Hydrolab Turbidimètre (Surface) WetLabs	1 mesure / 20 min [+ sonde STPS 1mes/min] 2 mesures / 5 min [+ sonde STPS 1mes/min]	60 cm	- Pas de données après relève du 20/10/10 (entrée d'eau dans la sonde) - Plus de données après le 07/11/10 (support coulissant de sondes vandalisé)
Fatouville [2^{ème} période]	27/01/11 27/01/11	05/07/11 05/07/11	Turbidimètre (Fond) MS 5 Hydrolab Turbidimètre (Surface) WetLabs	1 mesure / 20 min [+ sonde STPS 1mes/min] 2 mesures / 5 min [+ sonde STPS 1mes/min]	60 cm	Relève finale des 2 mouillages le 05/07/11

Tableau 5 : Mesures effectuées (site, type de sondes et dates des enregistrements) pour la campagne MODEL2

Les mesures ont été effectuées en deux temps pour permettre l'entretien intermédiaire des sondes, et tenter de couvrir une meilleure distribution des débits de la Seine : soit un premier leg en automne, et un second en 2^{ème} partie d'hiver, comptant sur un débit de crue fréquent à cette période. Hélas, la crue est intervenue cette année- là exactement au moment de la période de relève des sondes, et seule la descente de crue a fait l'objet de mesures.

De plus, le turbidimètre de surface à Fatouville a été vandalisé le 07/11/2010, mais le constat n'en n'a été fait que lors de la relève du 08/12/2010.

Une mission de calibration a été organisée à Fatouville depuis la passerelle du GPM-Rouen, le 7 octobre 2010 (débit fluvial de 322 m³.s⁻¹ et coefficient de marée de 103-108). 35 prélèvements surface et fond ont été effectués pour détermination des concentrations de MES en poids sec (Fig. 26), et parallèlement 16 profils au moyen d'une sonde multiparamètres (T,P,S et turbidité) ont été réalisés sur cette période. Cependant, seuls les premiers profils sont exploitables, la sonde ayant eu un problème d'alimentation par la suite.

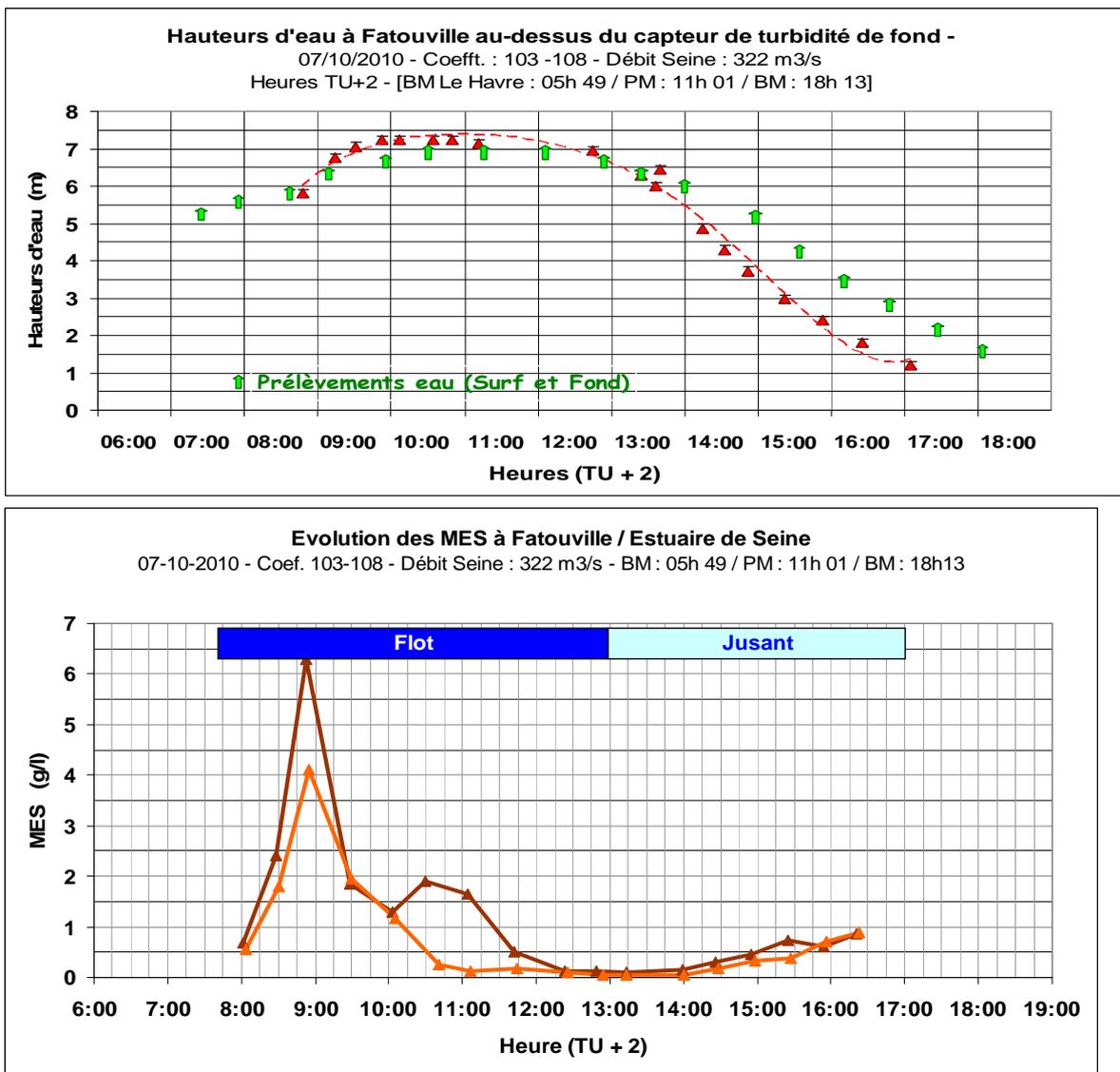


Fig. 26 : Mesures de calibration des sondes turbidimétriques – Fatouville (07/10/2010 – VE). En haut : chronique des prélèvements de surface et de fond selon la hauteur d'eau. En bas : évolution des MES en surface (courbe orange) et au fond (en brun).

D'autres résultats de campagnes de calibration et de mesures de représentativité des données locales enregistrées par les sondes sont fournis en annexe A1.1. Le bilan de ces missions de calibration est mitigé, car nous avons subi un certain nombre de dysfonctionnement de sondes, et les prélèvements ponctuels n'ont souvent pas permis de couvrir la (très large) gamme de turbidité rencontrée, comme on le verra plus loin. Néanmoins, nous avons pu adopter les calibrations suivantes :

- pour la sonde Wetlabs (à Fatouville Surface) : $MES (g/l) = 0.003 NTU_{constructeur}$
- pour la sonde Hydrolab MS5 (à Fatouville Fond) : $MES (g/l) = 0.0021 NTU_{constructeur}$
- pour les sondes Troll (fosse Nord et Honfleur fond) : $MES (g/l) = 0.002 NTU_{constructeur}$

Par contre, pour les sondes de La Carosse-surface et de Ratier-surface, nous ne disposons pas de données suffisantes pour calibrer en concentrations (g/l) de MES les mesures de turbidité (NTU). Enfin les mesures de fond effectuées à la station Ratier sont très chaotiques (plusieurs dysfonctionnements, et valeurs incertaines), ainsi nous avons préféré ne pas les considérer.

3.3 Présentation et analyse des résultats

La carte de la figure 27 permet de situer l'ensemble des points de mesure exploités dans ce chapitre, tandis que la figure 28 en reconstitue le planning, avec un rappel des conditions de débits de Seine rencontrés.

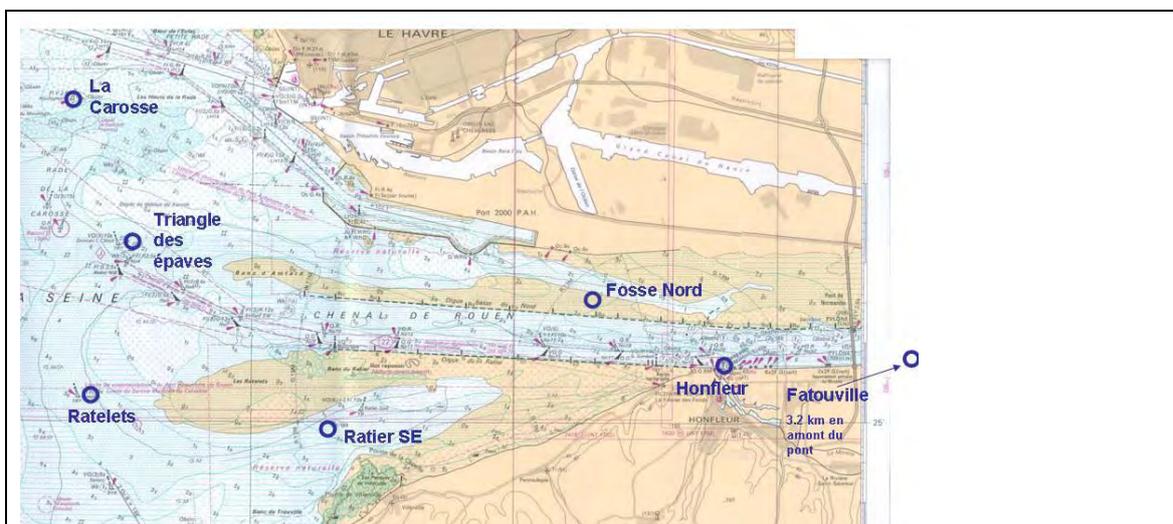


Figure 27 : Carte synthétique de positionnement des stations de mesures MODEL

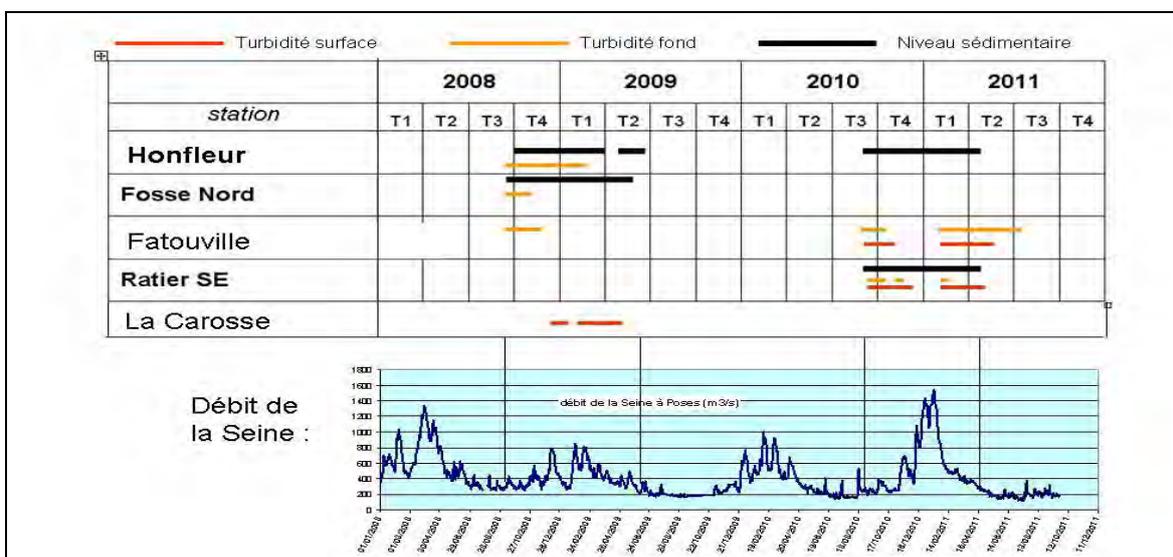


Figure 28 : Planning des mesures MODEL 1 & 2, et débit de la Seine à Poses.

S'agissant des débits, on observe une bonne variabilité de ceux-ci pendant les périodes de mesures, entre 250 et 800 m³.s⁻¹ de septembre 2008 à juin 2009, et entre 200 et 1500 m³.s⁻¹ en 2010-2011. En particulier la deuxième période de mesure a encadré une crue bien représentative de celles de la Seine. Malheureusement, les turbidimètres n'étaient pas en place au moment de la crue (au contraire des ALTUS), et finalement nous manquons encore de données sur le bouchon vaseux pendant la crue.

Conditions météorologiques

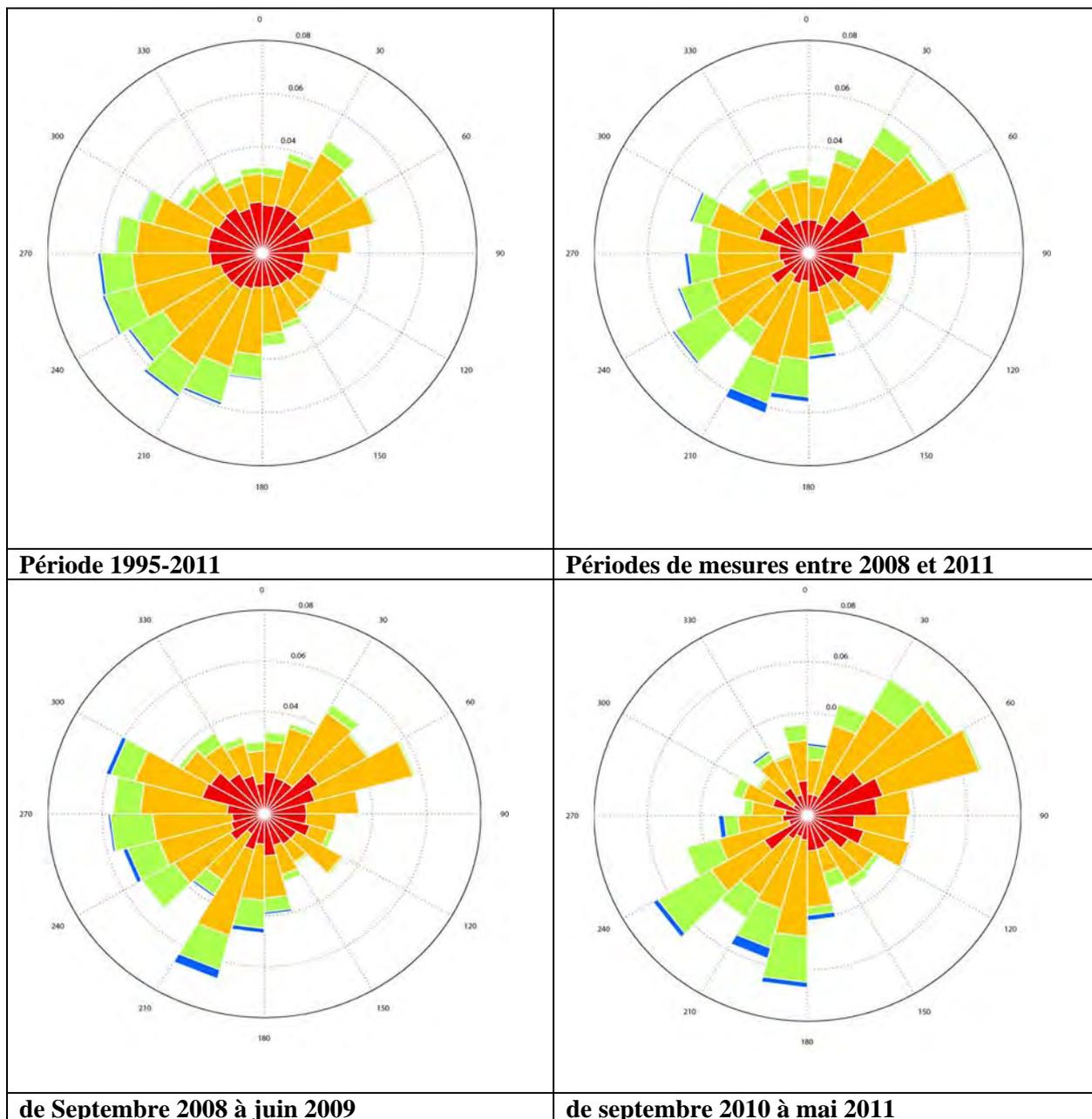


Figure 29 : Statistiques de vents en baie de Seine (49.5 °N, 0.0 °E) calculées à partir d'une simulation du modèle ARPEGE de Météo-France (résolution : 0.5°). Légende commune aux 4 roses : coordonnée radiale : probabilité ; rouge : vents entre 0 et 5 m/s, orange : vents entre 5 et 10 m/s, vert : vent entre 10 et 15 m/s ; bleu : vent entre 15 et 20 m/s

L'examen de la figure 29 permet d'évaluer la représentativité des périodes de mesures d'un point de vue météorologique. Quatre roses des vents ont été produites sur la base d'une information homogène, à savoir la simulation 4 fois par jour du vent au large de La Hève à l'aide du modèle météorologique Arpège de Météo-France, pour la période 1995-2011 (16 ans). La rose globale (Fig. 29a) fournit une image de la statistique des vents en baie de Seine, avec une dominance bien marquée du secteur SW à W, en particulier pour les vents forts. La figure 29b montre que pendant la période des mesures (de septembre 2008 à juin 2009 et de septembre 2010 à mai 2011) les statistiques de vent sont assez fidèles aux statistiques sur 16 ans. Cela reste vrai si l'on considère la seule période 2 (septembre 2010-mai 2011), mais l'est un peu moins pour la première période (septembre 2008 à juin 2009), au cours de laquelle les vents d'ouest sont dominants. Il est remarquable de constater la rareté des vents de nord et de sud-est.

Cet aperçu rapide des conditions météorologiques au cours de la période de mesure nous indique que les conditions environnementales rencontrées sont à peu près représentatives, et viennent donc renforcer l'analyse de la dynamique qui sera faite à partir des mesures disponibles. Ce commentaire, juste pour les données ALTUS et donc de vagues, serait à moduler pour les données de turbidité, car les effets météorologiques sont surtout sensibles aux stations Ratier et La Carosse, dont les durées de mesure sont moins longues.

Présentation des mesures

D'une manière générale, l'examen simultané des turbidités dans les différents sites n'apporte pas d'information pertinente, sauf pour les sites de Honfleur et Fatouville. Nous avons donc regroupé les données en 5 séries qui seront commentées séparément :

- turbidité à la station Fosse Nord (fond) en 2008-2009, simultanément au débit de la Seine, au vent, à l'amplitude des vagues, et au signal de marée
- turbidité à Honfleur et Fatouville (fond) et salinité à Fatouville (fond) en 2008-2009, simultanément au débit de la Seine et au signal de marée
- turbidité et salinité (surface et fond) à Fatouville en 2010-2011, simultanément au débit de la Seine et au signal de marée
- turbidité à La Carosse (surface) en 2009, simultanément au débit de la Seine, au vent, à l'amplitude des vagues aux Ratelets, ou à défaut à la station Fosse Nord, ainsi qu'au signal de marée
- turbidité au Ratier (surface) en 2010-2011, simultanément au débit de la Seine, au vent, à l'amplitude locale des vagues, et au signal de marée

L'ensemble des mesures est présenté en annexe 1, tandis que quelques zooms ou au contraire quelques séries globales sont reproduites ici, pour illustrer les analyses. Il est remarqué que les données de vent, issues de la simulation Arpège de Météo-France mentionnée plus haut, sont figurées par leur direction de provenance, de 0 à 360° (points bleus), et par leur intensité représentée par le carré de la vitesse du vent en m/s, considérée comme plus représentatif du « forçage » vent.

Le logiciel que nous avons utilisé pour les évolutions de paramètres en fonction du temps ne permettait pas de représenter simplement les dates de mesures. Les temps sont donc indiqués en jours, par rapport au 1^{er} septembre 2008 pour la première campagne et par rapport au 1^{er} septembre 2010 pour la seconde. La table suivante (non numérotée) permet de faire la correspondance entre jours écoulés depuis le 1er septembre et quelques dates significatives.

Date (à 0 h)	Nombre de jours depuis le 1^{er} septembre 2008	Nombre de jours depuis le 1^{er} septembre 2010
1 ^{er} octobre 2008	30	
1 ^{er} novembre 2008	61	
1 ^{er} décembre 2008	91	
1 ^{er} janvier 2009	122	
1 ^{er} février 2009	153	
1 ^{er} mars 2009	182	
1 ^{er} avril 2009	213	
1 ^{er} mai 2009	243	
1 ^{er} juin 2009	274	
1 ^{er} juillet 2009	304	
1 ^{er} octobre 2010		30
1 ^{er} novembre 2010		61
1 ^{er} décembre 2010		91
1 ^{er} janvier 2011		122
1 ^{er} février 2011		153
1 ^{er} mars 2011		181
1 ^{er} avril 2011		212
1 ^{er} mai 2011		242
1 ^{er} juin 2011		273
1 ^{er} juillet 2011		303

Correspondance entre nombre de jours depuis le 1^{er} septembre et jours calendaires.

Turbidité à la station Fosse Nord (fond) en 2008-2009

La figure 30 présente la quasi totalité des mesures de MES à la station Fosse Nord située en bas d'estran à proximité du chenal Nord, mesures détaillées dans l'annexe A1.2. Les concentrations sont élevées mais très variables au cours de la marée, et relativement corrélées à l'amplitude de

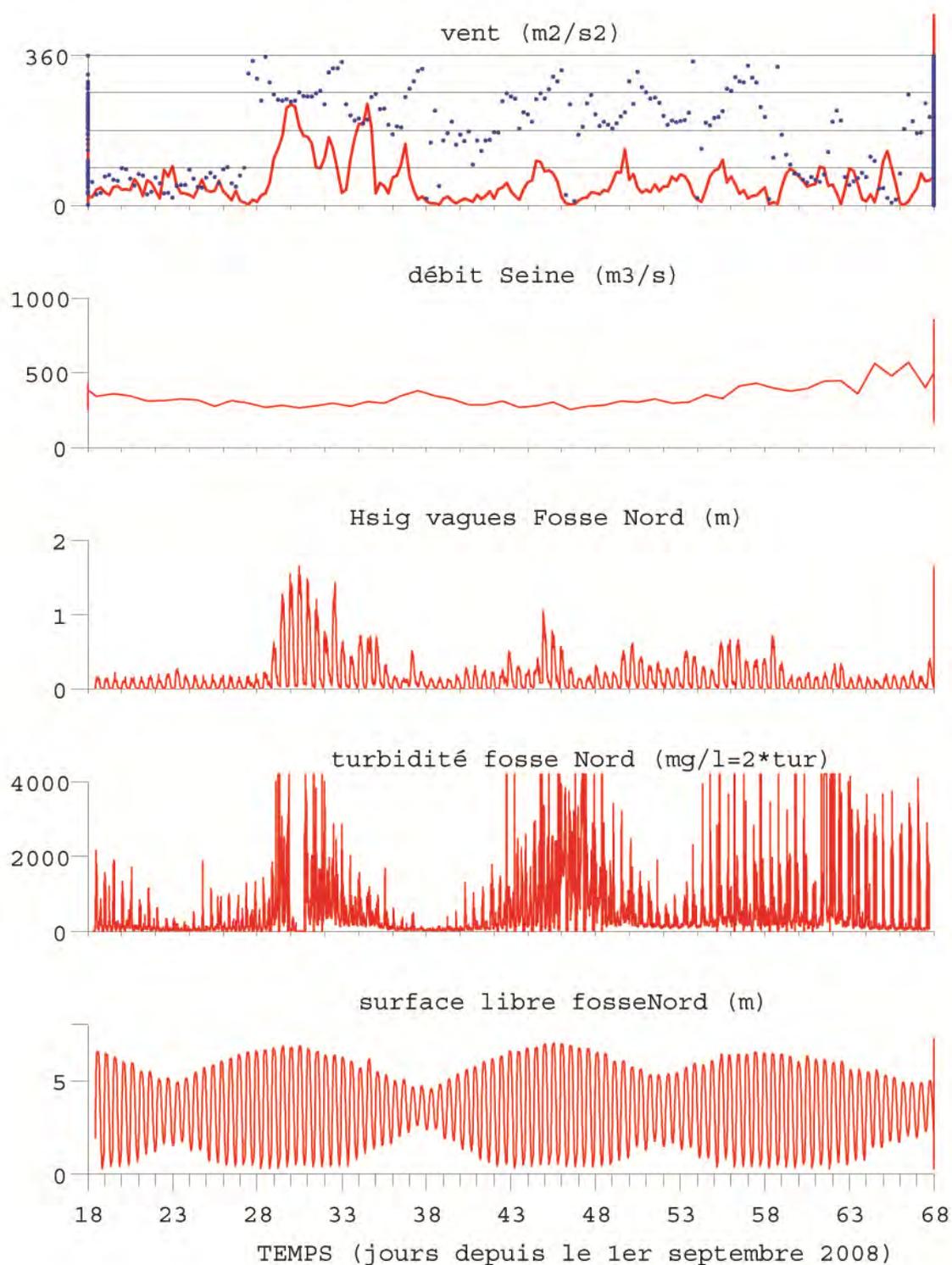


Figure 30 : Mesures de turbidité à la station Fosse Nord, entre le 19 septembre et le 6 novembre 2008.

la marée. Mais l'on voit clairement une influence des vagues, qui ont été importantes pendant la période de mesure, et en particulier en vive eau. La corrélation entre hauteur significative des vagues et pointes de vent lorsque ce dernier est de secteur ouest est notable. Cette première mesure de vagues (à notre connaissance) dans la fosse nord est d'ailleurs de grand intérêt : on observe que les hauteurs de vagues sont importantes (pour le projet COLMATAGE, nous avons rapporté que l'amortissement par rapport aux stations de mesures externes – Ratelets ou Triangle des épaves – était de l'ordre de 50-60%), et la donnée peut être valorisée pour une validation de modèle de propagation des vagues dans une configuration délicate (effets des digues submersibles).

L'évolution des MES au cours de la marée est mise en évidence sur la figure 31. Dans le cas sans vent/vague, les concentrations sont très faibles sauf pendant les pointes de jusant et surtout de flot, selon un schéma assez classique sur estran : les maxima de courant coïncident fréquemment avec des hauteurs d'eau faibles, et des MES maximales. L'asymétrie est clairement favorable au dépôt de pleine mer, et donc au piégeage tidal des MES (Bassoullet et al., 2000 ; Le Hir et al., 2000).

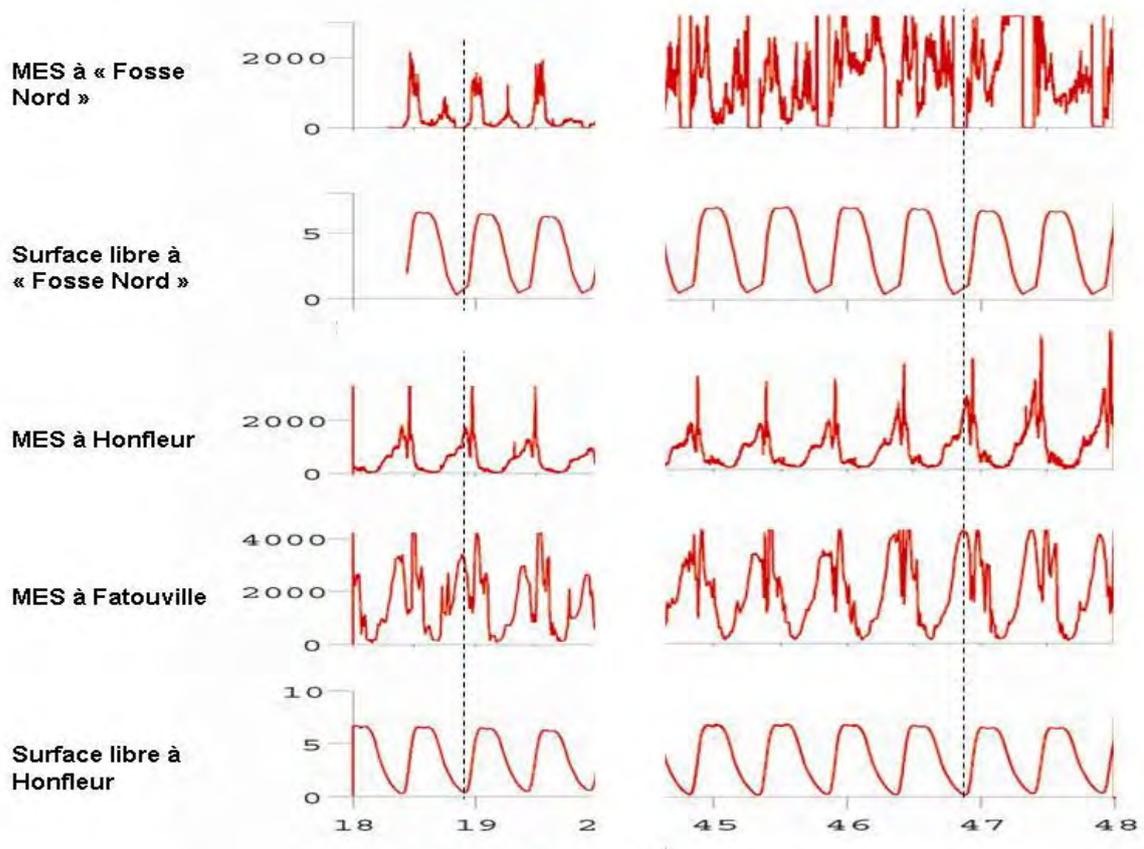


Figure 31 : évolution des MES à la station Fosse Nord, simultanément à celles observées à Honfleur et Fatouville. A gauche, les 19 et 20 septembre 2008 : vent faible, coefficient de marée 93 à 75 ; à droite : les 16, 17 et 18 octobre 2008, coefficients de marée 103 à 88, après un épisode de vent d'ouest ; le 16 octobre, vagues de 1m (Hsig) à pleine mer.

La comparaison avec l'évolution des MES à Honfleur, située légèrement « en amont » de cette station de la fosse Nord (Fig. 27) montre que les maxima de jusant (resp. de flot) s'observent

avant (resp. après) en fosse Nord, indiquant que ces maxima de MES ne sont pas l’empreinte du bouchon vaseux (qui, pour ce débit de la Seine d’environ $350 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, serait localisé plus en amont, comme l’indiquent aussi les MES plus élevées à Fatouville), mais plutôt les marqueurs des resuspensions dans la fosse Nord.

Par temps agité (vent de secteur ouest et vagues approchant 1m), les MES sont nettement plus élevées, en particulier à pleine mer et pendant le jusant qui suit, sans doute résultant de l’effet des vagues qui est dominant à pleine mer (Fig.31, droite). Les concentrations peuvent rester supérieures à 1 g/l pendant toute la marée.

Turbidité à Honfleur et Fatouville (fond) et salinité à Fatouville (fond) en 2008-2009

Comme le montre la première figure de l’annexe A 1.3, les mesures acquises simultanément à Honfleur et Fatouville en 2008 ont duré 50 jours, au cours desquels le débit de la Seine est resté assez faible, de l’ordre de $300 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. Il en résulte un signal essentiellement modulé par l’amplitude de la marée, très conforme à ce que montre la figure 31 ci-dessus pour les marées de vive eau des 16-17-18 octobre. Les MES à Fatouville sont sensiblement plus élevées. Comme, en jusant, le maximum de concentration intervient vers la fin (du jusant), il ne s’agirait pas de remise en suspension locale, mais bien de l’empreinte du bouchon vaseux arrivant dans le secteur aux alentours de la basse mer. Associé à des concentrations à Fatouville supérieures à celles de Honfleur, cela semble clairement indiquer un positionnement plus amont du bouchon vaseux. Il faut cependant rester prudent sur la comparaison des maxima de MES mesurés au fond, ces derniers pouvant varier sensiblement selon la configuration locale en particulier à basse mer.

La figure 32 donne un aperçu de la variabilité de la turbidité de fond à Honfleur, entre le 19 septembre 2008 et le 15 février 2009. On décèle une corrélation entre l’amplitude des vives eaux et les maxima de MES, un fléchissement des concentrations en période de haut débit, et pas d’effet visible du régime de vagues au large (ici aux Ratelets).

Les zooms de la figure 33 sont particulièrement démonstratifs. Pour un débit d’étiage (à gauche) le maximum de MES de jusant se produit juste avant la renverse, tandis que le maximum en flot serait synchrone au maximum de courant. En débit soutenu (petite crue, Fig.33 droite), le maximum de flot, probablement contrôlé par la pointe de vitesse intervient à la même heure marée, tandis que le maximum de jusant se produit plus tôt, ce qui dénote le passage plus précoce du bouchon vaseux, donc un positionnement plus à l’aval qu’en étiage de ce dernier (typiquement centré justement sur Honfleur). On remarque aussi un maximum de pleine mer à la fin de la « tenue du plein », nettement distinct du maximum de flot, qui provient sans doute de la décantation pendant l’étale de pleine mer (la renverse de courant), l’appareil de mesure étant situé près du fond. Ce phénomène est à peine visible en étiage, le bouchon vaseux étant nettement plus en amont. Enfin il faut relever la complémentarité de cette mesure de Honfleur par rapport aux longues séries enregistrées au même point par le système Marel qui, lui, était positionné à distance fixe de la surface et s’arrêtait à basse mer de vive eau, empêchant souvent l’interprétation du signal en terme de positionnement du bouchon vaseux.

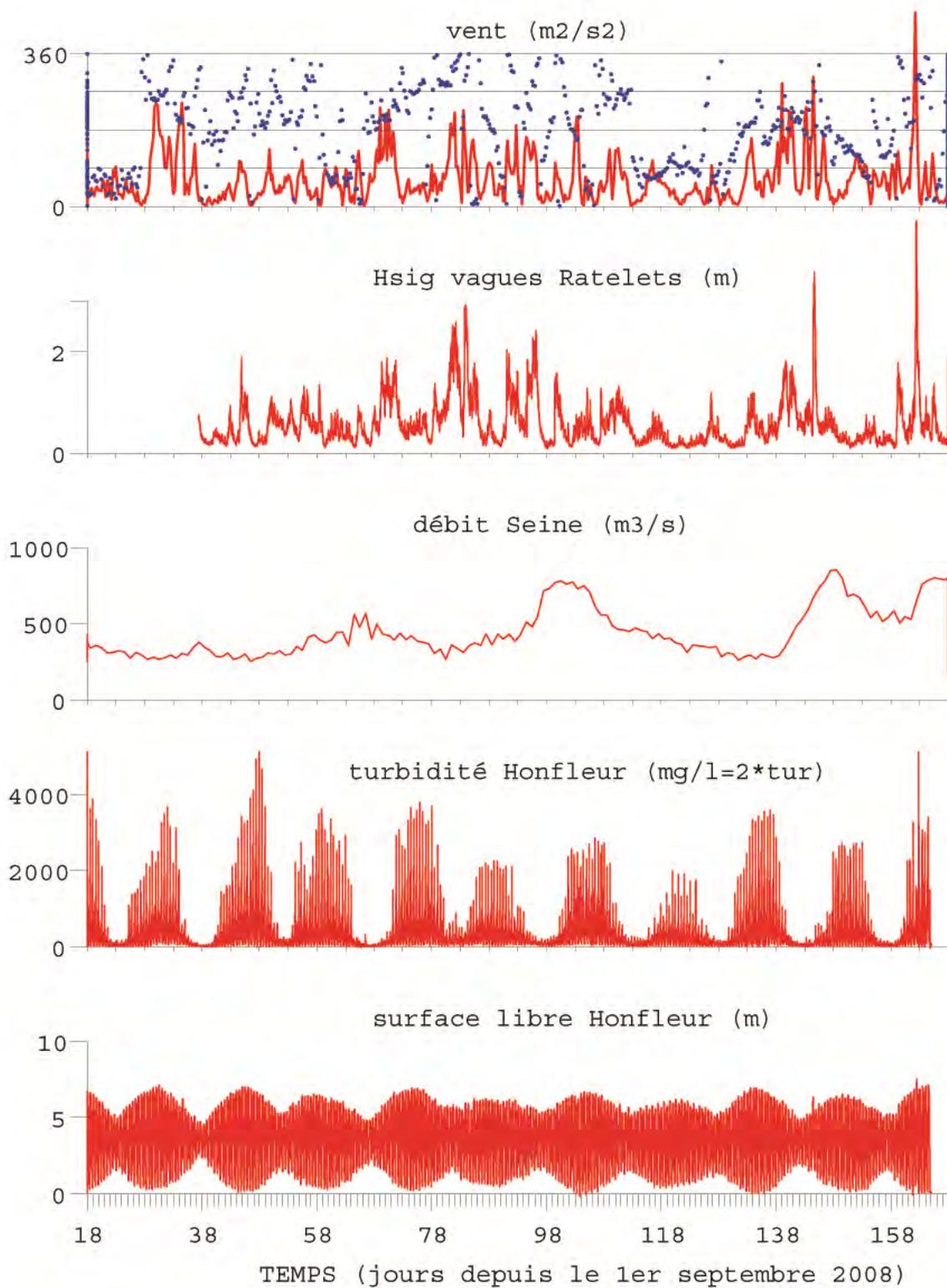


Figure 32 : Aperçu des mesures de turbidité à Honfleur (fond) et des conditions environnementales les accompagnant (du 19 septembre 2008 au 15 février 2009).

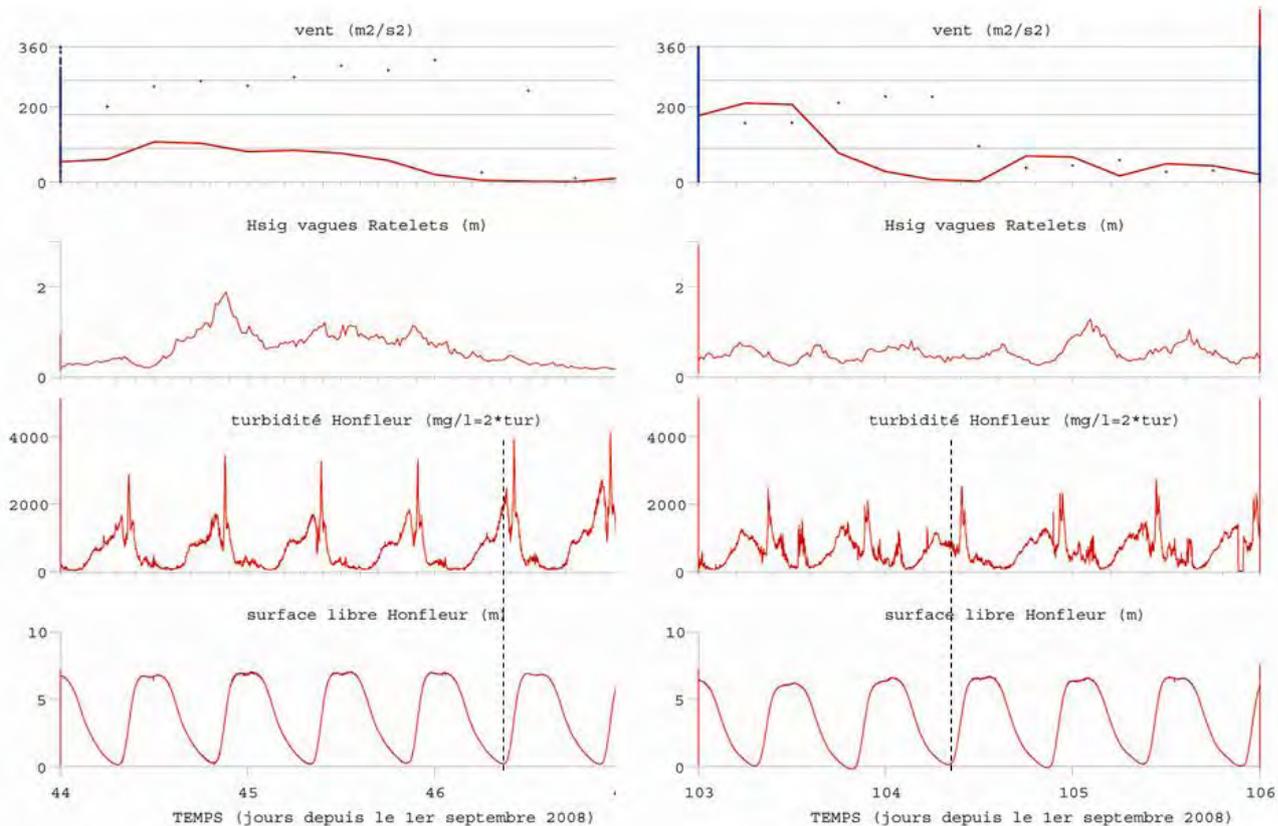


Figure 33 : Mesures de turbidité à Honfleur (fond). A gauche, du 14 au 16 octobre 2008 (coefficient de marée 92 à 103, débit de Seine à $300 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$) ; à droite, du 12 au 14 décembre 2008 (coefficients de marée 89 à 98, débit de Seine à $750 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)

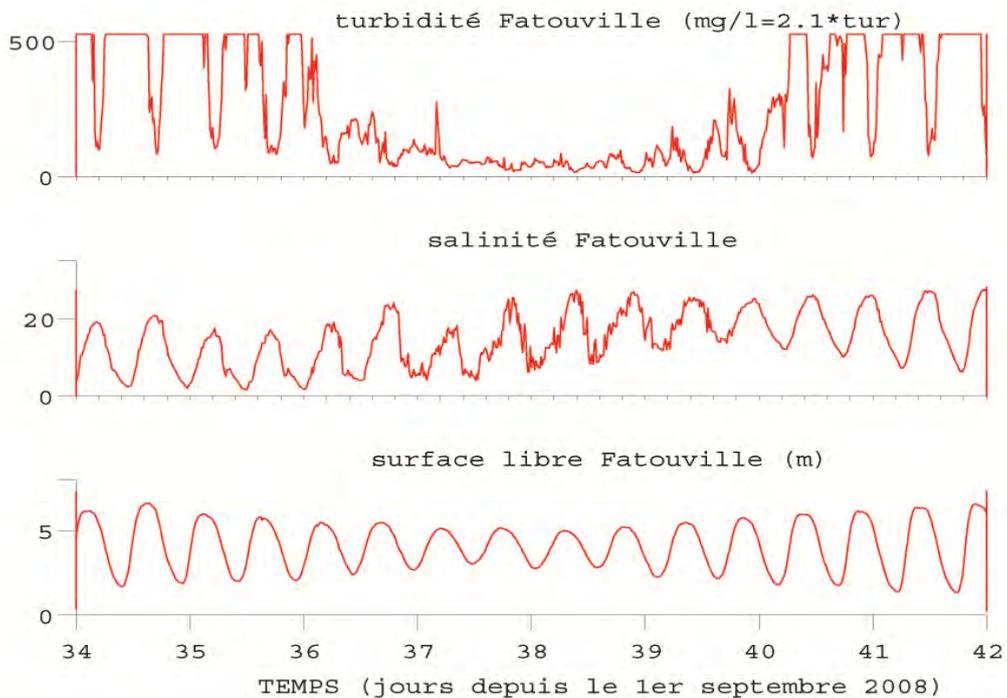


Figure 34 : Salinité et turbidité mesurées à Fatouville (fond) du 4 au 12 octobre 2008 (coefficient de marée minimum : 24)

L'examen de l'ensemble de la série de mesures révèle d'autres processus. Par exemple, des fluctuations de salinité sont observées en période de morte eau prononcée (Fig. 34), dénotant probablement un mécanisme de micro-seiches dans un « bassin » (l'embouchure) dont la géométrie varie peu (morte eau...). Au passage, il est intéressant de relever le niveau de turbidité en morte eau, proche du minimum observé lors des pleine mers de vive eau (de l'ordre de 50 mg/l, bien visible sur la figure 34 grâce à un changement d'échelle).

Des « anomalies » marégraphiques ont aussi été relevées, et reliées aux forçages météo-océaniques. Ainsi une surcote de l'ordre de 1m (pour être précis, il faudrait retrancher la prédiction marégraphique du moment) est observée le 23 janvier 2009 à pleine mer pour un vent d'W-NW de 13 m/s (Fig. 35, gauche), tandis que la surcote est plus « visible » lors de la basse mer le 10 février, et que des vagues sont enregistrées par la sonde.

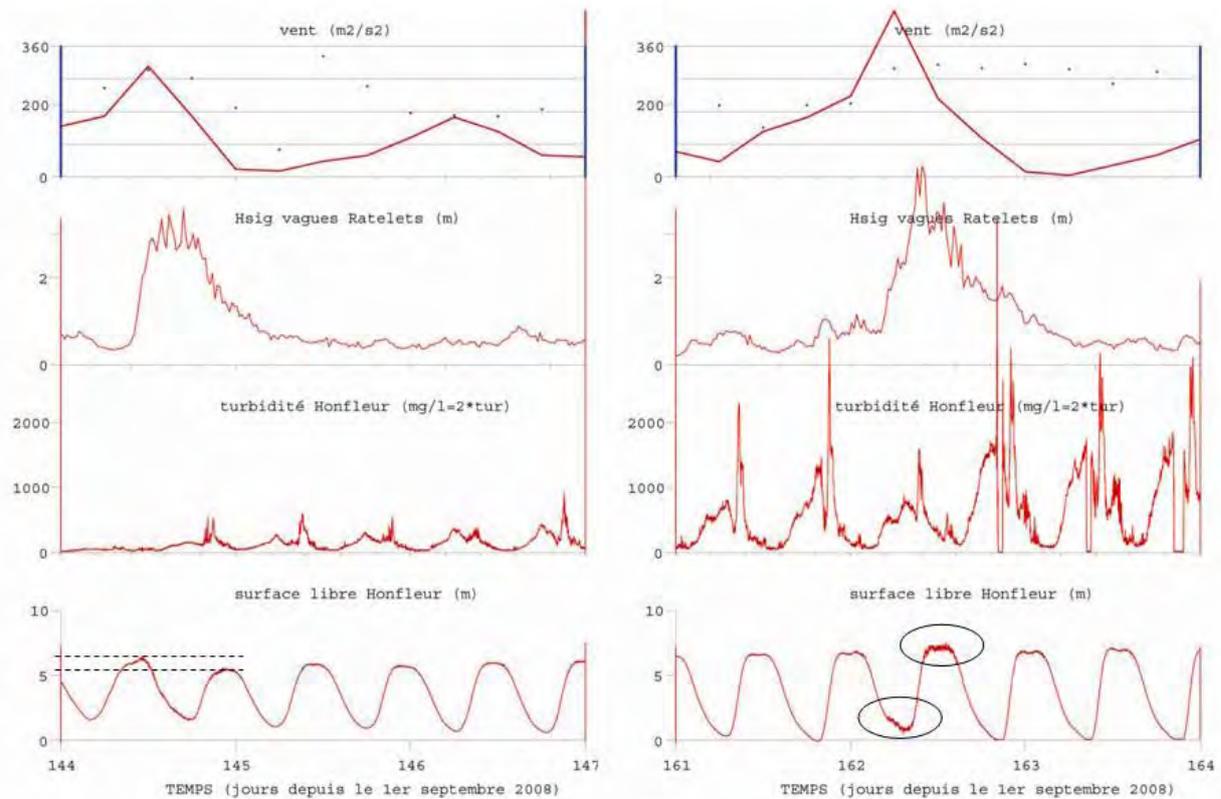


Figure 35 : Occurrences de surcotes d'origine météo à l'embouchure de la Seine. A gauche, le 23 janvier 2009 avec un vent d'W-NW de 13 m/s, à droite le 10 février avec un vent de 14 m/s du même secteur.

Remarque : les intensités de vent mentionnées ci-dessus sont des valeurs observées à la Hève, ce qui explique une légère différence avec les valeurs portées sur la figure, qui sont issues d'un modèle météo.

Turbidité et salinité (surface et fond) à Fatouville en 2010-2011

L'ensemble des mesures 2010-2011 disponibles à Fatouville est reproduit dans l'annexe A1.4. La figure 36 ci-après en rappelle le synopsis, difficile à analyser en tant que tel. On y observe simplement les variabilités des conditions d'environnement pendant les mesures, une gamme de

variation de concentrations en MES considérable, même en surface, et les salinités plus faibles lorsque le débit augmente, avec une stratification plus marquée (jours 150-170).

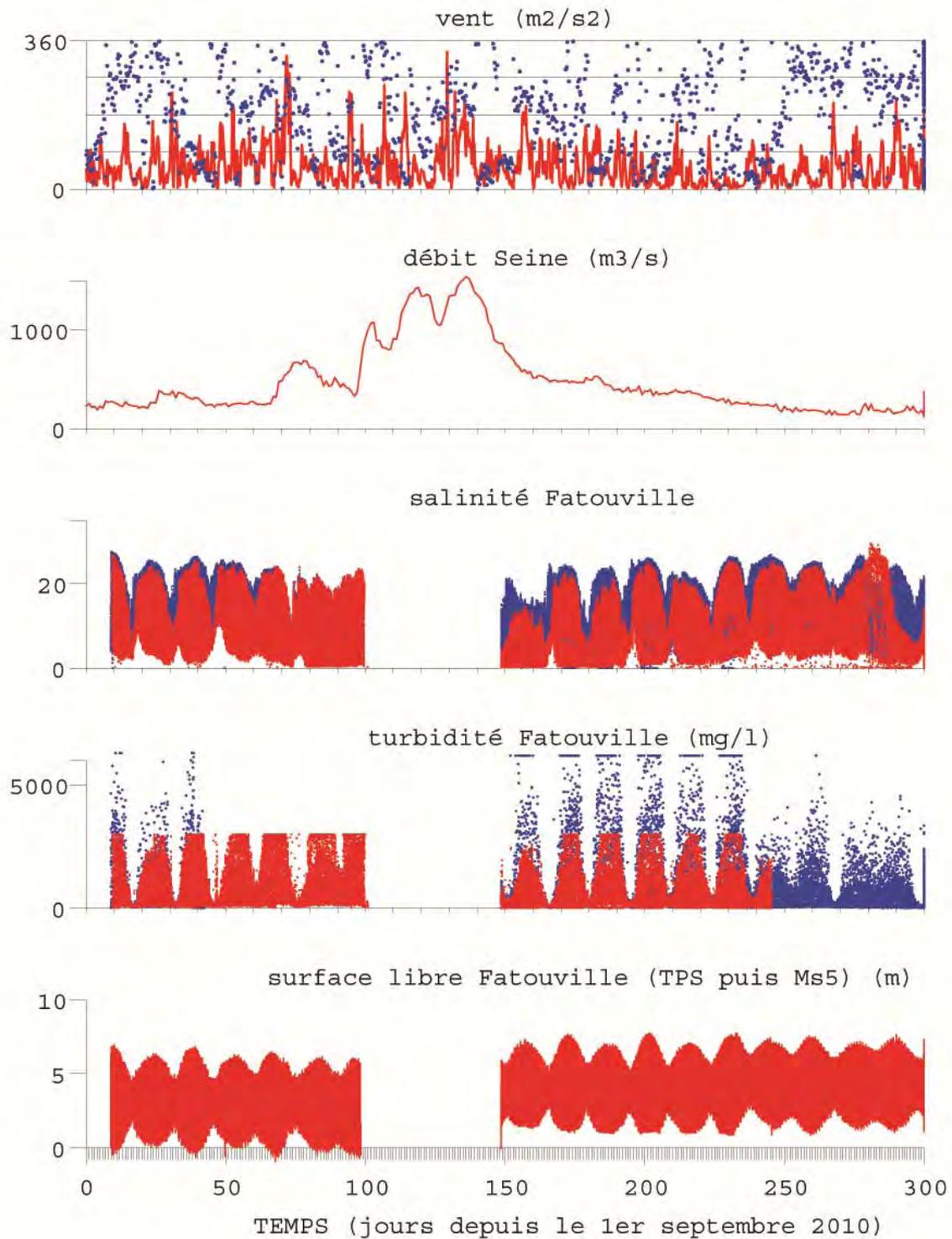


Figure 36 : Salinité et turbidité mesurées à Fatouville en 2010-2011, près du fond (bleu) et à 60 cm sous la surface (rouge). La surface libre a été mesurée par différents capteurs de pression, pour lesquels les références altimétriques n'étaient pas les mêmes.

En morte eau, la stratification en salinité est systématiquement relevée, comme l'illustre la figure 37. De façon à peu près constante (mais il manque des mesures pendant la crue), la salinité de surface varie peu, tandis que la salinité de fond suit une variation au cours de la marée, à l'image de ce qui se passe sur toute la colonne d'eau en vive eau, et selon une amplitude qui reste très forte en morte eau (15 à 20 PSU !). Le point Fatouville est extrêmement bien placé pour révéler la zone de gradient de salinité, par débit faible à moyen. Cette série de mesures constituera un ensemble de données très précieuses pour la validation des modèles hydrodynamiques 3D de l'estuaire de la Seine.

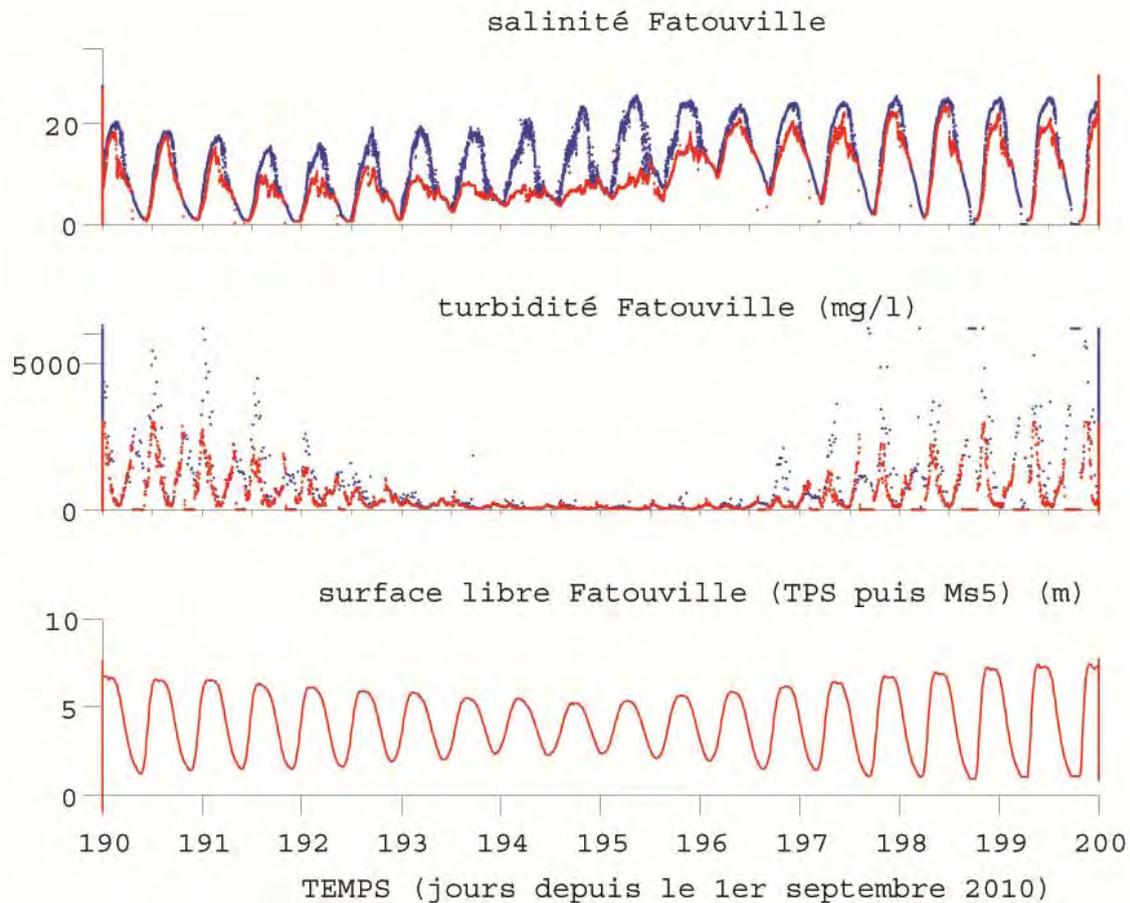


Figure 37 : Salinité et turbidité mesurées à Fatouville du 10 au 19 mars 2011, près du fond (bleu) et à 60 cm sous la surface (rouge), pour un débit de la Seine de $400 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$.

La Figure 37 montre une très grande variabilité des MES entre vive eau et morte eau. Cependant, même en morte eau la concentration atteint 0.3 g/l à basse mer pour un débit de la Seine de $400 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. Les figures de l'annexe A1.4 montrent que c'est assez général, avec des maxima qui descendent à 0.1 g/l pour un débit de $250 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. En ce qui concerne les turbidités en vive eau, il est plus aisé de commenter des zooms temporels plus courts (Figures 38 à 41). Pour un débit d'étiage (Figure 38), le maximum de concentration au fond en jusant se produit à basse mer, en atteignant 3 g/l , avec une stratification peu marquée en raison de courants forts jusqu'à la renverse, souvent observés en ce point. La sonde de surface est hors d'eau à basse mer de vive eau, mais la réapparition du signal dès que le niveau remonte, et clairement avant la renverse de

courant, montre une grande homogénéité verticale des concentrations et pas de décantation apparente à cette phase de la marée. L'homogénéité de la colonne d'eau est aussi remarquable pendant toute la première moitié du jusant. La pointe de flot se traduit par un maximum de turbidité très élevé, supérieur à 5 g/l au fond, et au-dessus de 3 g/l en surface (le signal de la sonde de surface est saturé à 3 g/l...). On remarque nettement un deuxième maximum au moment de la pleine mer, mais au fond seulement, qui résulte de la décantation des particules pendant la renverse de courant de pleine mer, qui est bien plus longue que celle de basse mer. Enfin, les turbidités à la fin de la pleine mer sont très faibles, pendant plusieurs heures. L'évolution des salinités a aussi son intérêt : la colonne d'eau reste très mélangée une bonne partie du temps, sauf pendant la longue pleine mer. On note qu'à la fin de celle-ci, la stratification se renforce par une décroissance brutale de la salinité de surface (le panache d'eau dessalée est advecté en surface vers l'aval), tandis qu'elle s'atténue très vite lorsque les courants de jusant se renforcent. Ce cycle de vive eau d'étiage est un modèle du genre, et pourra servir de mesure de calibration des modèles hydrosédimentaires : en particulier la décantation à pleine mer peut permettre de calibrer la vitesse de chute, que l'on sait être un paramètre auquel la modélisation est très sensible. C'était l'un des objectifs de la campagne de mesures, sachant que cette période de décantation de pleine mer avait toujours été difficile à capter jusqu'à maintenant, même en station de 13 h, en raison de sa brièveté.

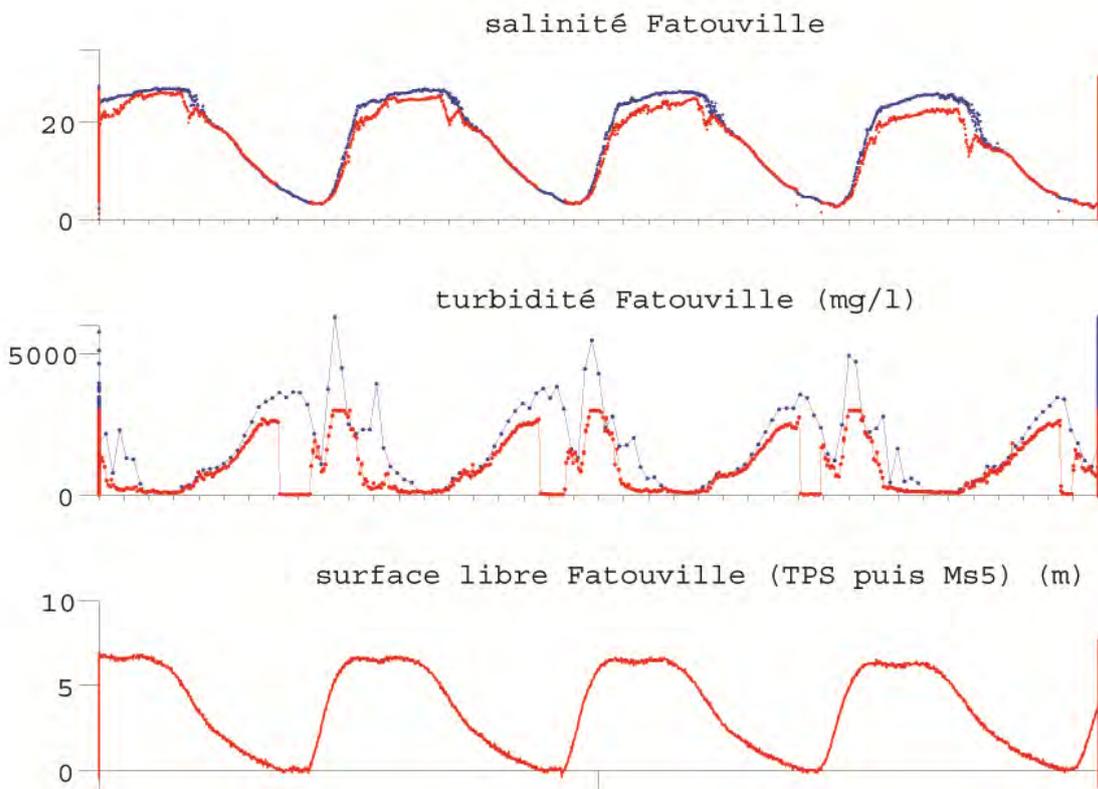


Figure 38 : Salinité et turbidité mesurées à Fatouville les 11 et 12 septembre 2010, près du fond (bleu) et à 60 cm sous la surface (rouge), pour un débit de la Seine de $250 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$.

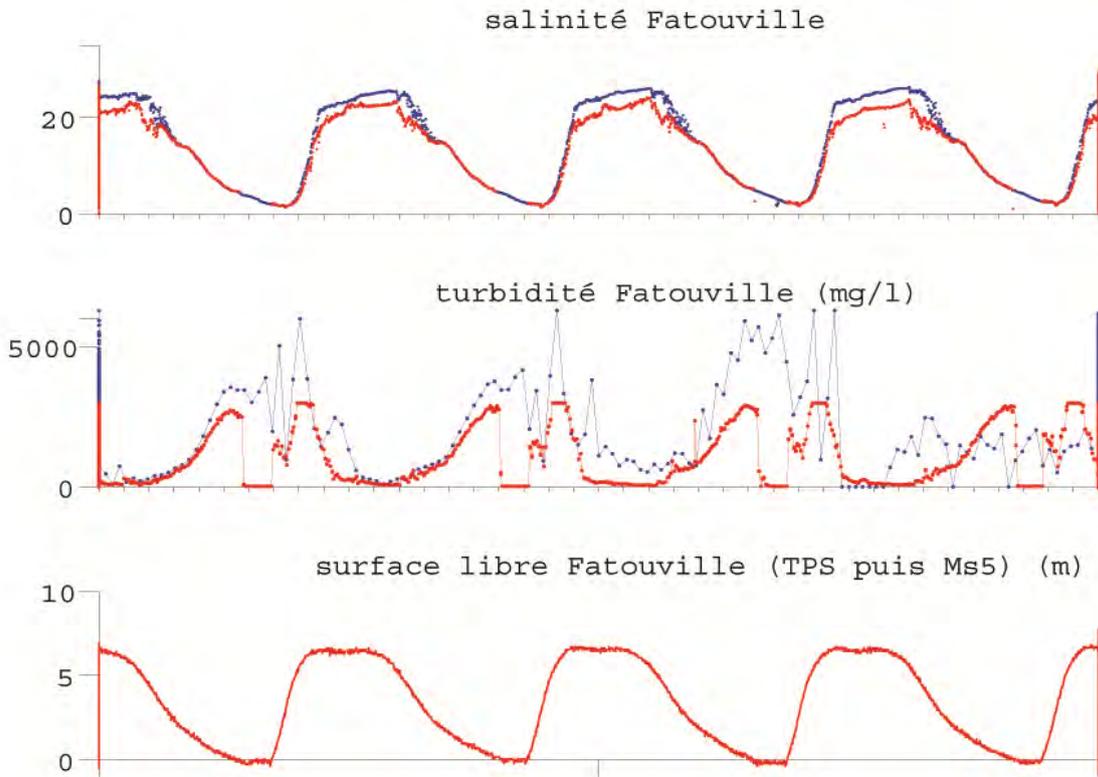


Figure 39 : Salinité et turbidité mesurées à Fatouville les 8 et 10 octobre 2010, près du fond (bleu) et à 60 cm sous la surface (rouge), pour un débit de la Seine de $300 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$.

Le cycle de vive eau présenté en figure 39 a lieu un mois plus tard, avec un débit de Seine légèrement supérieur ($300 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ au lieu de $250 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$). La ressemblance est grande, mais on voit que le maximum de concentration pendant le jusant se produit un peu plus tôt, ce qui révèle le passage du cœur du bouchon vaseux transporté vers l'aval à ce moment précis de la marée. Ainsi, il semble que pour un débit de $250 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, Fatouville corresponde à la position la plus en aval du bouchon vaseux, tandis qu'il irait un peu plus loin vers l'aval pour un débit de $300 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. Connaissant le courant de marée dans le chenal, on pourrait estimer alors la position extrême du bouchon vaseux, mais cela pourra être aisément simulé par modèle mathématique, après calibration en s'aidant de cette mesure surface/fond à Fatouville. Par ailleurs, les concentrations maximales mesurées en jusant, entre 2 et 3 g/l de la surface au fond, fournissent un bon ordre de grandeur de la concentration au cœur du bouchon vaseux pour ce débit de Seine de $300 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, a priori supérieur à ce que l'on décrivait auparavant.

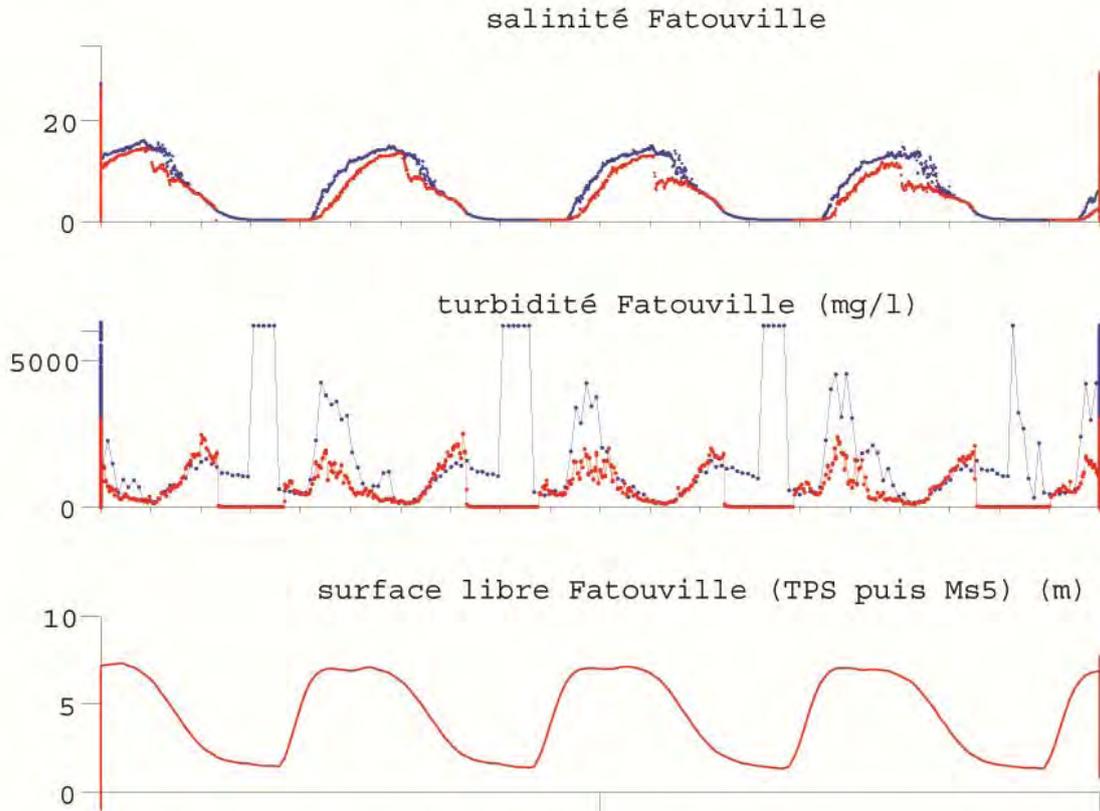


Figure 40 : Salinité et turbidité mesurées à Fatouville les 5 et 6 février 2011, près du fond (bleu) et à 60 cm sous la surface (rouge), pour un débit de la Seine de $550 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$.

La Figure 40 présente un cycle de petite vive eau pour un débit de $550 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, se produisant une vingtaine de jours après une crue de $1500 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ayant duré près d'un mois (Fig. 36). Ici le maximum de MES au jusant se produit plus tôt, reflétant un bouchon vaseux plus en aval, peut-être à peu près centré sur Fatouville. La concentration maximum en jusant est légèrement inférieure (de l'ordre de 2 g/l), en accord avec une réduction des concentrations du bouchon vaseux lorsque celui-ci se positionne plus en aval. Mais l'amplitude de marée est également plus faible, de telle sorte qu'il est difficile de conclure à ce sujet. L'augmentation subite des MES de fond en fin de jusant, qui se renforce au cours des vives eaux suivantes, comme le laisse entrevoir la figure 36, est difficile à expliquer, d'autant plus qu'à ce moment-là, le signal de surface est « perdu », la sonde restant peut-être coincée sur le câble au cours de la descente. Il pourrait s'agir d'une arrivée de crème de vase, depuis l'amont, entretenue par la décantation du bouchon vaseux à pleine mer. Cette hypothèse n'est pas démentie à l'examen de la figure 41, où l'on voit également au cours de la 3^{ème} marée une remontée brutale des MES de fond à basse mer, tandis que lors des marées qui l'encadrent, c'est au contraire une chute brutale qui est observée à basse mer. Il pourrait en fait s'agir de très fortes concentrations représentatives de crème de vase, qui entraînent un signal d'absorption optique du turbidimètre remplaçant la rétrodiffusion normalement observée dans la gamme de concentration faible, comme cela a été plusieurs fois montré pour les turbidimètres de type OBS. On remarquera que simultanément la salinité s'annule brutalement au fond (NB : la salinité de surface, en rouge sur les figures n'apparaît plus en raison du blocage de la sonde, comme évoqué plus haut), pour les quatre

cycles de marée de la figure 41. Il semblerait donc que la crème de vase soit formée dans la zone du « coin salé », voire en amont, donc constituée de sédiment et d'eau douce (il faudrait vérifier que le capteur de conductivité répond à peu près de la même façon quelle que soit la concentration de MES variant dans une large gamme...).

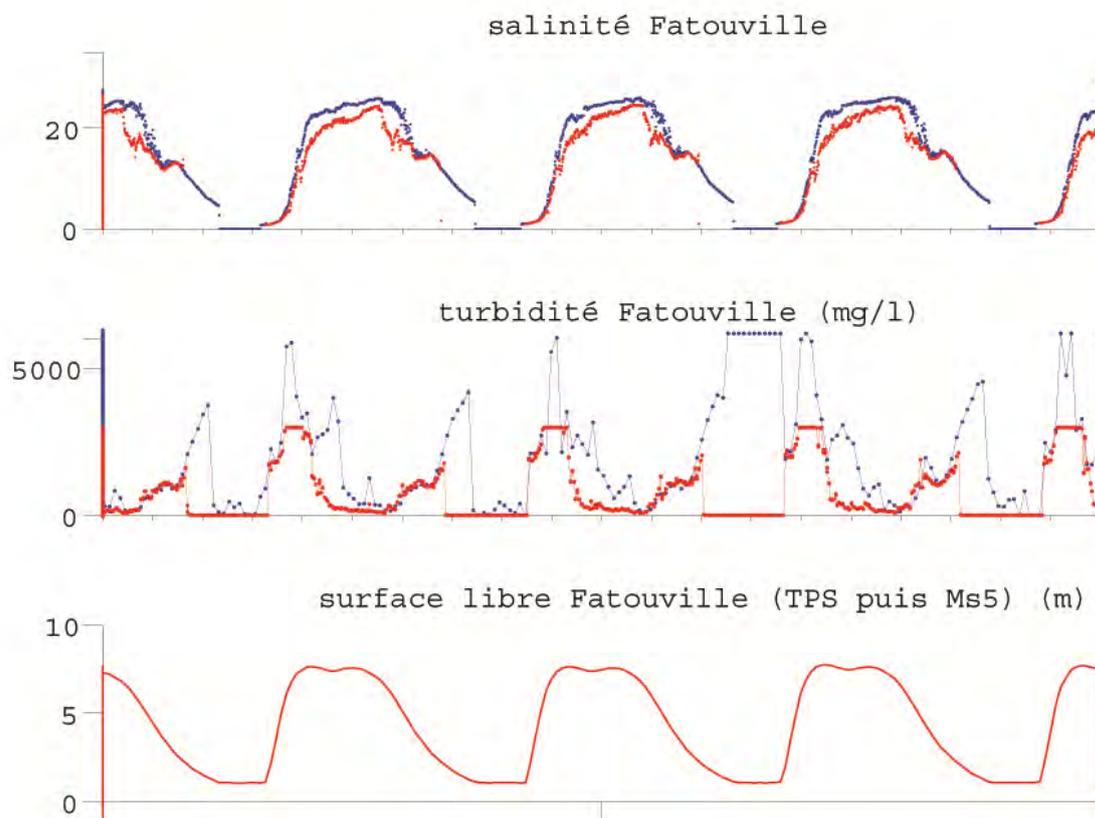


Figure 41 : Salinité et turbidité mesurées à Fatouville les 20 et 21 mars 2011, près du fond (bleu) et à 60 cm sous la surface (rouge), pour un débit de la Seine de $370 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$.

Enfin, l'examen des salinités montre encore un mélange de la colonne d'eau pendant la marée sauf à pleine mer, avec un décrochage très net des salinités de surface au début du jusant, qui s'atténue complètement lorsque le courant de marée augmente. Les fluctuations tidales de salinité à Fatouville sont de l'ordre de 15 PSU, l'eau étant douce près de la moitié du temps pour le débit de $550 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, post-crue (Fig.40).

Ces résultats obtenus à Fatouville sont donc d'un grand intérêt, même si parfois les analyses effectuées restent spéculatives. Ils montrent aussi la pertinence d'effectuer simultanément des mesures en surface et au fond, ce qui autorise des interprétations croisées en termes de stratification en densité et en termes de décantation des MES.

Turbidité à La Carosse (surface) en 2009

Pour avoir une idée de l'extension vers le large des structures turbides pendant les mesures de la campagne MODEL1, il a été décidé de monter sur la bouée MAREL-La Carosse encore en place une sonde température/turbidité, dont l'ensemble des données est représenté sur la figure 42 et

détaillé dans l'annexe A1.5. Ces mesures sont exprimées en NTU, la quantité de prélèvements d'eau effectués à des fins de calibration ne couvrant pas une gamme suffisamment large.

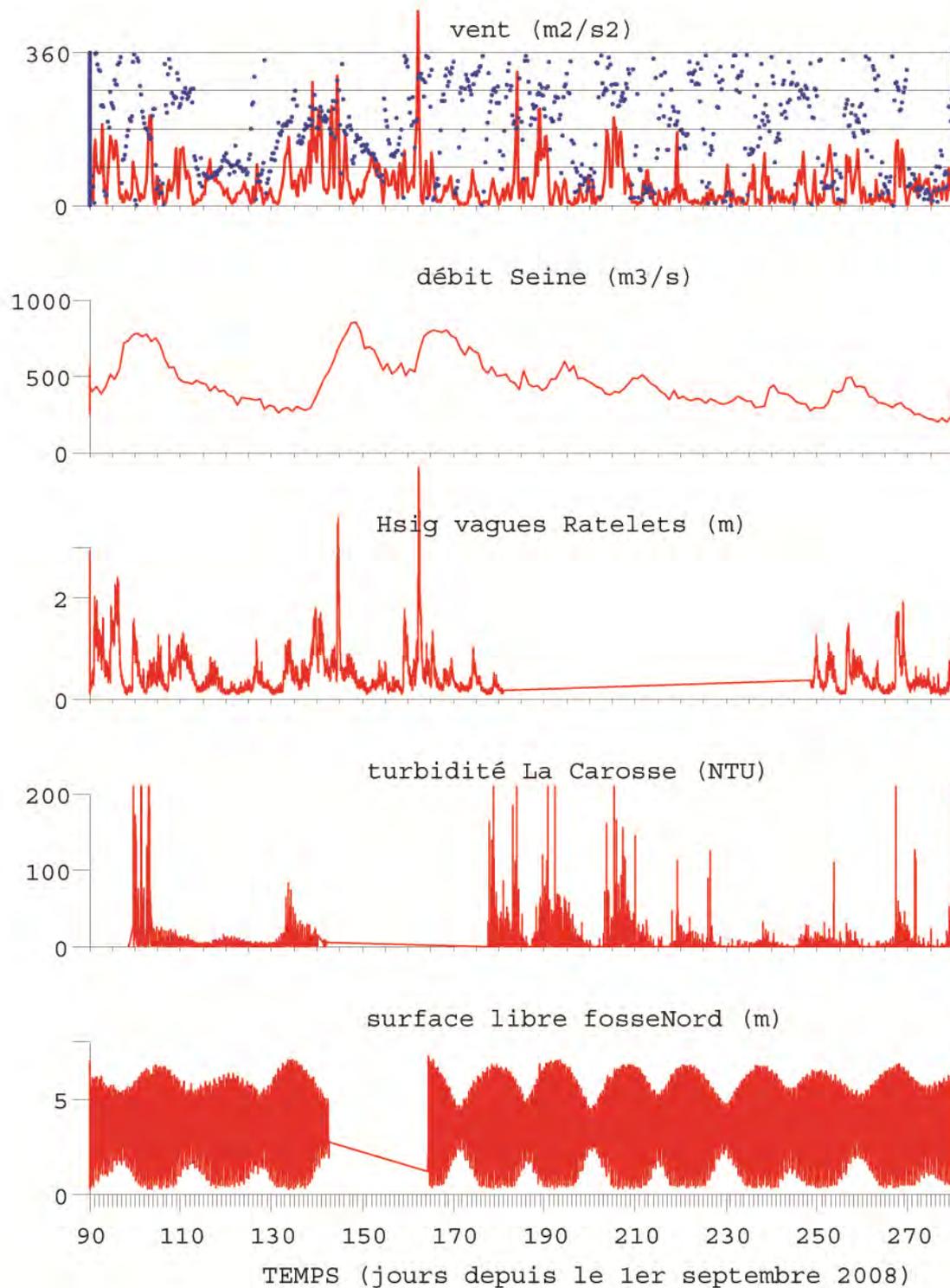


Figure 42 : Mesures de turbidité de surface à La Carosse (bouée Marel). L'amplitude de marée est représentée par les oscillations de surface libre mesurées à la station Fosse Nord, tandis que l'amplitude des vagues est fournie à la station Ratelets.

On observe de larges fluctuations de la turbidité à La Carosse, avec une empreinte claire de la marée et des vagues. Il se trouve que pendant la période des mesures, des épisodes de vagues sont intervenus fréquemment en vive eau (Fig. 42).

Le zoom de la figure 43 montre qu'au cours des vives eaux de la fin de période montrée, les turbidités oscillent entre quelques NTU et 20 NTU au moment de la fin de jusant (pour mémoire, 1 NTU représente approximativement 2 mg/l). Par contre, en première partie de la période, de fortes turbidités apparaissent, entre 30 et 200 NTU, avec des fluctuations difficiles à relier à la phase de marée. Les hauteurs de vagues sont également modérées, par contre un fort vent de Sud est relevé. Cet épisode fait suite à des vagues importantes observables sur la figure 42. Enfin, le débit de la Seine est relativement élevé ($750 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$). Il semblerait que les fortes turbidités observées les 12 et 13 décembre résultent d'une advection par un vent de Sud de MES préalablement remises en suspension par des vagues conséquentes, et/ou liées à la frange du bouchon vaseux sorti de l'estuaire en cette période de haut débit de la Seine. On retient ainsi l'influence forte qu'exercent les quatre principaux forçages (marée, vent, vagues, débit) sur les MES à La Carosse.

C'est ce que confirme la figure 44 : pendant les vives eaux du début, en période calme, la turbidité varie de quelques NTU à 10 NTU à basse mer, et plafonne à 5 NTU pendant la morte eau. Au cours de la vive eau suivante, plus importante, un épisode de vent de Sud se produit, avec des vagues supérieures à 1 m aux Ratelets, et la turbidité à La Carosse dépasse 50 NTU. Cette mesure montre la grande variabilité des turbidités au large de l'embouchure, dans une gamme qui est justement celle à partir de laquelle se produit la limitation de la production primaire par la turbidité. Ces fluctuations sont donc de grande importance, et seront réexaminées dans le chapitre 4 sur l'imagerie satellitaire.

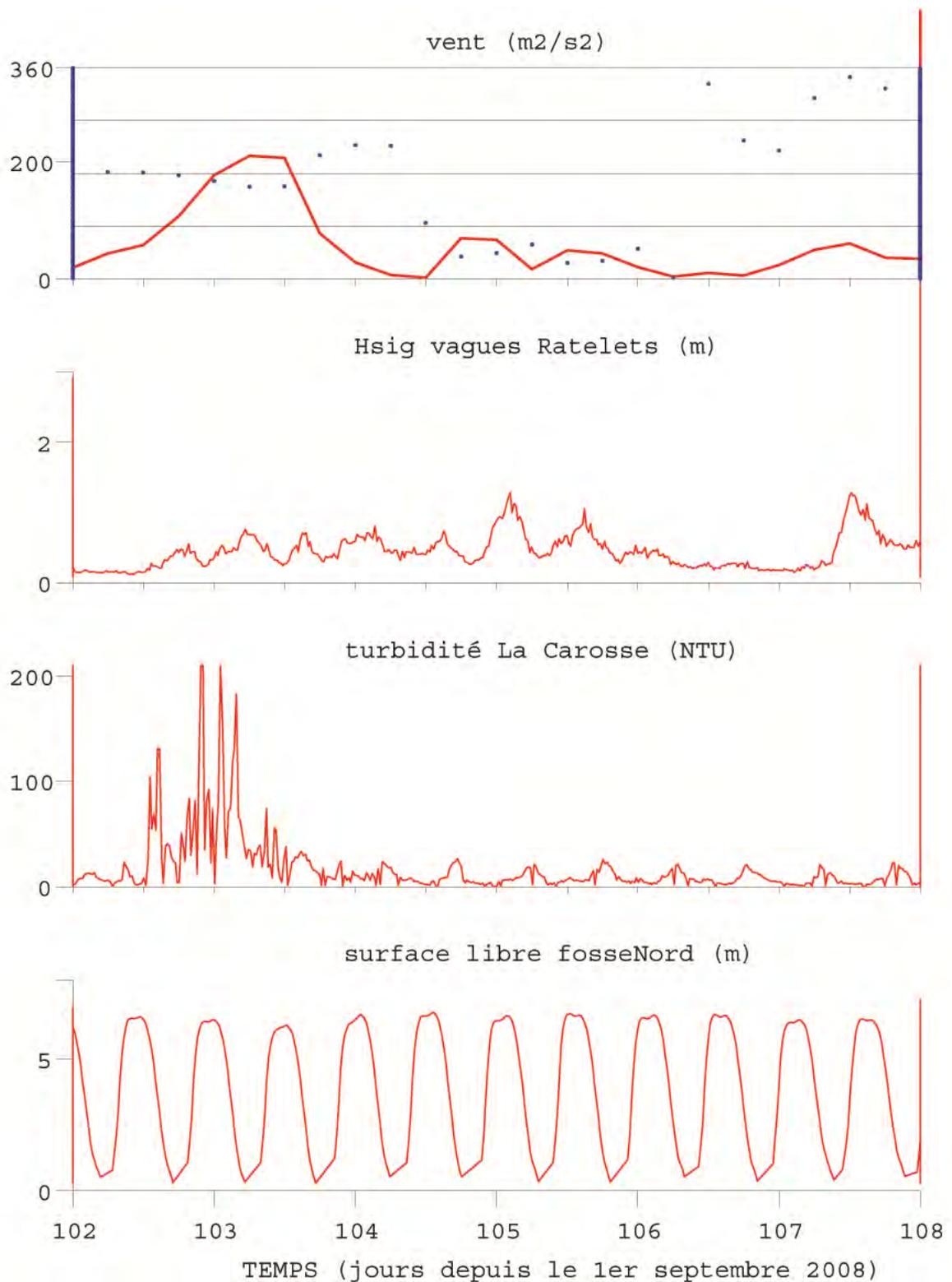


Figure 43 : Mesure de turbidité de surface à La Carosse (bouée Marel) du 12 au 18 décembre 2008, pour un débit de la Seine d'environ $750 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. L'amplitude de marée est représentée par les oscillations de surface libre mesurées à la station Fosse Nord, tandis que l'amplitude des vagues est fournie à la station Ratelets.

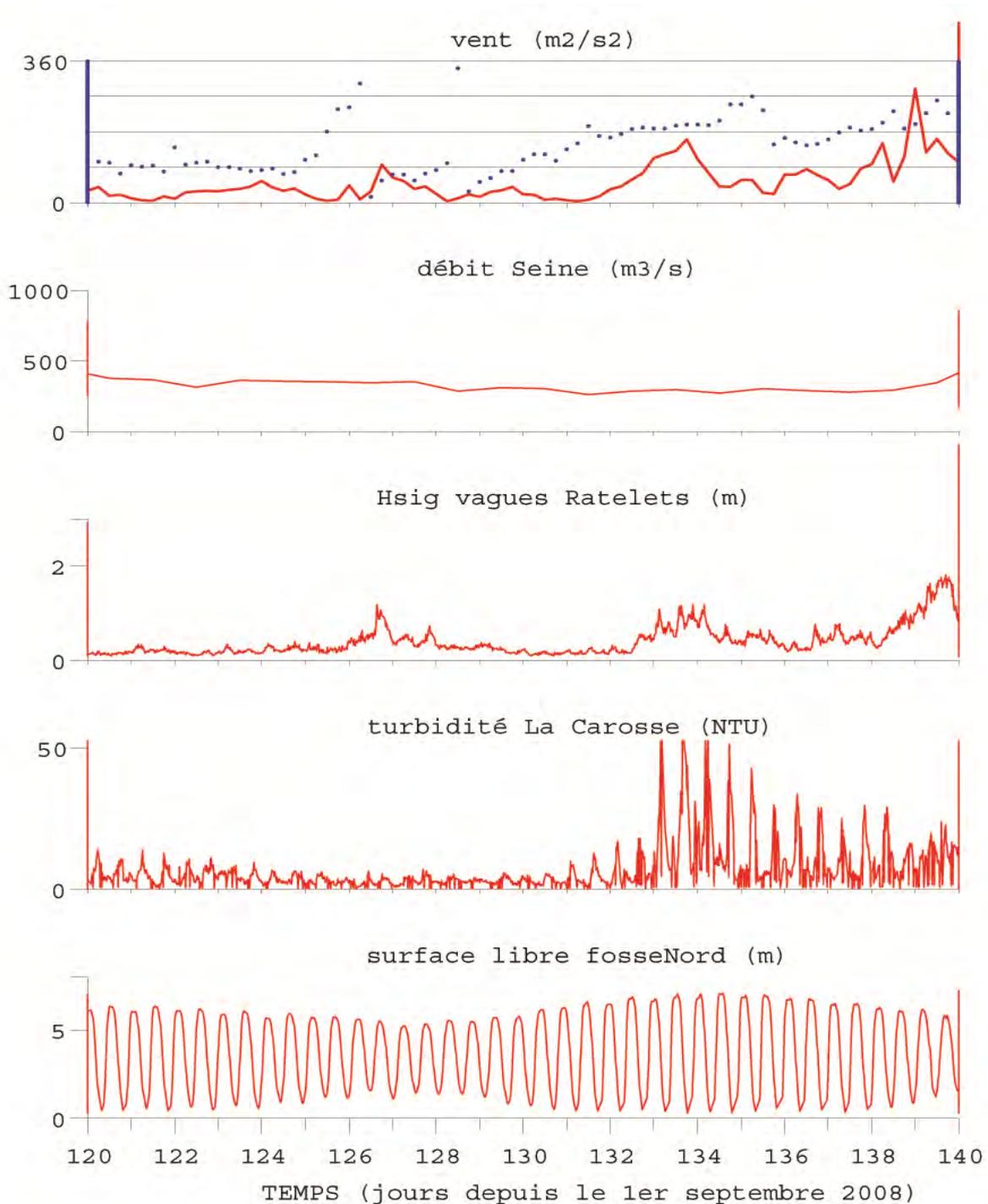


Figure 44 : Mesure de turbidité de surface à La Carosse (bouée Marel) du 30 décembre 2008 au 18 janvier 2009, pour un débit de la Seine d'environ $350 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. L'amplitude de marée est représentée par les oscillations de surface libre mesurées à la station Fosse Nord, tandis que l'amplitude des vagues est fournie à la station Ratelets.

Turbidité au Ratier (surface) en 2010-2011

Les mesures effectuées dans la fosse Sud sur le flanc Est du banc du Ratier sont probablement les premières mesures en continu de turbidité effectuées dans ce secteur, où même leur ordre de

grandeur n'était pas connu. Ici encore les prélèvements d'eau n'ont pas été suffisamment nombreux pour qu'une calibration des turbidimètres en mg/l puisse être effectuée. L'ensemble des données est représenté en annexe A1.6, et la figure 45 en fournit un aperçu.

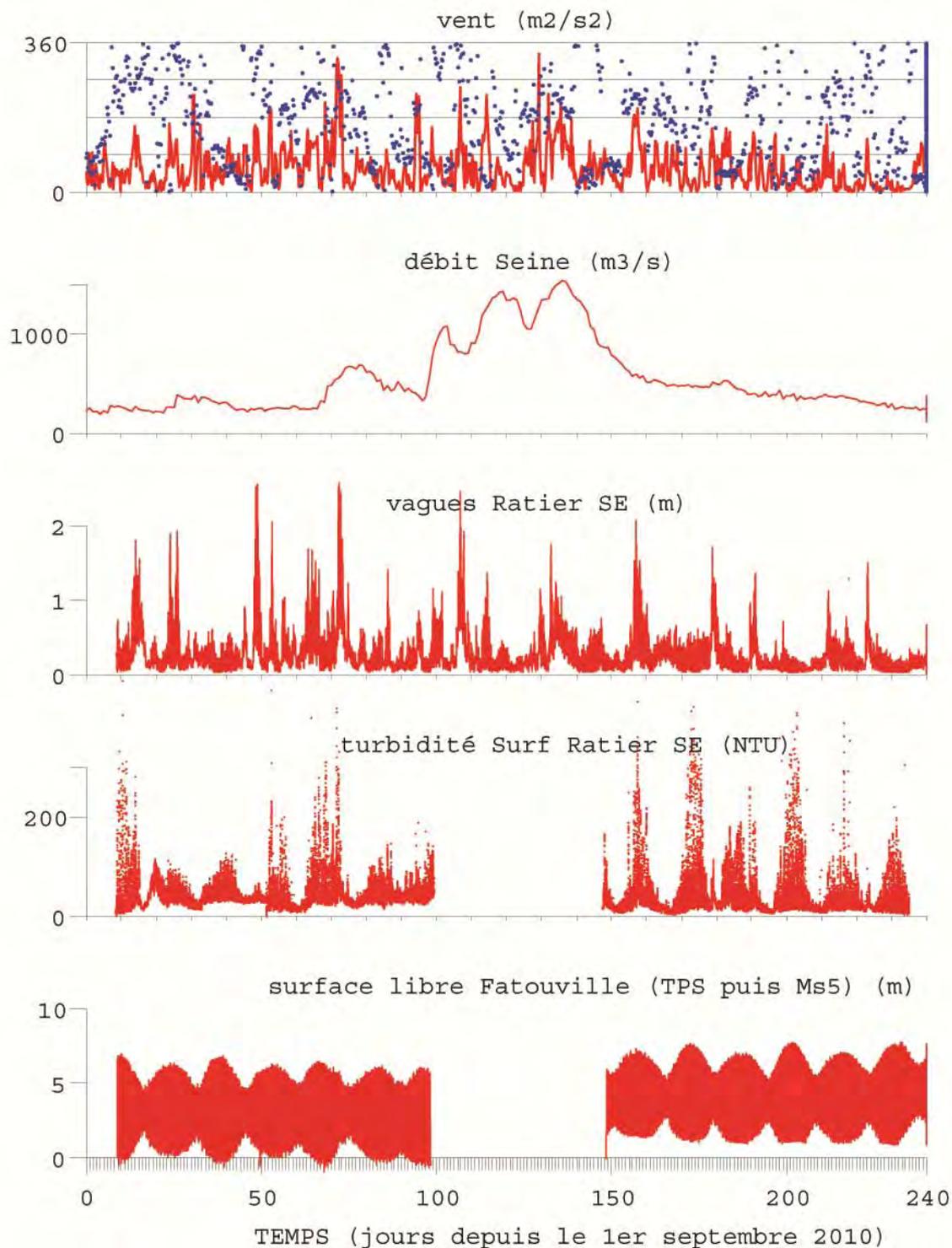


Figure 45 : Mesures de turbidité de surface et de hauteur des vagues à la Station Ratier Sud-Est en 2010-2011. L'amplitude de marée est représentée par les oscillations de surface libre mesurées à Fatouville. Il est possible que les concentrations minimales au cours de la première période soient anormalement élevées.

Il semble que ce soit la marée qui contrôle le plus le signal de turbidité dans la Fosse Sud, même si de nombreux pics peuvent être associés aux vagues. L'effet du débit, qui aurait pu apparaître vers les jours 150-170 (Fig. 45), après la crue, n'est pas évident : les maxima de turbidité de vive eau seraient donc plus reliés à des remises en suspension dans le voisinage qu'à une empreinte du bouchon vaseux. La gamme de variation de la turbidité est d'une dizaine de NTU en morte eau à environ 300 NTU en vive eau.

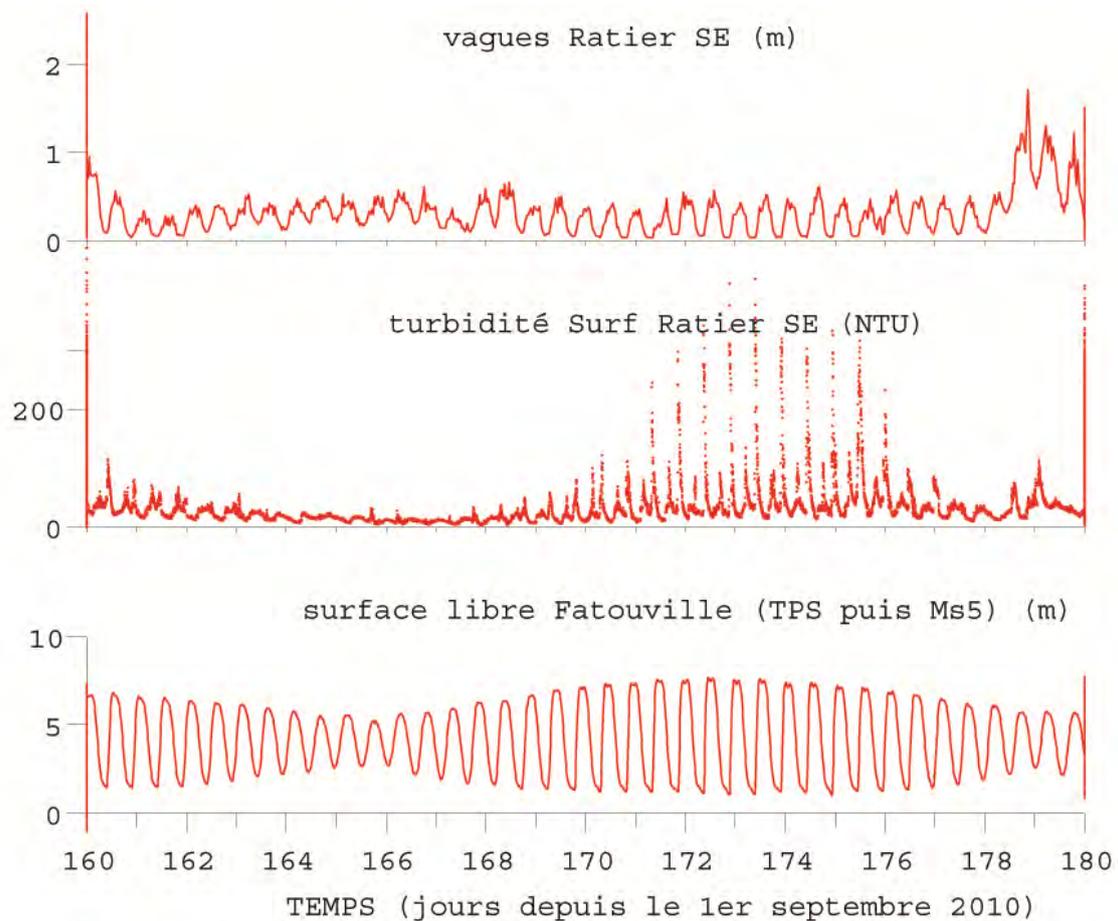


Figure 46 : Mesure de turbidité de surface et de hauteur des vagues à la Station Ratier Sud-Est entre le 8 et le 27 février 2011, pour un débit de Seine de $500 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. L'amplitude de marée est représentée par les oscillations de surface libre mesurées à Fatouville

La figure 46 est représentative des concentrations observées dans la Fosse Sud. Une oscillation entre 14 et 100 NTU pour les marées moyennes du début de période, puis des turbidités très faibles en morte eau (5 à 20 NTU) qui montent jusqu'à plus de 300 NTU lors des vives eaux qui suivent : un premier maximum se produit à la fin de la marée descendante (probablement au maximum de jusant), et un second, nettement plus fort, à la fin de la marée montante (probablement au maximum de flot). En fin de période, les vagues sont assez fortes (surtout à pleine mer) et entraînent une augmentation de turbidité modérée (max 100 NTU). Ce scénario se répète fréquemment, comme l'attestent les séries montrées en annexe A1.6. Ces relativement faibles augmentations de turbidité sous l'effet des vagues semblent relater une faible resuspension locale devant les concentrations élevées de flot, qui peuvent résulter d'une

resuspension distante. Une étude plus fine des possibles transits de sédiments fins devra être menée en tenant compte de la phase précise des courants de marée, et en lien avec la nature des fonds (une bonne partie des fonds de la Fosse Sud sont occupés par des sables plus ou moins envasés, ou par des vases fossiles indurées).

Synthèse sur les données des campagnes MODEL

L'ensemble des données hydrosédimentaires acquises au cours du projet MODEL de Seine-Aval IV est considérable. Malgré quelques déboires liés à des dysfonctionnements de certaines sondes, et le « ratage » de la crue de l'hiver 2011, l'objectif de décrire par des enregistrements en continu la variabilité des turbidités dans le secteur d'embouchure de la Seine est atteint. Plusieurs faits majeurs ont été relevés :

- concentrations en MES très élevées, a priori supérieures à celles estimées auparavant, dépassant à chaque vive eau les 3 g/l en surface et 5 g/l au fond à Fatouville,
- fortes concentrations aussi dans la Fosse Nord, avec des resuspensions locales indépendantes du bouchon vaseux pendant la période de mesures,
- concentrations plus faibles dans la Fosse Sud (sans doute moins vaseuse), qui restent corrélées à la marée, même si les vagues entraînent aussi des resuspensions,
- positionnement du bouchon vaseux, avec par exemple une position la plus aval au droit de Fatouville, pour un débit de $250 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$,
- intérêt fort d'une mesure simultanée surface/fond au même point, qui permet une bien meilleure compréhension des phénomènes et une paramétrisation de la décantation des particules ; de même, la série de mesures acquises au fond au même endroit que MAREL-Honfleur dont la série comportait des « trous » à chaque basse mer de vive eau permettra de revisiter ces mesures MAREL en les complétant par expertise,
- sensibilité des turbidités à la station de La Carosse, permettant de hiérarchiser l'importance relative des forçages principaux que sont la marée, le vent, les vagues et le débit de la Seine.

Nul doute que cet ensemble de données acquises dans la colonne d'eau, associées aux données altimétriques (érosions/dépôts) acquises en conjonction avec le projet COLMATAGE de Seine-Aval IV et analysées dans le rapport final de ce projet, servira de base à la calibration et à la validation des modèles hydrosédimentaires qui seront mis en œuvre dans le secteur de l'estuaire et la baie de Seine.

Pour compléter cette analyse des données de turbidité du projet MODEL, nous proposons de reproduire ci-dessous la [synthèse rédigée à partir des mesures de variations de niveaux de fond réalisées conjointement dans le cadre des projets COLMATAGE et MODEL](#), même si la cohérence entre les deux ensembles de données ne doit pas être systématiquement recherchée, car les mesures de turbidité sont essentiellement représentatives des sédiments vaseux, tandis que les variations altimétriques sont plus importantes en milieu sableux ou sablo-vaseux :

« Des quatre sites équipés d'instruments ALTUS (Fosse Nord, triangle des épaves, Ratelets, Ratier Sud-Est), celui des Ratelets est le plus dynamique pour ses variations altimétriques. Les épisodes d'érosion, parfois brutaux, comme les épisodes de dépôts significatifs interviennent tous en conjonction avec des vagues importantes, en général corrélées à des vents de secteur ouest qui les génèrent. En particulier une érosion exceptionnelle de 30 cm a pu être observée sous l'effet de vagues de hauteur significative (H_s) de 3 m, intervenant peu après une tempête de 4-5 jours qui avait généré des vagues atteignant 2.5 m (H_s). Il semblerait qu'un phénomène de liquéfaction soit intervenu : le sédiment constitué de sables fins (légèrement envasés) ayant perdu sa structuration sous l'effet du cisaillement oscillant généré par les vagues voit sa viscosité apparente diminuer fortement (thixotropie). Le « rechargement du site » en 3 mois, mais principalement au cours d'épisodes de vagues, est remarquable. On peut généraliser ces observations : dans tous les secteurs sablo-vaseux, des variations rapides du sédiment (typiquement de l'ordre de la dizaine de cm) sont observées, la plupart du temps suivies de dépôts du même ordre de grandeur, intervenant lors de tempêtes ultérieures. La dominance des vagues comme agent de remaniement de ces fonds sablo-vaseux est indéniable (même dans l'environnement macro-tidal de l'embouchure de la Seine), et puisqu'en un point donné des tempêtes de même secteur sont susceptibles d'entraîner érosion ou dépôt, il semblerait que les tempêtes provoquent des érosions et dépôts distribués spatialement, les sédiments sableux se redéposant très rapidement. Les schémas de transports n'ont pas été élucidés par nos seules observations ponctuelles, d'autant moins que les évolutions résiduelles sont faibles. Toujours sur le site des Ratelets, où les observations sont les plus longues, une stabilité avait été constatée en 2008-2009 tandis qu'une érosion résiduelle d'une vingtaine de cm a été observée en 2010-2011. Cette tendance à une légère érosion sur ce point central du front ouest du banc du Ratier semble révéler une stabilisation voire une régression temporaire du banc du Ratier, observation qu'il conviendrait de confirmer avec les cartes de différentiels bathymétriques. Au passage, on observe que ces évolutions semblent indépendantes du débit de la Seine (une crue de $1500 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ pendant près d'un mois n'a pas d'effet visible sur la tendance résiduelle). Enfin, on relève que l'effet des marées n'a été mis en évidence que pour les fortes vives-eaux.

En Fosse Nord, un engraissement résiduel de 16 cm en 9 mois sur le site instrumenté a été observé : ce dépôt se produit principalement au cours des périodes de calme. Pour ce site, les mesures de vagues mettent en évidence un amortissement de l'ordre de 50-60% par rapport aux stations externes.

Le site du Ratier sud-est enregistre une érosion résiduelle de 10 cm en 7 mois de mesures. Les variations du niveau de sédiment au cours d'épisodes de vagues y sont plus atténuées que sur le flanc ouest du banc du Ratier. Les vents de SE comme ceux d'ouest sont susceptibles de générer des érosions, tandis que les dépôts interviennent au cours de tempêtes d'ouest (par exemple lorsqu'une érosion est observée aux Ratelets). »

L'ensemble des résultats des campagnes de mesures altimétriques dans le secteur d'embouchure de la Seine est reproduit en annexe 4 du présent rapport.

4- Distribution des turbidités de surface déduites des images satellite MODIS (NASA) à 250 m, et fusion avec les images à 1 km

L'étude de la distribution des turbidités de surface à partir des images à haute (250 m) et moyenne (1 km) résolutions du satellite MODIS de la NASA depuis son lancement en 2003 a été confiée à la société HOCER sous la maîtrise d'œuvre Ifremer. Un premier traitement parallèle des deux types d'images a ainsi été réalisé pour l'ensemble des images disponibles « claires » au niveau de l'embouchure (HOCER, 2010). Nous rappelons ici que les données à 250 m de MODIS/Aqua présentent le double intérêt d'avoir une résolution spatiale adéquate pour le suivi des MES et de la turbidité à l'échelle de l'embouchure de la Seine et de fournir la radiance dans les grandes longueurs d'onde, plus sensibles aux fortes concentrations en MES que celles disponibles dans les bandes de MODIS à 1 km. Dans un second temps, il a été demandé à HOCER de reprendre le traitement des images, d'une part en évaluant les valeurs de turbidité annoncées par comparaison aux mesures disponibles en surface, d'autre part en fusionnant les images à 1 km et à 250 m pour traiter l'ensemble de la zone d'étude (estuaire et embouchure de Seine) avec une dynamique réunissant les gammes couvertes par les deux types d'image (HOCER, 2011).

Après un exposé synthétique de la méthodologie employée, le contenu de la base de donnée est décrit, puis des exemples d'images sont fournis et commentés, illustrant différentes configurations représentatives rencontrées entre 2003 et 2010. L'ensemble des images de MES après fusion entre données à 250 m de résolution et données à 1 km de résolution est fourni sous forme d'annexe 2 dans le volume des annexes.

4.1 Méthodologie utilisée pour le traitement des images satellites et la constitution d'une base de données

Cette étude a été menée de la manière suivante :

- acquisition des images MODIS à 250 m « claires » (avec une couverture nuageuse faible) sur l'estuaire de la Seine archivées au LPDAAC (Land Process Distributed Active Archive Center) de la NASA depuis 2003 ;
- les images à 250 m couvrant la surface de la Terre selon des emprises de $10^{\circ} \times 10^{\circ}$, la Baie de Seine est couverte par 2 images se rejoignant au méridien 0° , au milieu de l'embouchure ; un programme pour réaliser automatiquement la fusion de ces images a donc été développé ;
- développement de programmes pour calculer automatiquement la turbidité avec l'algorithme développé à l'université de Bordeaux par l'équipe de J.M. Froidefond (Petus et al., 2010) ; cet algorithme est spécialement adapté aux MES et à la turbidité, mais les régressions utilisées ont été obtenues à partir de mesures effectuées dans le panache de l'Adour ; le même algorithme a également été utilisé avec succès sur le Rio de la Plata ;
- constitution d'une banque d'images et des paramètres environnementaux qui les accompagnent (sous forme de fichier Excel) comprenant :
 - l'amplitude (coefficient) et la phase de la marée (heures de pleine et basse mers),
 - l'intensité et la direction du vent mesurées à La Hève (jusqu'en juin 2009), complétées par l'intensité (en m/s) et la direction du vent du jour « QuikSCAT » [ces données, issues de mesures réalisées par le diffusiomètre du satellite QuikSCAT de la NASA, sont disponibles sur le serveur du CERSAT (

<http://www.ifremer.fr/cersat/en/data/download/gridded/mwf.htm>); elles sont extraites des données maillées du champ de vent journalier, à la résolution 0.5° * 0.5 au point de maille 49.75°/-0.25°]

- la hauteur et la période des vagues (hauteur significative, et fréquence de pic à 12 h TU et leur moyenne sur 24 h), issues d'une simulation rétrospective à l'aide du code Wavewatch III (extraction au point Havre 2) réalisée par F. Ardhuin,
- débit du jour de la Seine
- développement de programmes permettant la génération automatique des cartes de turbidité à 250 m et 1 km sur l'ensemble de la zone et sur un zoom de l'estuaire de la Seine.

Rappel des calibrations utilisées

a) Pour les images à 250 m de résolution (Petus et al., 2010) :

- concentrations en MES (mg/l) :

$$MES = 12450 * (Rad670/\pi)^2 + 666.1 * (Rad670/\pi) + 0.48$$

- turbidité (NTU) :

$$Turb = 26110 * (Rad670/\pi)^2 + 604.5 * (Rad670/\pi) + 0.24$$

b) pour les images MODIS à 1 km de résolution (Gohin et al. 2002, Gohin et a. 2005) :

les MES sont calculées à partir des concentrations en chlorophylle déterminées empiriquement par l'algorithme OC5 développé au département DYNECO/PELAGOS par Francis Gohin. (Gohin et al. 2002, Gohin et a. 2005) La turbidité est calculée à partir des MES et de la chlorophylle à partir de la régression suivante :

$$Turb = 0.54 * (mesino + 0.234*chla^{0.57})$$

La gamme de validation de ces algorithmes est initialement considérée limitée à 50 mg/l (resp. 25 mg/l) pour les images à 250 m (resp. 1 km) de résolution.

Un exemple de restitution des images satellites à 1 km et 250 m de résolutions pour le passage du 17 février 2003 à 14h00 est fourni figure 47. Les différences et complémentarités entre les deux images de baie de Seine apparaissent clairement : la résolution 1 km apporte une bien meilleure dynamique dans les eaux du large, dont la concentration de surface est de l'ordre de 3-5 mg/l, tandis que les informations dans l'embouchure sont rapidement saturées. Au contraire, l'image à 250 m n'apporte aucune information au cœur de la baie, mais une dynamique beaucoup plus riche à la côte, avec des valeurs jusqu'à une cinquantaine de mg/l. En particulier, un « bouchon vaseux » apparaît clairement, à peu près centré sur le pont de Normandie.

Ainsi, un ensemble de 358 images a été traité, avec au moins la résolution de 250 m et le plus souvent celle de 1 km en plus. Le tableau qui répertorie ces images et les conditions d'environnement correspondantes est fourni dans l'annexe A2.1

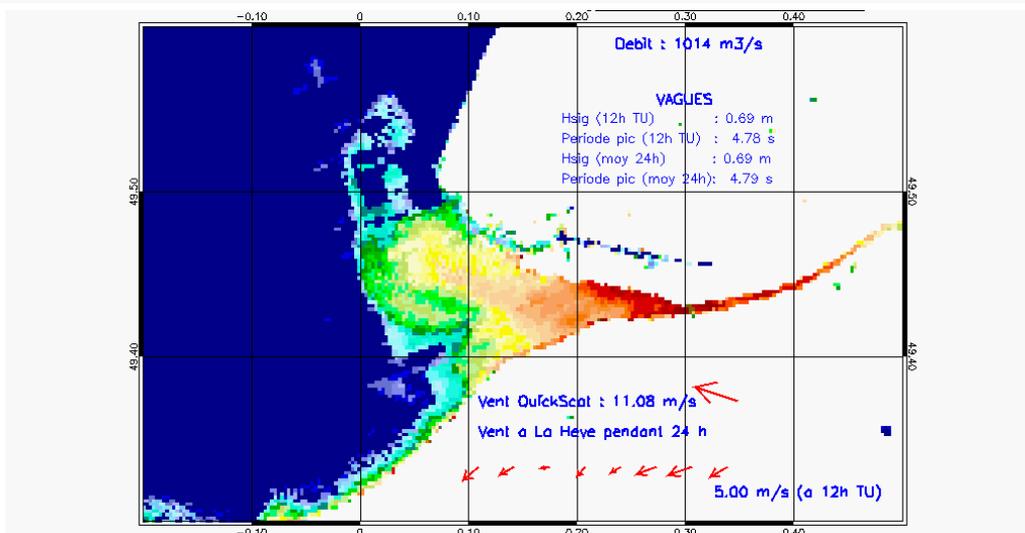
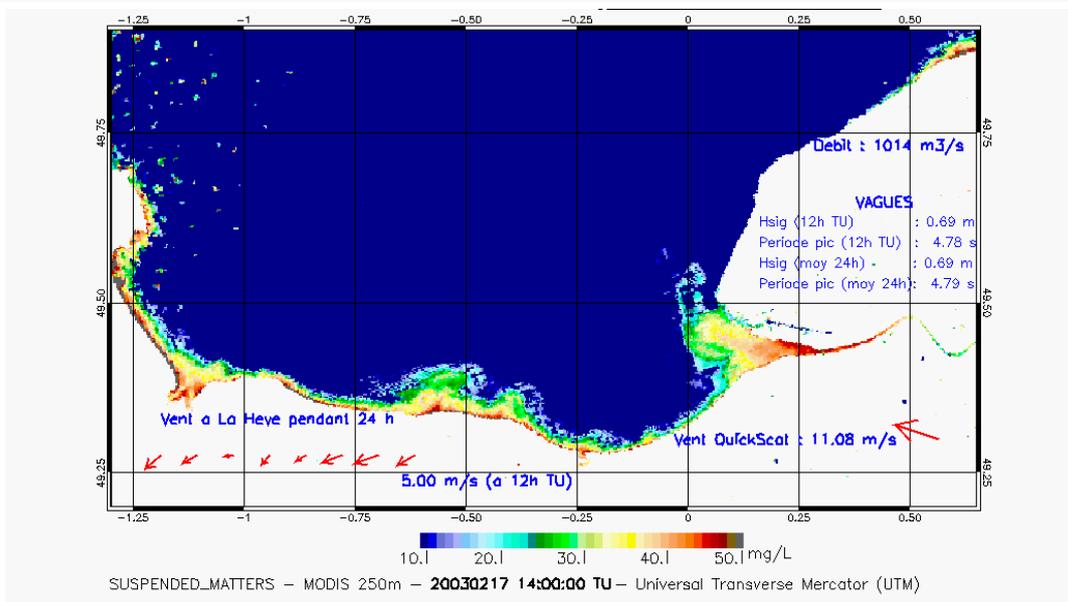
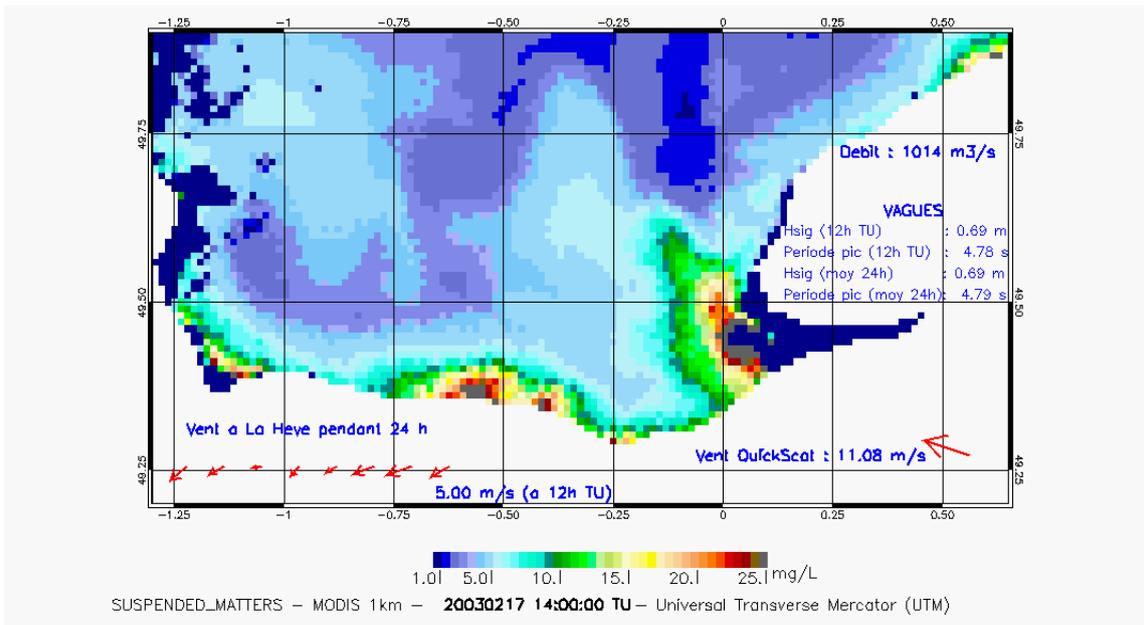


Figure 47 : Exemple d'images satellite MODIS issues du premier traitement : a) avec une résolution de 1 km, b) et c) avec une résolution de 250 m.

Deuxième phase de l'étude : évaluation des calibrations des images à 250 m et fusion avec les images à 1 km

La deuxième phase de l'étude avait pour but de revoir la calibration des images à « haute » résolution, d'une part en comparant les résultats aux données disponibles au moment des passages du satellite, d'autre part en évaluant l'algorithme de traitement proposé par Doxaran et al. (2009) pour l'estuaire de la Gironde, et surtout en recherchant une continuité avec les images à 1 km de façon à pouvoir les fusionner.

Evaluation des algorithmes utilisés pour la résolution 250 m

Les données in-situ de turbidité et de MES disponibles dans l'estuaire de la Seine ont d'abord été collectées :

- données provenant de la bouée MAREL Honfleur
- données fournies par le GIPSA (N. Bacq)
- données récentes mesurées dans le cadre du projet SeineAval IV MODEL.

Un fichier de 171 couples de valeurs associant des pixels clairs des images MODIS 250 m et des données *in situ* a été constitué. La difficulté d'établir une relation entre mesures *in situ* et données satellite vient du fait que (1) les variations des mesures *in situ* sont très rapides en fonction de la marée, (2) les données MAREL Honfleur et FATOUVILLE sont très proches de la berge et donc soumises à d'importantes remises en suspension en fonction de la marée, et correspondent dans les images à des pixels susceptibles d'être parasités par la terre, (3) il a ainsi été décidé de décaler d'un pixel vers le centre du fleuve les données satellite correspondant aux mesures MAREL Honfleur.

Les figures 48a et 48b présentent la correspondance entre turbidités *in situ* observées et turbidités satellite constituées d'après les algorithmes de :

Petus :
$$\text{Turb} = 26110 * (\text{Rad}670 / \pi)^2 + 604.5 * (\text{Rad}670 / \pi) + 0.24$$

et Doxaran :
$$\text{Turb} = 0.54 * (12.996 * \text{Exp}((\text{Rad}840 / \text{Rad}670) / 0.189))$$

Avec les mesures de turbidité disponibles, la validation de l'algorithme de Doxaran est médiocre, et celle de l'algorithme de Petus reste meilleure : c'est donc ce dernier qui est conservé.

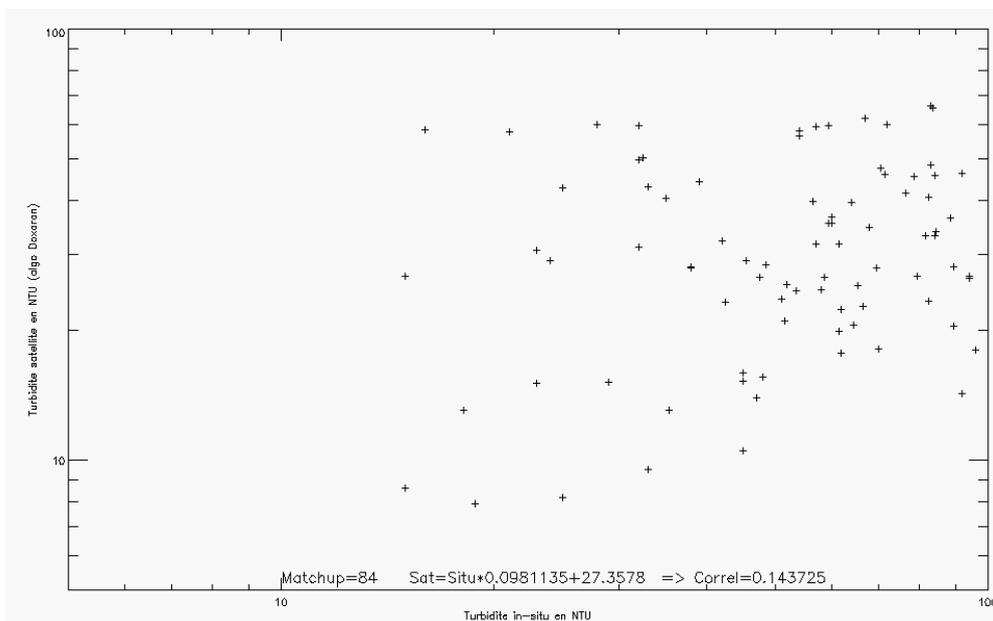
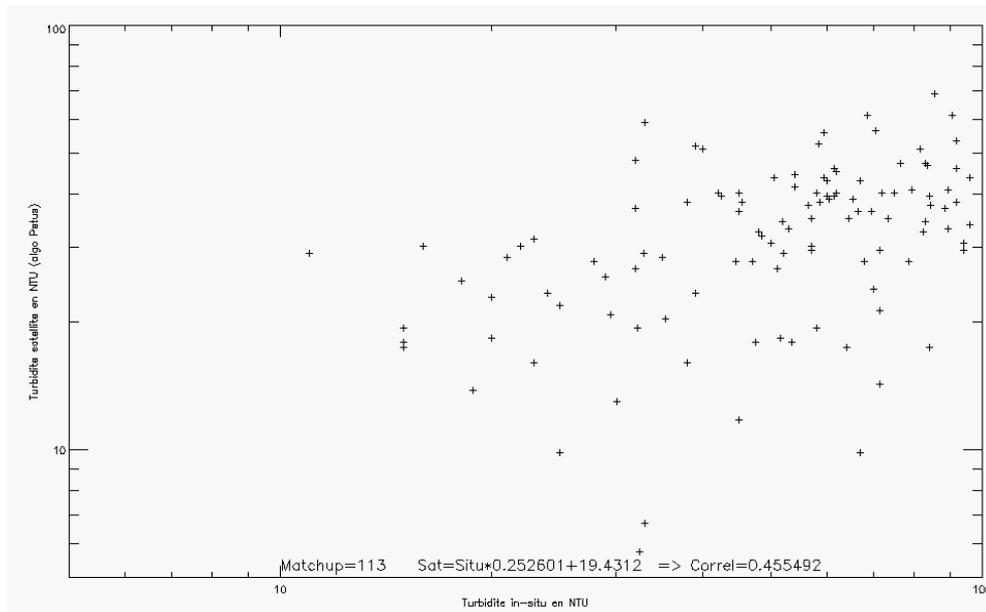


Figure 48 : Diagrammes de « corrélation » entre turbidités in situ (abscisse) et turbidités satellite déduites des algorithmes de Petus et al. (2010), en haut, et de Doxaran et al. (2009), en bas.

Recalage à partir des images à 1 km

Les images MODIS à 1 km de MES et de turbidité sont réalisées quotidiennement à l'IFREMER. Elles sont calibrées régulièrement à partir des jeux de données issus des réseaux de surveillance (REPHY, RNO, SOMLIT, SRN). Un algorithme de type « switch » est appliqué, privilégiant dans les fortes concentrations le canal à 670 nm par rapport au 560 nm pour les zones plus claires. On peut donc légitimement penser que les pixels communs aux images à 1 km et 250 m seront calculés à partir des canaux à 670 nm, ce qui permettra d'effectuer un recalage sur des données estimées avec un signal de même type que se soit avec l'algorithme « switch » ou avec celui de C. Pétus.

La calibration s'effectue sur les images « zoomées » sur l'estuaire de la Seine. Les canaux « suspended_matters », et « turbidity » sont extraits des images à 1 km de l'archive IFREMER.

La turbidité et les MES à 250m sont calculées à partir de l'algorithme de C. Pétus. Les données à 250 m sont re-projetées sur la grille à 1km. Pour chacune des images de MES la régression s'effectue sur les pixels communs dont les valeurs à 1 km sont inférieures à 40 mg/l et les valeurs à 250 m supérieures à 0 mg/l. Le résultat des régressions est appliqué à l'ensemble des pixels à 250m pour chacune des images dont le r^2 est supérieur à 0.5 (corrélation > 0.71). Pour les autres, un coefficient et une constante de régression moyens, calculés avec les r^2 supérieurs à 0.8 (corrélation > 0.9), sont appliqués.

Fusion des images 250 m et 1 km

La calibration à partir des pixels communs des images à 250 m et 1 km assure la continuité et la cohérence entre les données internes à l'estuaire à 250 m et les images à 1 km au large. Les images ont finalement été fusionnées et mises en concordance avec les données hydro-météo-fluviales comme dans la première phase du traitement.

Remarques:

- *le coefficient r^2 apparaît en bas à gauche de l'image ce qui permet de savoir quelle méthode a été appliquée ([voir plus haut](#)).*
- *un masque terre/nuages plus fin à été appliqué permettant de bien distinguer les valeurs saturées des nuages.*
- *sur certaines images on constate que certains pixels à 1km en bordure de panaches sont surestimés.*
- *au large les pixels nuageux bien masqués à 1 km peuvent être comblés par des mauvaises valeurs estimées à partir des données à 250m.*

4.2 Présentation d'une collection d'images de MES MODIS « fusionnées 1 km et 250 m »

L'ensemble des images ainsi traitées est donné dans l'annexe A2.2, sous forme de cartes de MES de la baie de Seine ou d'un zoom de l'embouchure de la Seine, à l'image de la figure 49, qui reprend l'exemple de la figure 47. On voit clairement que dans la nouvelle image composite, les dynamiques des zones du large et côtières sont toutes les deux restituées. Le choix d'avoir procédé au traitement sur la haute résolution pour l'ensemble de la baie de Seine nous permet aussi de disposer d'une information fine sur l'ensemble de la côte du Calvados et en baie des Veys, en harmonie avec le nouveau modèle hydrosédimentaire. Ainsi les algorithmes de traitements mis en place doivent nous permettre de produire une information sur les resuspensions qui sont observées sous l'effet des vagues le long de la côte du Calvados. On remarquera que dans le secteur d'embouchure, les concentrations en MES ont presque doublé entre le 1^{er} traitement (Fig. 47) et le traitement final (Fig. 49), ce qui est cohérent avec la « corrélation » qui apparaît sur les turbidités en figure 48 (haut).

Dans la suite, nous présentons une série d'images sélectionnées présentant des configurations caractéristiques souvent rencontrées, ou permettant d'identifier assez nettement des processus sédimentaires majeurs. Les paramètres d'environnement spécifiés sur chaque figure sont :

- en haut, à gauche : marée (heures des basses et hautes mers, coefficient), ainsi que le niveau de surface libre au Havre au passage du satellite
- en haut à droite : variation du débit de la Seine dans les 15 jours qui précèdent
- au milieu à droite : débit du jour de la Seine, et hauteurs significatives et période de pic des vagues (à 12h TU le jour du passage du satellite ou en moyenne pendant les 24 h

- en bas à gauche : évolution du vent (vecteur, en rouge) observé à la Hève depuis 24h et valeur du vent à 12 h TU (intensité du dernier vecteur)
- en bas à droite : vent journalier issu de mesures réalisées par le diffusiomètre du satellite QuikSCAT de la NASA au point de maille 49.75°/-0.25°
- le jour et l'heure du passage du satellite apparaissent en gras.

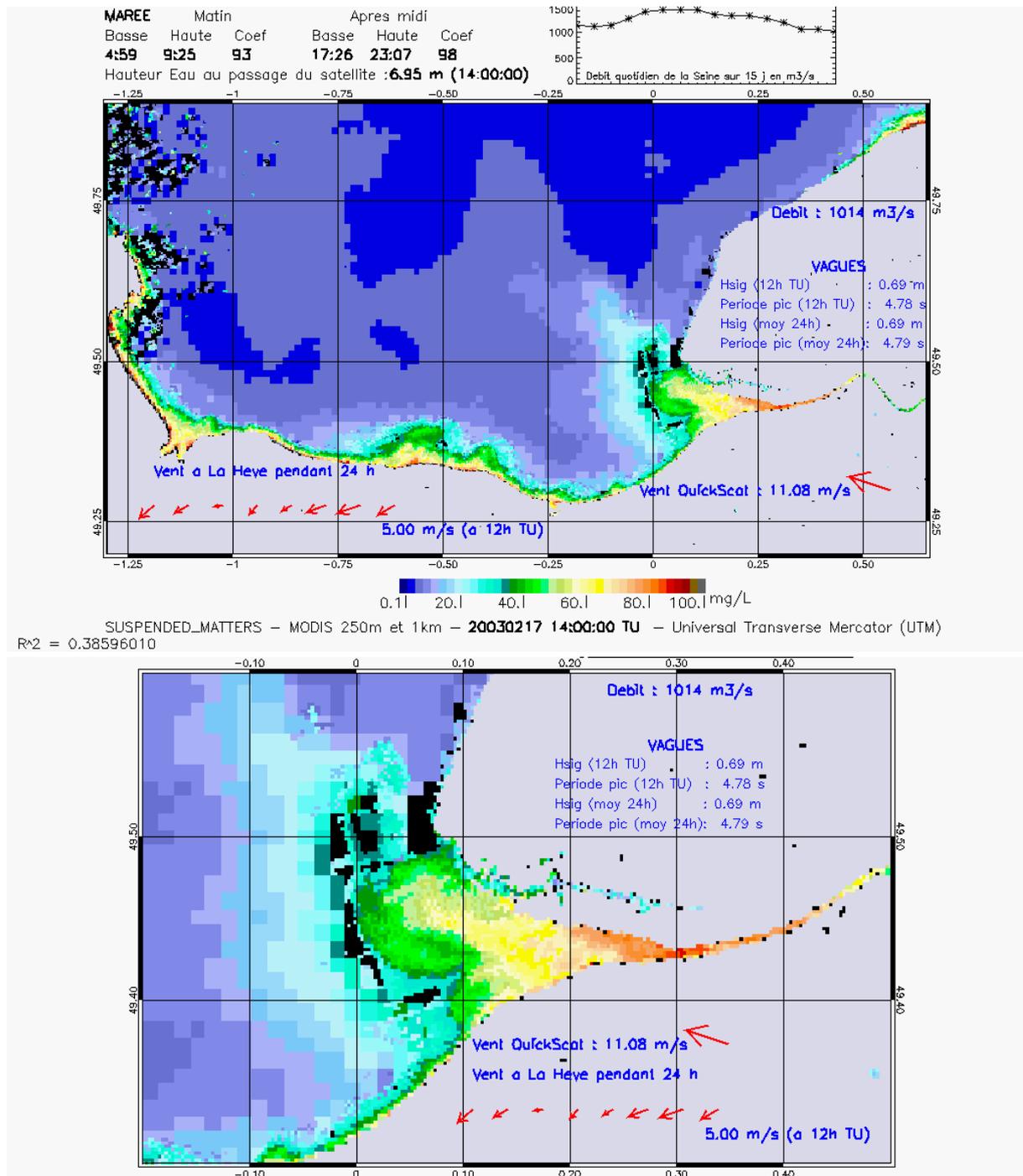


Figure 49 : Exemple d'image satellite MODIS issue du second traitement, i.e. après fusion des images à 250 m et 1 km. Situation du 17 février 2003, 14:00 h TU.

Débits encore élevés après une crue à 1500 m³.s⁻¹, pendant le jusant...

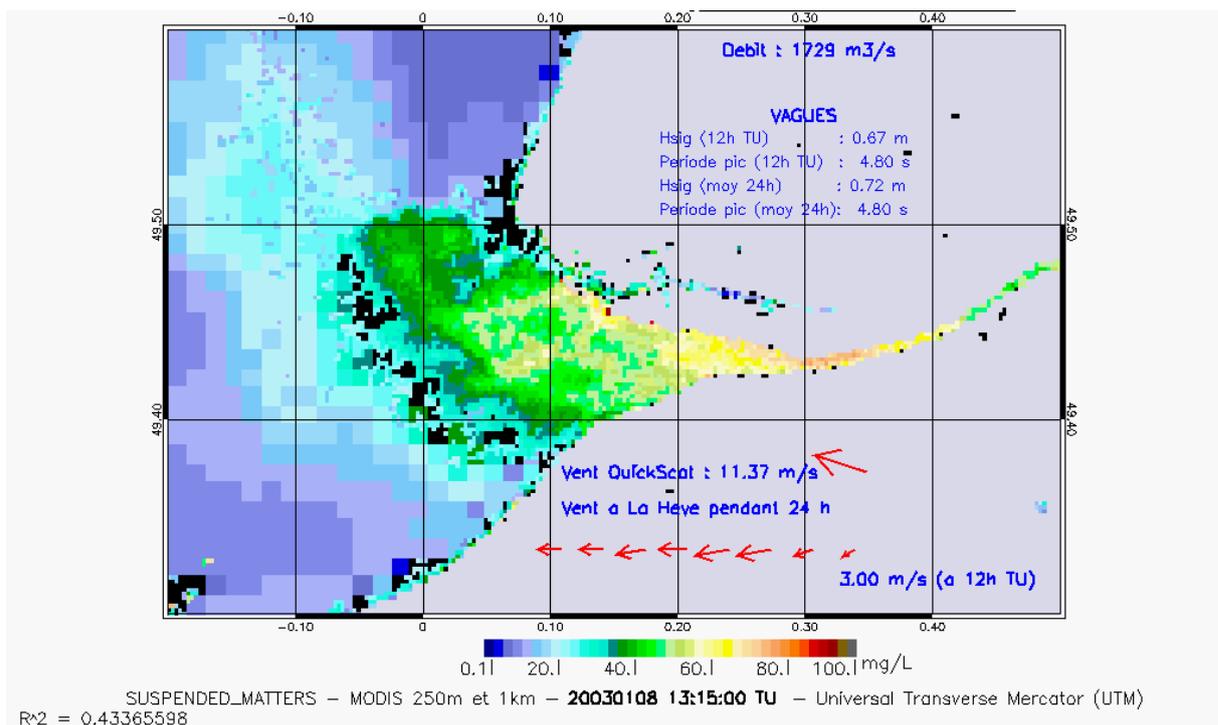
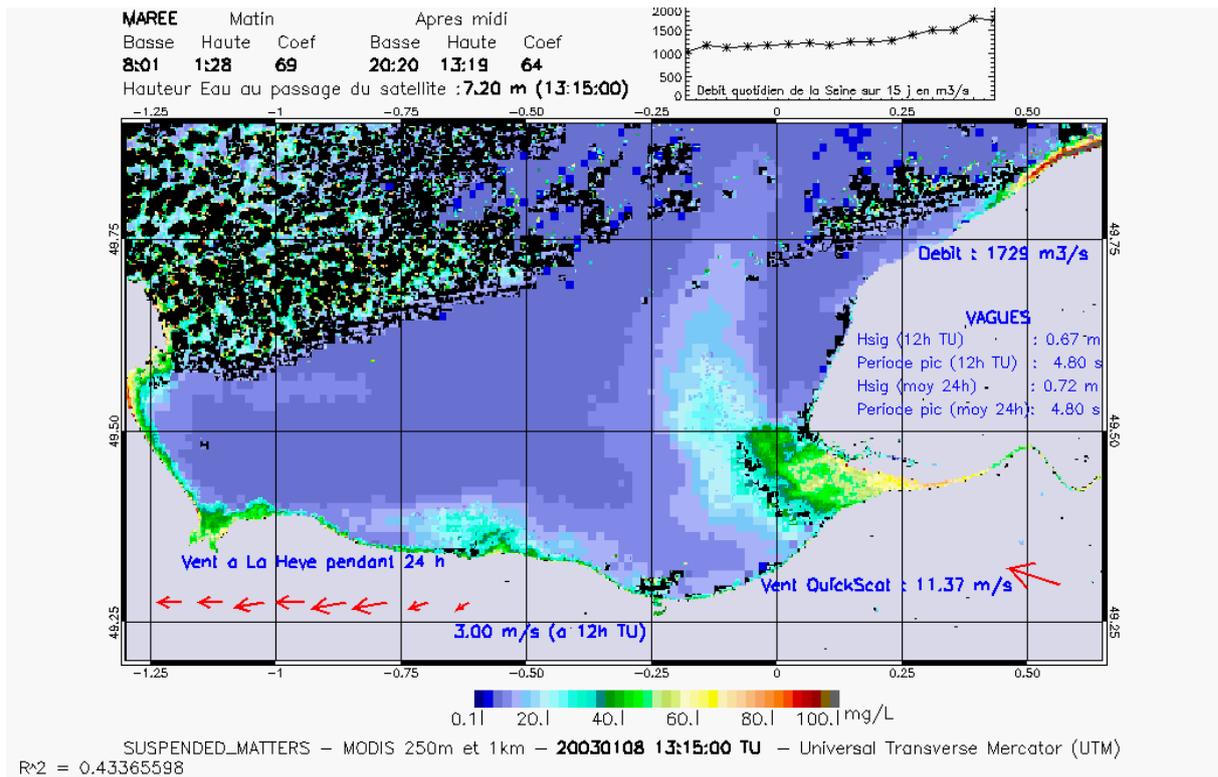


Figure 50 : Distribution des MES de surface, issues des images satellite MODIS à 250 m et 1 km de résolution. Situation de crue et vent d'est, marée moyenne, pleine mer.

Rare image de crue montrant le bouchon vaseux à pleine mer positionné à peu près à Fatouville ...

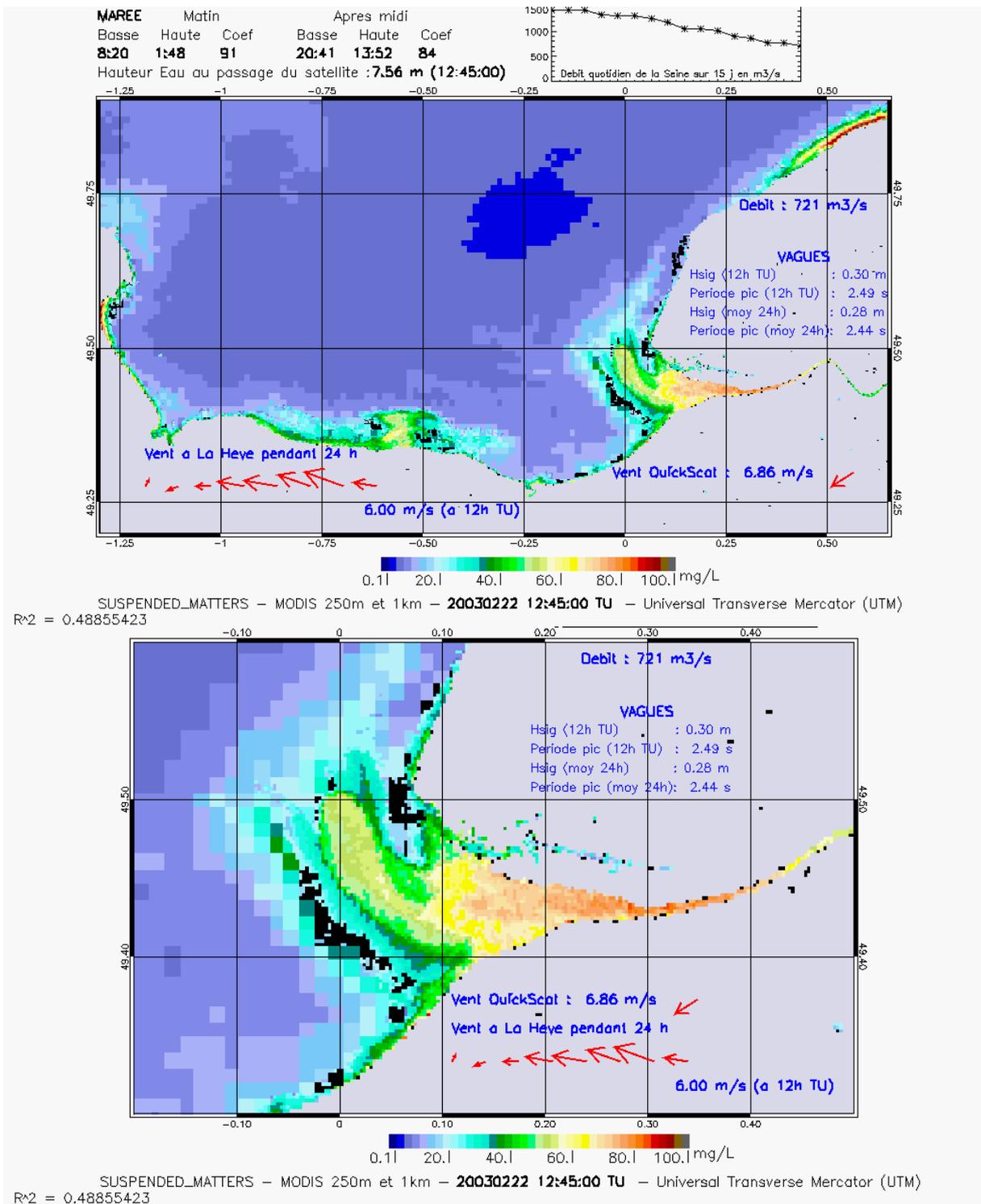


Figure 51 : Distribution des MES de surface, issues des images satellite MODIS à 250 m et 1 km de résolution. Situation de débit encore élevé et vent d'est, marée moyenne, 1 h avant pleine mer

Bouchon vaseux vers la Risle, et trace du courant de Verhaule devant La Hève ; on remarque aussi de fortes suspensions sur la côte du pays de Caux : effet du vent d'est qui a précédé ?...

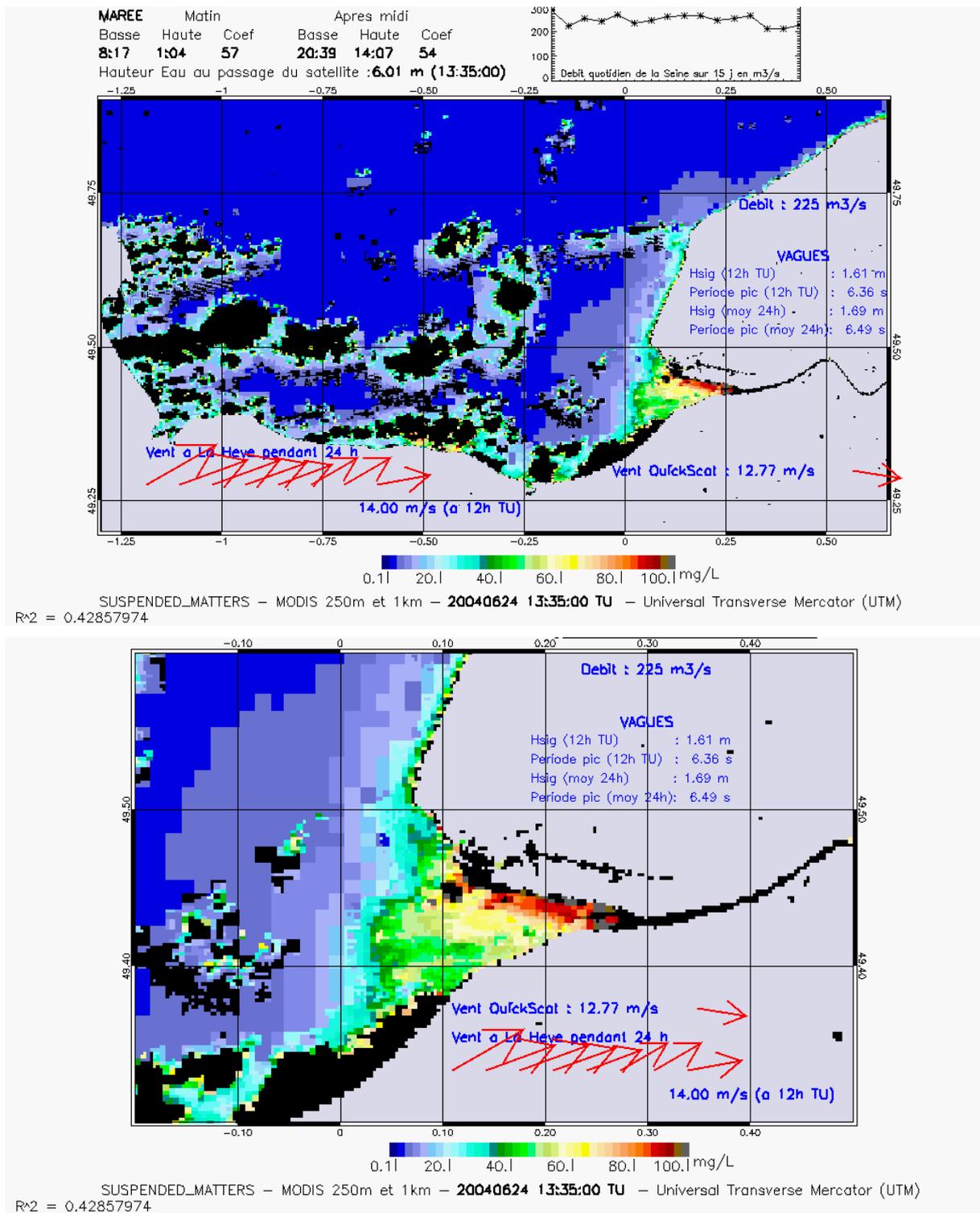


Figure 52 : Distribution des MES de surface, issues des images satellite MODIS à 250 m et 1 km de résolution. Situation d'étiage et vent d'ouest, petite marée, 1/2 h avant pleine mer

Les forts vents d'ouest/sud-ouest qui ont sévi pendant les jours précédents ont levé des vagues de 1.7 m, et généré à l'embouchure des resuspensions, probablement indépendantes du bouchon vaseux, qui à pleine mer se retrouvent dans la fosse nord...

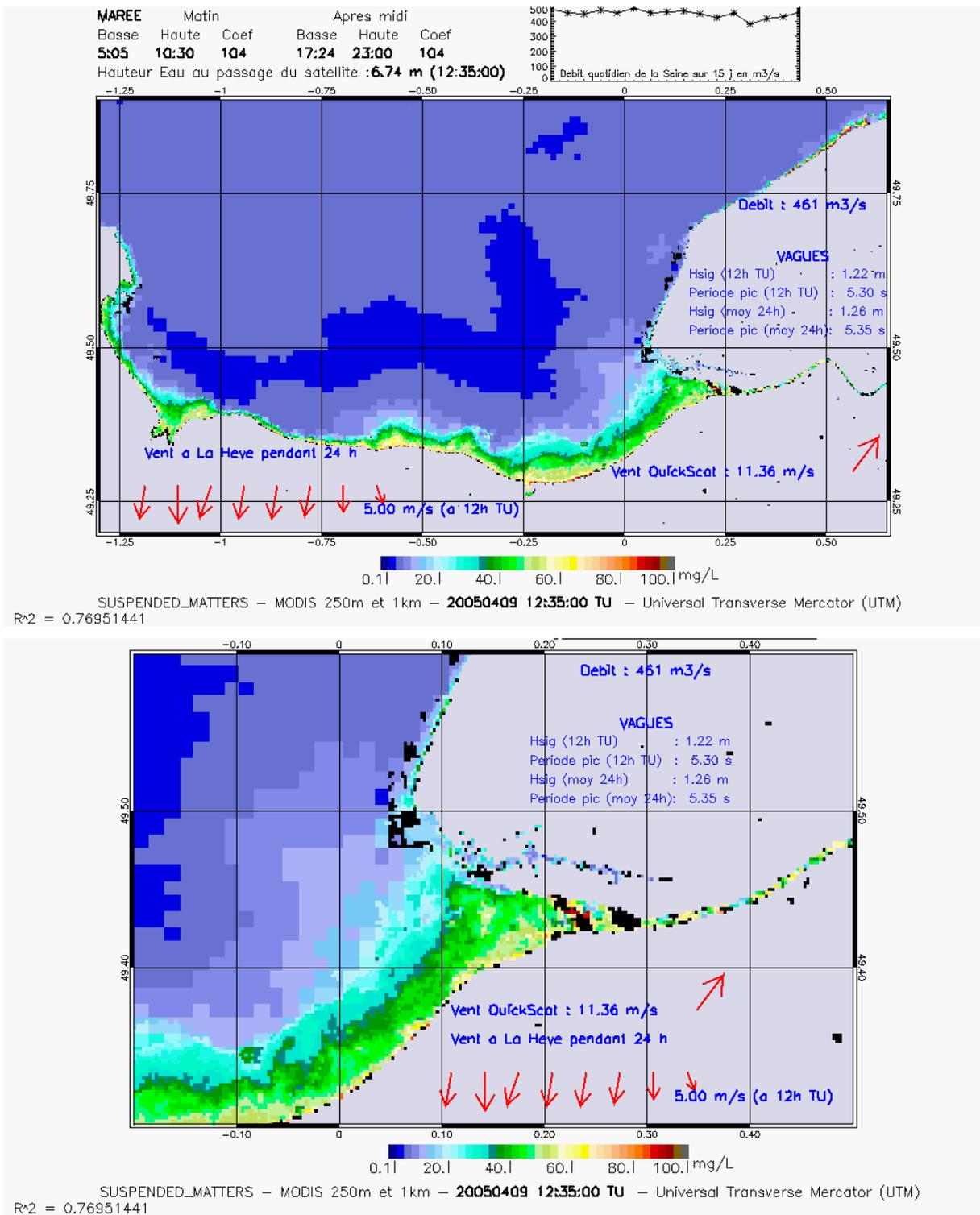


Figure 54 : Distribution des MES de surface, issues des images satellite MODIS à 250 m et 1 km de résolution. Situation de débit moyen et vent fort de nord, vive eau, 2 h après pleine mer.

Forte empreinte des remises en suspension le long du Calvados par les vagues générées par le vent de nord...

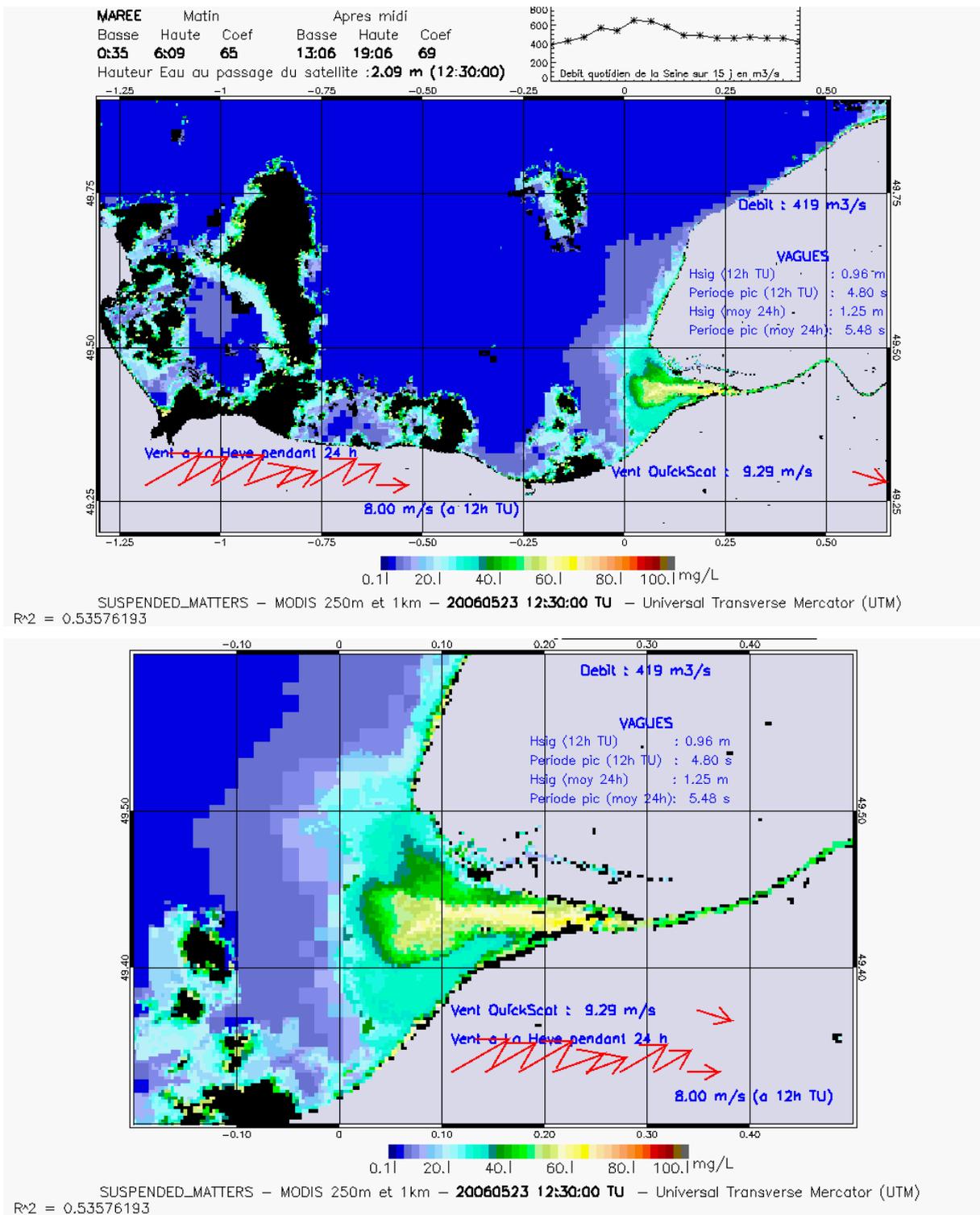


Figure 55 : Distribution des MES de surface, issues des images satellite MODIS à 250 m et 1 km de résolution. Situation de débit moyen et vent fort de sud-ouest, marée moyenne, basse mer.

Ici les resuspensions liées aux vagues peuvent se confondre avec le bouchon vaseux. Les concentrations restent faibles : début de renverse de basse mer ?

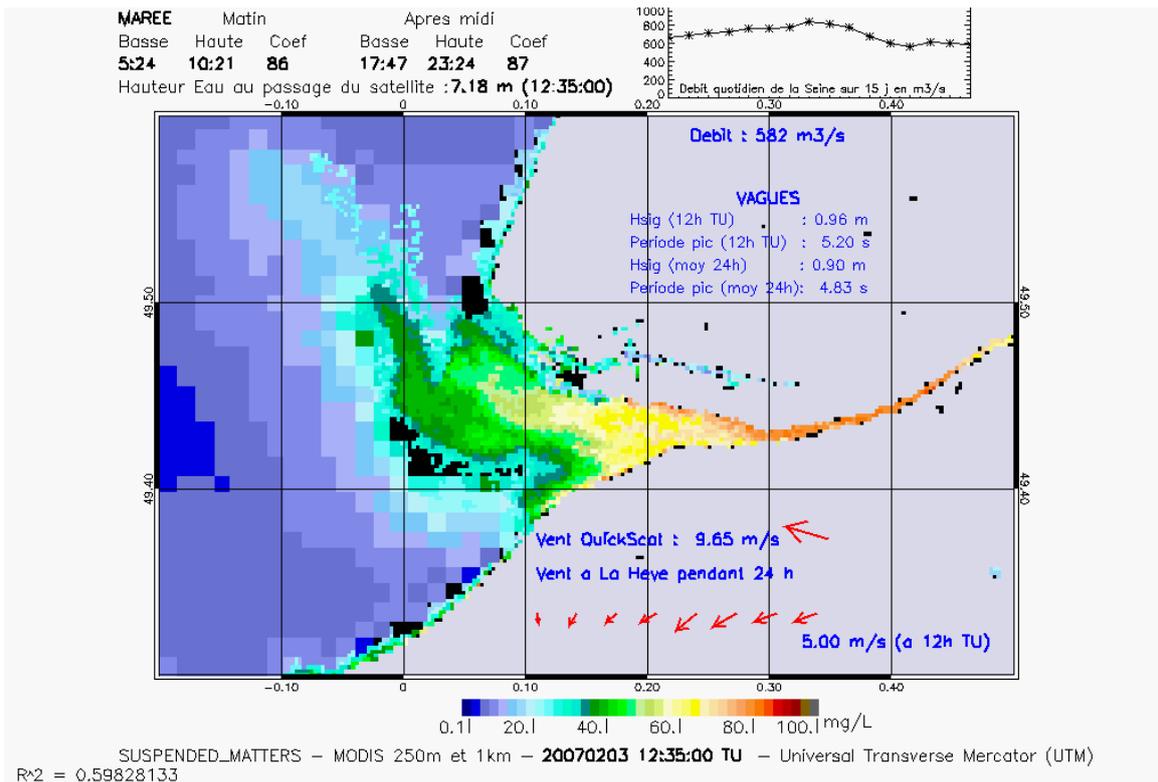


Figure 56 : Distribution des MES de surface, issues des images satellite MODIS à 250 m et 1 km de résolution. Situation de débit moyen et vent modéré d'est, petite vive eau, 2h après pleine mer

Le bouchon vaseux s'identifie bien, placé devant l'embouchure de la Risle

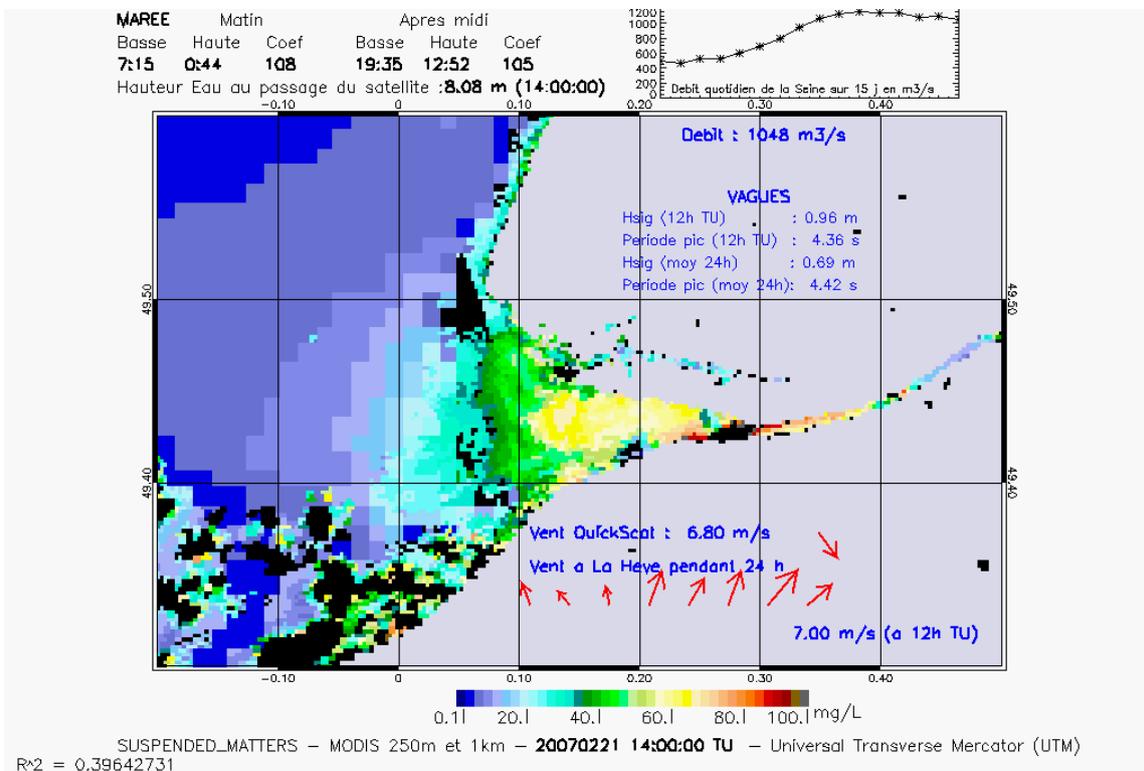


Figure 57 : Distribution des MES de surface, issues des images satellite MODIS à 250 m et 1 km de résolution. Situation de petite crue et vent de sud-ouest, vive eau, 1h après pleine mer

Très nette position du bouchon vaseux, au niveau du pont de Normandie, à peu près à pleine mer.

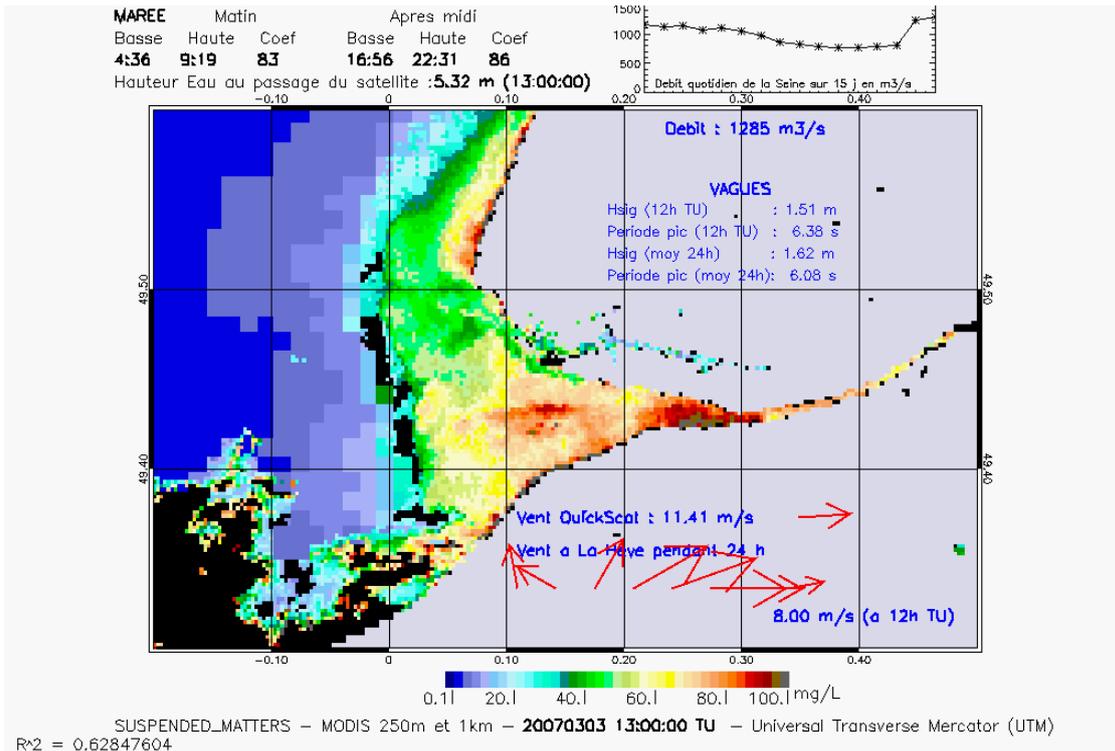


Figure 58 : Distribution des MES de surface, issues des images satellite MODIS à 250 m et 1 km de résolution. Situation de petite crue et vent fort de sud-ouest puis ouest, petite vive eau, 4h avant basse mer

Bouchon vaseux bien localisé, vagues importantes, resuspensions dans les bancs d'embouchure et devant le pays de Caux au nord de la Hève...

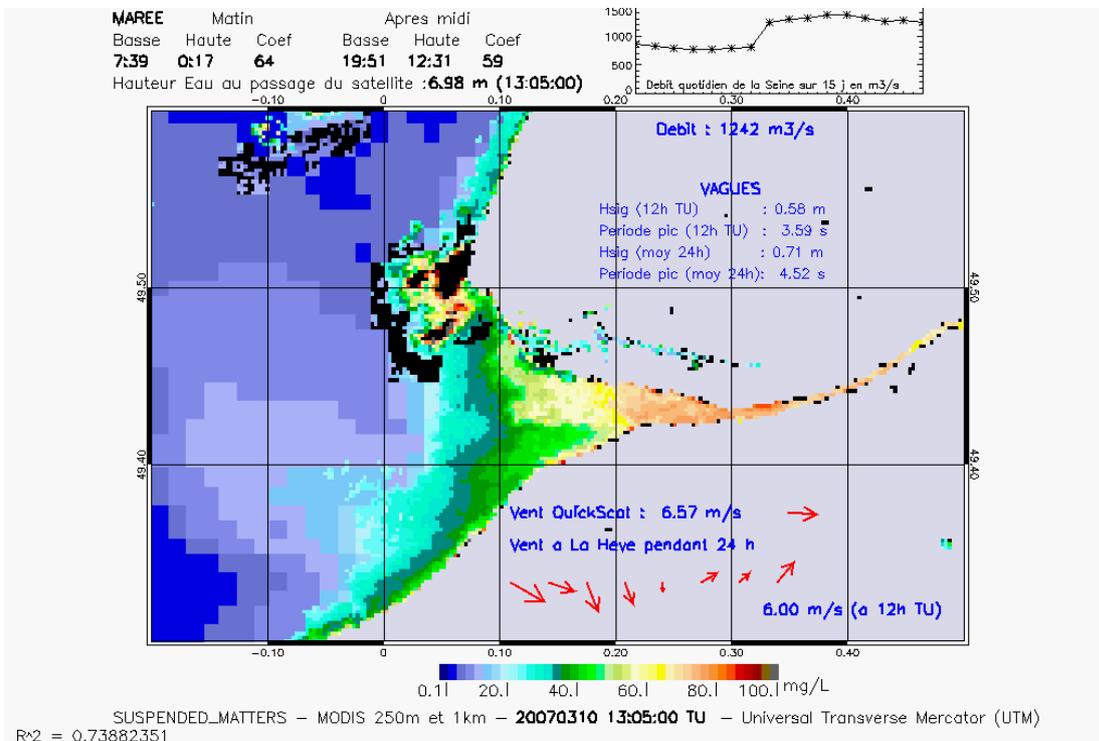


Figure 59 : Distribution des MES de surface, issues des images satellite MODIS à 250 m et 1 km de résolution. Situation de petite crue et vent modéré de sud-ouest, petite marée, 1/2 h après pleine mer

Pour ce débit, le bouchon vaseux à pleine mer est à Fatouville...

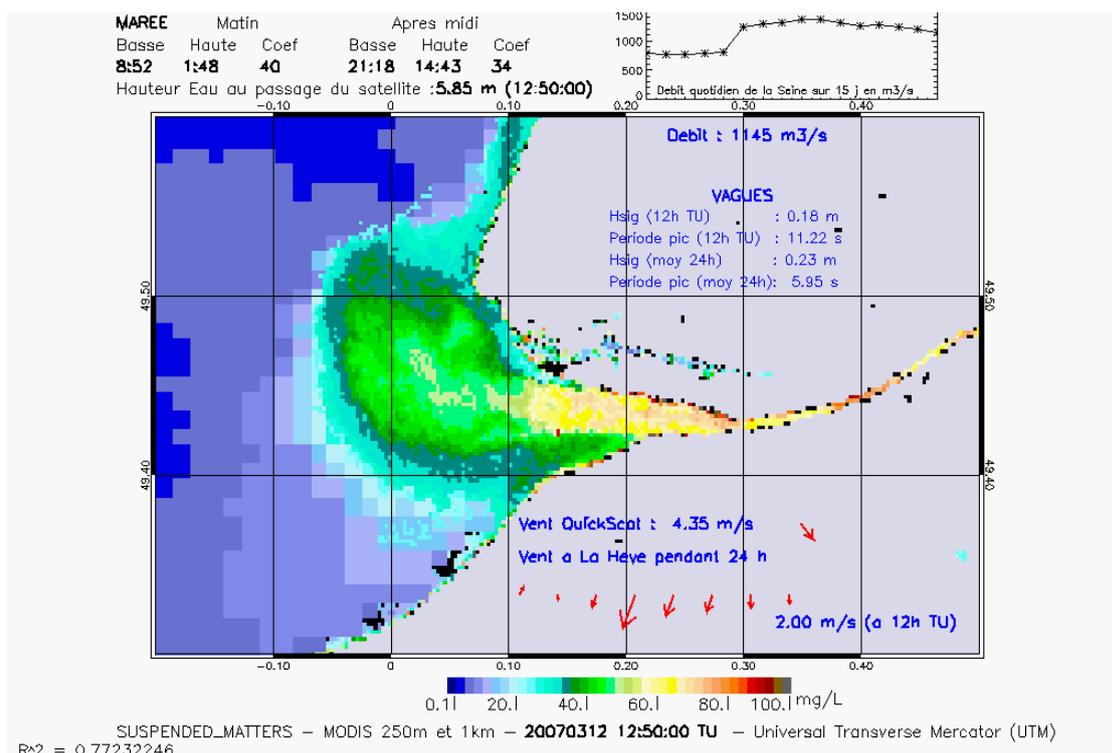


Figure 60 : Distribution des MES de surface, issues des images satellite MODIS à 250 m et 1 km de résolution. Situation de petite crue et vent faible, morte eau, 2h avant pleine mer

Trace du courant de Verhaule, bouchon vaseux s'étendant jusqu'à la Risle, ? ...

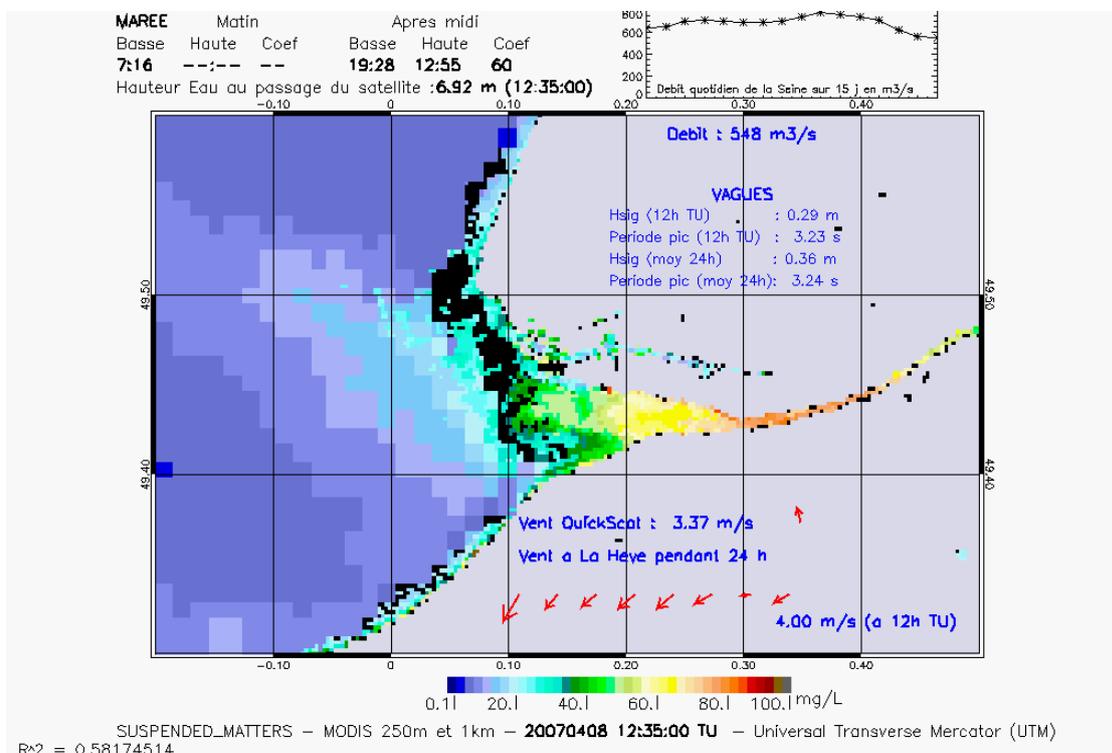


Figure 61 : Distribution des MES de surface, issues des images satellite MODIS à 250 m et 1 km de résolution. Situation de débit moyen et vent faible, marée moyenne, 1/2 h avant pleine mer

Bouchon vaseux devant Fatouville peu avant pleine mer...

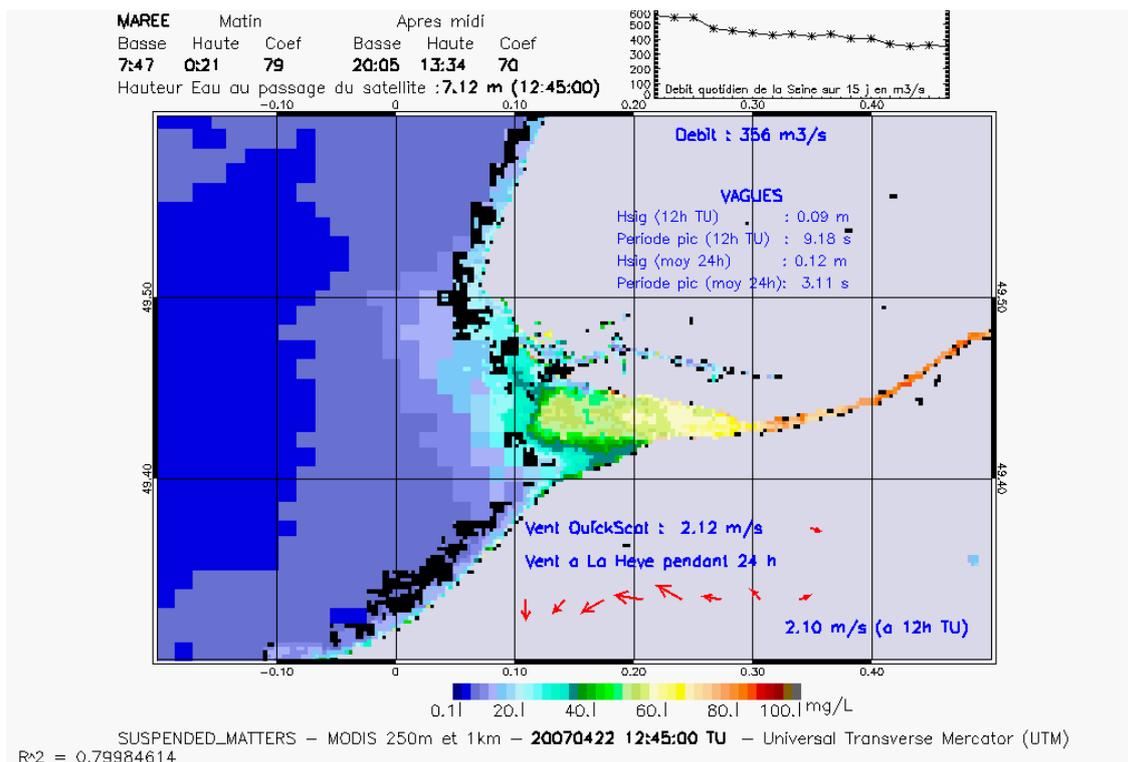


Figure 62 : Distribution des MES de surface, issues des images satellite MODIS à 250 m et 1 km de résolution. Situation de débit faible et vent faible, marée moyenne, 1 h avant pleine mer

Bouchon vaseux entre Tancarville et La Risle...

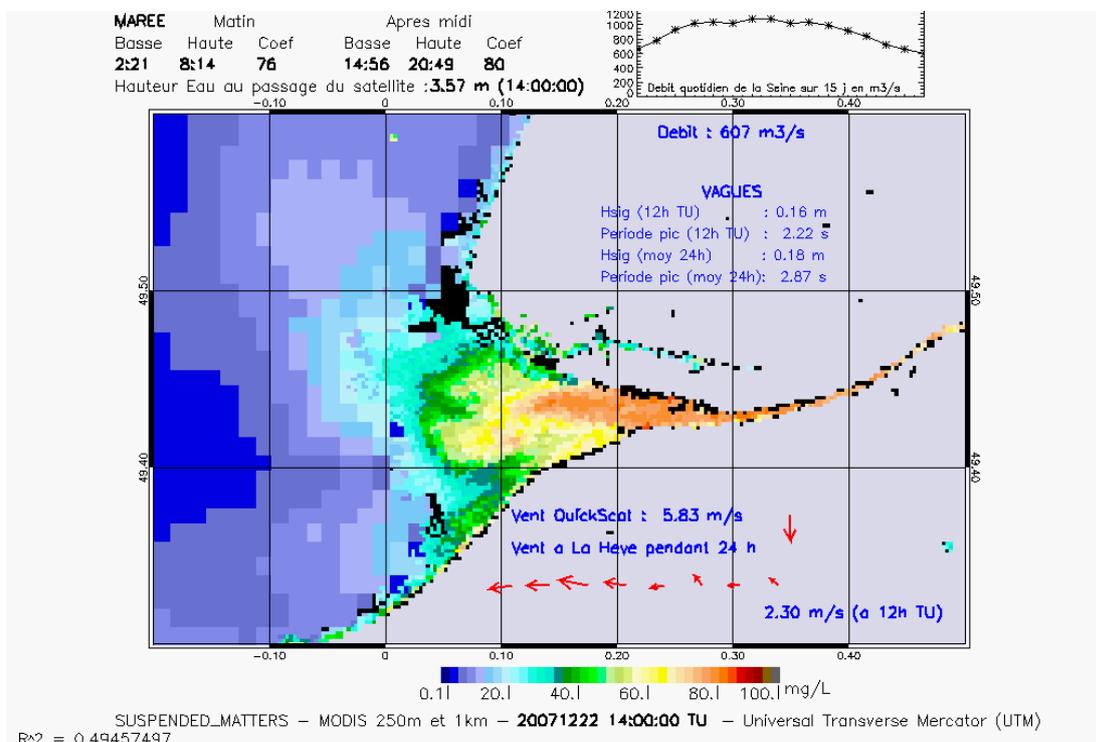


Figure 63 : Distribution des MES de surface, issues des images satellite MODIS à 250 m et 1 km de résolution. Situation de débit élevé après petite crue, petite vive eau, 1 h avant basse mer

Bouchon vaseux devant Honfleur...

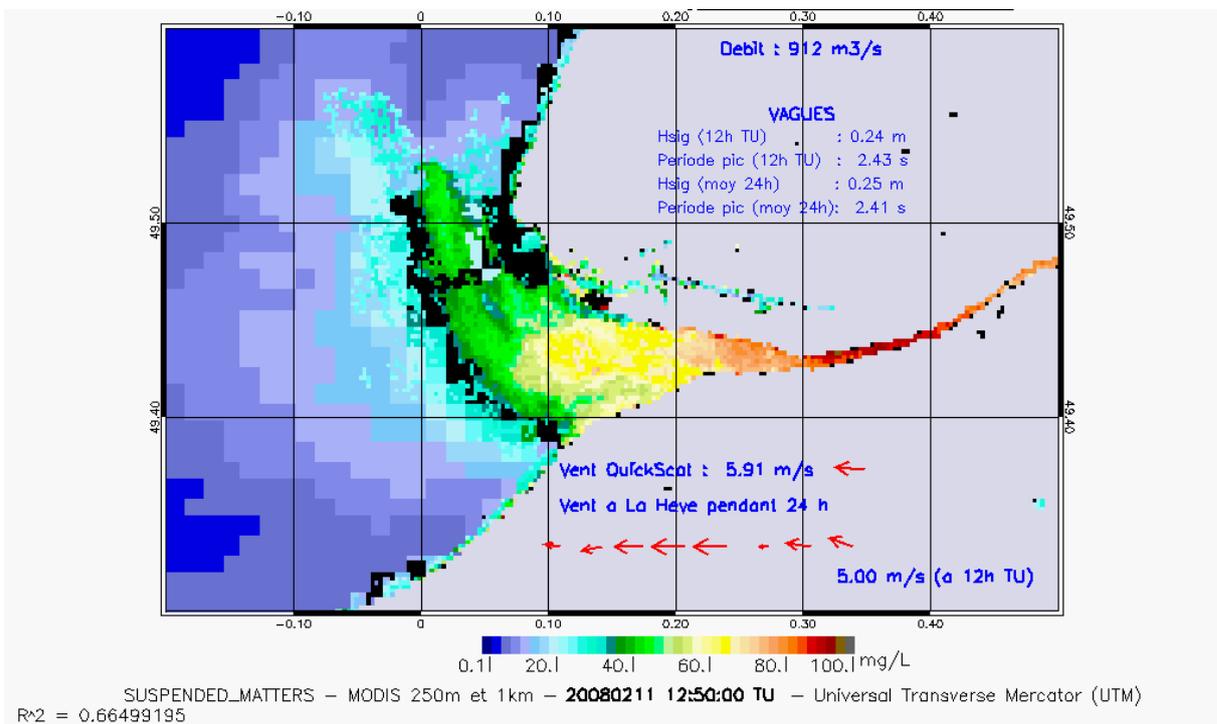
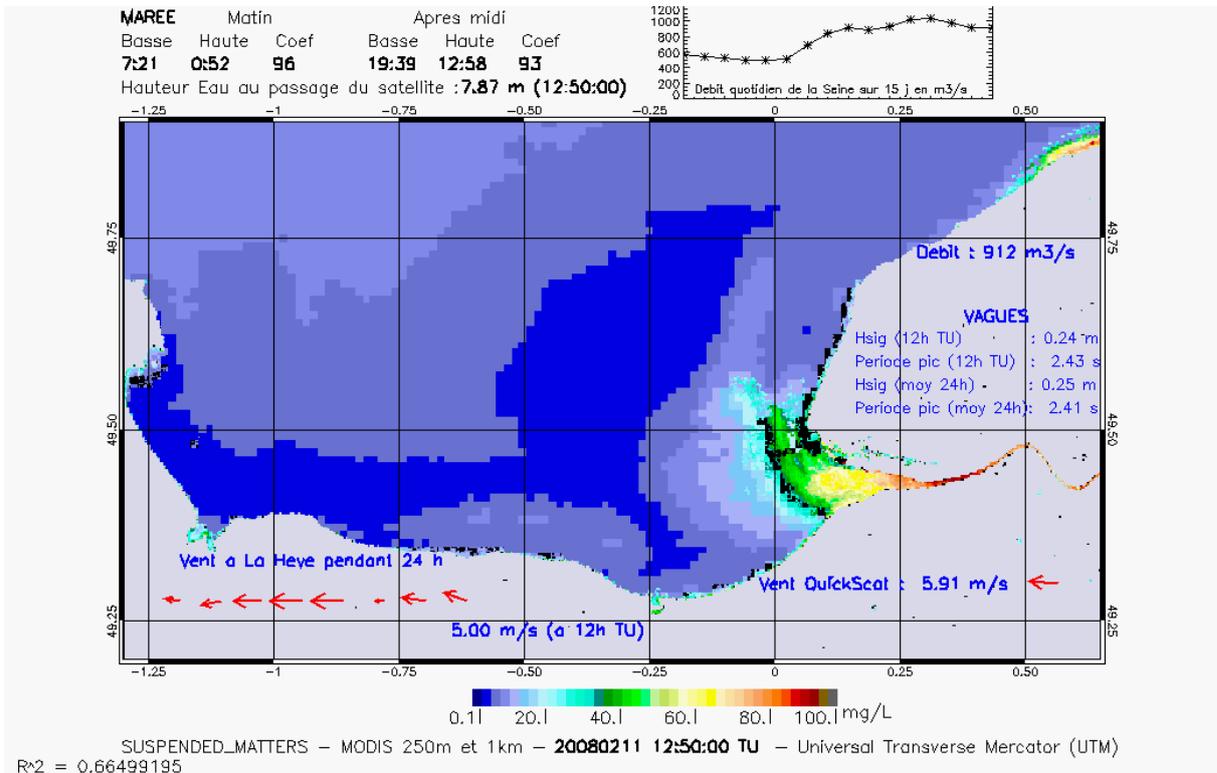


Figure 64 : Distribution des MES de surface, issues des images satellite MODIS à 250 m et 1 km de résolution. Situation de débit élevé et vent faible, vive eau, pleine mer

Positionnement du bouchon vaseux devant Fatouville à pleine mer...

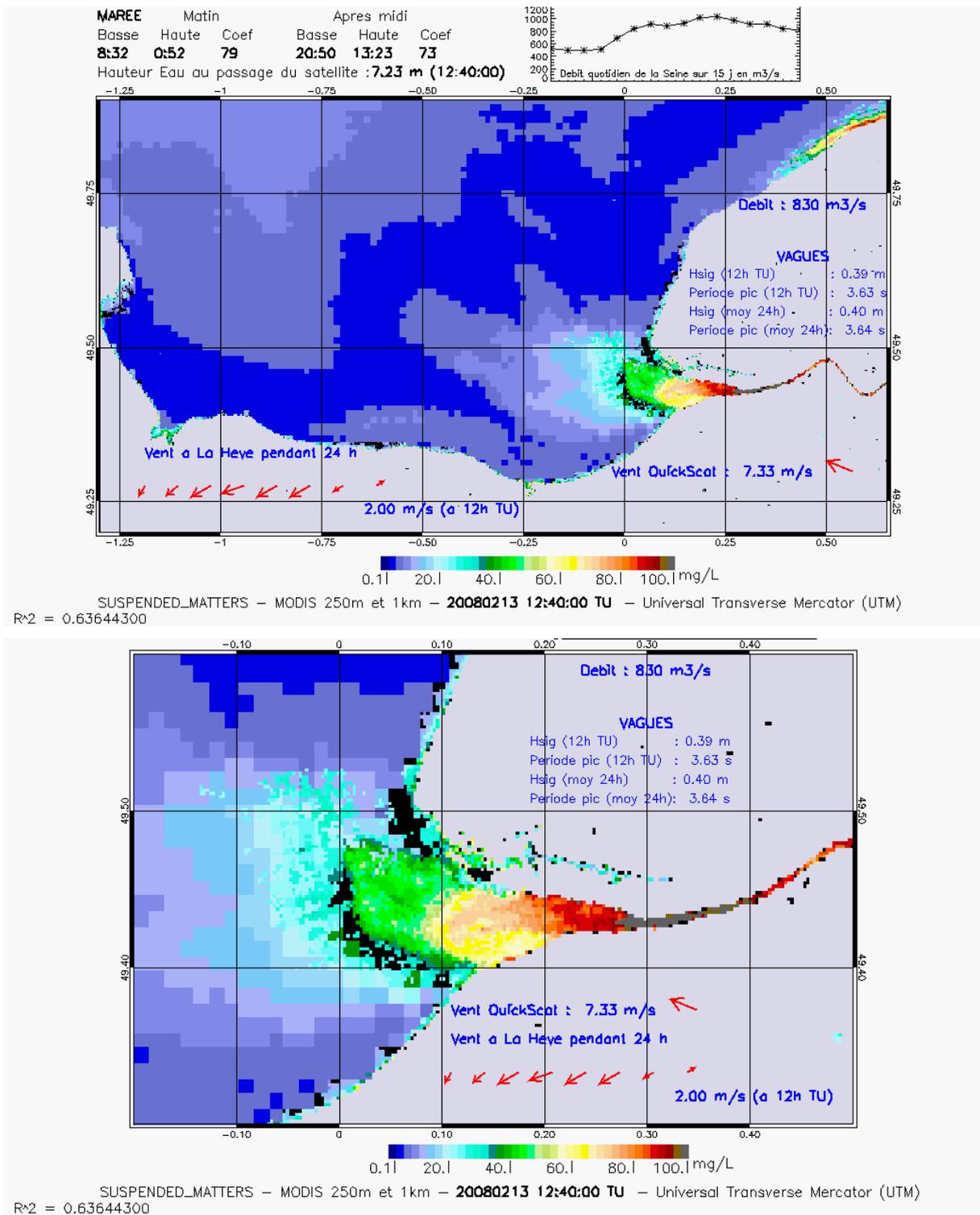


Figure 65 : Distribution des MES de surface, issues des images satellite MODIS à 250 m et 1 km de résolution. Situation de débit élevé et vent faible, marée moyenne, 1h avant pleine mer

Positionnement du bouchon vaseux entre le pont de Normandie et Fatouville, cohérent avec situation du 11 février 2008 ; les concentrations sont plus élevées que le 11, alors que l'amplitude de marée est plus faible : il est probable que le 11 février (Fig. 64) la décantation a déjà commencé...

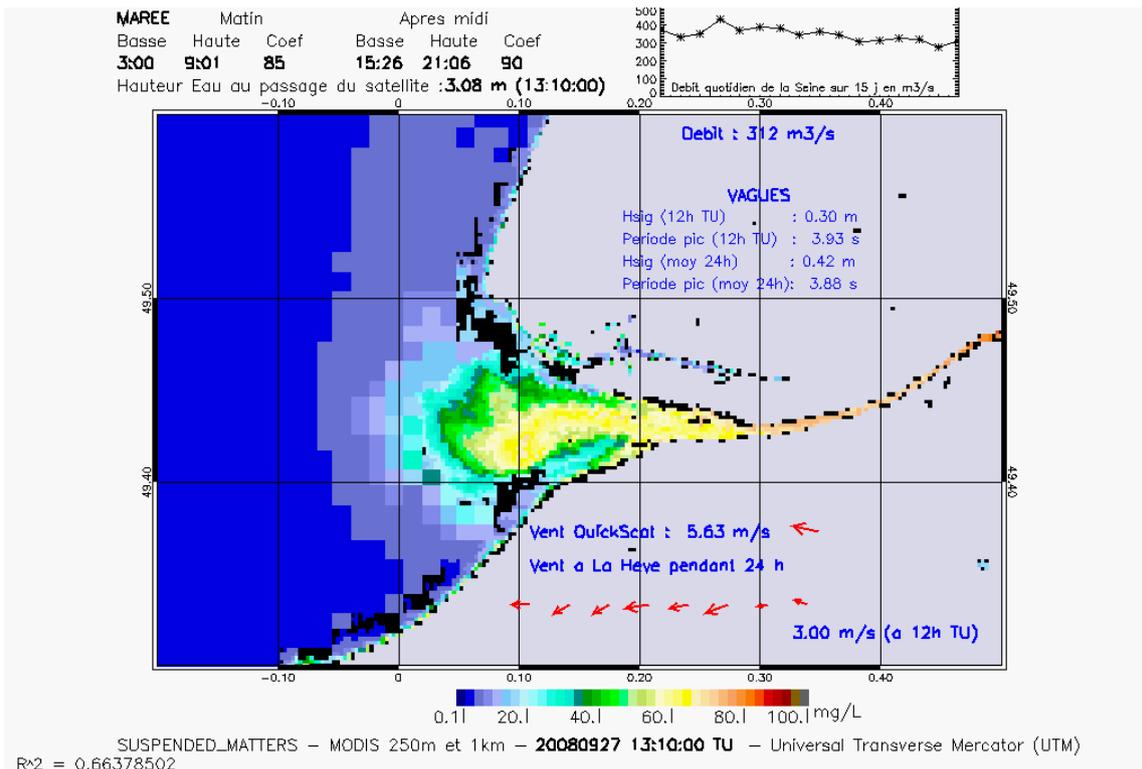


Figure 66 : Distribution des MES de surface, issues des images satellite MODIS à 250 m et 1 km de résolution. Situation de débit faible et vent faible, vive eau, 2h avant basse mer.

Le bouchon semble étalé en amont de Fatouville, des resuspensions sur le banc du Ratier restent visibles...

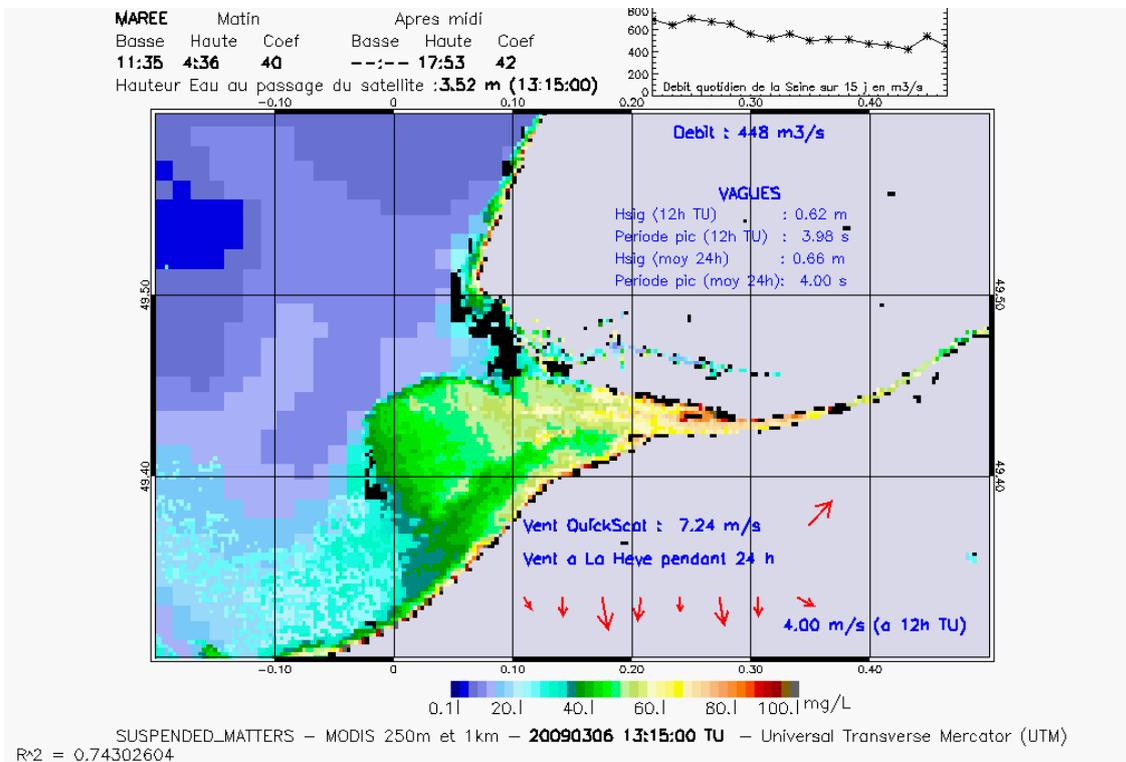


Figure 67 : Distribution des MES de surface, issues des images satellite MODIS à 250 m et 1 km de résolution. Situation de débit moyen et vent de nord, morte eau, 2h après basse mer

Le bouchon vaseux est diffus (morte eau) mais se voit dans la fosse Nord, de même qu'au large un front turbide bien marqué est visible...

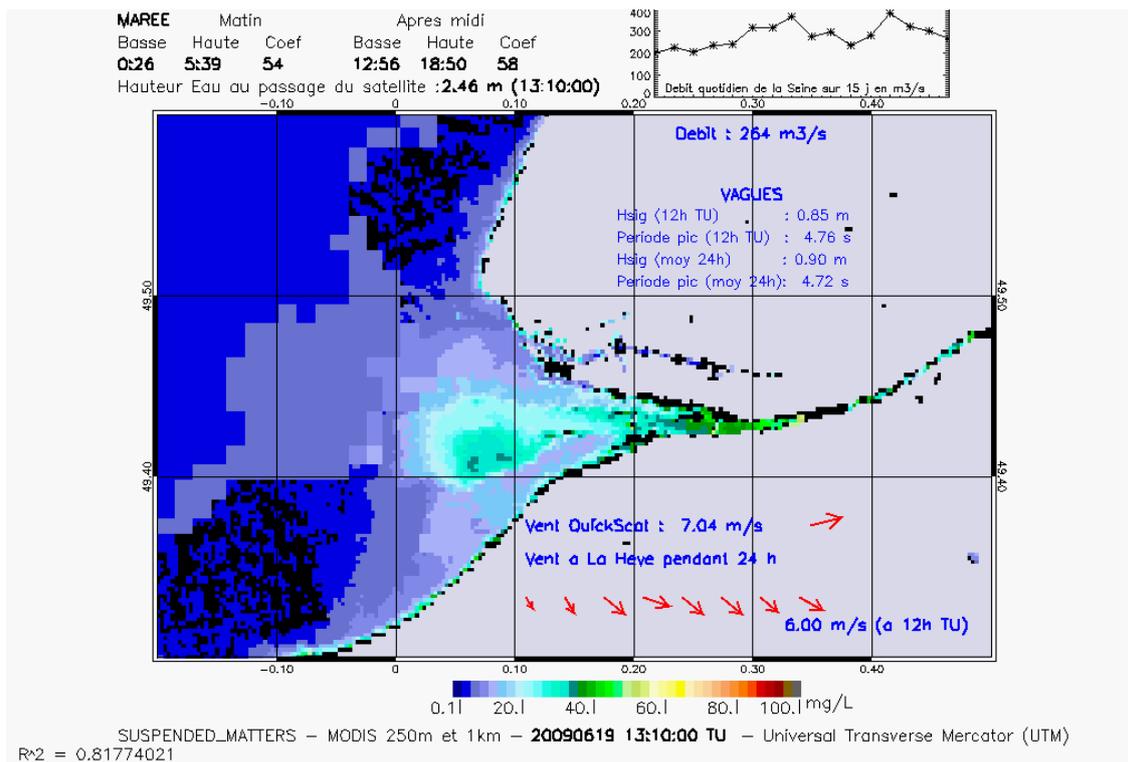


Figure 68 : Distribution des MES de surface, issues des images satellite MODIS à 250 m et 1 km de résolution. Situation d'étiage et vent de nord-ouest, petite marée, basse mer

Le bouchon vaseux apparaît devant Fatouville à basse mer, mais en même temps des resuspensions sont visibles sur le banc du Ratier...

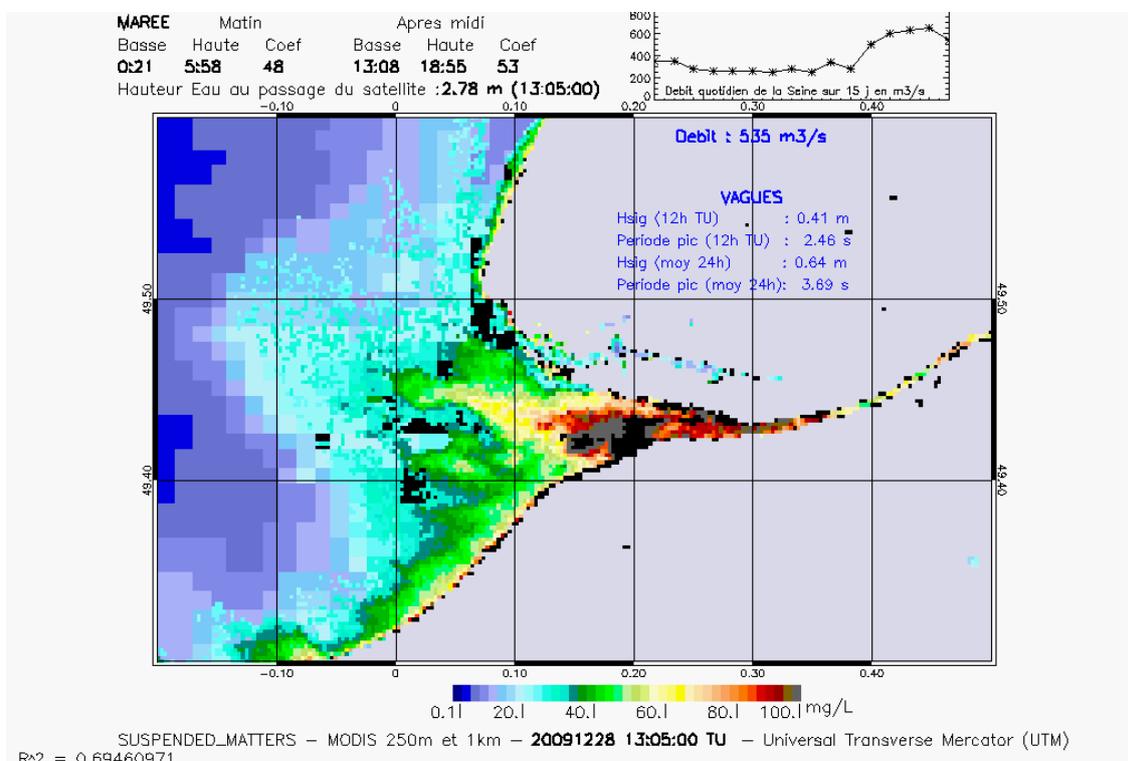


Figure 69 : Distribution des MES de surface, issues des images satellite MODIS à 250 m et 1 km de résolution. Situation de débit moyen, morte eau, basse mer

Le bouchon vaseux à basse mer est un peu en aval de Honfleur, pour un débit moyen...

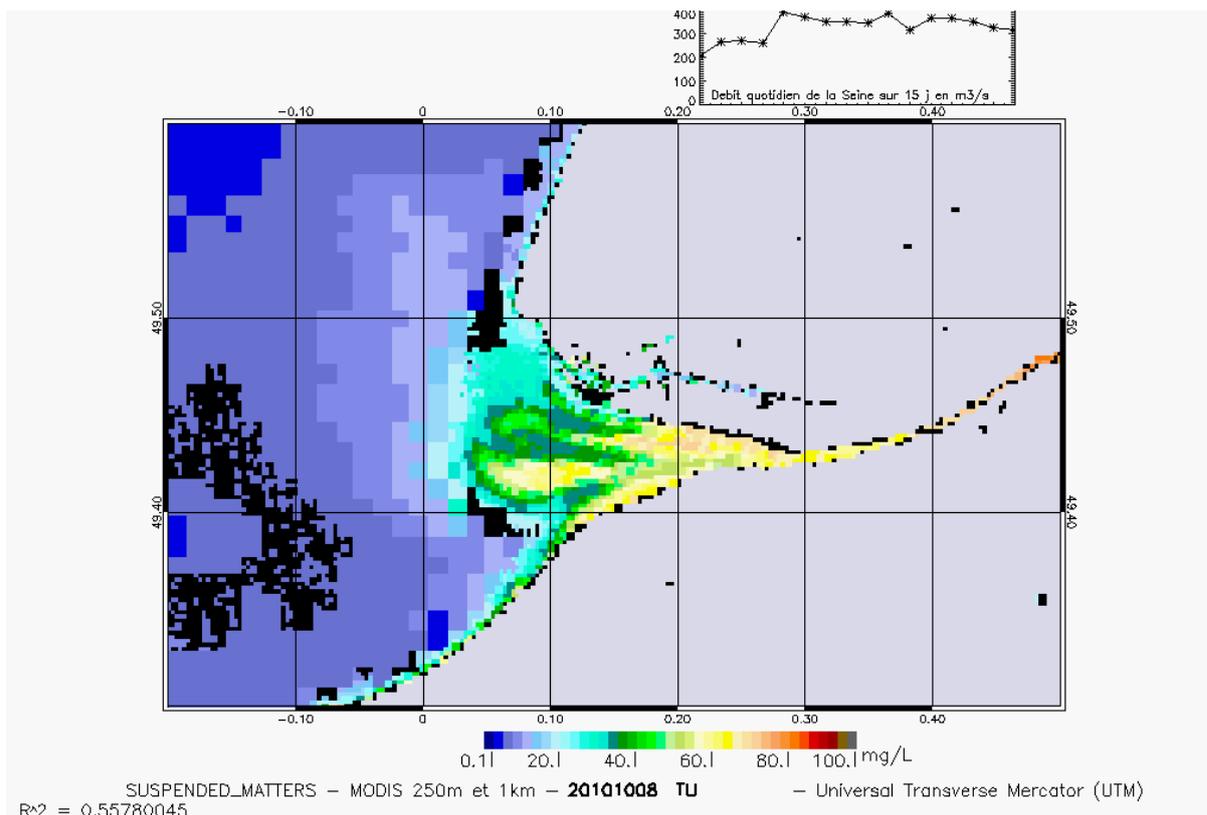


Figure 70 : Distribution des MES de surface, issues des images satellite MODIS à 250 m et 1 km de résolution. Situation d'étiage, vive eau

Pour cette image incomplètement renseignée, la pleine mer est à 9h45 et la basse mer à 17h01, c'est donc probablement une situation de début de jusant, avec le bouchon vaseux encore en amont de la Risle ; cette image a été sélectionnée pour la mise en évidence des bancs d'embouchure et des turbidités marquées en fosse nord (vent d'est de ~7 m/s).

Pour conclure, il convient de rappeler que l'imagerie satellite apporte de précieuses indications sur les structures spatiales de turbidité, mais seulement en surface. Les concentrations qui résultent de la tentative de calibration restent faibles dans l'estuaire au regard des concentrations résultant des mesures en continu, et il faut considérer que les valeurs fournies sont très approximatives : nous n'avons pas été en mesure de produire une marge d'incertitude, et il sera nécessaire de le faire ultérieurement. Un effort supplémentaire doit être consenti sur la recherche de données simultanées *in situ* et par imagerie satellite, peut-être en profitant mieux des dernières données MODEL, car la quantité d'informations contenues dans ces images est exceptionnelle. Ce n'est qu'après cette étape supplémentaire de calibration qu'il sera opportun de tenter un traitement statistique de ces images, avec une difficulté réelle liée à une très grande variabilité générée par les multiples forçages très présents dans le secteur (vent, vagues, marée, débit) : l'exercice est d'autant plus difficile que la dimension spatiale de la zone est assez faible.

Quoi qu'il en soit, un protocole de traitement des images MODIS à 250 m de résolution a été produit, et il serait intéressant de poursuivre son exploitation pour traiter les images à venir, par exemple au prix d'une réactualisation annuelle du catalogue d'images.

5- Harmonisation des modèles Seine-Aval

La démarche globale utilisée dans Seine Aval pour la modélisation pluridisciplinaire consiste à coupler au code hydrosédimentaire des modules optionnels qui décrivent les processus biogéochimiques (au sens large), par exemple la dynamique bactérienne, la production primaire, la dynamique de la matière organique et des sels nutritifs, de l'oxygène, et enfin la dynamique des contaminants chimiques métalliques et organiques. La modélisation des processus propres à chaque discipline nécessite des études spécifiques alliant mesures in situ, mesures en laboratoire, développement de modèle et validation. Lorsque les processus interagissent, les améliorations opérées pour certains d'entre eux doivent être progressivement introduites dans une version harmonisée du code pluridisciplinaire, après une phase de validation relative au processus ayant fait l'objet d'une amélioration. Il en découle un déphasage entre le développement de certains modules et celui du code intégré. En particulier entre le développement du code hydrosédimentaire et les couplages avec les processus chimiques ou biologiques. Au cours de la phase 3 du programme Seine Aval, le modèle hydrosédimentaire a été considérablement remanié grâce notamment à la réalisation d'un modèle morphodynamique sable/vase de l'embouchure, incluant également une refonte de la simulation des vagues (Waeles et al., 2007 et 2008). Par contre la version dite « pluridisciplinaire » qui inclut les différents modules biogéochimiques n'a pas été upgradée pendant cette phase, l'accent ayant été mis sur les modules eux mêmes, sur leur validation puis leur application. L'objectif du travail d'harmonisation des modèles est donc d'intégrer dans la version du code pluridisciplinaire, étendu à la baie de Seine, certains des acquis de la modélisation hydrosédimentaire de la phase SA3, puis d'en tester les effets sur les résultats des modèles de contamination chimique. De même, l'adaptation des fichiers bathymétriques pour ce modèle intégré, étendu à la baie de Seine a été réalisée pour tenir compte des aménagements de Port 2000.

Les deux versions du modèle SiAM, appliquées à l'estuaire de la Seine, et qui étaient exploitées pendant la phase SA3 (en excluant l'ancienne version SA1 utilisée dans SimuSA) sont les suivantes :

- La version SA2 pluridisciplinaire est une version du modèle SiAM, étendue à la baie de Seine (figure 71), c'est à dire que son domaine va jusqu'à Cherbourg à l'Ouest et jusqu'à St Valery en Caux à l'Est (Thouvenin et al, 2002). Elle utilise la bathymétrie datant de 1999 (avant Port 2000) mais comprend deux options, permettant de résoudre les équations sur un maillage fin (100/300m dans l'estuaire) ou bien sur un maillage grossier (1 km dans l'estuaire). Les couches sont horizontales et d'épaisseurs constantes, sauf les couches de surface et de fond ; la couche de surface varie au cours du temps en fonction de la hauteur d'eau. Les différents modules (RIVE, CF, MOSE, MET&OR) y sont intégrés. L'effet du vent réel est pris en compte sur tout l'estuaire et la baie de Seine en estimant les fetchs (selon la formulation utilisée par Cugier, comm. pers.). L'effet de la houle sur la remise en suspension des sédiments a été introduit en utilisant une formulation proposée par Silva Jacinto (2001), (Thouvenin et al, 2003). Les résultats du modèle de prédiction de la marée du SHOM (Simon et Pineau, 1999) sont utilisés pour les conditions aux limites en mer ouverte en recomposant le signal à travers la reconstitution de 20 ondes (Thouvenin et al, 2002). Deux fractions de particules vaseuses sont simulées, différenciées par leur vitesse de chute et la densité des grains : les vases dites "légères" et les vases dites "lourdes". La consolidation des vases est simulée par transport vertical sur la colonne sédimentaire (équation de conservation de la masse,

tenant compte d'une vitesse de tassement des vases, résolue sur une succession de couches d'épaisseurs variables de l'ordre du millimètre).

- La version SA3 morphodynamique sable/vase est limitée par le méridien de Ouistreham à l'Ouest et s'arrête au nord d'Antifer (figure 71). La discrétisation horizontale dans l'estuaire est de 100 m / 300 m comme la grille fine de la version SA2. Par contre, la coordonnée verticale est de type "sigma", c'est à dire que le nombre de couches est uniforme dans le domaine et les épaisseurs sont donc variables ; les couches ne sont pas horizontales mais suivent la bathymétrie. Plusieurs options sont possibles pour la bathymétrie ; les aménagements de Port 2000 peuvent être pris en compte (fichier bathymétrie 2005 du GPM Rouen et GPM Havre). Le transport de sable est simulé et les variations à long terme de la bathymétrie (morphodynamique) sont estimées. Une seule fraction de vase est transportée. Les comportements cohésif et non cohésif des particules sont pris en compte. La consolidation des sédiments au cours du temps est calculée de façon empirique. Au début du projet MODEL, de nouveaux tests et améliorations ont été introduits à savoir : la prise en compte d'une condition à la limite plus précise avec un grand nombre de composantes harmoniques (115) issues du calcul de prévision de la marée du SHOM (Simon et Pineau, 1999), une simulation plus précise des vagues issue de Waeles et al., 2007 et 2008, et une nouvelle formulation de la vitesse de chute qui tient compte de la turbulence.

Pour upgrader la version multidisciplinaire, l'idée était de garder l'extension du maillage à la baie de Seine pour permettre des calculs plus précis de flux sortant et entrant dans l'estuaire, notamment pour les variables dissoutes, et de tester certaines améliorations du modèle SA3, sans trop complexifier le programme afin de limiter les temps de calcul. Les options du mélange sable/vase et des coordonnées sigma n'ont donc pas été reprises pour ces tests. Seules les options : nouvelles bathymétries / vitesse de chute améliorée/ multiplication du nombre de composantes harmoniques de la marée aux limites ouvertes ont été testées.

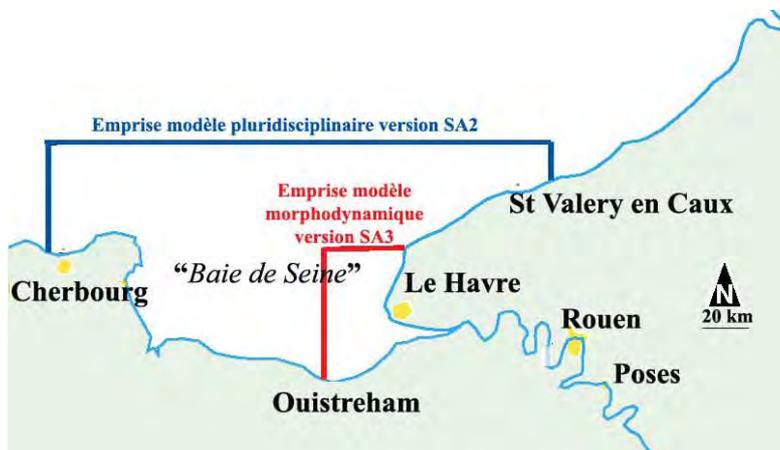


Figure 71 : Emprises des modèles SA2 et SA3.

Modifications testées

L'upgrade de la version SA2 a consisté dans cette phase du travail à tester les modifications suivantes :

- o Bathymétrie 2005

L'intégration du fichier issu des ports autonomes de Rouen et Le Havre dans l'estuaire de la Seine a été réalisée de la même manière que dans la version SA3. Pour la grille fine, les valeurs de profondeurs utilisées en hydrosédimentaire ont été reprises. Par contre, la bathymétrie dans la

baie de Seine reste la même que précédemment (fichier construit par Cugier (1999), à partir des fichiers du SHOM et d'une digitalisation des cartes près des côtes).

Les deux options bathymétrie 2005 (avec Port 2000) et bathymétrie 1999 sont possibles.

- o Composition harmonique de la marée aux limites ouvertes au large

La recombinaison des ondes harmoniques pour obtenir l'évolution de la hauteur d'eau en fonction du temps aux limites Ouest, Nord et Est du modèle (figure 71) a été reprogrammée à partir du nouveau calcul de la marée du SHOM. 115 composantes de l'onde de marée sont prises en compte et calculées en chaque point de la frontière au large.

- o Expressions de la vitesse de chute des vases

Dans la version SA2, la vitesse de chute est fonction de la concentration en suspension (plus la turbidité est forte, plus la vitesse de chute augmente), jusqu'à une concentration de début d'entravement (de l'ordre de 2 g/L). Au delà de cette concentration, la vitesse de chute n'augmente plus et rediminue lentement au fur et à mesure que l'on atteint de très fortes concentrations en particules. Dans la version hydrosédimentaire actuelle, de nouvelles formulations ont été testées, tenant compte de la turbulence sur le fond engendrée par le frottement et de la distance par rapport au fond. Plus on est proche du fond, plus la vitesse de chute tend à diminuer lorsque la turbulence augmente ; en effet, plus il y a du courant et de la turbulence au fond, moins les particules ont tendance à se déposer. Cette formulation a été testée dans la version SA2 mise à jour.

Résultats

Le modèle est appliqué essentiellement pour ces tests sur l'année 2006 (départ au 1^{er} novembre 2005). La vérification de la propagation de la marée à l'embouchure est faite sur l'année 2004, année où des enregistrements marégraphiques sont disponibles à la bouée MAREL de Honfleur.

Le nouveau calcul des conditions aux limites au large (115 ondes de marée au lieu de 20) produit un signal excellent à Marel Honfleur (comparaison en 2004 : figure 72). Toutefois, les différences induites sur les matières en suspension et la salinité dans l'estuaire restent faibles.

Dans la version SA2, la vitesse de chute ne dépendait que de la concentration en MES. La nouvelle formulation de la vitesse de chute qui dépend aussi de la turbulence engendrée par le frottement sur le fond modifie les résultats mais sans apporter une amélioration qui puisse être validée avec les mesures. Cette formulation est moins bien adaptée aux coordonnées en z. En effet, le nombre de couches par petite profondeur est faible et la réduction ou l'augmentation de la vitesse de chute sur la verticale est moins bien représentée que lorsque le nombre de couches est constant quelque soit la profondeur (coordonnées sigma).

La nouvelle version a été appliquée sur l'année 1998 (bathymétrie 1999) avec les modifications des conditions de marée au large, de la vitesse de chute et plusieurs réglages ont été testés. Globalement les résultats sont modifiés mais il est difficile de constater une nette amélioration. Les résultats ne sont pas plus valides ni plus précis que les anciens, tant du point de vue concentrations dans la masse d'eau que stocks de vase déposés au fond ou encore flux exportés vers la baie.

De même pour l'année 2004 et 2006, les résultats du modèle sont comparés aux mesures à Honfleur et la concordance est plus ou moins bonne selon les périodes. Là encore, les modifications apportées et les nouveaux réglages n'apportent pas d'amélioration avérée.

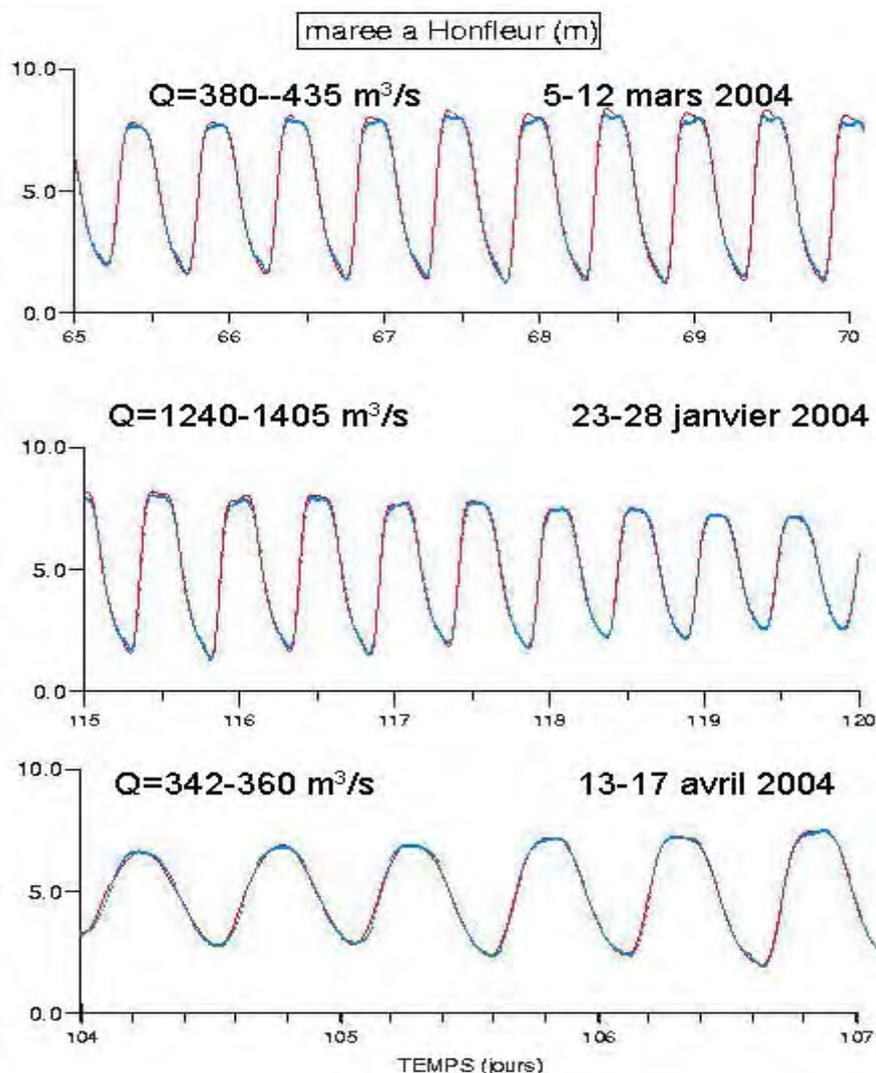


Figure 72 : Comparaison entre les résultats du modèle (rouge) et les enregistrements à MAREL Honfleur (bleu), pendant trois périodes en 2004.

La grille grossière a une résolution spatiale nettement moins bonne dans l'estuaire que la grille dite "fine". L'intégration de Port 2000 avec la nouvelle bathymétrie 2005 pose des difficultés pour représenter les nouvelles digues et chenaux. Sachant le peu d'applications envisagées à court terme, le travail de réglage des paramètres pour obtenir des résultats analogues avec les deux grilles n'a pas été refait.

Etant donné ces résultats décevants malgré de nombreux tests, il a semblé inutile de tester les résultats sur les contaminants chimiques, d'autant plus qu'il existe très peu de mesures de validation en 2006 pour ces substances.

Conclusion relative à l'harmonisation des modèles Seine-Aval

La stratégie choisie pour la mise à jour du modèle intégré pluridisciplinaire, incluant la baie de Seine, a consisté à réaliser un certain nombre de modifications dans la version SA2 du modèle. Cette stratégie n'a pas abouti à une amélioration sensible des résultats. Ceci montre que le passage aux coordonnées « sigma » (nombre de couches sur la verticale constant quelque soit la profondeur d'eau) devient indispensable pour permettre une meilleure simulation des dépôts et

des érosions dans les zones peu profondes. Le traitement de la houle, la formulation du frottement sur le fond, la simulation de la consolidation des vases, la prise en compte des apports de vase fine par la baie de Seine semblent des éléments plus influents pour obtenir un meilleur signal. La démarche consistant à reprendre intégralement (en coordonnées sigma) la version SA3 morphodynamique, qui a été encore améliorée en 2009, pour l'étendre à la baie de Seine et y intégrer les modules pluridisciplinaires, aurait sans doute été plus efficace.

Cependant ce travail n'a pas été tenté puisqu'au sein du projet MODEL, un nouveau modèle est en cours d'implantation (cf Ch. 7), sur une base MARS pour remplacer la base hydrodynamique SiAM afin de profiter des possibilités de paralléliser les calculs pour améliorer leur rapidité. Le nouveau modèle (en coordonnées sigma et étendu à la baie de Seine) deviendra utilisable pour les applications pluridisciplinaires après intégration des modules qui ont été développés et appliqués dans le projet Seine Aval (RIVE, CF, MET&OR etc..). Il est remarqué par ailleurs qu'aucun projet soumis ou en cours dans le programme Seine Aval 4 n'a fait appel aux modèles qui utilisent ces modules dans les deux dernières années, ce qui justifiait de ne pas opérer l'intégration sur un outil provisoirement utilisé en hydrosédimentaire ; ce travail sera réalisé directement sur le nouveau modèle MARS-SiAM-3D.

6- Exploitation du modèle hydrosédimentaire Seine-Aval III

Compte tenu de l'importance accordée au développement du nouveau modèle hydrosédimentaire de l'estuaire et la baie de Seine, qui sera décrit dans le chapitre 7, nous avons opté pour une présentation très synthétique des différents usages du modèle SiAM-3D développé dans le cadre de Seine-Aval III qui ont été réalisés pour le projet MODEL. Il s'agit principalement d'une amélioration du paramétrage sédimentaire, d'un premier exercice d'estimation des incertitudes et d'une exploitation pour aider à la formulation d'indicateurs d'état Hydro-Morpho-Sédimentaire (HMS) en vue de la définition de l'état écologique des masses d'eau de transition pour la DCE. La plupart de ces tests seront refaits avec le nouveau modèle hydrosédimentaire, plus précis a priori que le modèle SiAM-3D (amélioration de la résolution et enrichissement du comportement sédimentaire multiclasse).

Amélioration du paramétrage sédimentaire

Le paramétrage du modèle a été partiellement revu, de façon à reproduire à la fois les mesures réalisées dans la fosse Nord et dans le chenal de navigation en 2008/2009, mais aussi les mesures MAREL effectuées à Honfleur en 2006. Les principaux changements de paramétrage portent sur la réduction du diamètre des sables (de 200 μm à 140 μm), une évolution de la loi sur la vitesse de chute des vases, et un réajustement des lois d'érosion du sable et des sédiments vaseux.

Tandis que le modèle simule correctement l'ordre de grandeur des concentrations de matières en suspension (MES), aucun paramétrage n'a permis de reproduire fidèlement la phase du pic de MES au jusant dans le chenal (à Fatouville par exemple): pour les conditions de débit de 2008, le modèle simule un maximum de jusant bien plus précoce, révélateur d'une remise en suspension locale (pendant le maximum de courant) plus que de l'advection d'un maximum de turbidité. A contrario, la mesure MAREL à Honfleur a pu être reproduite assez correctement, en crue comme en étiage (fig. 73).

On observe que les salinités sont très bien reproduites par le modèle, quels que soient le débit et la phase de la marée.

Vers une estimation des incertitudes du modèle

Le modèle a été utilisé pour estimer les flux particuliers échangés entre l'estuaire et les secteurs adjacents à l'embouchure. Un premier exercice de calcul d'incertitude a été réalisé, en étudiant la sensibilité des flux modélisés et des variations de masse sédimentaire par secteurs à différents paramètres. Préalablement, une liste de facteurs d'incertitudes de la modélisation a été dressée, parmi lesquels : la possibilité d'ignorer des processus physiques, le choix de stratégies différentes pour représenter un même processus, les erreurs commises sur les observations qui servent à la calibration, les paramètres de calcul numériques, les paramètres physiques utilisés pour représenter les processus, les conditions initiales et les conditions aux limites du modèle et

enfin les incertitudes relatives aux conditions de forçage (météorologiques en particulier). Les résultats pour quelques uns de ces facteurs d'incertitudes sont représentés sur la figure 74. Les flux particuliers sont assez robustes, mais on note une sensibilité forte à la vitesse de chute et à la condition aux limites marines. Ce résultat justifie au passage l'effort consenti par Seine-Aval à l'étude de la floculation et des vitesses de chute associées (projet FLUMES). Ces résultats ont été présentés à un colloque de la Société Hydrotechnique de France et publiés (Le Hir, 2010).

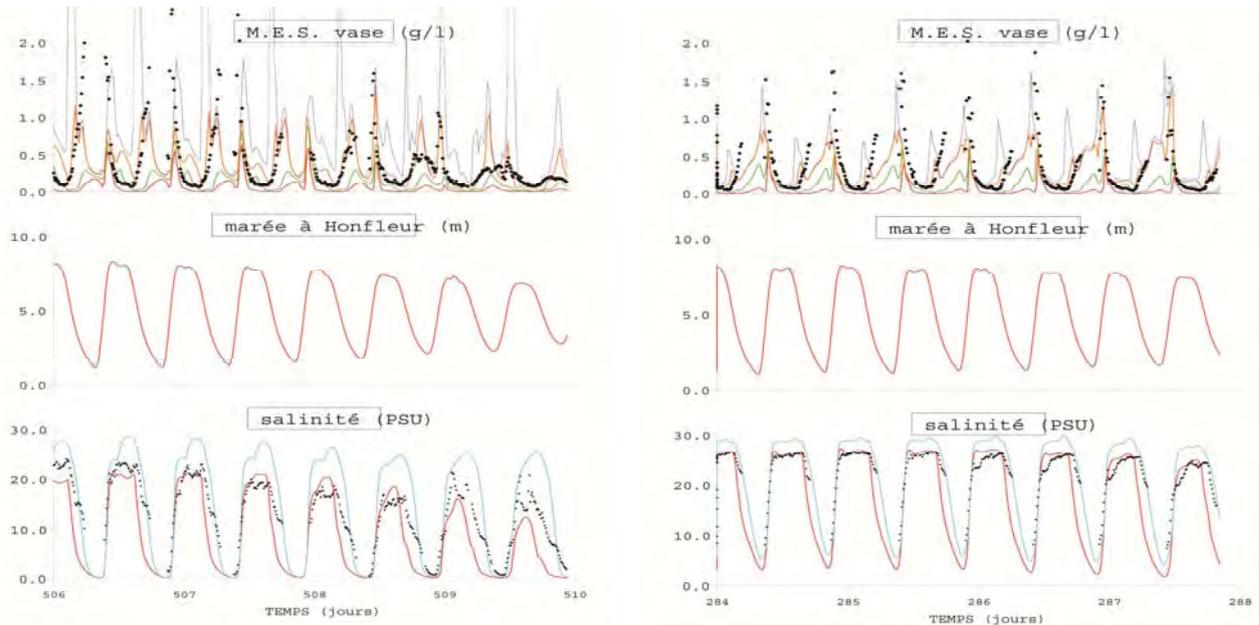


Figure 73 : Simulation des turbidités et des salinités à Honfleur, en crue (à gauche) et en étiage (à droite), à l'aide du modèle SiAM3D de l'estuaire de Seine. Les résultats de calcul apparaissent en bleu pour le fond et en rouge pour la surface (des niveaux intermédiaires sont aussi représentés pour la turbidité), tandis que les mesures (points noirs) sont acquises à 1.5m sous la surface (correspondant à une couche de fond à basse mer...)

Utilisation du modèle pour la formulation d'indicateurs d'état Hydro-Morpho-Sédimentaire d'un estuaire

Enfin, le modèle a été exploité pour rechercher des indicateurs d'état HMS de l'estuaire. Par exemple, la distribution des vitesses en fonction du pk a été évaluée (fig. 75). Des discontinuités sont observées et, en quelques sections, certaines gammes de courant max sont mal représentées : sur la figure 75, des indicateurs de qualité (tels que le prévoit la DCE) sont suggérés (en rouge) : intérêt à éviter les gradients trop marqués, intérêt à élargir la gamme des courants max en chaque section, pour favoriser la diversité des habitats... Mais il ne s'agit encore que d'ébauches d'indicateurs, reposant sur des hypothèses qui restent encore à discuter de façon pluridisciplinaire.

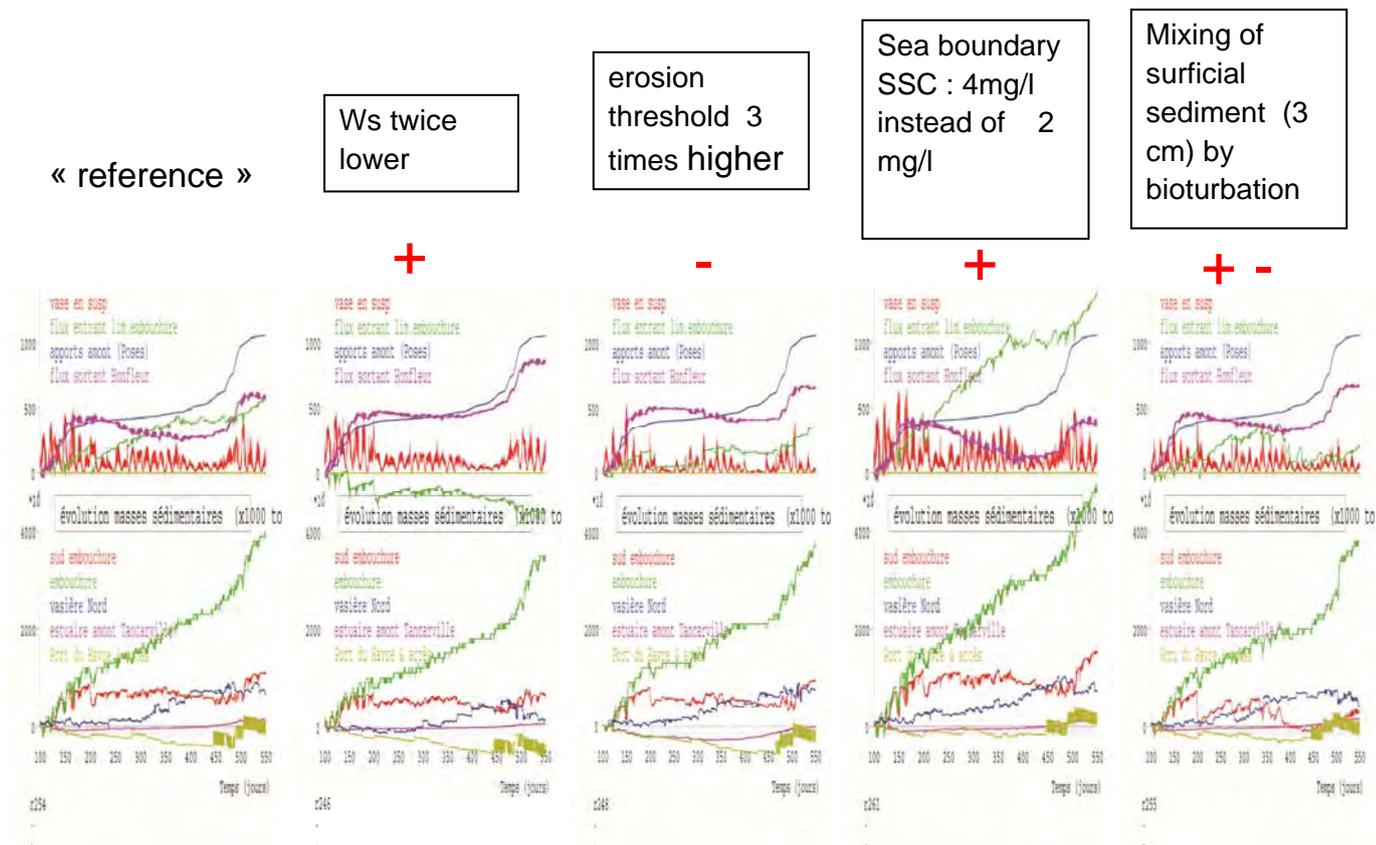


Figure 74 : Incertitude sur la simulation, à l'aide du modèle hydrosédimentaire SiAM-3D de l'estuaire de la Seine, de quelques flux représentatifs et de variations de masses sédimentaires pendant un an et demi. Les hypothèses de paramétrisation sont indiquées en haut par colonnes, tandis que sur les graphes supérieurs sont présentés la masse totale de vase en suspension (rouge), les flux sortants à Honfleur (violet), les flux entrant à Poses (bleu) et au large (vert). Les graphes du bas représentent les variations de masses (en ktonnes) en des secteurs géographiques pré-définis.

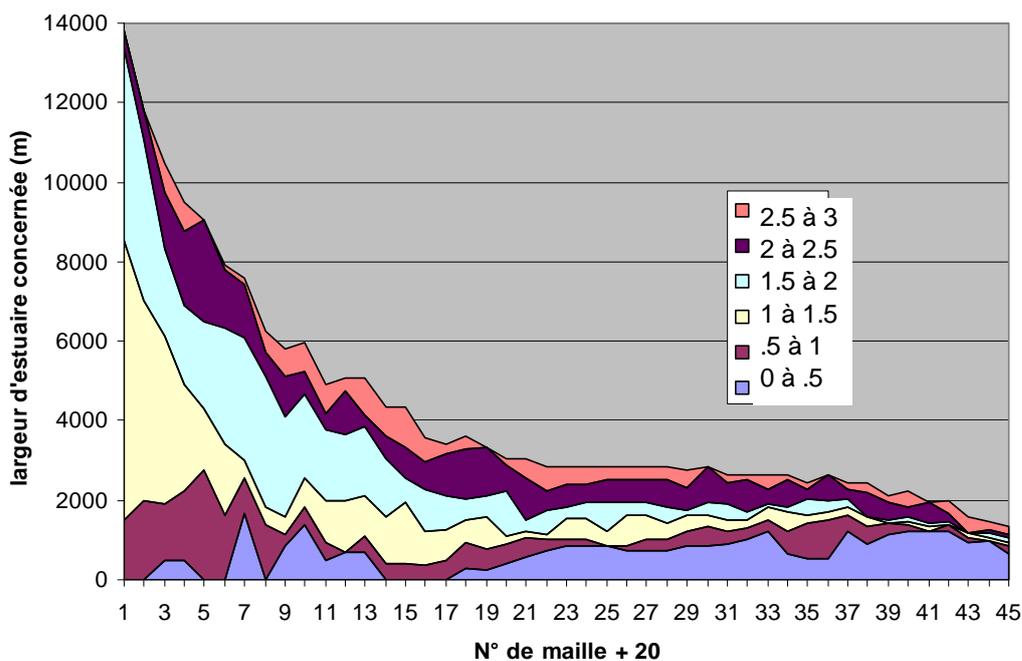


Figure 75 : Distribution des courants max (classes en m/s) dans l'estuaire aval, exprimée en largeur de section concernée pour chaque maille longitudinale du modèle (Honfleur est situé à l'abscisse « 25 »).

De la même façon, une carte des salinités moyennes a été dressée, ainsi qu'une carte des variations des salinités moyennes journalières au cours d'une année (fig.76). Ici encore, des indicateurs de qualité peuvent être recherchés, comme l'extension du secteur poly- ou méso-halin, ou la nécessité de le maintenir abrité... Une fois validés par les biologistes, ces indicateurs pourraient être utilisés pour qualifier l'impact d'un aménagement, en simulant à l'aide du modèle les évolutions tendanciennes qu'il entraînerait sur les salinités.

Des indicateurs impliquant les processus sédimentaires sont aussi à l'étude. Ainsi, on pourrait chercher à maintenir le long de l'estuaire une diversité des natures de fond (des vases aux sables ou aux galets), pour assurer une continuité des habitats ou encore une distribution type des turbidités à ne pas « dépasser » (fig.77). Ces réflexions ont fait l'objet d'une présentation au colloque ELET de l'ECSA à Bordeaux en novembre 2011.

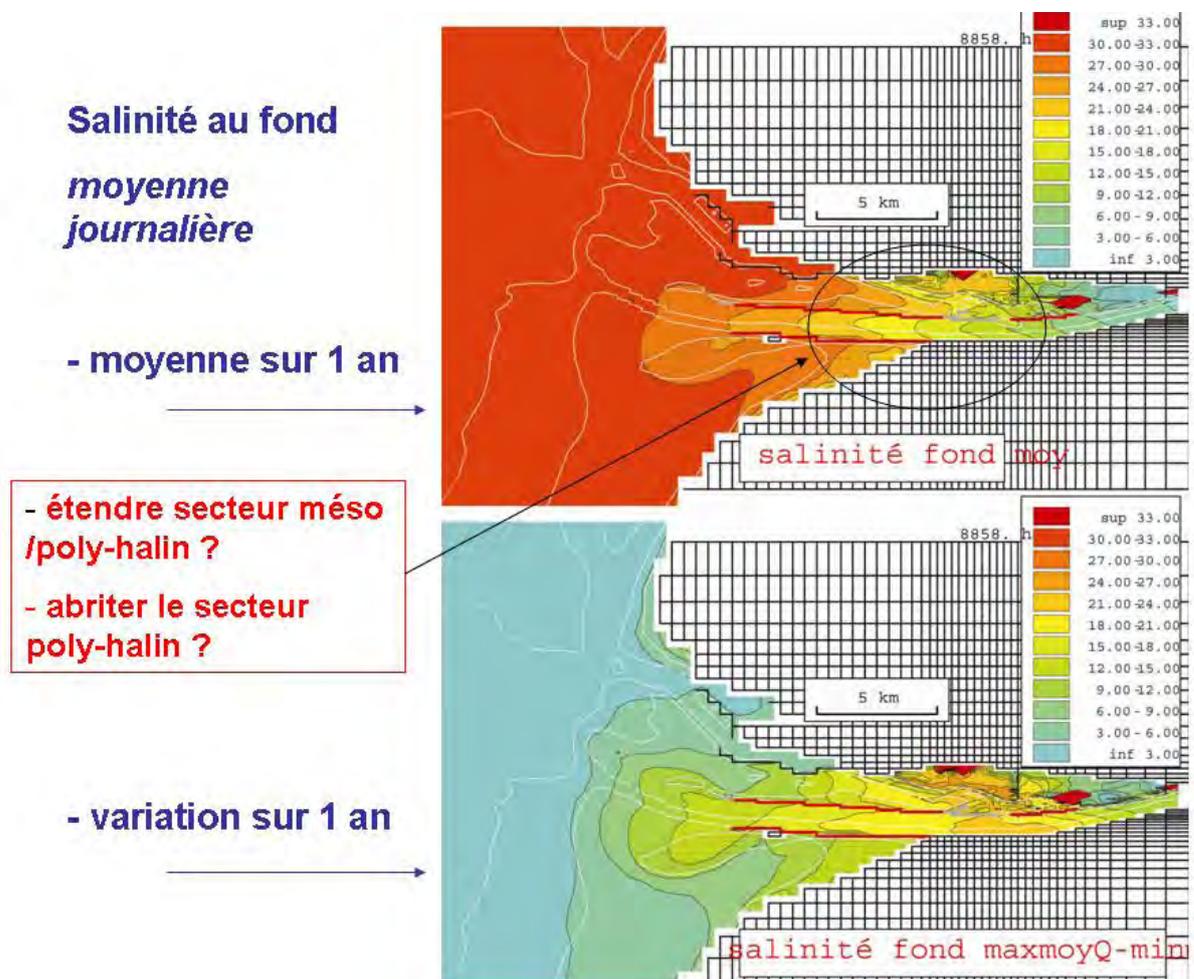


Figure 76 : Simulation des salinités moyennes et de leurs variations à l'embouchure de la Seine, à l'aide du modèle SiAM-3D de l'estuaire. En rouge : des suggestions d'indicateurs de bon état ou d'amélioration d'état possible.

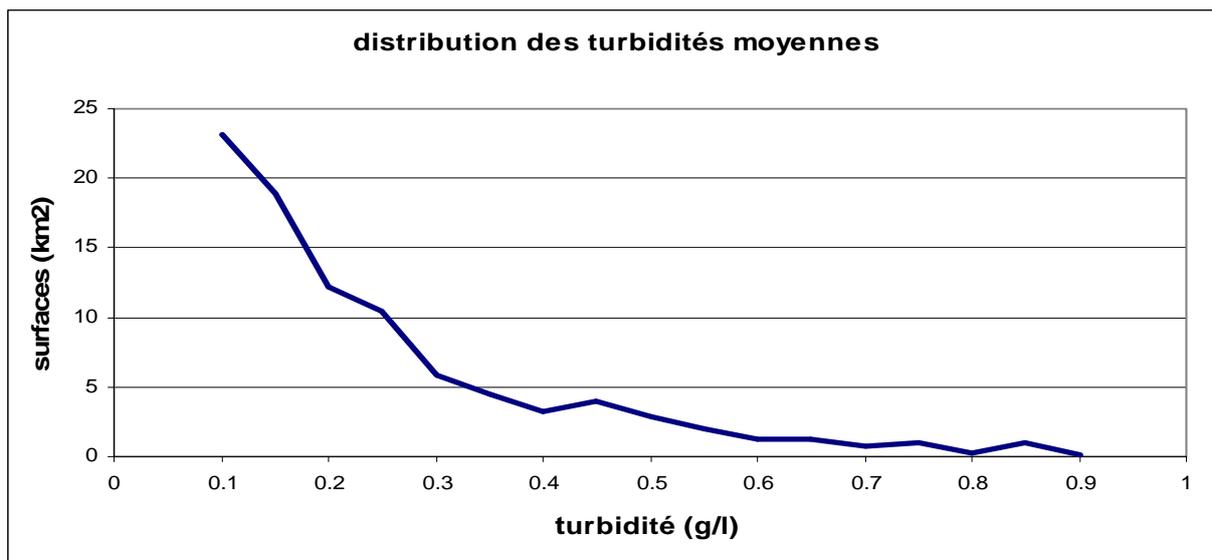


Figure 77 : Surfaces cumulées de l'estuaire pour chaque gamme de turbidité moyenne au cours d'une année. On pourrait imaginer des équivalents adimensionnels de ces grandeurs, et des courbes-types à ne pas « dépasser », pour construire un indicateur d'état sédimentaire...

7- Développement d'un nouveau modèle hydro-sédimentaire pour Seine-Aval

L'application du nouveau modèle hydrosédimentaire à la baie et à l'estuaire de Seine, et l'essentiel de la démarche de validation, sont décrits dans Kervella (2011) et Renault (2011).

7.1 Le code MARS 3D et sa version curvilinéaire

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 (Lazure et Dumas, 2009).

A la base, MARS3D est un algorithme de calcul des courants marins, des hauteurs d'eau et des éléments transportés par les courants.

La résolution de ses équations est basée sur des schémas aux différences finies. Elles sont discrétisées sur des grilles décalées. La grille C d'Arakawa est adoptée pour le calcul des différentes variables physiques : les variables température, salinité, élévation de la surface libre, densité sont définies au centre des mailles de la grille ; les vitesses zonales sont calculées au centre du côté Est et les vitesses méridiennes au centre du côté Nord des mailles.

L'utilisation de schémas aux différences finies implique l'incorporation d'une grille structurée (matrice des coordonnées complète). C'est pourquoi notre maillage possède autant de points à terre, qui permettent de conserver ce caractère structuré de la matrice.

La résolution temporelle utilise une méthode de séparation des modes barotropes, rapides, et des modes baroclines, lents, selon Blumberg et Mellor (1987). Un modèle 2D (basé sur les équations du mouvement et de la continuité, intégrées de la surface au fond) est couplé au modèle 3D afin de résoudre séparément les ondes de gravité de surface et les ondes internes. Ces deux modèles utilisent le même pas de temps qui est adaptatif de façon à respecter en permanence le critère de stabilité numérique de Courant-Friedrich-Levy (fixé à 0,6 dans notre cas). Pour le modèle 2D, sur l'horizontale, les courants barotropes zonaux et méridiens ainsi que la surface libre sont calculés suivant un schéma semi-implicite de type ADI (Implicite en Directions Alternées) proposé en 1971 par Leenderste et Gritton : l'équation du mouvement selon la composante zonale est résolue au premier demi-pas de temps et celle selon la composante méridienne au demi-pas de temps suivant et ainsi de suite. L'équation de la continuité est résolue à chaque demi-pas de temps.

Pour chacune de ces deux étapes, le modèle 2D permet un calcul des courants moyens et de la surface libre à l'instant n , puis le modèle 3D calcule, via une série de modèles 1DV, le champ de courant avec ses cisaillements, ses courants de densité et ses instabilités à l'instant $n+1$, en rendant implicite la diffusion verticale turbulente. Ensuite, la moyenne verticale du courant est comparée avec le courant barotrope estimé lors de la première étape ; si la différence entre les 2 valeurs est inférieure à un seuil fixé par l'utilisateur, on passe au demi-pas de temps suivant. On peut ensuite calculer les vitesses verticales à partir de l'équation de continuité.

Les traceurs (quantités advectées telles que la température et la salinité pour le calcul de la densité, mais aussi les différentes classes de matières en suspension, ou encore différents constituants transportés dans la masse d'eau qui constituent les variables d'état d'un modèle biogéochimique) sont calculés à chaque demi pas de temps avec un calcul implicite pour les termes sur la verticale et un calcul explicite basé sur les schémas de types QUICK (Leonard, 1979) et upwind pour les termes advectifs horizontaux.

Adaptation à une grille curvilinéaire non orthogonale

Les équations du modèle ont été modifiées afin de prendre en compte la curvilinéarité de notre maillage : des opérateurs définissant la déformation de chaque maille (taille et orientation par rapport à un repère cartésien fixe) sont calculés puis incorporés dans MARS3D. La modification des équations de MARS3D résulte du travail post-doctoral de Jérôme Gourrion (Gourrion, 2005) et de la thèse (en cours d'achèvement) d'Iman Khojasteh Pour Fard.

Le modèle hydrodynamique est mis en place en 2D puis en 3D avec 10 niveaux sur la verticale (en coordonnées sigma), régulièrement répartis.

7.2 Création du maillage

La démarche adoptée dans le cas de la baie et de l'estuaire de la Seine repose sur la réalisation d'un maillage curviligne structuré non-orthogonal en 2D de la baie de Seine et de la rivière jusqu'à Poses (limite de marée dynamique), en suivant le plus possible le trait de côte et en adaptant les tailles de mailles aux vitesses de courant susceptibles d'être rencontrées, afin de maintenir un pas de temps de calcul correct par la suite (formulé selon le critère CFL : $u < \Delta x / \Delta t$ et $v < \Delta y / \Delta t$).

L'intérêt de réaliser ce type de maillage est d'une part d'orienter les lignes de maillage dans les directions privilégiées de l'écoulement et d'autre part de pouvoir raffiner les mailles à certains endroits (comme l'embouchure de la Seine, la baie des Veys, la zone littorale du Calvados, ...) sans pour autant affecter l'ensemble du domaine d'étude et augmenter le temps de calcul. Les fleuves et leurs méandres peuvent aussi être représentés en 3D (après réalisation de la bathymétrie) et il est ainsi possible d'étudier les échanges, notamment en termes de dynamique sédimentaire, entre les compartiments « chenal » et « berges ».

Pour réaliser ce maillage, nous utilisons le logiciel ICEM CFD 12.1. ICEM est un logiciel de maillage distribué par ANSYS (à l'instar de Fluent, Gambit, ...) :

<http://www.ansys.com/assets/brochures/ansys-icem-cfd-12.1.pdf>

ICEM permet de créer des maillages structurés ou non en 2D et en 3D.

La création du maillage de la baie de Seine et de la Seine a demandé plusieurs mois car ce genre de travail n'avait jamais été réalisé à l'Ifremer auparavant. Un rapport fourni en annexe A3.1 fait état de ce travail (Kervella & Le Hir, 2011).

La figure 78 ci-dessous présente l'ergonomie de l'espace de travail d'ICEM avec le maillage de la baie de Seine.

Les coordonnées des points définissant le trait de côte de la baie sont fournies par le serveur de données Sextant de l'Ifremer (fichier ascii xyz en Lambert93). Les limites des principaux ouvrages portuaires et du chenal de navigation sont fournies par le GIP Seine-aval (fichiers ascii xyz en Lambert93).

L'emprise du maillage couvre toute la baie de Seine, de Cherbourg à Fécamp, et la Seine jusqu'à Poses (PK 200). Le maillage compte (en 2D) 79213 mailles dont 20821 mailles en eau (mailles pour lesquelles les calculs hydrodynamiques sont effectués). Les tailles de mailles sont variables (rappelons qu'en curviligne non-orthogonal, les mailles sont des quadrilatères quelconques et donc pas forcément des rectangles) avec des dimensions maximales de 2000 m x 2500 m près de la frontière du modèle (nord de la baie de Seine) et des dimensions minimales de 100 m x 200 m sur notre principale zone d'intérêt : l'embouchure de la Seine.

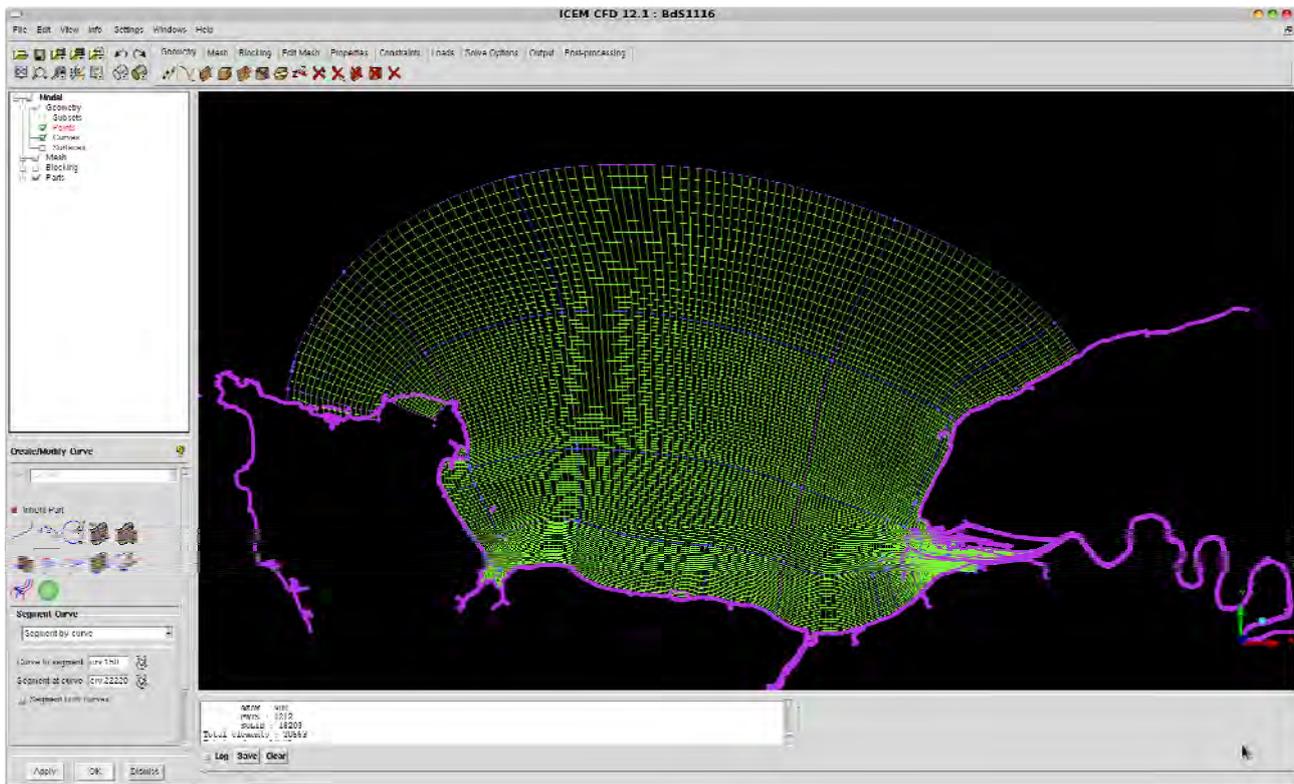


Figure 78 : Capture d'écran du logiciel ICFM 12.1

La figure 79 présente le maillage dans son intégralité : une emprise de la baie de Cherbourg à Fécamp avec une frontière courbée permettant la quasi-orthogonalité des mailles avec la côte à l'ouest et à l'est de la baie ; des mailles volontairement agrandies près de cette frontière afin de limiter le temps de calcul, et des mailles très fines en baie des Veys (environ 200 m x 200 m) et à l'embouchure de la Seine. Des agrandissements de ces deux zones sont présentés en figure 80. Nous voyons que les mailles suivent le trait de côte (taille des mailles le long de la côte du Calvados : environ 500 m x 300 m, le critère conduisant à cet ordre de grandeur des mailles à la côte étant essentiellement la performance du modèle de vagues dont les temps de calcul sont importants) et sont donc dans le sens des principaux courants côtiers (longitudinaux à la côte). Par ailleurs, dans le cas de l'embouchure, nous nous sommes efforcés de suivre la bathymétrie du chenal de navigation, délimité plus en amont par les digues submersibles, ce qui permet également d'orienter les mailles dans le sens des principaux courants sur cette zone et donc de réduire le temps de calcul (pour un même pas de temps, la satisfaction du critère CFL conduit à allonger les mailles dans le sens du courant principal, ici le courant de marée. Néanmoins, il convient de prendre aussi en compte la possibilité d'occurrence de courants transversaux engendrés par le vent, notamment dans le secteur de l'embouchure).

A noter aussi qu'à la demande du GIP, des mailles de calcul couvrent l'ancienne zone inondable du Hode, rive droite de l'estuaire en aval de Tancarville, de façon à permettre des simulations avec une bathymétrie modifiée dans ce secteur (en particulier pour pouvoir simuler les processus hydro-sédimentaires susceptibles de s'être produits avec une topographie antérieure).

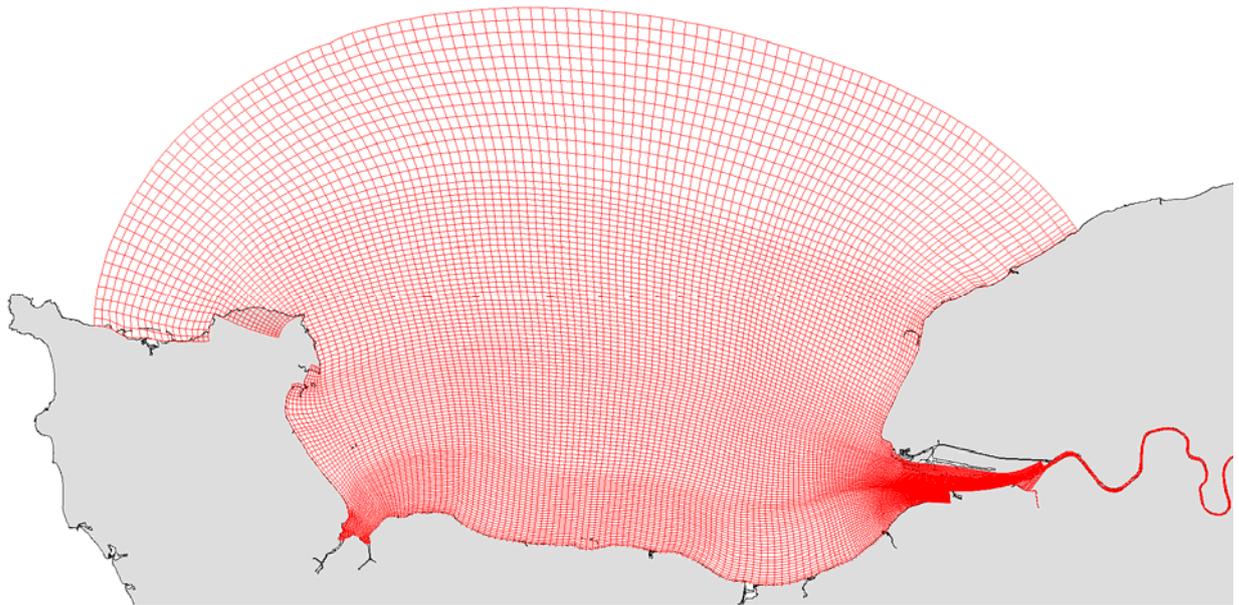


Figure 79 : Maillage curviligne de la baie de Seine

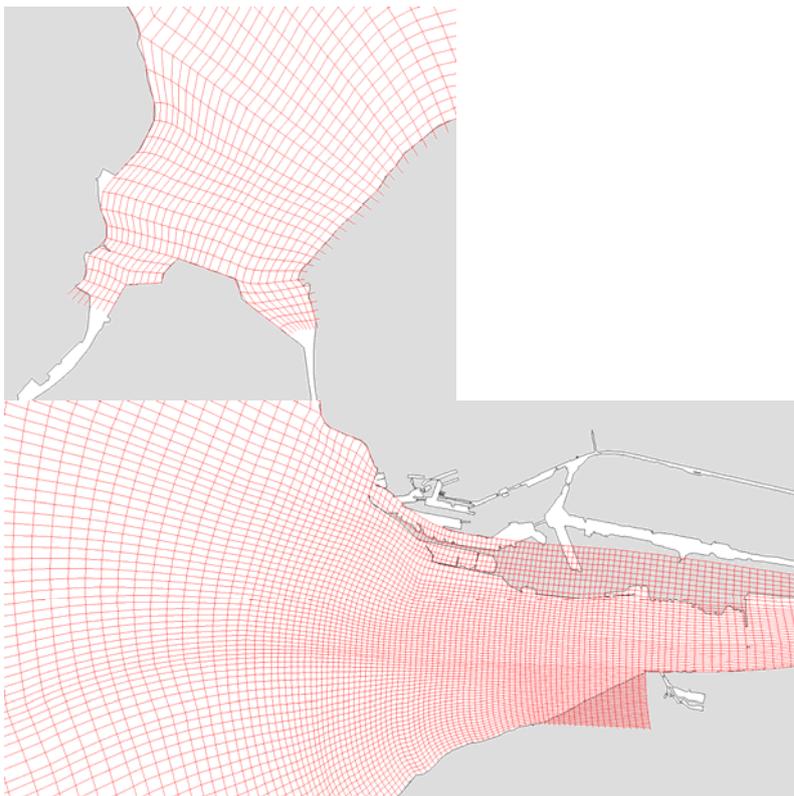


Figure 80 : Zooms du maillage curviligne : Baie des Veys (à gauche) et embouchure de la Seine (à droite).

La figure 81 illustre le maillage de l'estuaire et de ses méandres jusqu'à Poses. Le maillage de l'estuaire comporte, selon les sections, de 3 à 8 mailles dans sa dimension transversale, avec une largeur de maille de l'ordre de 100 m et une longueur de maille de l'ordre de 300 m : de Honfleur à Poses, il y a ainsi plus de 500 mailles dans la dimension longitudinale. Les îles en amont de Rouen sont également prises en compte.

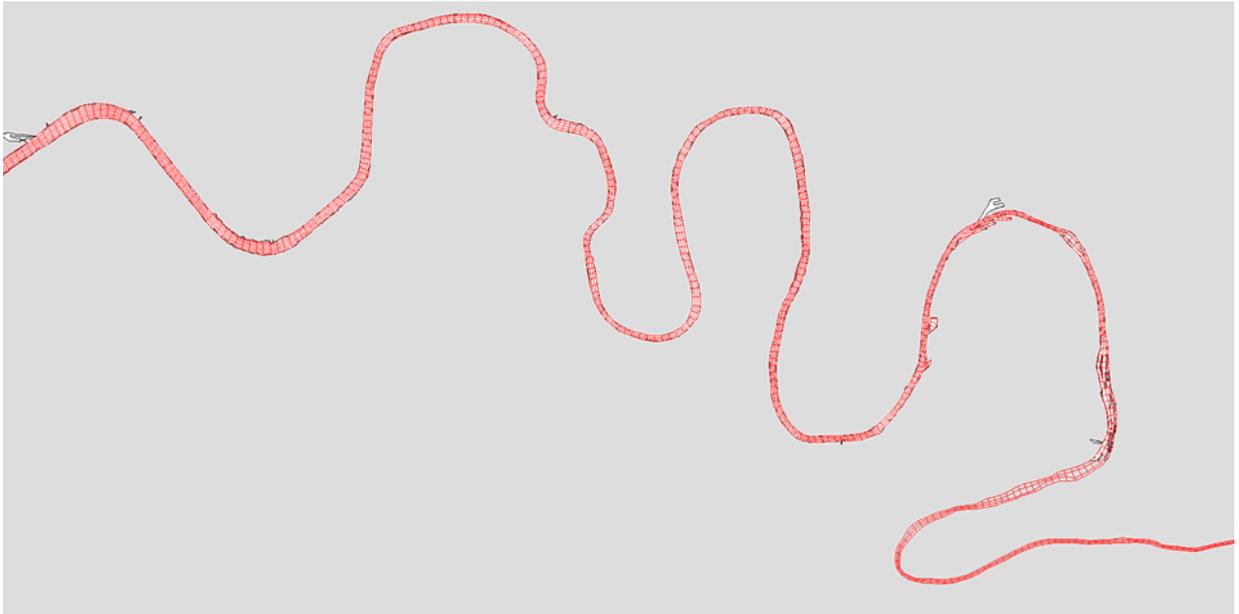


Figure 81 : Maillage curviligne de la rivière et de ses méandres.

Une fois le maillage obtenu, l'étape suivante est la création de la bathymétrie. Les coordonnées du maillage exprimées dans le système de coordonnées projetées Lambert93 sont tout d'abord converties dans le système de coordonnées WGS84 (système utilisé par BMGTOOLS et MARS3D).

7.3 Reconstitution de la bathymétrie du modèle

La bathymétrie (ainsi que les niveaux moyens) de notre modèle est reconstituée à l'aide du logiciel BMGTOOLS, dont les routines d'interpolation et de visualisation ont été modifiées pour prendre en compte la curvilinéarité du maillage [la matrice des points du maillage est une matrice incomplète ; il faut donc la compléter avec des points fictifs afin d'obtenir une grille structurée ; ces points fictifs doivent être ignorés lors de l'interpolation de la bathymétrie], en utilisant les données les plus récentes et les plus précises existant dans la zone :

- Pour la baie de Seine : MNT (Modèle Numérique de Terrain) au pas de 100 m Bretagne Nord et MNT au pas de 100 m Baie de Seine (source : IFREMER/SHOM, sous Caparmor : /home13/dedale/BATHY/MNT/Atl-Manche-100m)
- Pour l'embouchure de la Seine : des données du GPM Rouen de décembre 2009 sous forme de grille de 10 m x 10 m pour l'embouchure jusqu'à Tancarville (source : GIP Seine-Aval, sous : /home3/tantale/SEDIMENTO/Seine/bathymetrie/)
- Pour la Seine : des données de 2008 sous forme de grille de 5 m x 5 m entre Tancarville et Rouen (source : GIP Seine-Aval) et des données de 2005 sous forme de grille de 1 m x 1 m acquises à l'aide de sondeurs mono- et multi-faisceaux entre Rouen et Poses (source : GIP Seine-Aval, sous : /home3/tantale/SEDIMENTO/Seine/bathymetrie/).

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 curviligne (la recherche s'effectue uniquement sur nos points « en eau »).

L'algorithme utilisé pour l'interpolation est l'algorithme « CARGEN » (Caillaud, 2010) : pour chaque point (x0, y0) de la grille en coordonnées projetées (projection Mercator), on recherche la

cote $z_0 = h_0$. Les données de sondes sont interpolées linéairement sur chaque point (x_0, y_0) . On va rechercher les trois points voisins les plus proches parmi tous les points de sondes. C'est cette recherche qui demande le plus de temps de calcul. Une fois les 3 points obtenus, on construit un plan passant par ces points. L'équation du plan ainsi calculée, de la forme $ax + by + cz + d = 0$, il est possible de déterminer la côte z_0 du point de grille (x_0, y_0) qui correspondra à l'interpolation des trois voisins sur le point de grille.

Dans notre cas, la recherche de voisins se fait autour des centres des bords de chaque maille (points U et V) de la grille au lieu du centre des mailles, afin d'obtenir directement les hauteurs H_x et H_y . Ces hauteurs 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 82). Ce niveau représente la hauteur moyenne des mers au dessus du niveau de plus basse mer astronomique (PBMA, données SHOM).

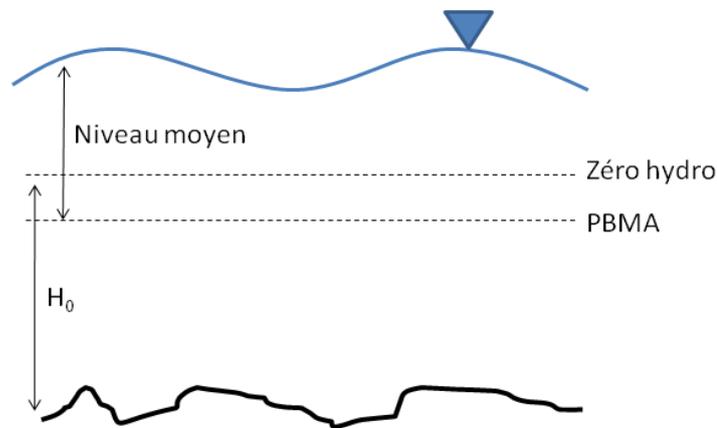


Figure 82 : Bathymétrie, niveaux verticaux de référence et niveau moyen.

Cette bathymétrie est ensuite retouchée à la main, toujours à l'aide du logiciel BMGTOOLS, les hauteurs H_x et H_y permettant alors de prendre en compte des ouvrages tels que Port 2000 ou les digues submersibles. Pour ces dernières, la valeur H_y correspond à leur cote d'arasement.

La figure 83 présente une superposition du maillage et du jeu de sondes bathymétriques (H_x, 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 84.

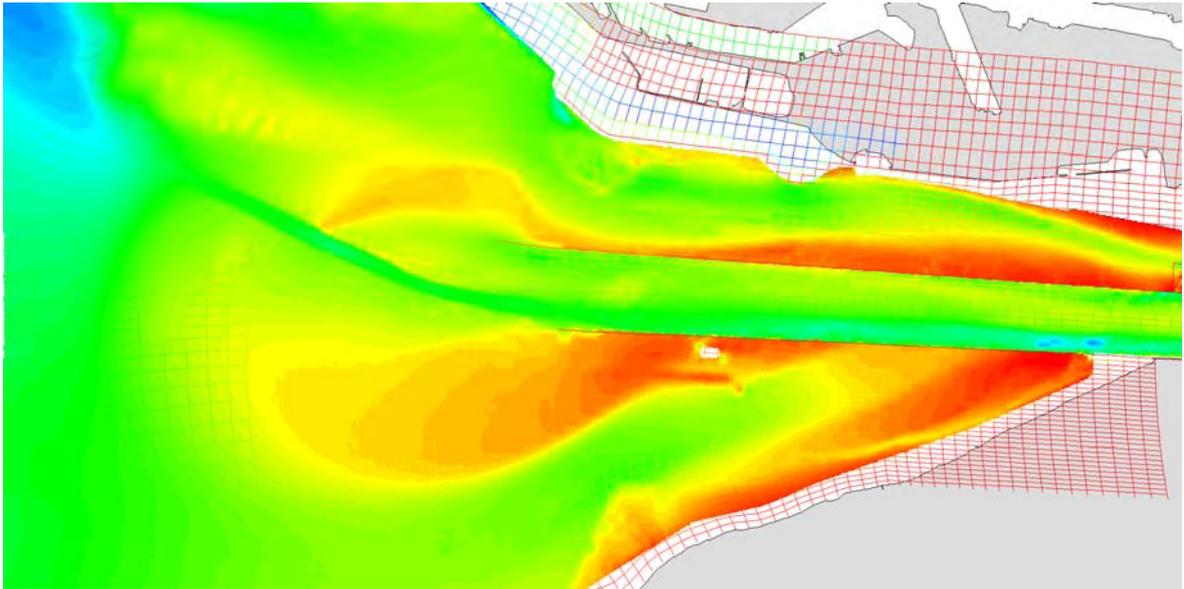


Figure 83 : Superposition du maillage et du jeu de sondes bathymétriques (source : GIP Seine-Aval) à l'embouchure de la Seine.

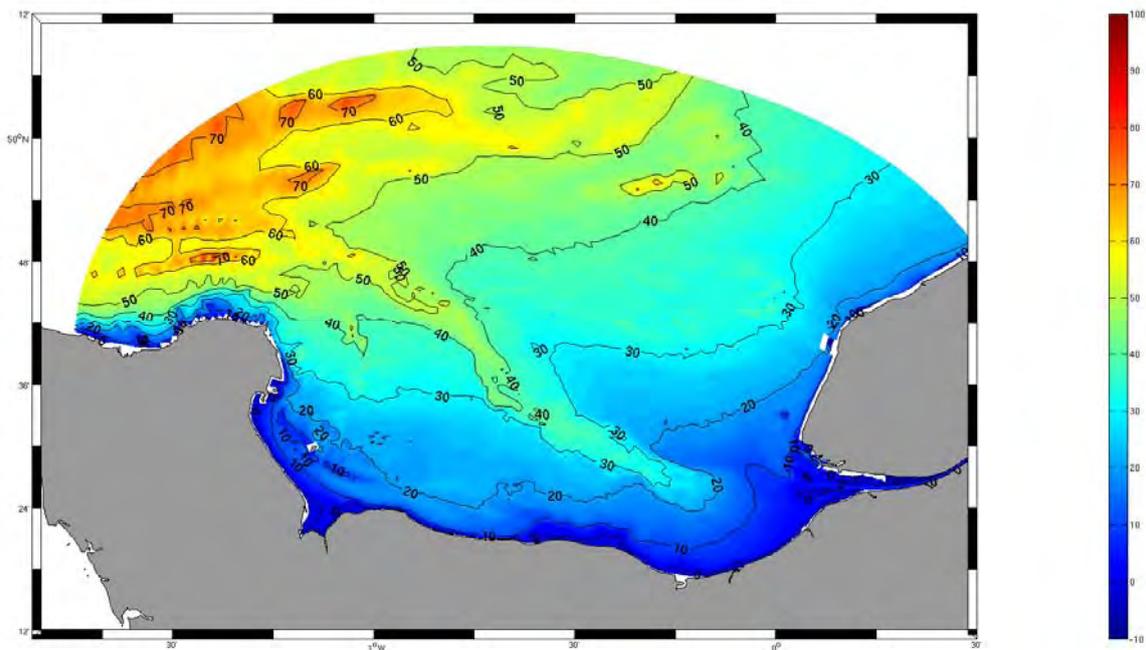


Figure 84 : Bathymétrie de la baie de Seine (en noir les isobathes pour des profondeurs correspondant aux dizaines de mètres).

7.4 Forçages du modèle

En marée, le modèle est actuellement forcé à la limite externe par la marée issue du modèle CST-FRANCE (SHOM) : il s'agit d'un modèle de l'ensemble de la Manche à 2 dimensions horizontales corrigé par des mesures de hauteurs d'eau (marégraphes). Les sorties de ce modèle sont interpolées en chaque maille de notre frontière courbe au nord de la baie de Seine (figure 85). On peut noter la déformation de l'onde de marée le long de cette frontière du domaine modélisé, avec un minimum d'amplitude correspondant au point amphidromique proche de la côte sud de l'Angleterre, et un maximum d'amplitude à l'est de l'entrée de la baie, près de Fécamp.

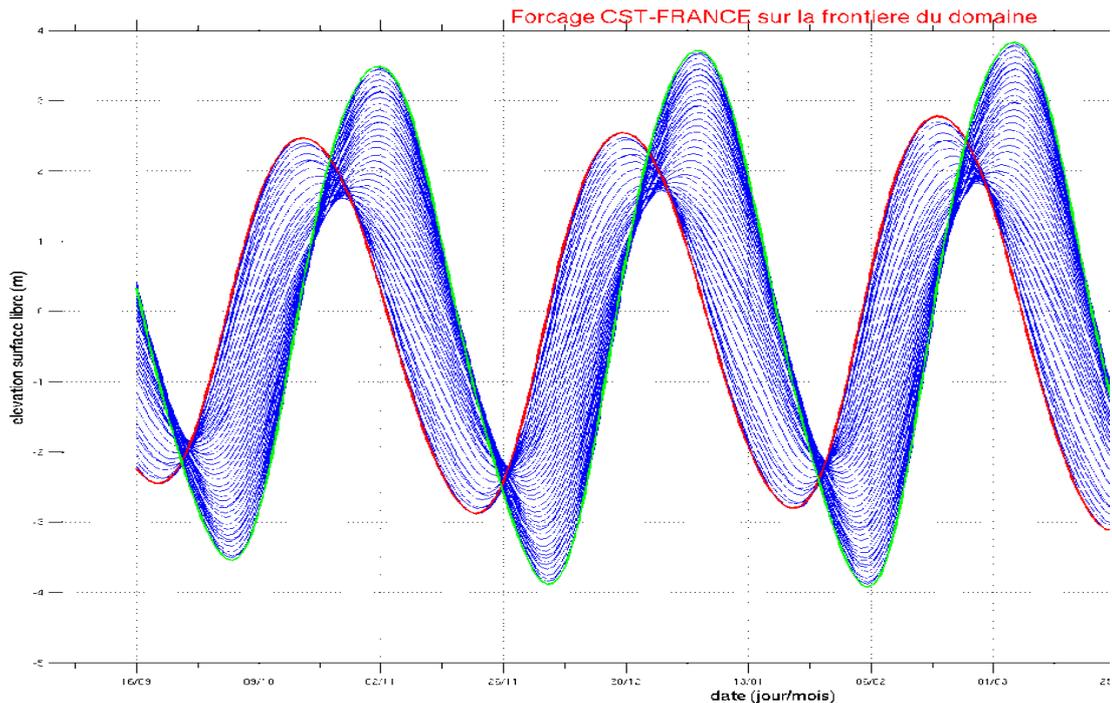


Figure 85 : Forçage par des hauteurs d'eau issues du modèle CST-France (SHOM) à la frontière nord de notre domaine (en rouge le point le plus à l'ouest et en vert le point le plus à l'est, en bleu tous les autres points de la frontière).

Le modèle est également forcé par un apport d'eau douce au niveau du barrage de Poses qui respecte le débit de la Seine (moyenne journalière). Le débit de la Risle (PK 346) est également prescrit.

Aux niveaux des forçages atmosphériques, les sorties du modèle ARPEGE de Météo-France (15 km environ de résolution spatiale, 4 données par jour) sont utilisées, en particulier pour les vents.

7.5 Calibrage hydrodynamique et caractérisation des rugosités de fond prises en compte

Au sein du code Mars 3D les frottements sur le fond sont intégrés par le biais de la réaction du fond sur le fluide. La contrainte de frottement sur le fond peut être exprimée en fonction de la vitesse de frottement u_* , (intensité des mouvements turbulents) selon l'expression $\tau = \rho u_*^2$. Dans toute la suite, c'est le frottement de forme qui est considéré, car c'est lui qui « freine » l'écoulement à l'échelle où il est « perçu » par le modèle discrétisé en mailles de dimensions supérieures à la dizaine de mètres. Ainsi, le frottement doit prendre en compte la présence d'obstacles ponctuels et surtout des rides (cas général pour un fond sableux ou graveleux). Par ailleurs, un frottement « de peau » est introduit dans le module « dynamique sédimentaire » du code de calcul, pour rendre compte de la contrainte de cisaillement exercée sur les particules sédimentaires et donc susceptible de les mobiliser. Ce frottement de peau n'est pas décrit ici.

En fait, le courant à proximité du fond (par exemple au premier niveau sigma dans le modèle discrétisé) peut être relié à la vitesse de frottement par la longueur de rugosité, en supposant valide l'hypothèse de profil logarithmique des vitesses dans la couche limite de fond :

$$u(z) = u^*/\kappa \ln (z/z_0)$$

avec κ la constante de Von Karman =0.4, z la cote au-dessus du fond et z_0 la longueur de rugosité du fond.

La longueur de rugosité z_0 est une grandeur mathématique, qui caractérise la rugosité liée à l'état de surface du fond (rugosité macroscopique) ; par exemple un fond lisse sera caractérisé par un faible z_0 tandis qu'un fond présentant des rides aura un z_0 nettement plus élevé (les expériences ont montré que pour un régime turbulent « rugueux », le z_0 valait à peu près $1/30^{\text{ème}}$ du coefficient de rugosité « physique » de Nikuradse, qui est de l'ordre de grandeur des « grains » ou des rides (hauteur x cambrure).

Spatialisation des variations de frottements sur l'ensemble du domaine modélisé

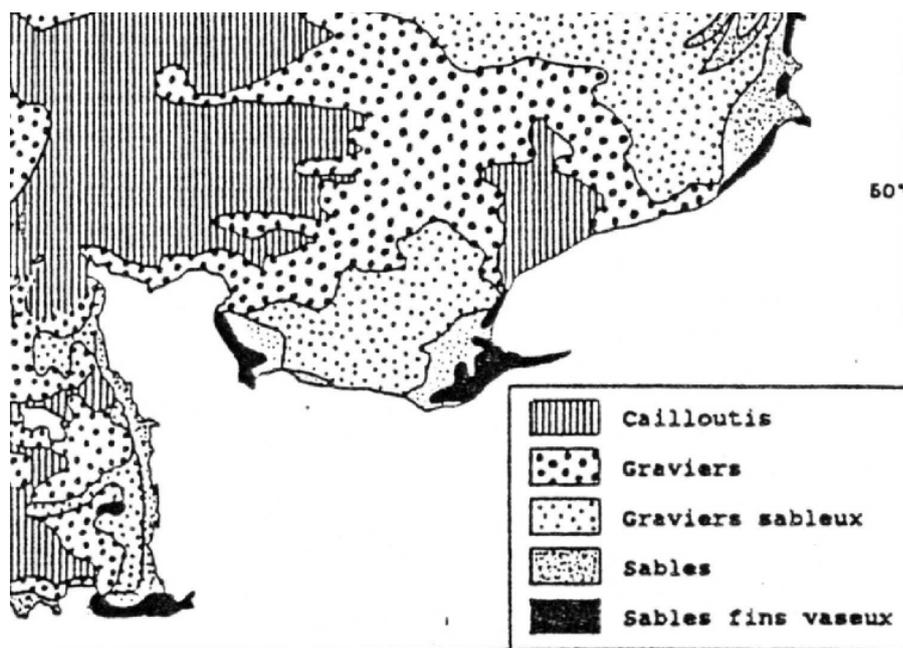
En partant du postulat que la rugosité macroscopique du fond peut être corrélée aux faciès sédimentaires, les variations spatiales de z_0 ont été déterminées en s'appuyant sur les données SIG de faciès sédimentaires.

Les données utilisées au niveau de l'embouchure sont celles établies par S. Lesourd dans le cadre de sa thèse et correspondent à l'année 1995 ; néanmoins il est prévu que cette carte soit mise à jour par S. Lesourd en 2012 dans le cadre du projet Seine-Aval COLMATAGE.

Détermination du faciès majoritaire pour chaque maille :

Dans un premier temps, le maillage du modèle a été intégré au sein du SIG Seine-Aval, et ce dernier a été utilisé pour identifier le faciès majoritaire présent dans chacune des mailles (fig. 86) : ce travail a été réalisé par le GIP Seine-Aval.

Remarque les données de nature sédimentaire issues de Seine-Aval ne couvrent pas l'ensemble de la zone modélisée (elles sont limitées à l'ouest pas le méridien passant par Ouistreham et au nord par le parallèle passant par Etretat). Néanmoins au regard de la carte de couverture sédimentaire de la Manche établie par Larsonneur en 1982 (fig.ci-dessous), il apparaît que le reste de la zone modélisée est majoritairement caractérisé par une couverture de graviers ou graviers sableux (en dehors du littoral sud-est Cotentin).



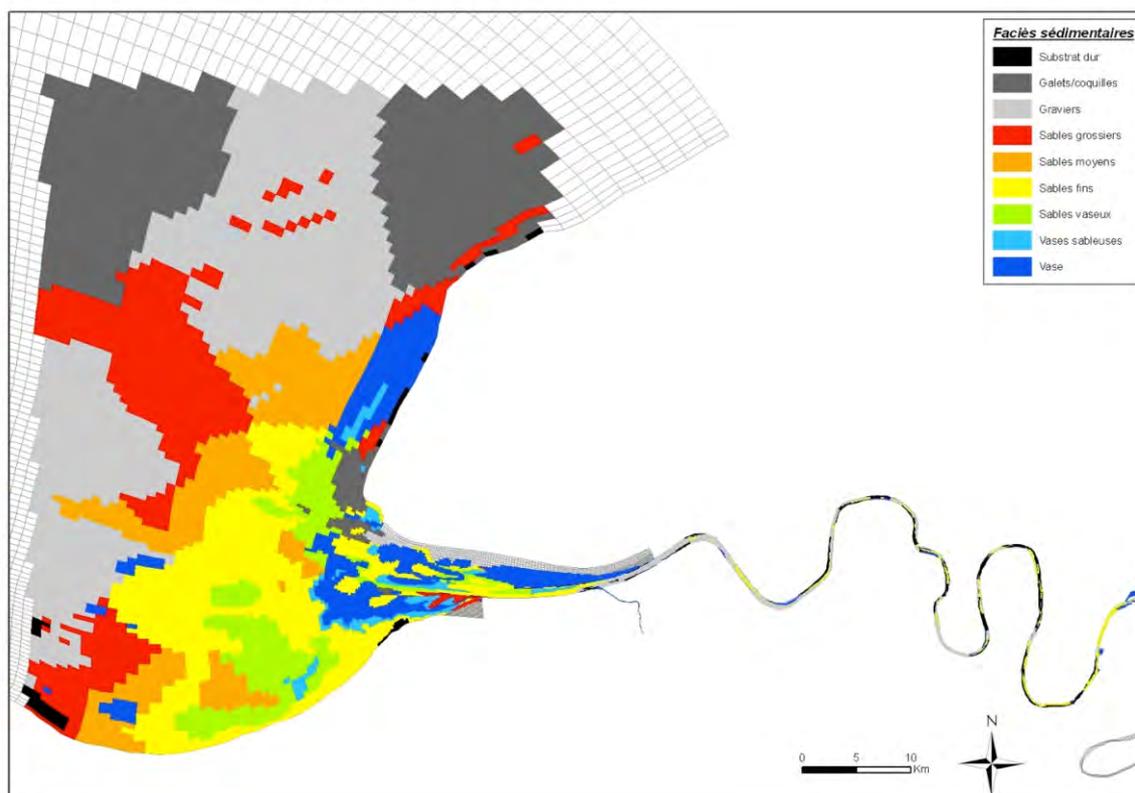


Figure 86 : Représentation discrétisée sur le maillage du modèle Mars3D curviligne de la Seine de la répartition des faciès sédimentaire (GIPSA, d'après Lesourd 1995).

Ainsi provisoirement, il est considéré que l'ensemble de la baie à l'exclusion de la zone couverte par la carte de Lesourd est constitué de graviers. Cette hypothèse devrait être révisée s'agissant du bord ouest de la baie de Seine, et en particulier de la baie des Veys, mais il s'avère que cela est sans incidence sur la circulation et la propagation de la marée dans l'estuaire.

Affectation d'une valeur de z_0 à chaque type de faciès:

Cette description de la nature du fond est ensuite introduite dans le modèle : lors de l'initialisation du calcul, en chaque maille une valeur de z_0 est affectée selon le type de faciès.

Faciès sédimentaire <i>(typologie de Lesourd)</i>	Rugosité macroscopique Z_0 (mm)
Substrat dur	10
Galets-coquilles	10
Gravier	10
Sables grossiers	5
Sables moyens	5
Sables fins	2
Sables vaseux	1
Vases sableuses	0,1

Vases	0,1
-------	-----

Ces valeurs de z_0 ont été déterminées « à dire d'expert », et partiellement justifiées par une table proposée par Soulsby (1983, in Soulsby, 1997) qui cependant ne semble pas reposer sur un ensemble de mesures très riche. Pour un fond ridé (sables, graviers...), on peut reprendre les formulations suivantes (cf. Le Hir, 2008) :

$$z_0 = k_s / 30$$

$$k_s \text{ (coefficient de Nikuradse)} = 30 H r^2 / \lambda$$

$$\lambda \text{ (longueur d'onde des rides)} = 1000 D_{50} \text{ (diamètre des grains)}$$

$$H r / \lambda \text{ (cambrure des rides)} = 0.1$$

$$\text{Soit } H r = 100 D_{50}, k_s = 300 D_{50} \text{ et } z_0 = 10 D_{50}$$

Les évaluations ci-dessus montrent qu'il serait possible d'affiner l'estimation du z_0 dans la baie, sans effort supplémentaire puisque l'information « faciès » est « connue » par le modèle, via le SIG. Mais la propagation de la marée reste peu sensible au z_0 dans la baie, et il n'a pas été jugé utile de procéder à ce raffinement.

Ajustement du frottement dans l'estuaire

Au contraire, dans la partie fluviale de l'estuaire, le modèle est beaucoup plus sensible aux frottements, qui peuvent être générés par la rugosité du fond, mais aussi par les rives et leurs aménagements ou encore la végétation rivulaire ou toute sorte d'irrégularités bathymétriques non restituées dans le modèle. La dimension des mailles (fréquemment 3 mailles dans la largeur du fleuve) de notre modèle ne permettant pas de rendre compte de tous ces frottements, une procédure de calibration du modèle par essais successifs sur les valeurs de z_0 a été entreprise afin de reproduire la propagation de la marée jusqu'au barrage de Poses. Ainsi nous avons défini 5 zones au sein desquelles les coefficients de frottements varient linéairement (fig.87).

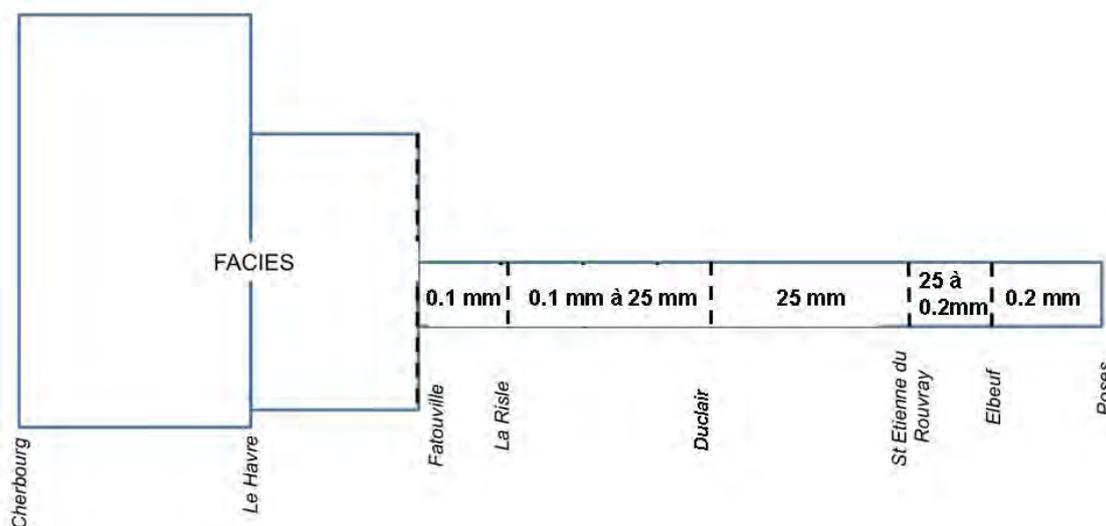


Figure 87 : Identification des zones caractéristiques de variabilité des longueurs de rugosités (représentation cartésienne de l'emprise du maillage curviligne)

Un travail fastidieux d'ajustement des facteurs de frottement a été réalisé en deux temps, d'abord dans le cadre du Master 2 d'Emmanuel Renault (2011), puis plus récemment en mars

2012 pour régulariser la variation des z_0 sans perdre en précision sur la marée simulée. La calibration était effectuée en comparant les résultats du modèle (cote de surface libre) aux données marégraphiques dans l'estuaire.

Pour les débits supérieurs à la moyenne, un réajustement des rugosités en amont d'Elbeuf a été introduit en utilisant la relation suivante :

$$z_0 = 0.2 (1 + (Q-500)/300) \text{ pour } Q \text{ (débit de la Seine)} > 500 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$$

La justification est une augmentation des frottements lorsque le niveau d'eau monte. Il peut ainsi s'agir de frottements liés aux végétations rivulaires seulement inondées en haut débit. Une paramétrisation en fonction du niveau d'eau local plutôt qu'en fonction du débit serait donc plus élégante, mais faute de temps, ce travail n'a pas été concrétisé.

La figure 88 illustre la répartition des z_0 en situation de débit faible ou moyen. Seule la valeur en amont d'Elbeuf est augmentée pour les débits supérieurs à $500 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$.

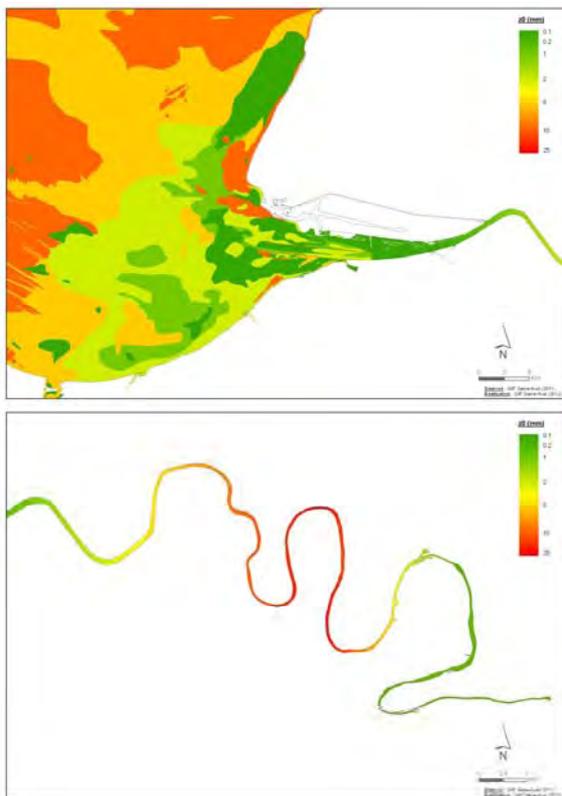


Figure 88 : Cartographie des variations de la longueur de rugosité z_0 introduites dans le modèle Mars 3D de l'estuaire de la Seine

7.6 Validation du modèle hydrodynamique

La figure 89 présente une cartographie des élévations de la surface libre (référéncée par rapport au niveau moyen) de la baie de Seine à un instant quelconque de la marée. Ces élévations sont comparées en plusieurs points de la baie aux sorties du modèle CST-France. Les résultats obtenus, présentés sous la forme d'un diagramme de Taylor, sont très satisfaisants (Fig. 90). Ce diagramme exprime les différences entre les deux modèles en termes de corrélation

(phasage/déphasage de l'onde de marée) et d'écart-type (amplitude de l'onde marée) pour 8 points de la baie, respectivement (dans l'ordre de la légende) Cherbourg, Barfleur, les îles Saint-Marcouf, Port-en-Bessin, Ouistreham, Le Havre, Antifer et Fécamp. Les valeurs sont très proches de 1 (valeur idéale) pour les 8 points, ce qui indique une forte corrélation et une différence d'amplitude faible entre les deux modèles.

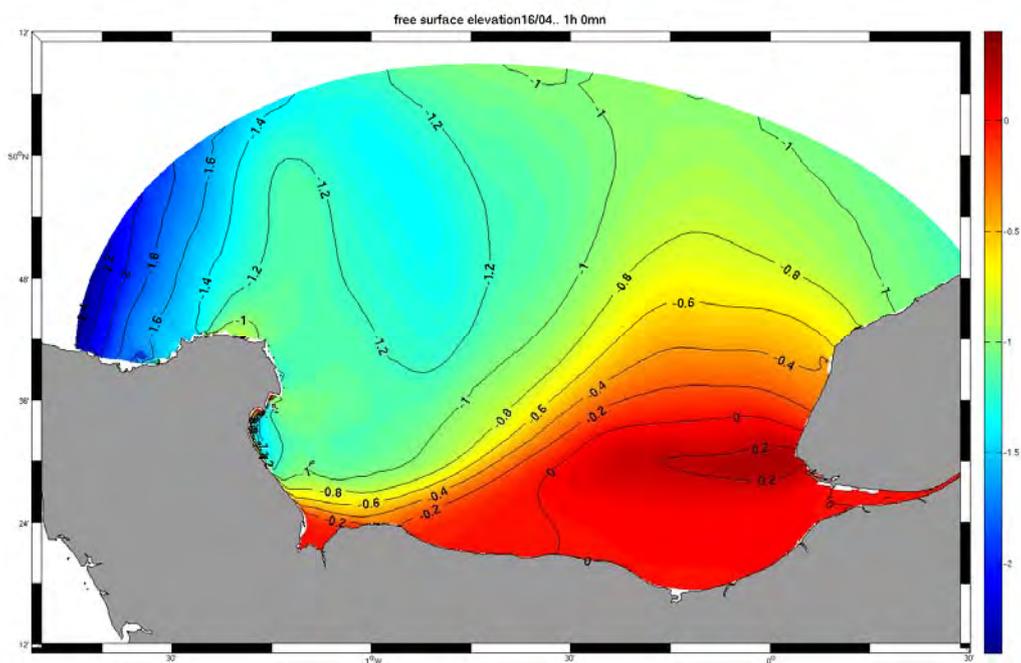


Figure 89 : Exemple de cartographie de l'élévation de la surface libre calculée à partir de MARS3D

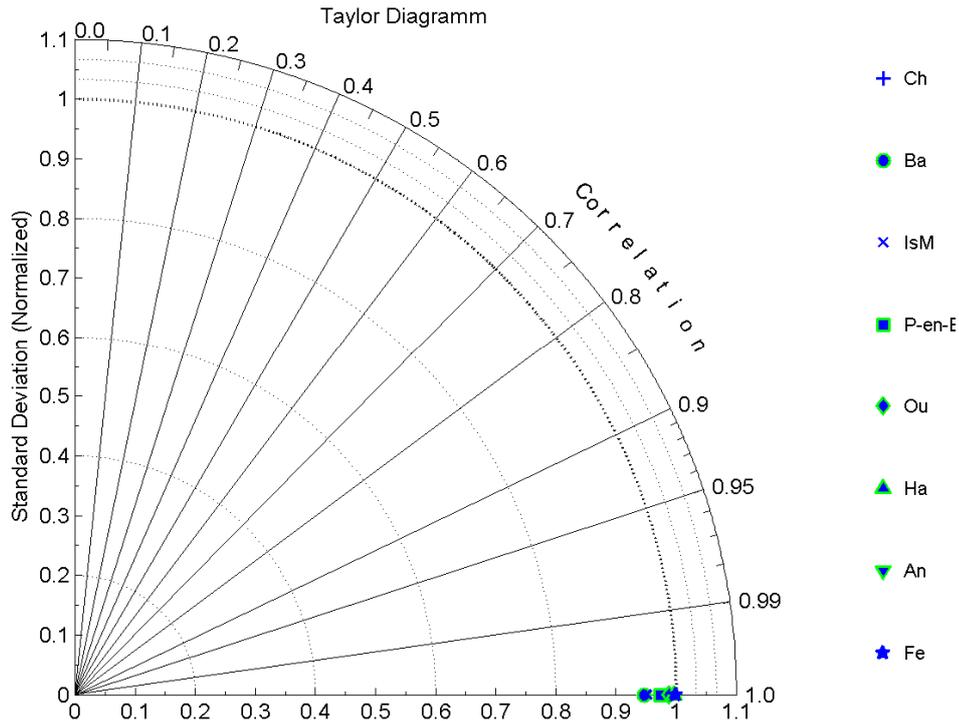


Figure 90 : Diagramme de Taylor présentant le degré de performance du modèle curvilinéaire MARS3D de la Seine par rapport aux sorties du modèle CST-France (SHOM)

Pour la partie estuarienne, la validation a été effectuée par comparaison à des mesures marégraphiques (fourniture GIPSA et GPM Rouen) réalisées en 16 points de la Seine toutes les 5 minutes. Pour plus de clarté et afin de mettre en évidence la dissipation de l'onde de marée de l'aval à l'amont de l'estuaire, 7 points de comparaison sont présentés (figure 91) de Honfleur, à l'embouchure de la Seine, à Pont de l'Arche, le marégraphe le plus en amont, près de la limite de marée dynamique (barrage de Poses). La distance séparant Honfleur de Pont de l'Arche est de 200 km.

Les résultats sont présentés pour une période de 5 jours sous des conditions de débit faibles (environ $300 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$) et en prenant en compte dans les simulations le forçage exercé par le vent (modèle ARPEGE de MétéoFrance).

Ces résultats sont globalement très satisfaisants, tant en amplitude, qu'en phase et en niveau moyen. La partie la plus amont de la rivière - plus difficile à simuler car l'énergie de l'onde de marée est très dissipée par le frottement sur le fond - est très bien représentée. Les écarts les plus importants sont à Caudebec. Ces résultats sont pour partie liés à l'utilisation de mailles curvilignes qui permet d'obtenir une géométrie « réaliste » de la rivière et de prendre en compte ses méandres ainsi que les îles et les bras morts, et qui permet de pallier au manque d'efficacité (sections de l'écoulement difficiles à décrire précisément à toute heure marée) des modèles classiques (cartésiens) souvent unidimensionnels dans cette partie amont de la Seine (Waelles, 2005).

Afin de vérifier la robustesse du modèle, il convient d'effectuer les mêmes comparaisons pour un débit de crue. La figure 92 présente les résultats obtenus pour une petite crue de $1370 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ les 5 et 6 mars 2007. Les résultats sont encore très bons, avec un écart à la mesure qui se révèle tantôt à Duclair, tantôt à Petit Couronne. On notera que les échelles de représentation des hauteurs d'eau varient d'un marégraphe à l'autre, et qu'en fait la « dynamique » de propagation est très forte. Le niveau d'eau en amont, supérieur d'environ 3 m à celui obtenu pour un débit

de $300 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, est très bien reproduit, validant ainsi l'augmentation du frottement amont avec le débit.

Pour les deux simulations représentées, les conditions initiales étaient irréalistes : on voit que la mise en régime hydrodynamique du système est très brève : de l'ordre d'une dizaine d'heures, c'est à dire guère plus que le temps de propagation du signal de marée depuis la frontière du large, quel que soit le débit. L'adaptation des niveaux d'eau aux variations de débit se fait également très rapidement, et est bien reproduite par le modèle.

Propagation de la marée en estuaire de Seine

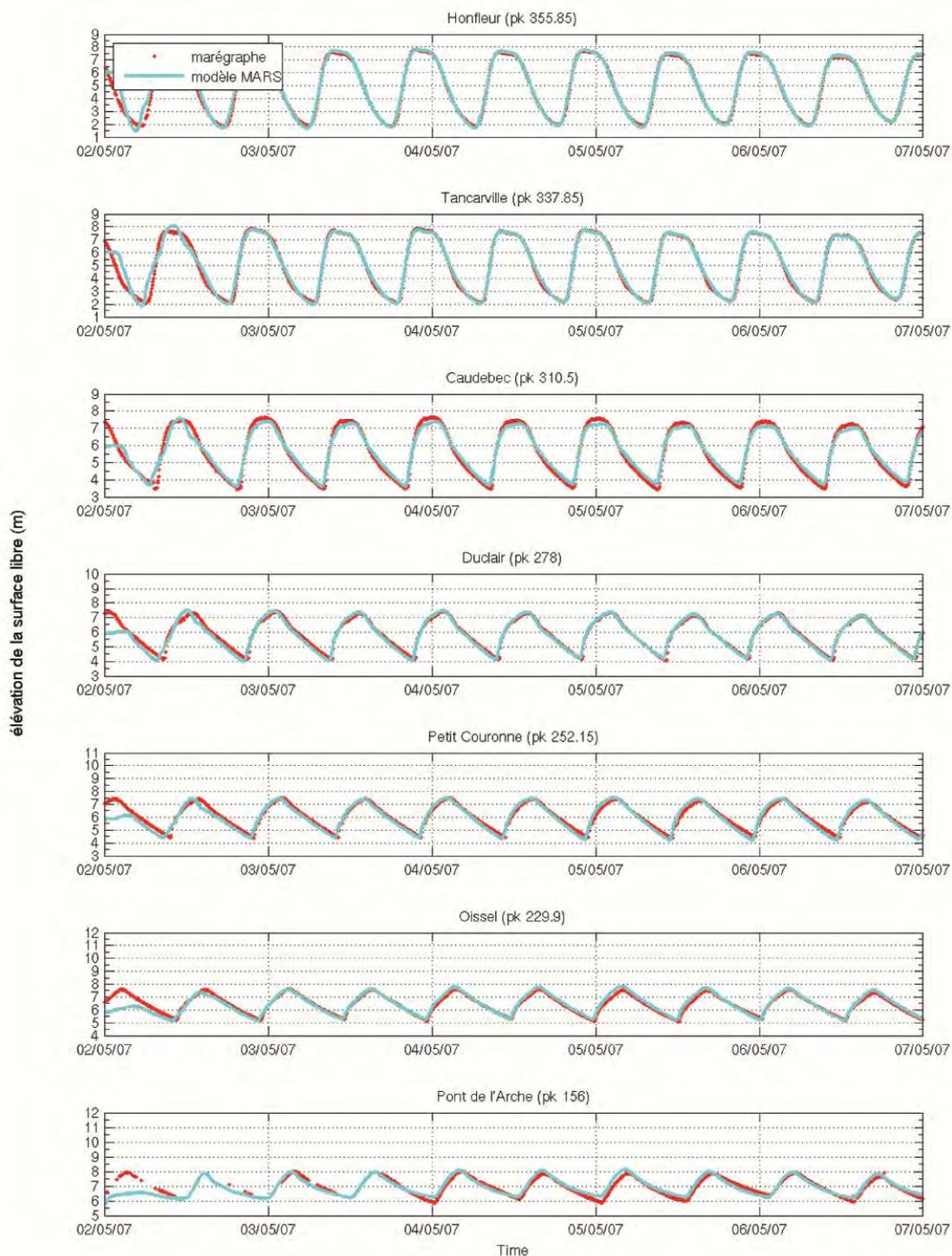


Figure 91 : Comparaisons d'élévations de la surface libre dans l'estuaire pour un débit faible de la Seine (environ $300 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$). Mesures marégraphiques en rouge et modèle MARS3D en bleu clair.

Propagation de la marée en estuaire de Seine

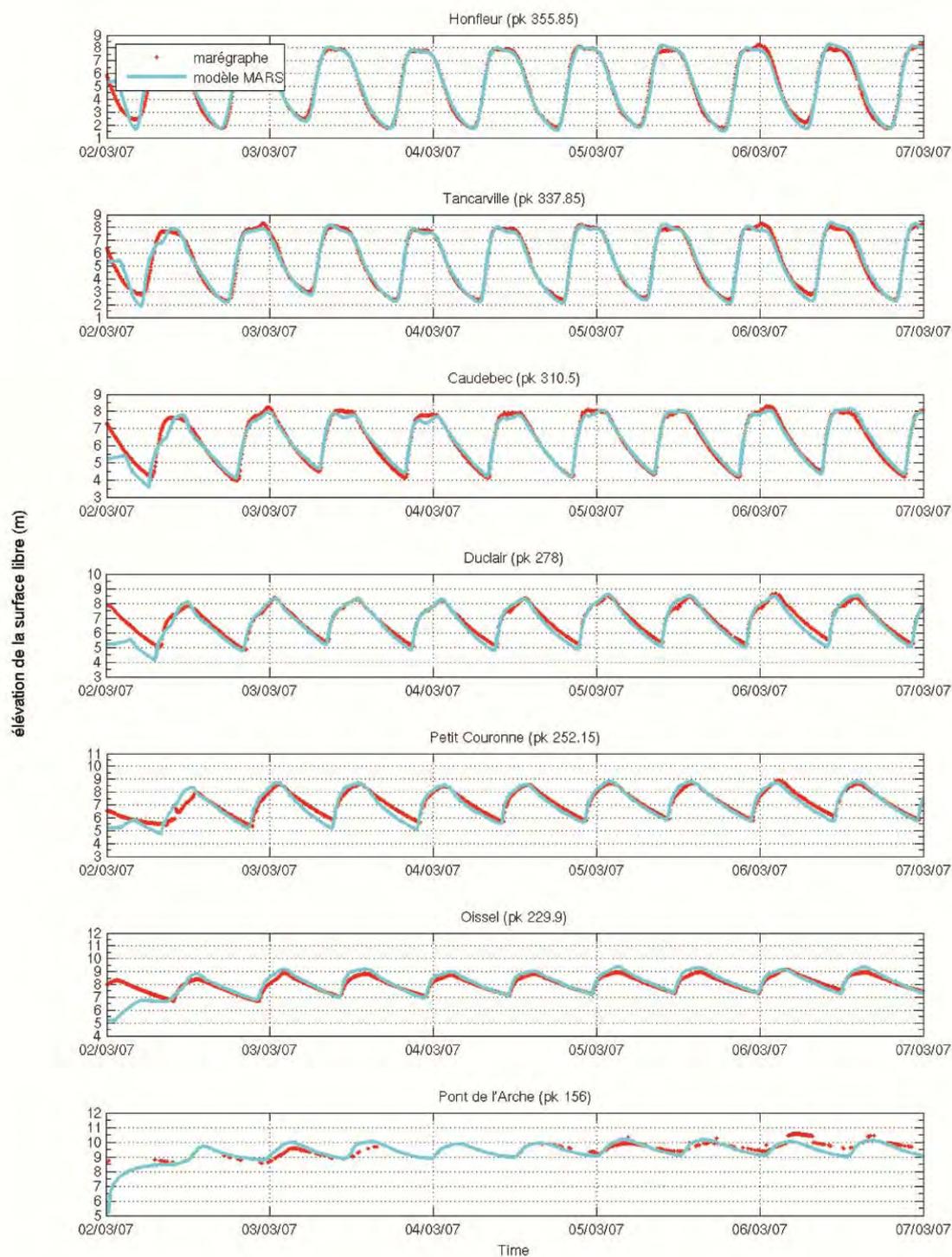


Figure 92 : Comparaisons d'élévations de la surface libre dans l'estuaire pour un débit élevé de la Seine (environ $1370 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$). Mesures marégraphiques en rouge et modèle MARS3D en bleu clair.

Dans la suite, les résultats de modélisation qui seront présentés avaient été obtenus avec une calibration des frottements un peu différente dans l'estuaire (calibration de l'été 2011), qui conduisait à des résultats de même qualité mais avec une modulation moins régulière des z0 (Renault, 2011 ; Kervella, 2011).

Simulation des courants

Si la calibration du modèle en niveaux d'eau est une chose délicate en estuaire, on sait que la qualité de simulation de la marée dans la zone côtière (ici la baie de Seine) est très liée à la qualité de la condition à la limite et varie peu en fonction du paramétrage du modèle. Par contre il en va autrement des courants simulés, d'autant plus qu'une structure tridimensionnelle peut se mettre en place sous l'action du vent ou des gradients de densité. Nous avons donc porté notre effort sur la validation des courants simulés, sans calibration supplémentaire.

La capacité du modèle à reproduire les intensités et les directions des vitesses de courant est évaluée grâce à une campagne de mesures réalisée en 2004 par la société IXSURVEY pour le Grand Port Maritime de Rouen.

Toutes les mesures sont réalisées à l'aide d'ADCP (Acoustic Doppler Current Profiler) posés sur le fond qui nous fournissent des profils de courants sur toute la colonne d'eau au cours du temps. Les points de mesures (respectivement : La Risle, Courval, la Brèche du Ratier, Cokburn et le Ratier sud) sont indiqués sur la figure 93.

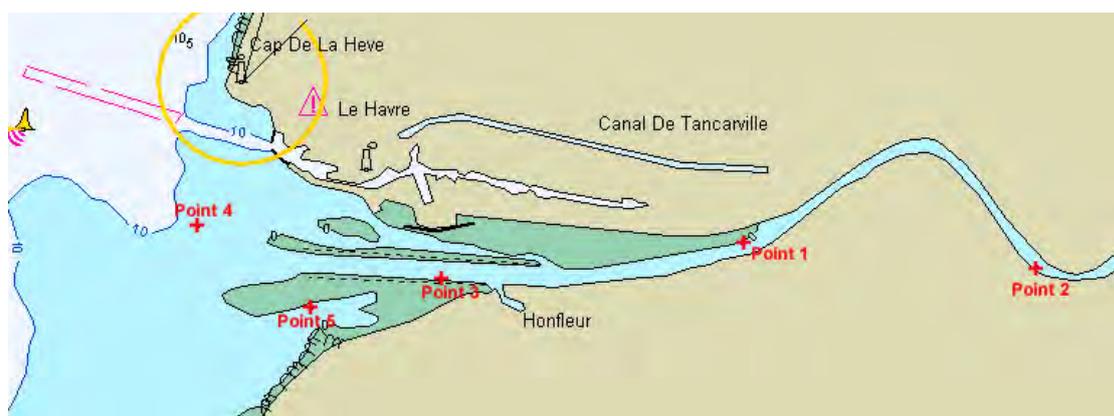


Figure 93 : Localisation des points de mesures du courant (ADCP, IXSURVEY 2004)

Les figures 94 à 103 présentent les comparaisons entre ces mesures ADCP et le modèle MARS3D à coordonnées curvilignes. Les figures paires présentent des comparaisons en termes d'intensité de vitesse et les figures impaires des comparaisons en termes de direction. Ces figures sont divisées en 3 parties : comparaison des vitesses moyennées sur la colonne d'eau issues de l'ADCP et du modèle (en haut), vitesse sur la colonne d'eau simulée (au milieu) et vitesse sur la colonne d'eau enregistrée par l'ADCP (en bas).

Au point 1 (La Risle, figures 94 et 95), la comparaison des vitesses moyennes sur la colonne d'eau permet d'affirmer que le modèle reproduit correctement les intensités en flot et en jusant, qui atteignent une valeur maximale de 1.75 m.s^{-1} lors du flot. Les renverses de courant sont elles aussi bien reproduites. On note cependant des écarts d'intensité d'environ 0.9 m.s^{-1} en début de jusant (sous-estimation du modèle), liés peut-être à la définition de la bathymétrie dans cette zone (mesures proches de la berge), et un écart plus faible en fin de jusant (sur-estimation du modèle). Les structures du courant sur la colonne d'eau sont correctement reproduites au cours du temps (extrema de valeurs du courant bien placés et possédant la bonne intensité), hormis cette sous-estimation du courant en début de jusant. Les changements de directions sont quant à eux très bien reproduits. En particulier, la différence des deux renverses est notable : la

renverse de flot est simultanée sur toute la colonne d'eau, tandis que la renverse de jusant se produit d'abord en surface, en raison des gradients de densité amont/aval.

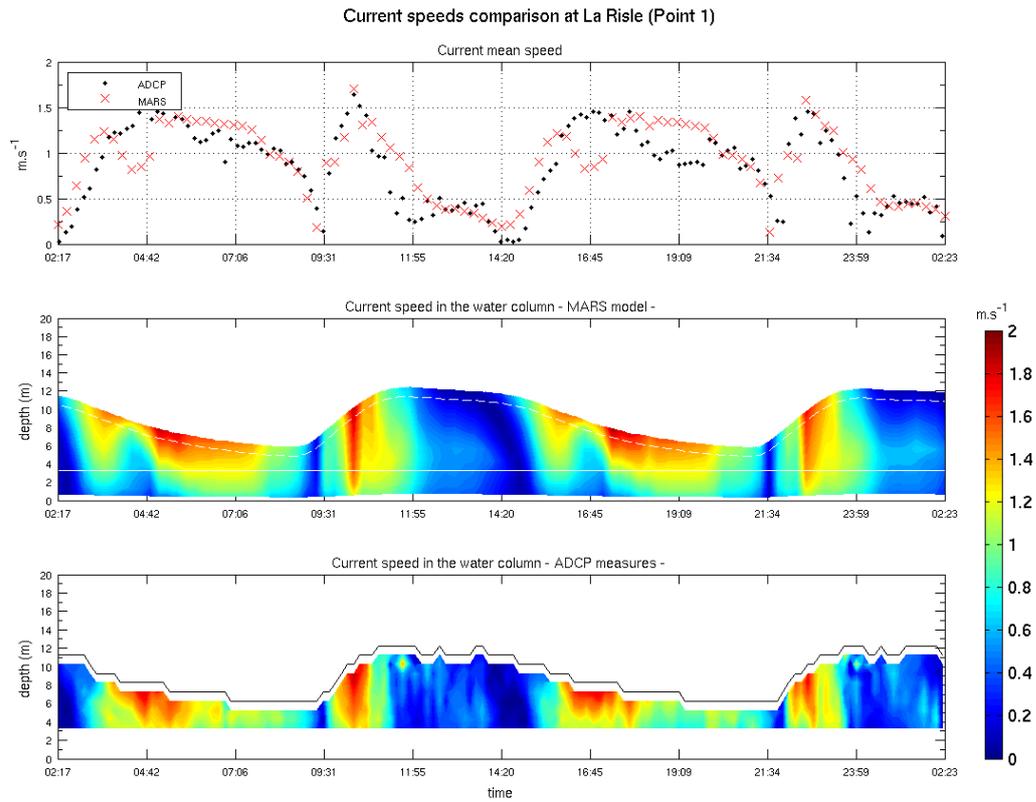


Figure 94 : Intensité du courant près de la Risle (point 1)

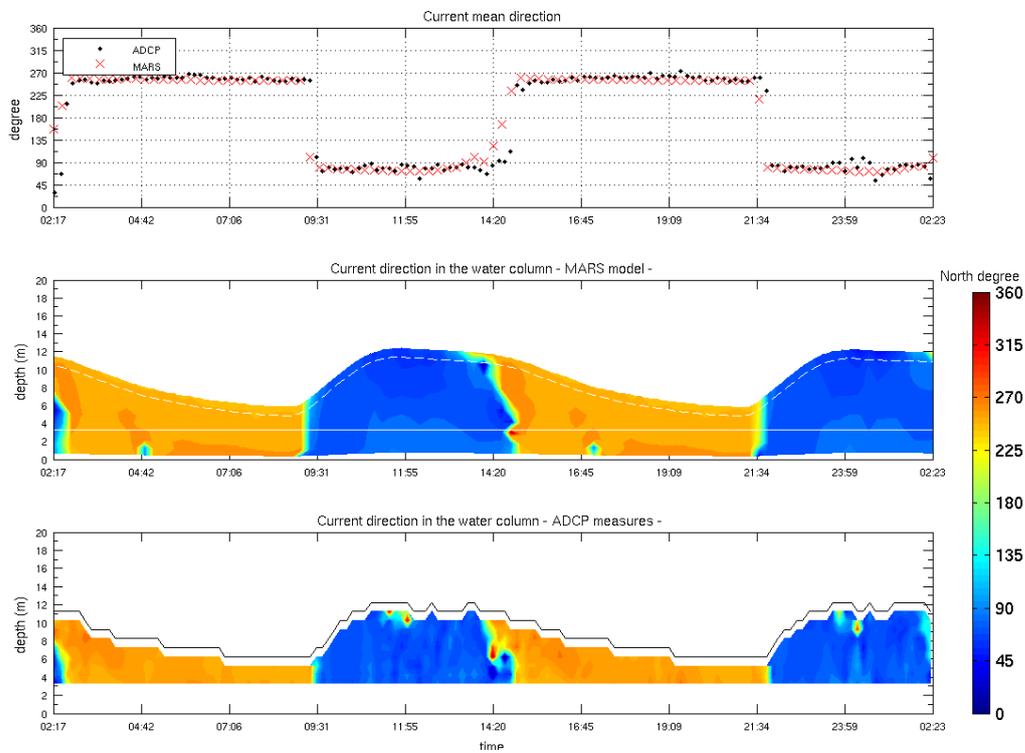


Figure 95 : Direction du courant près de la Risle (point 1)

Le point 2 (Courval, figures 96 et 97) se situe dans le premier méandre du fleuve. Les vitesses calculées par le modèle atteignent jusqu'à 2 m.s^{-1} en fin de jusant, et correspondent ainsi aux intensités mesurées, malgré une légère sous-estimation globale. Les étales de pleine mer et de basse mer simulées par le modèle semblent être un peu plus longues que celles mesurées. Les changements de direction (renverses de courant) s'opèrent de manière identique sur toute la colonne d'eau (pas de gradient de densité dans ce secteur pour les conditions de débit du jour). Ils correspondent parfaitement aux observations (NB : la direction correspondant à la couleur bleu foncé est identique à celle correspondant à la couleur rouge ; respectivement 0° et 360°).

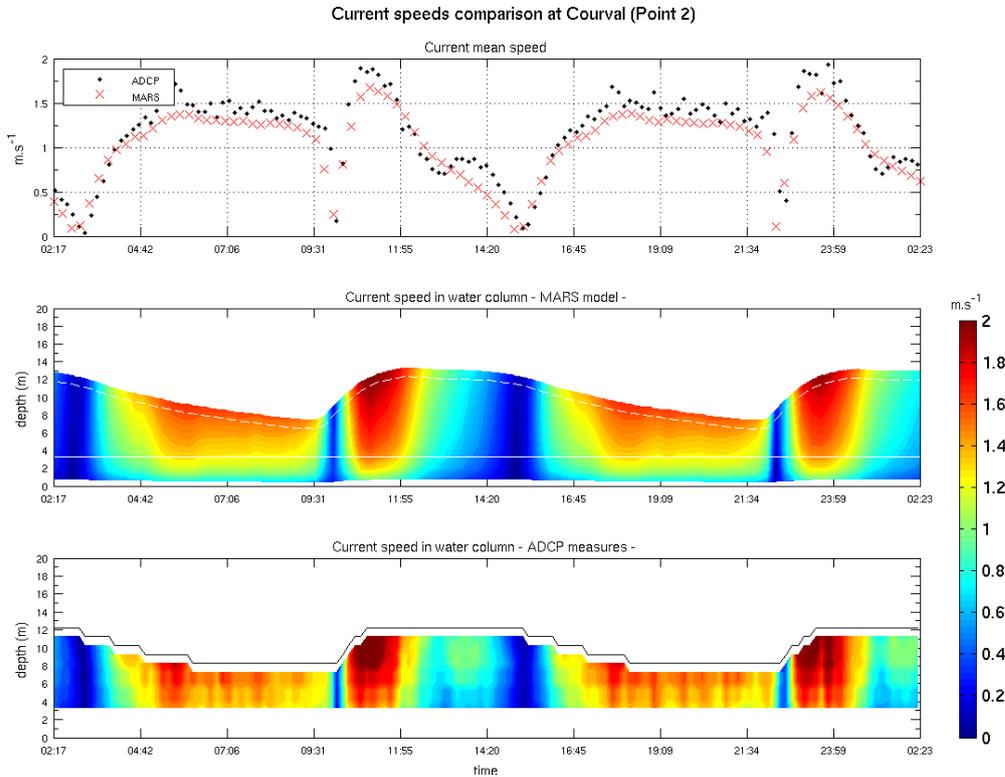


Figure 96 : Intensité du courant à Courval (point 2)

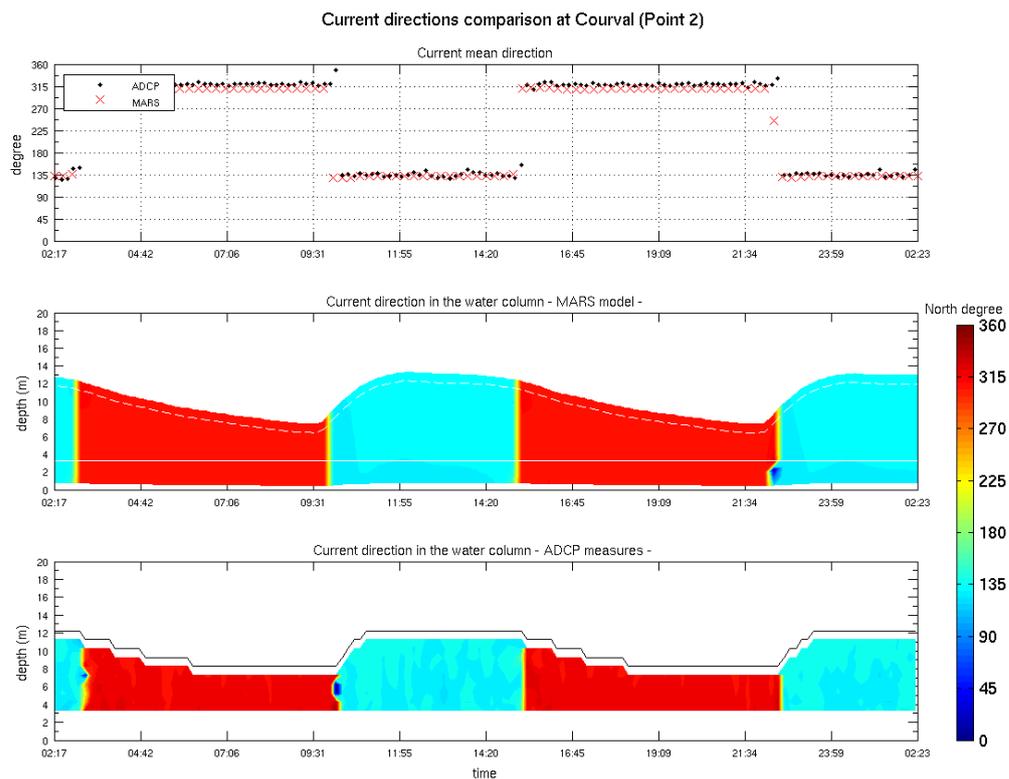


Figure 97 : Direction du courant à Courval (point 2)

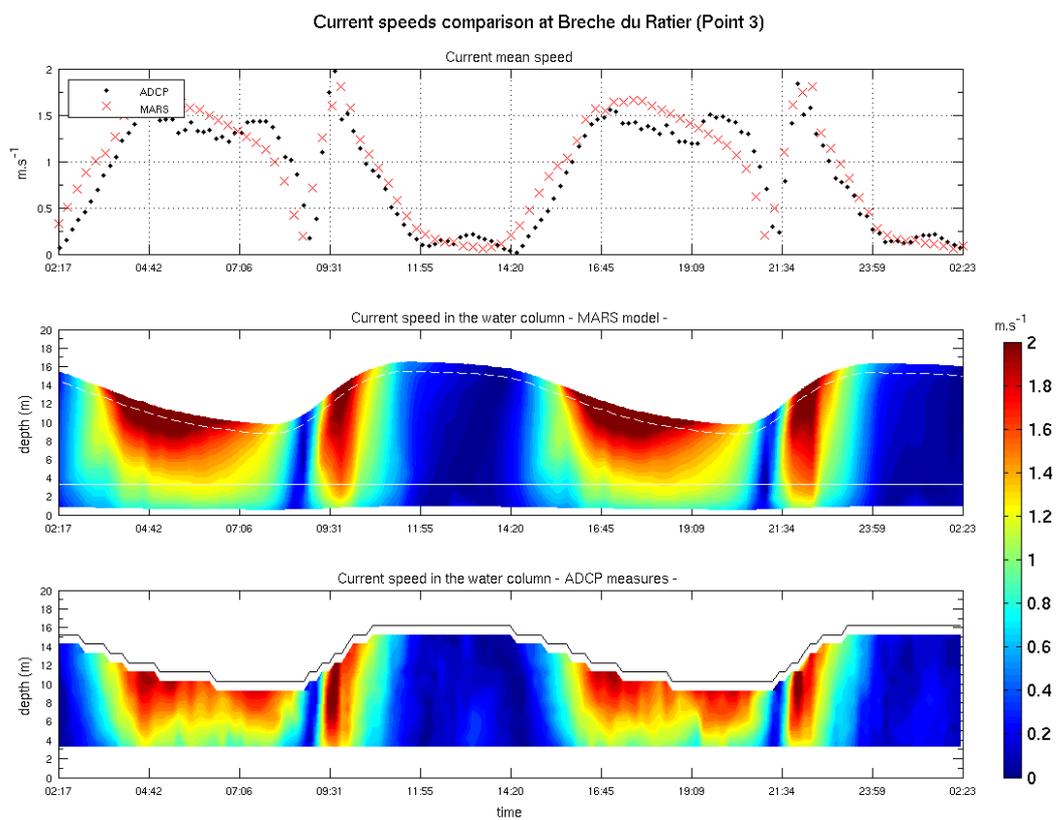


Figure 98 : Intensité du courant à la brèche du Ratier (point 3)

Current directions comparison at Breche du Ratier (Point 3)

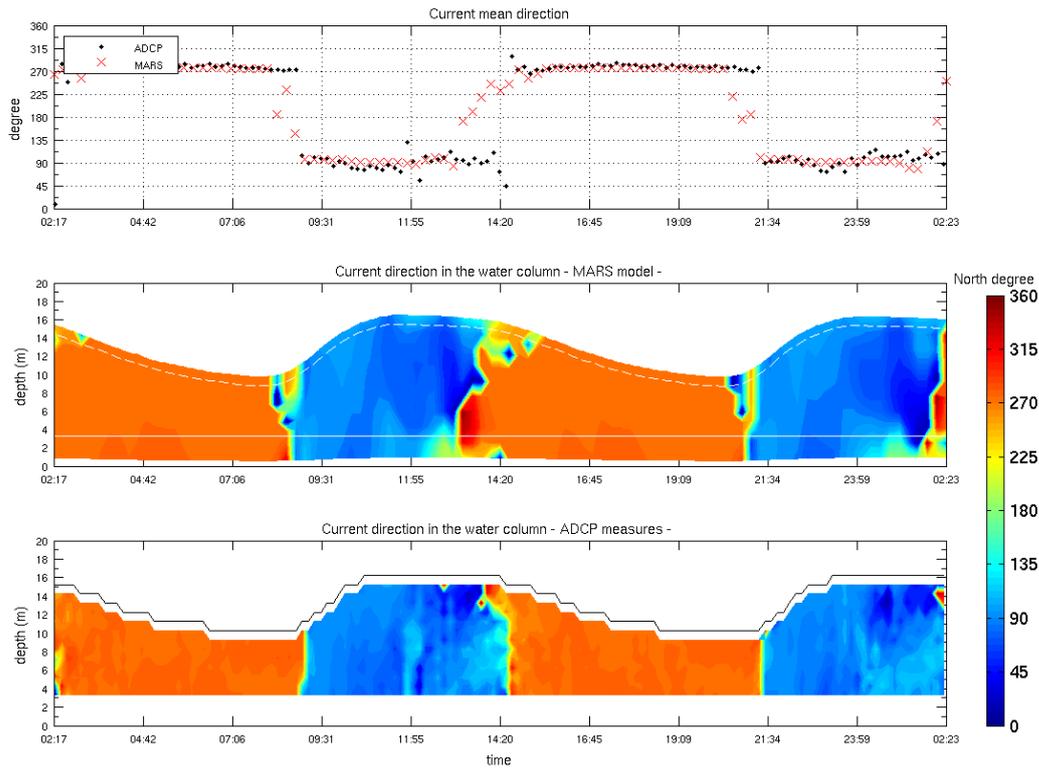


Figure 99 : Direction du courant à la brèche du Ratier (point 3)

Current speeds comparison at Cokburn (Point 4)

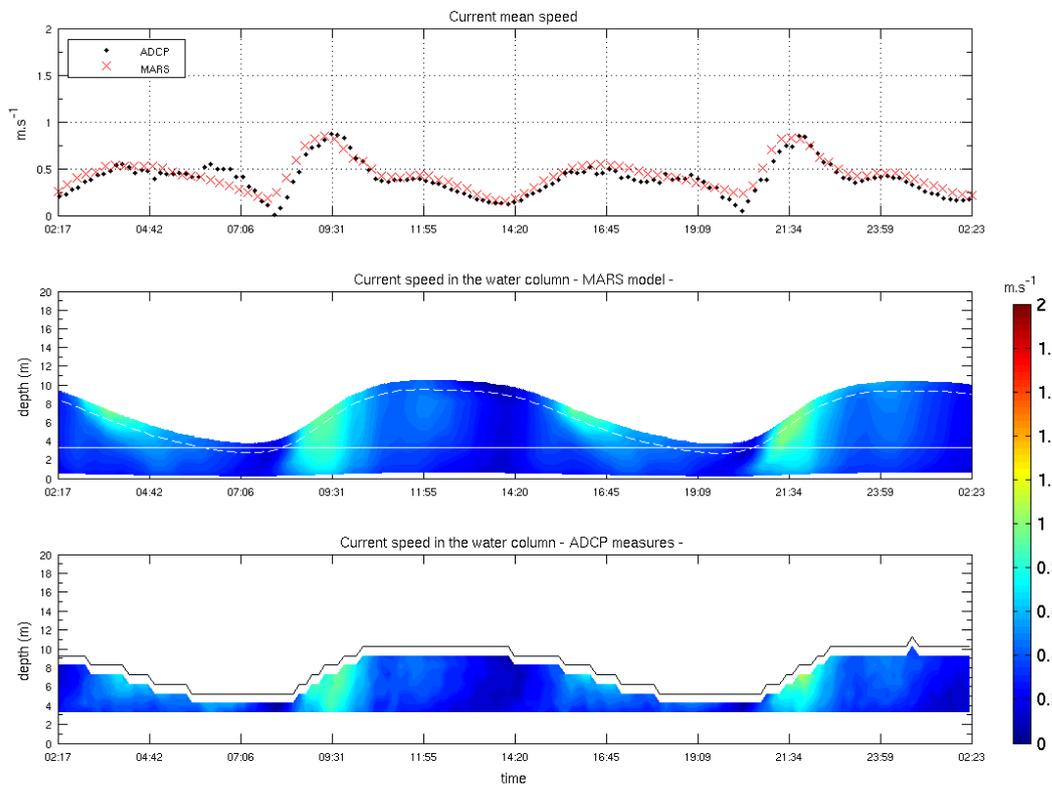


Figure 100 : Intensité du courant à Cokburn (point 4)

Current directions comparison at Cokburn (Point 4)

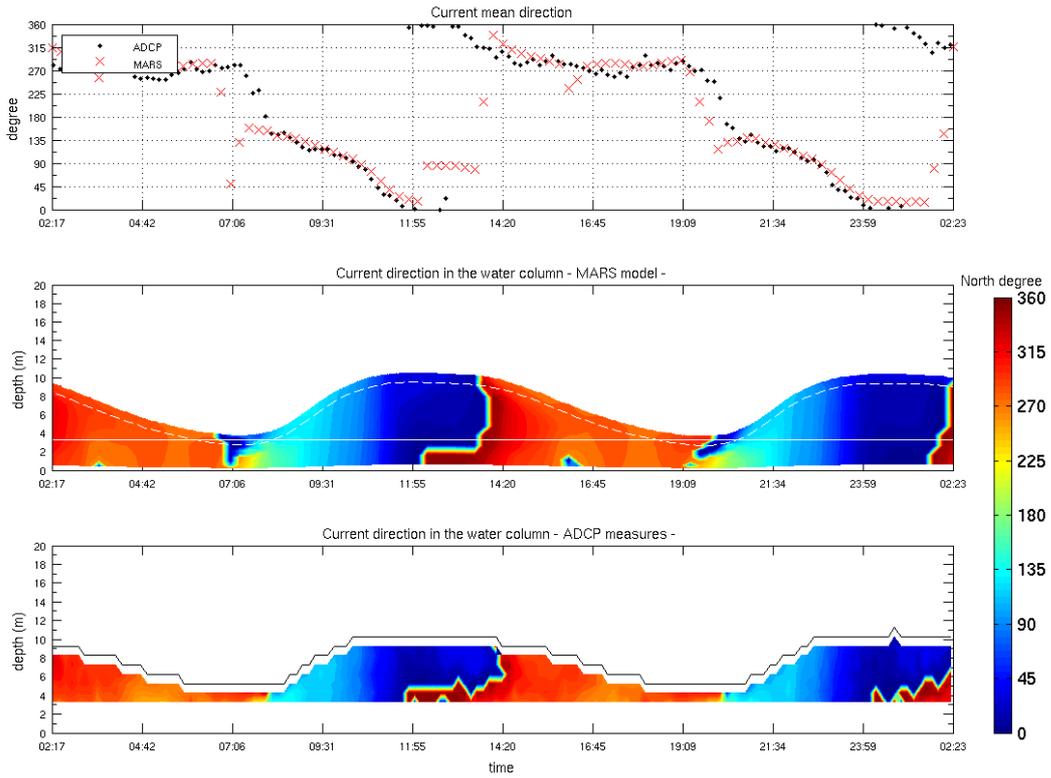


Figure 101 : Direction du courant à Cokburn (point 4)

Current speeds comparison at Ratier Sud (Point 5)

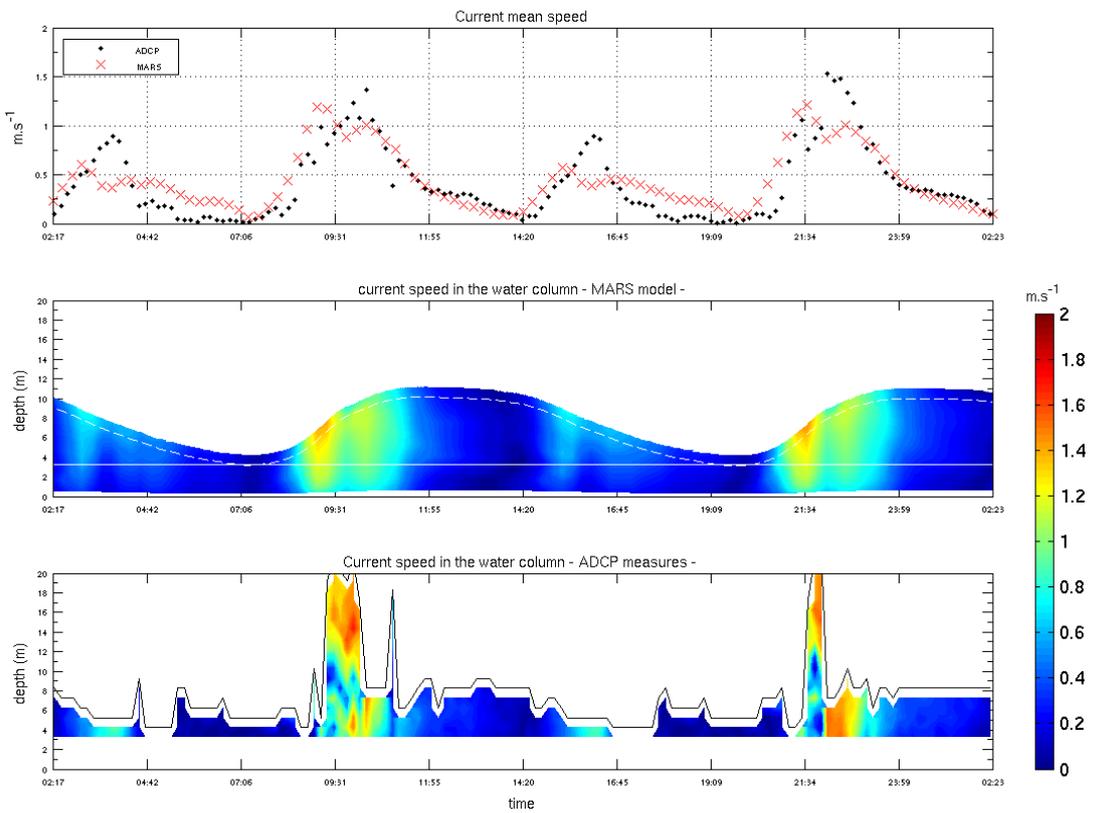


Figure 102 : Intensité du courant au Ratier sud (point 5)

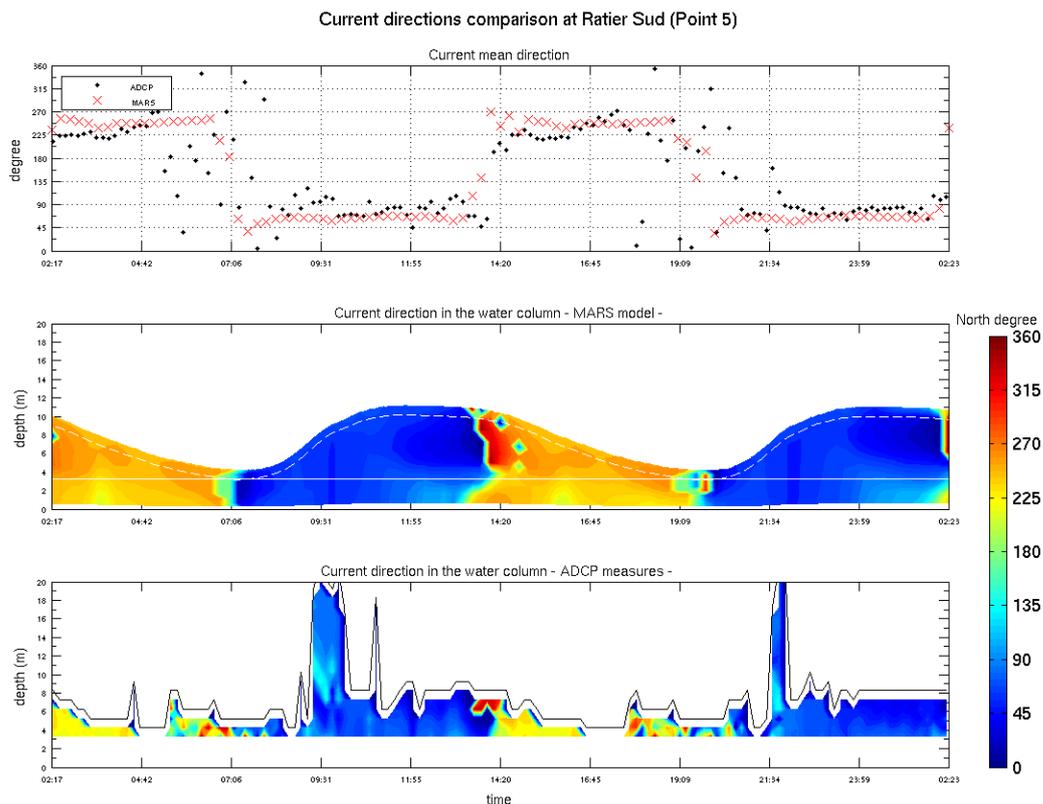


Figure 103 : Direction du courant au Ratier sud (point 5)

Le point 3 (Brèche du Ratier, figures 98 et 99) est situé dans la zone d'endiguement à l'embouchure du fleuve. Nous pouvons constater une profondeur importante à cet endroit, liée à la présence du chenal de navigation. Les courants de jusant y sont quasiment aussi forts en termes d'intensité (2 m.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, ce qui conduit, par un effet de canalisation, à une augmentation des vitesses du jusant. Les intensités de vitesse et changements de direction sont dans l'ensemble correctement reproduits par le modèle, mais avec un degré de corrélation moins important que pour les 2 premiers points au niveau des vitesses : surestimation des intensités en début de jusant et sous-estimation en fin de jusant notamment.

Le point 4 (Cokburn, figures 100 et 101) est situé à l'entrée de l'embouchure, à l'interface entre la baie et l'estuaire. Les courants y sont plus faibles, de l'ordre de 0.5 m.s^{-1} en jusant et de 1 m.s^{-1} en flot, et sont bien reproduits par le modèle, que ce soit en termes d'intensité ou de direction. Il faut d'ailleurs noter qu'à ce point, où le courant de marée est giratoire, le modèle reproduit très bien un renversement des courants qui ne se réalise pas de façon homogène sur la colonne d'eau (vers 12h) : il s'agit peut-être de l'avance du « fond » sur la « surface » qui est classiquement observée dans un courant de marée en raison d'une inertie plus faible des couches de fond se déplaçant moins vite (Le Hir, 1980), mais l'effet est ici vraiment spectaculaire.

Les mesures fournies par l'ADCP au point 5 (Ratier Sud, figures 102 et 103) présentent des anomalies (hauteurs d'eau incohérentes et données manquantes). Effectuer une comparaison sur la colonne d'eau en termes d'intensité et de direction entre le modèle et les observations n'a pas de sens. Nous avons cependant accès aux données moyennées qui, en ce point difficile à

simuler de par sa bathymétrie complexe et ses courants changeant, sont en bonne adéquation avec les sorties de notre modèle.

Globalement, le modèle reproduit donc 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.

Nous considérons ainsi, par le biais de ces comparaisons des sorties du modèle avec des données de marégraphes tout le long de l'estuaire et avec des profils ADCP à l'embouchure et dans l'estuaire, que le modèle MARS3D curviligne de l'estuaire de la Seine est validé du point de vue hydrodynamique et donne dans l'ensemble des résultats très satisfaisants.

7.7 Validation de l'hydrologie (salinité)

La validation de l'hydrologie complète la validation du modèle hydrodynamique, puisqu'ainsi c'est le module du transport d'éléments dissous (advection/diffusion des constituants de la masse d'eau) qui est évalué. La figure 104 présente la comparaison entre les données du système MAREL-Honfleur et les sorties du modèle à Honfleur en termes de salinité. Au niveau de la sortie du modèle, une moyenne des deux couches entourant le capteur MAREL-Honfleur (distance fixe d'environ 1.5 m sous la surface) est effectuée à chaque pas de temps.

Ce premier test est tout à fait satisfaisant. Il convient néanmoins de réaliser d'autres comparaisons en d'autres points de la baie ou de l'estuaire afin de vérifier cette cohérence entre le modèle et les mesures disponibles. Il faudra également comparer la salinité de notre modèle aux mesures réalisées à sur toute la colonne d'eau (par exemple celles de Fatouville 2011) afin de voir si l'allure du profil de salinité simulé (du fond à la surface) est correcte et donc de vérifier que les stratifications sont bien reproduites par le modèle.

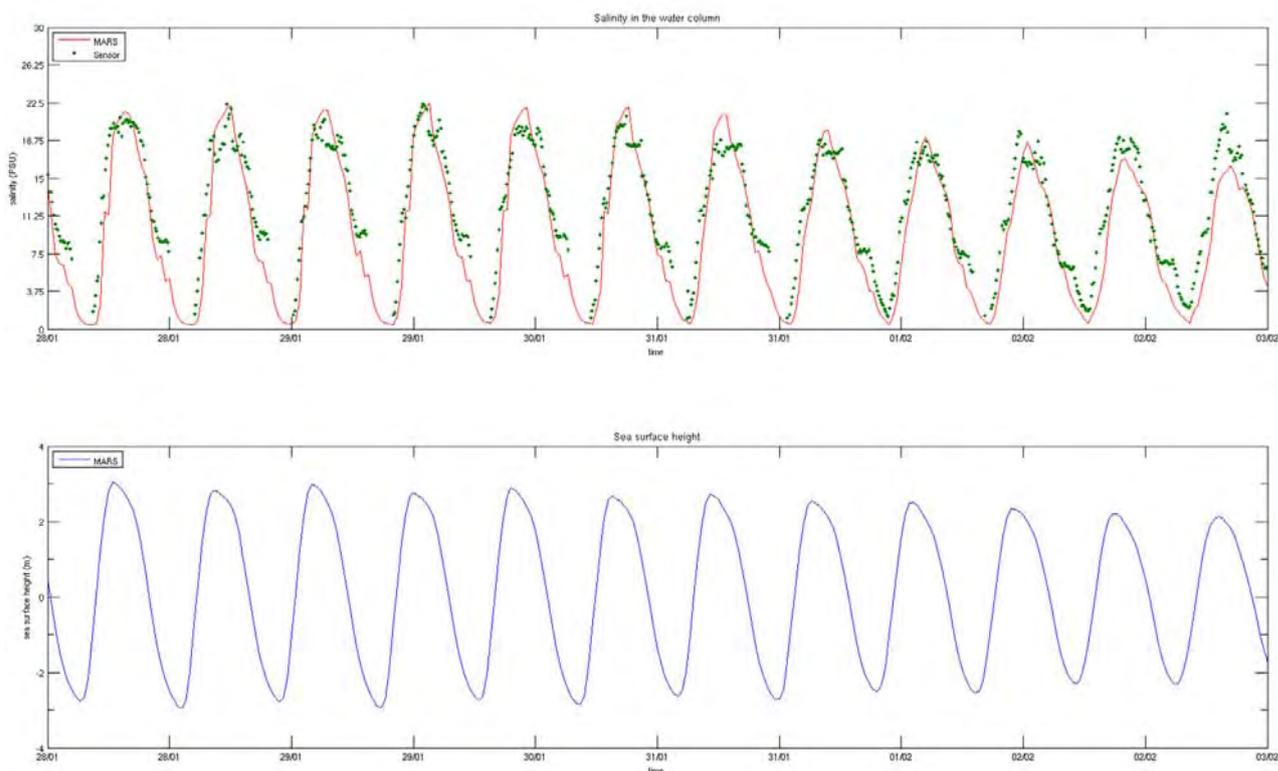


Figure 104 : En haut : comparaison de la valeur de salinité issue du modèle à l'altitude du capteur (en rouge) et des données de salinité issues de la bouée MAREL-Honfleur (en points verts). En bas : niveau de marée à Honfleur.

Les figures 105 et 106 présentent des cartographies de salinité (au fond et en surface) à l'embouchure de la Seine pour deux journées de 2005 bien distinctes sur le plan hydrodynamique. Le 19 février est en effet en période de mortes-eaux (coefficient 35) mais présente un débit soutenu de la Seine (840 m³.s⁻¹), alors que le 28 février se situe en vive eau (coefficient de marée 85), avec un débit moyen de la Seine (485 m³.s⁻¹).

Ces figures permettent d'avoir une vision spatialisée des champs de salinité et donc des gradients horizontaux, qui existent. La différence de salinité entre fond et surface en morte eau est spectaculaire, 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, et isole le chenal entre les digues des fosses Nord et Sud. .

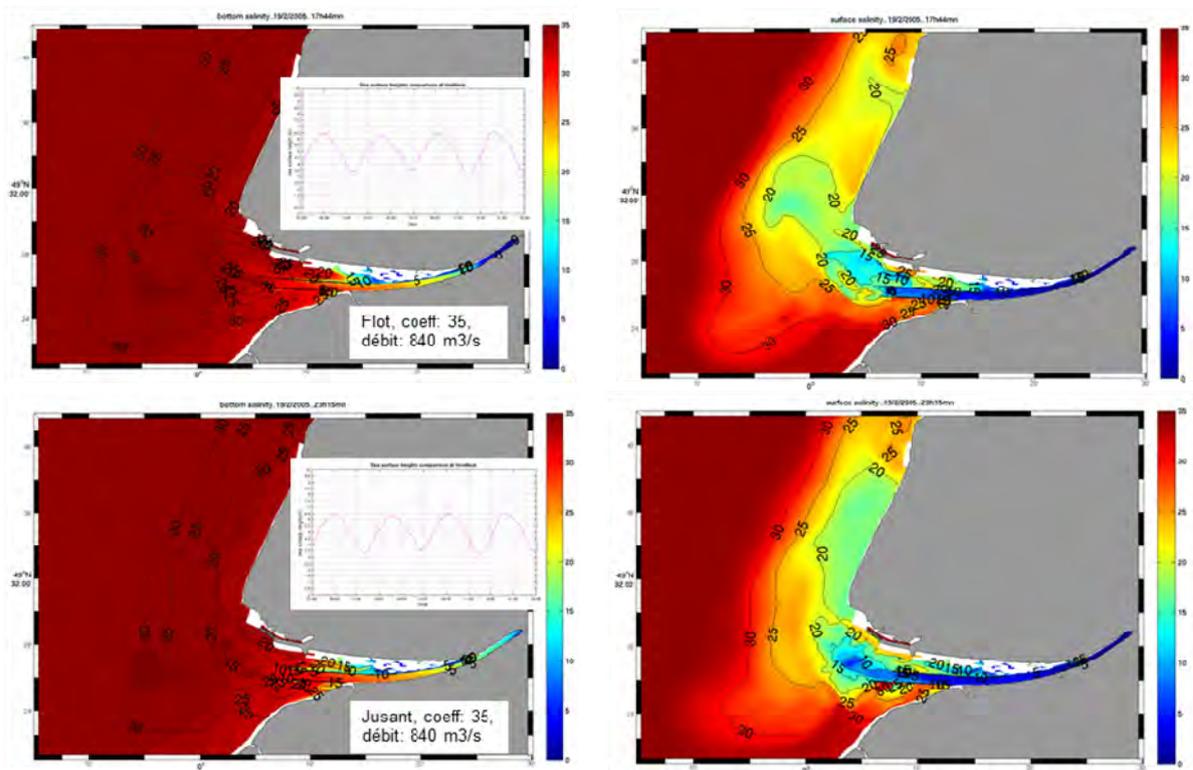


Figure 105 : Cartographies de salinité issues du modèle le 19 février 2005 (coefficient de marée 35) : lors du flot au fond (en haut à gauche) et en surface (en haut à droite), lors du jusant au fond (en bas à gauche) et en surface (en bas à droite).

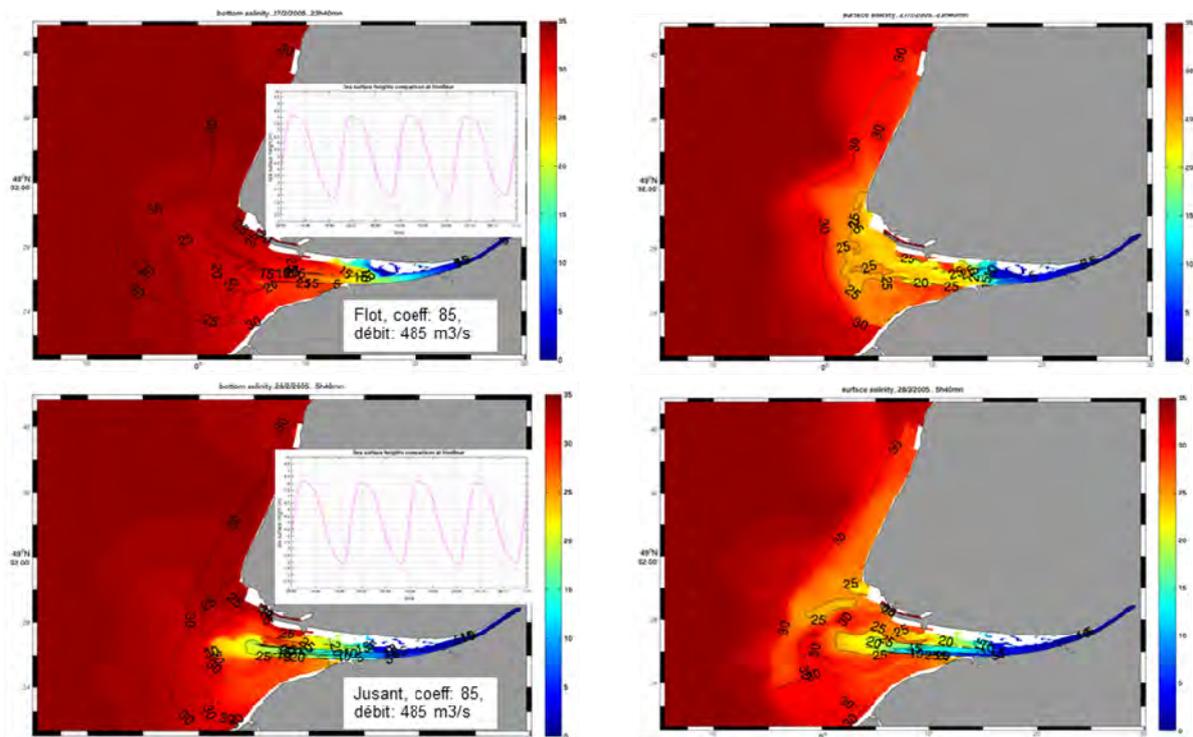


Figure 106 : Cartographies de salinité issues du modèle le 28 février 2005 (coefficient de 85) : lors du flot au fond (en haut à gauche) et en surface (en haut à droite), lors du jusant au fond (en bas à gauche) et en surface (en bas à droite).

Comparaison des salinités de surface simulées avec les turbidités issues des images satellite MODIS

Une démarche alternative et complémentaire de validation hydrologique du modèle consiste à comparer les panaches de température simulés en baie de Seine à ceux que l'on obtient par imagerie satellite SST (Sea Surface Temperature). Cependant les images de température que nous avons à disposition n'avaient pas une résolution suffisante à l'embouchure, et une comparaison qualitative des structures de surface simulées et des structures turbides issues des images MODIS a été explorée à titre provisoire, tant que le modèle de transport sédimentaire n'était pas opérationnel. Les figures 107 à 109 ci-après en donnent une illustration, qui reste très qualitative.

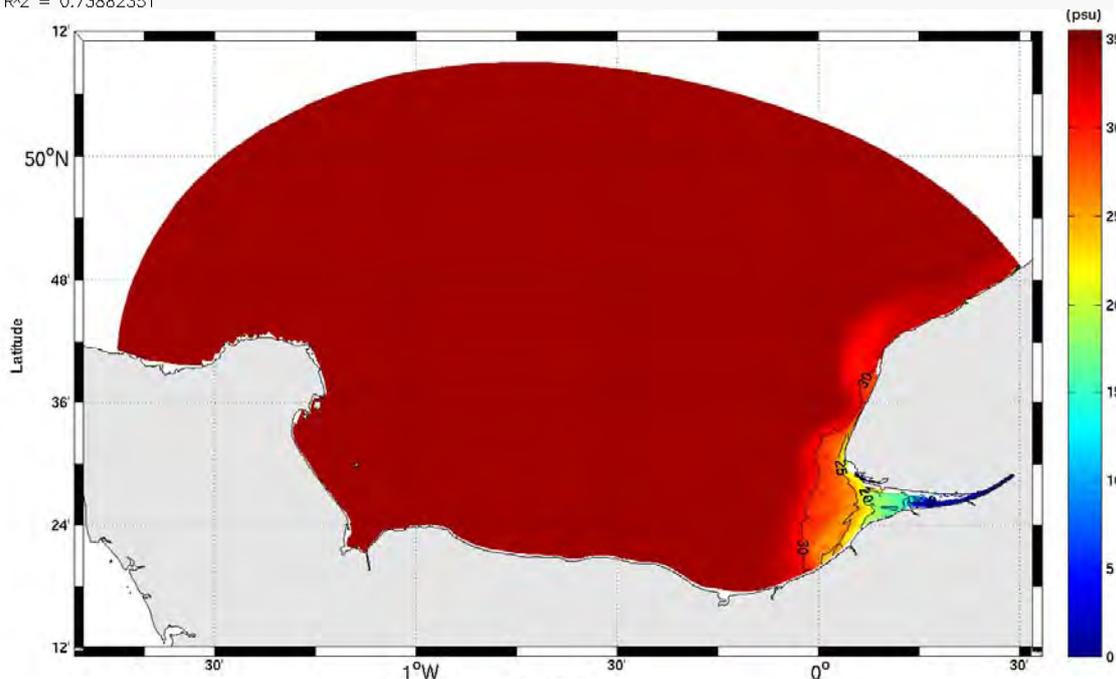
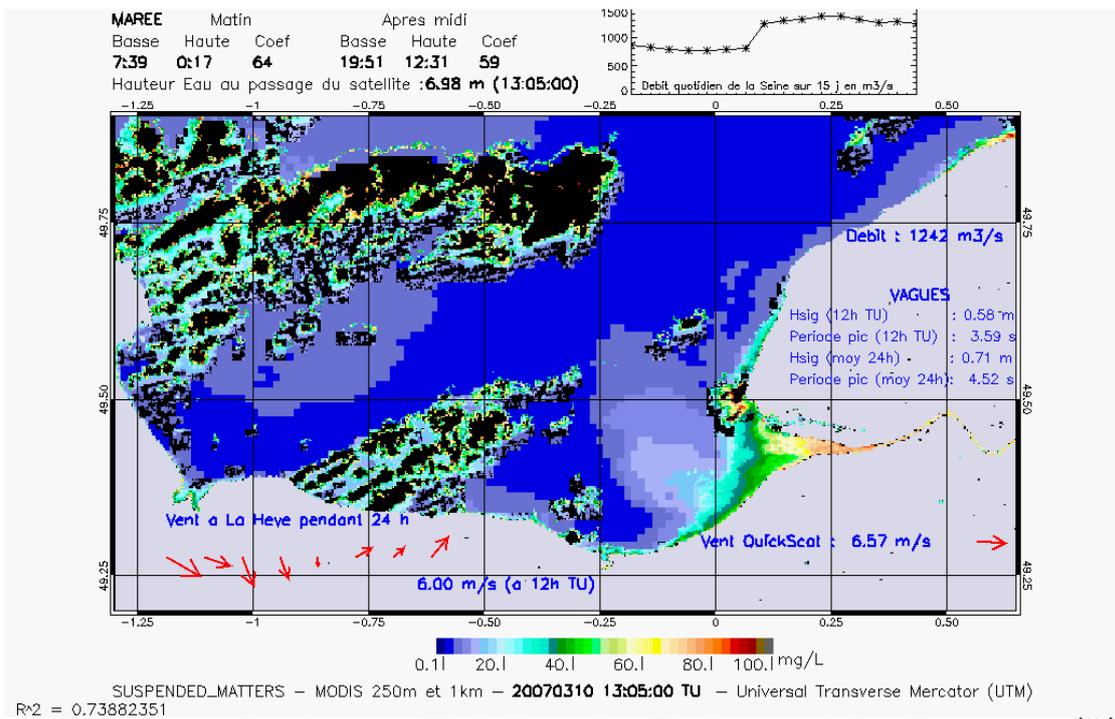


Figure 107 : Comparaison du panache turbide de surface de la Seine au panache halin de surface simulé au même instant.

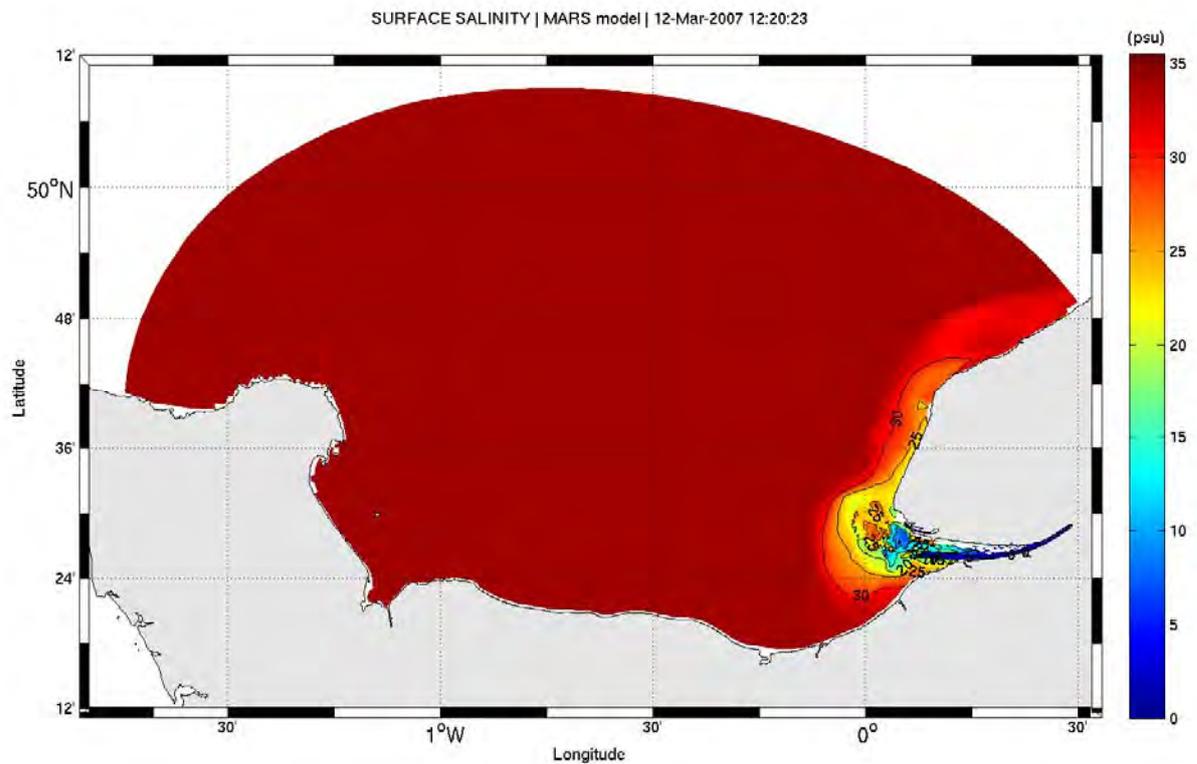
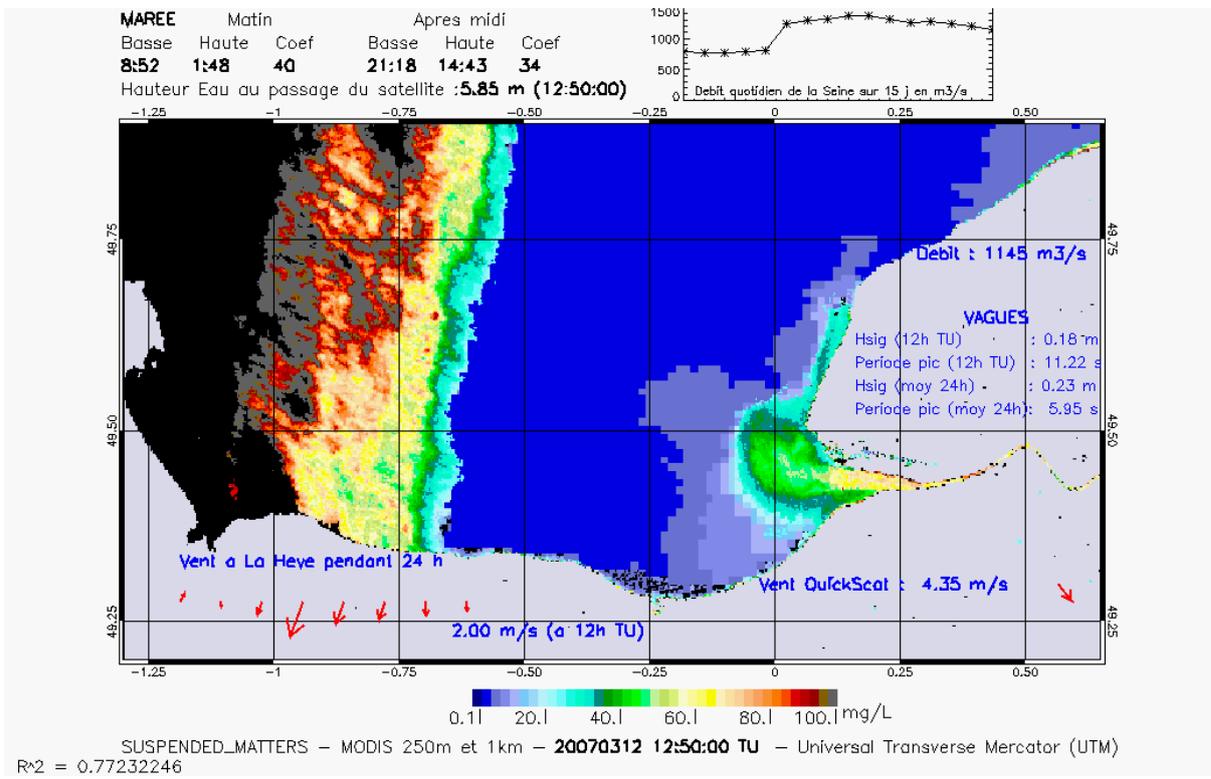
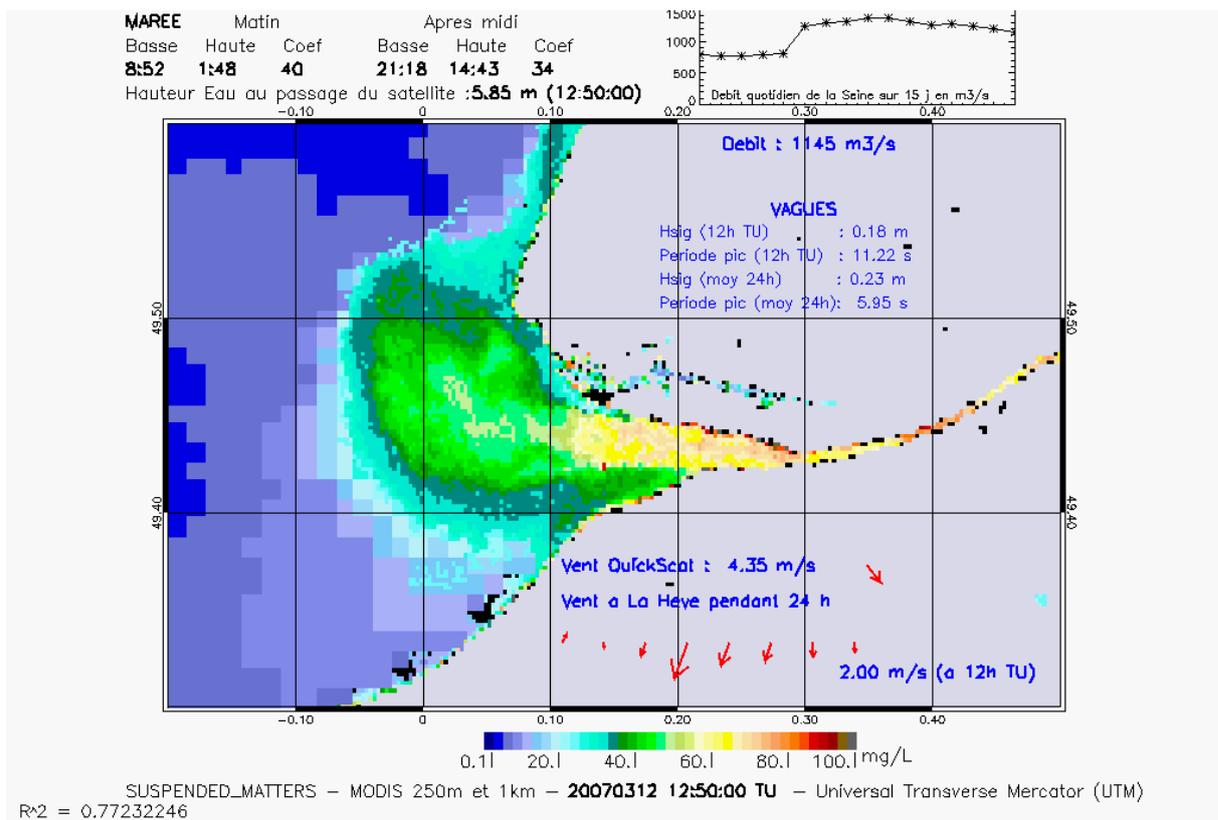


Figure 108 : Comparaison du panache turbide de surface de la Seine au panache halin de surface simulé au même instant.



SURFACE SALINITY | MARS model | 12-Mar-2007 12:20:23

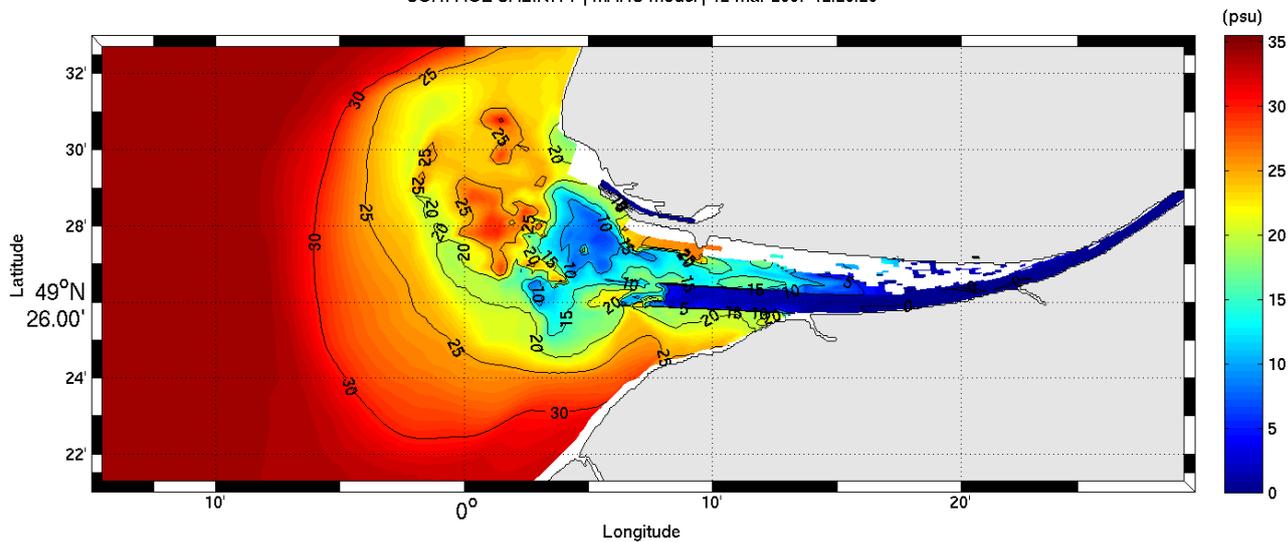


Figure 109 : Comparaison du panache turbide de surface de la Seine au panache halin de surface simulé au même instant.

7.8 Modélisation des vagues

Compte tenu de l'importance des vagues dans la dynamique sédimentaire dès qu'on sort de l'estuaire (cf. conclusions du rapport du projet Seine-Aval COLMATAGE), et afin d'obtenir

des remises en suspension des sédiments réalistes, le modèle de calcul de vagues WaveWatchIII a été implanté sur la baie de Seine.

WAVEWATCH III est un modèle de vagues de 3ème génération développé par NOAA/NCEP/NWS (Tolman, 2002) dans l'esprit du modèle WAM (WAMDI Group, 1988; Komen, 1994). Il est issu du modèle WAVEWATCH I, développé à Delft University of Technology (Tolman, 1991), et du modèle WAVEWATCH II, développé à la NASA, au Goddard Space Flight Center (Tolman, 1992). Il a été appliqué avec succès, à l'échelle globale et régionale, en différents endroits du monde (Tolman, 2002; Chu et al., 2004; Tessier, 2006; Ardhuin, 2007; Dufois, 2008; Dufois et al., 2008).

Le code calcule l'évolution de l'état de la mer en le décomposant en un spectre d'ondes se propageant dans différentes directions et avec différentes périodes T.

Il peut être utilisé avec 3 types de maillages : cartésien, curviligne orthogonal et triangulaire non-structuré.

Ce dernier type de grille, basé sur un assemblage de triangles, permet plus de flexibilité pour décrire des géométries complexes (développements F. Ardhuin et A. Roland, comm. pers.). C'est ce type de maillage non-structuré qui a été utilisé ici. Les quadrilatères du maillage curviligne de la baie de Seine ont été coupés en deux triangles (Fig. 110 et 111).



Figure 110 : Maillage non structuré de la Baie de Seine utilisé par WaveWatchIII.

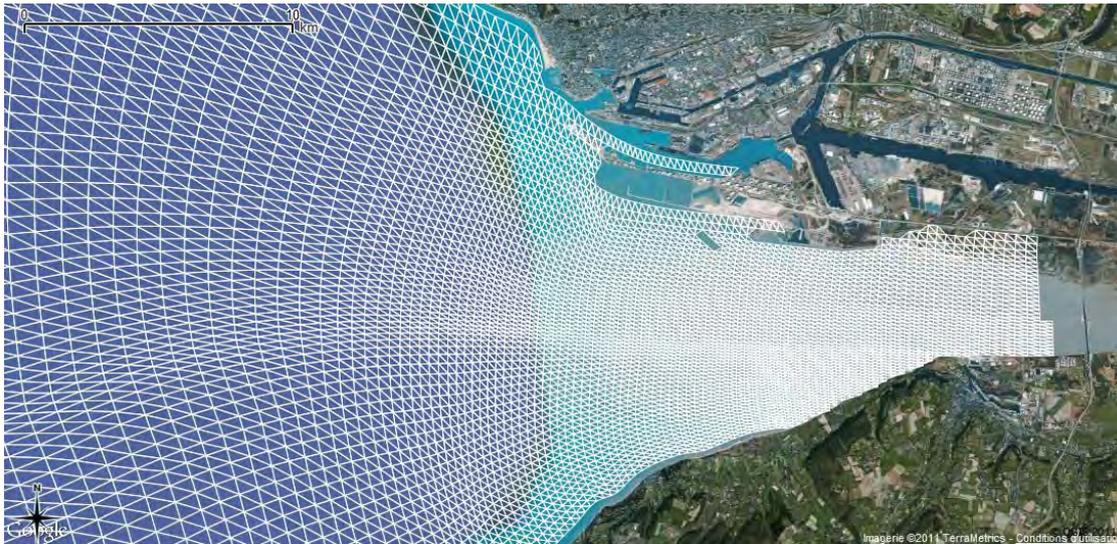


Figure 111: Maillage non structuré de la Baie de Seine utilisé par WaveWatchIII. Zoom sur l'embouchure de la Seine.

La simulation des vagues en baie de Seine nécessite un emboîtement de modèles assez complexe : un modèle de l'Atlantique Nord-Est forcé par un modèle mondial fournit des conditions aux limites à un modèle de la Manche dont on extrait des spectres directionnels de vagues le long de la frontière curviligne de la baie de Seine. Tous ces modèles sont naturellement eux-mêmes forcés par des modèles météorologiques d'emprises compatibles.

Les simulations WaveWatch III de la baie de Seine peuvent être réalisées sur la période souhaitée, sous réserve de disponibilité des conditions limites (les 10 années récentes ont été simulées...). Des contraintes sur le fond dues aux vagues en sont alors extraites afin de forcer le modèle sédimentaire.

Une nouvelle version du modèle MARS 3D est en cours de validation pour intégrer l'effet des contraintes de radiation sur les circulations. Son utilisation pour l'embouchure de la Seine est prévue, mais l'application n'a pas encore été faite.

7.9 Evaluation des apports amont

Les apports solides de la Seine amont sont pris en compte dans le modèle à l'aide d'une estimation des concentrations et de la mesure du débit de la Seine à Poses, telle que fournie par le GIPSA. Les concentrations peuvent être issues de mesures spécifiques ou d'une relation paramétrique entre concentration et débit (cf § 2.1). Jusqu'à présent, une relation différente entre débits faibles ou moyens ou débits de crue était adoptée, mais l'hystérésis de montée/descente de crue n'était pas pris en compte (§ 2.1 ; Avoine, 1986 ; Guezennec, 1999). Une nouvelle méthode est proposée ici pour prendre en compte cet effet d'hystérésis, en différenciant les montées et descentes de crue.

Tout d'abord le débit est filtré sur une durée de n_f jours, pour en supprimer les variations 'haute fréquence'. Puis, lorsque le débit Q dépasse un seuil donné Q_{dc} (débit de début de crue), une phase de montée de crue est définie, jusqu'au pic de crue (Q maximum) repéré dans la période qui suit (limitée à n_c jours). Pendant cette phase, la relation $MES(mg/l) = 10^{-3} * Q^{1.66}$ est retenue, tandis que pendant les autres phases c'est la loi $MES(mg/l) = 0.0344 * Q + 7.797$ qui est conservée.

Ainsi le modèle proposé comporte 3 paramètres, n_f , Q_{dc} et n_c , en plus des deux relations concentration/débit qui pourraient aussi évoluer.

La méthode a été confrontée aux mesures journalières de MES sur les années 2001-2003 (données SNS). Les résultats sont exprimés en terme de coefficient de corrélation au carré (r^2) et d'erreur quadratique (erms).

Avec l'ancienne méthode (lois différentes selon que le débit est inférieur ou supérieur à 800 m^3/s): $r^2=0.41$ et $erms=0.062$ g/l

Selon la nouvelle méthode, pour $Q_{dc} = 900$ m^3/s , $n_f = 10$ jours, $n_c = 30$ jours :

$r^2=0.69$ et $erms=0.022$ g/l

L'ancienne méthode est peu sensible au seuil de débit choisi (700, 800, 900, 1000 m^3/s), cela modifie peu r^2 et erms. Par contre, la nouvelle méthode est relativement sensible :

- au filtrage : $r^2 \sim 0.69$ pour un filtre de 10-25 jours et $r^2 \sim 0.5$ pour un filtre de 5 ou 30 jours ;
- au seuil de crue : $r^2 \sim 0.69$ pour $Q_{dc} = 900$ m^3/s et $r^2 \sim 0.5$ pour $Q_{dc} = [700, 800, 1000]$ m^3/s ;
- à la durée sur laquelle le pic de crue est recherché, $r^2 > 0.6$ pour $n_c > 30$ jours et $r^2 < 0.5$ pour $n_c < 25$ jours.

Ces résultats sont illustrés par les figures 112 (a et b) et 113.

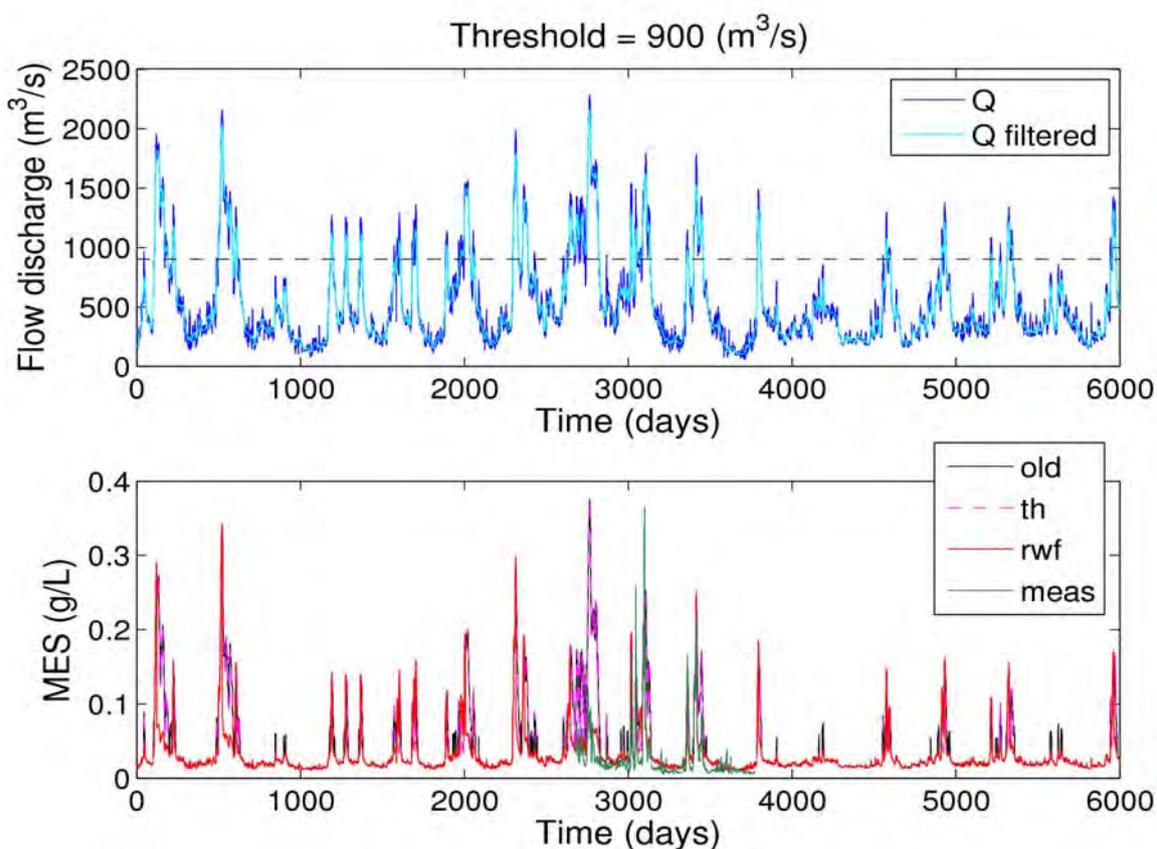


Figure 112a : (en haut) Débit de la Seine (Q) mesuré entre le 01/09/1993 et le 16/02/2011, et filtré (Q filtered) avec une fenêtre glissante de 10 jours. (en bas) MES estimées à partir du débit suivant les méthodes décrites dans le § 7.9 : ancienne méthode avec seuil à $Q=700$ m^3/s (old) et $Q=900$ m^3/s (th), nouvelle méthode avec prise en compte de l'hystérésis montée/descente de crue (rwf : rising/waning flood), et MES mesurées à Poses (meas) (donnés SNS).

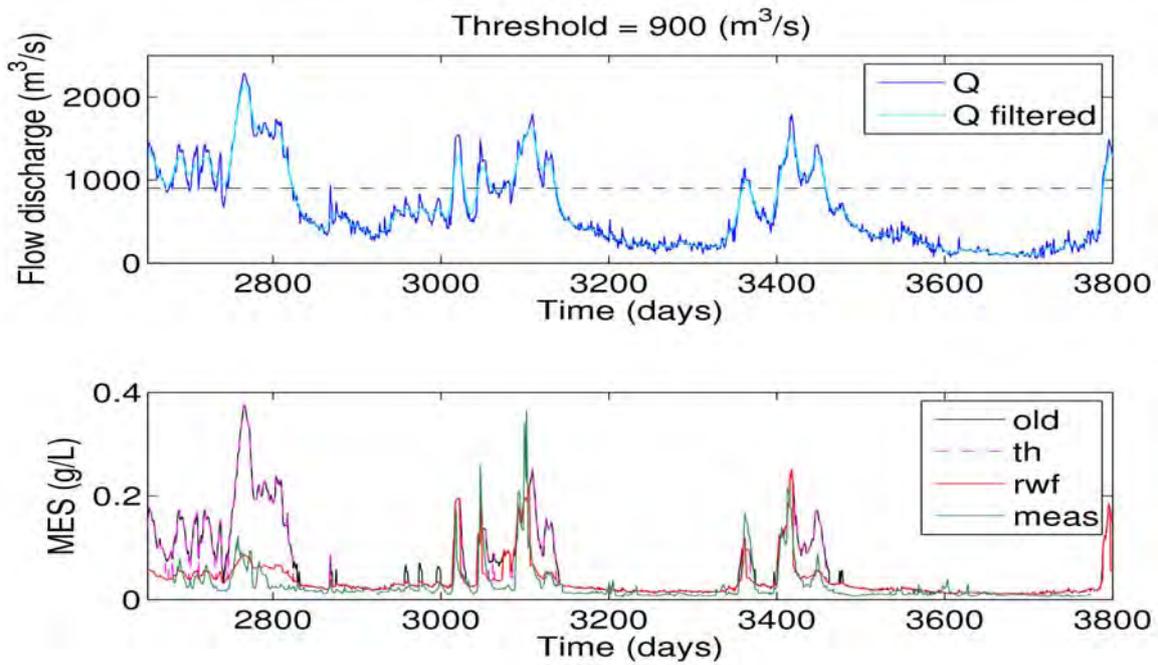


Figure 112 b : même légende que la Figure 112a : zoom sur la période du 01/01/2001 au 31/12/2003.

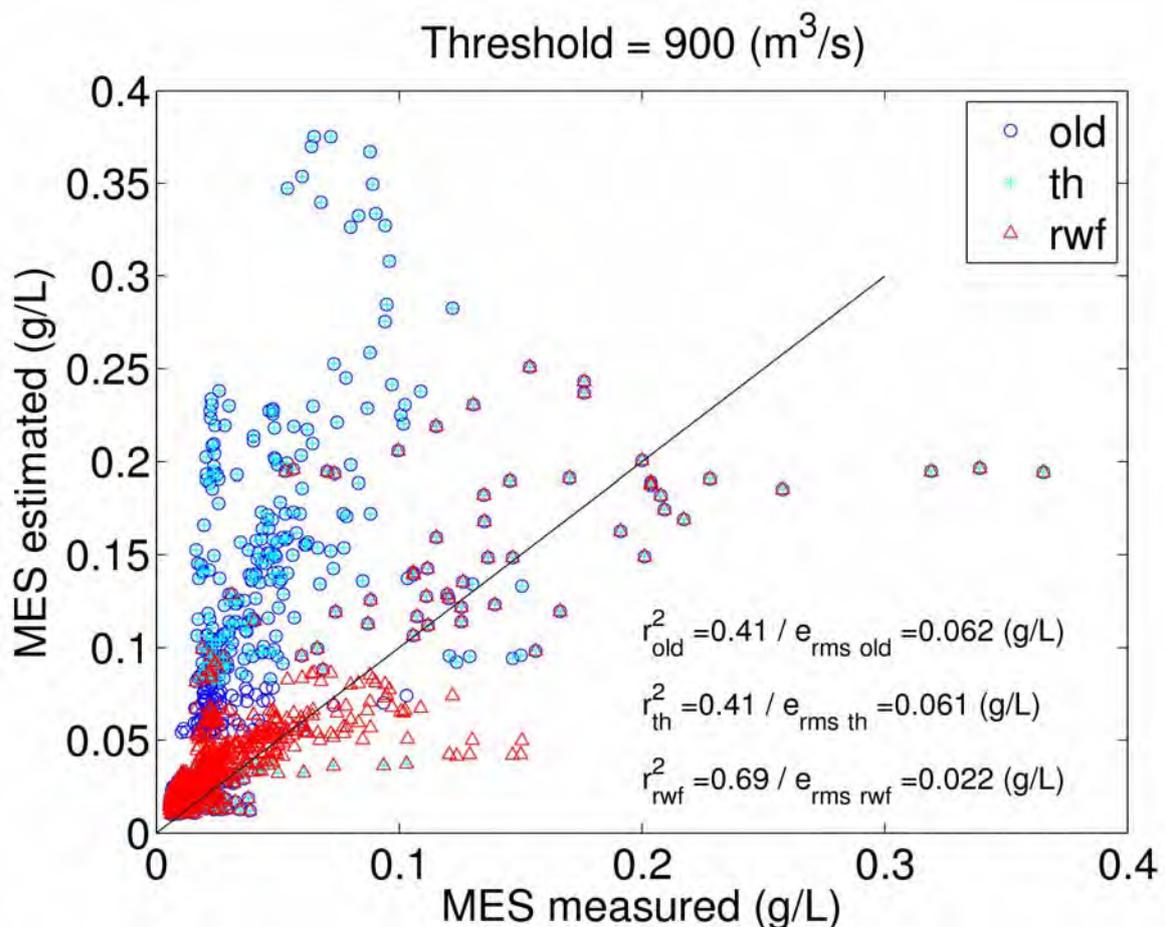


Figure 113 : Comparaison des MES estimées par les différentes méthodes présentées dans le § 7.9 avec les MES mesurées à Poses entre le 01/01/2001 et le 31/12/2003. r^2 et e_{rms} sont le coefficient de corrélation au carré et l'erreur quadratique, respectivement ; la ligne diagonale représente la ligne d'égalité.

La nouvelle méthode permet de bien différencier les phases de montée/descente de crue et améliore significativement les estimations de MES ($r^2=0.69$ / $erms=0.022$ g/L). Cependant les tests ont été effectués sur trois années de mesure (2001-2003), validant ainsi trois grandes crues hivernales et il est possible que r^2 et $erms$ soient moins bons sur une période plus longue. La nouvelle méthode est sensible au filtrage, au seuil de crue et à la durée sur laquelle le pic de crue est recherché. Malgré cela, on conserve $r^2>0.5$ et $erms>0.030$ g/L, ce qui reste bien supérieur aux estimations de l'ancienne méthode ($r^2=0.41$ et $erms=0.062$ g/L). L'exercice pourra être poursuivi en réajustant éventuellement les relations concentration/débit pour les phases de montée et descente de crue (pour le présent test, ce sont les relations d'Avoine (1986) qui ont été utilisées).

7.10 Modélisation sédimentaire

Le modèle hydrosédimentaire vient d'être implanté dans l'estuaire et la baie de la Seine. La formulation générale et le module sédimentaire sont décrits dans Le Hir et al. (2011). Il s'agit d'un nouveau modèle qui permet de prendre en compte simultanément plusieurs classes de sable et plusieurs classes de vases. Son utilisation dans l'embouchure de la Seine est en particulier justifiée par la diversité des classes de sable, puisque si le sable fin de 200 μm est réputé dominant dans le secteur, les analyses granulométriques récentes ont montré que la gamme était assez étendue. En particulier, il semble que le sable dragué dans le chenal à proximité du pont de Normandie soit du sable très fin (100-120 μm) dont la mobilité est différente de celle d'un sable de 200 μm .

Préparation de l'application du modèle sédimentaire multiclasse en Seine

En vue d'une future utilisation du code multiclasse, un travail préparatoire a été réalisé pour la sélection des classes granulométriques à retenir. Ce travail réalisé par le GIPSA (J.P. Lemoine) en collaboration avec l'équipe 1 de MODEL s'appuie sur les analyses granulométriques effectuées dans le cadre du projet COLMATAGE (Lesourd, 2011). La figure 114 présente le spectre granulométrique d'ensemble des échantillons COLMATAGE réalisés dans le secteur d'embouchure de la Seine

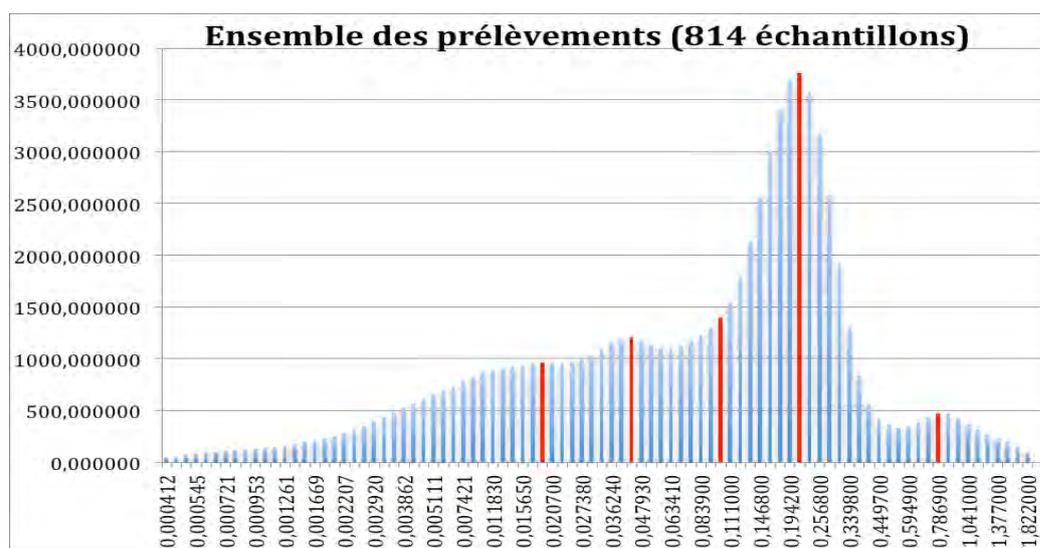
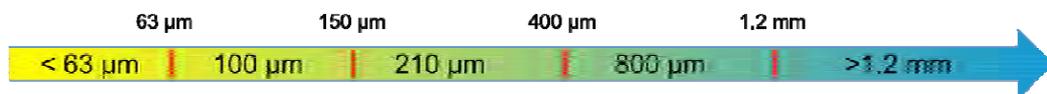


Figure 114 : Somme de l'ensemble des spectres granulométriques associés aux prélèvements sédimentaires effectués dans le projet COLMATAGE ; en rouge les coupures retenues dans le modèle.

L'analyse de l'ensemble des spectres granulométriques montre clairement 4 modes principaux du sédiment, à 800, 210, 43 et 18 μm . Cependant les analyses granulométriques effectuées par le Grand Port Maritime de Rouen sur les sédiments dragués à l'embouchure montre un mode à 100 μm que nous retrouvons également sur les prélèvements COLMATAGE effectués au niveau de ces zones draguées ("la brèche" et "l'engainement"). Le mode à 18 μm n'étant pas clairement marqué nous avons retenu une discrétisation du sédiment à 5 classes, respectivement centrées sur 800, 210, 100, et 43 μm . Cette dernière classe représente en fait les « vases », et le choix de la taille représentative des grains n'a que peu d'incidence sur le comportement de cette classe. Le schéma ci-dessous illustre le positionnement des classes de sédiments modélisés dans la continuité effective des sédiments réels :



Initialisation du sédiment en 5 classes de taille

Après avoir discrétisé les spectres granulométriques, la proportion de chacune des classes de sédiments dans l'ensemble des mailles du modèle a été déterminée. Ce travail s'est effectué en 3 temps : (1) tout d'abord l'ensemble des prélèvements a été replacé sur la carte de couverture sédimentaire établie par S. Lesourd afin de pouvoir déterminer à quel faciès appartient chaque prélèvement. Puis (2) les spectres ont été analysés en fonction du faciès sur lequel ils ont été prélevés, ceci afin de déterminer la proportion de chacune des classes en fonction du faciès. Enfin (3) ces proportions ont été affectées à chacune des mailles du modèle, en considérant le faciès majoritaire au sein de chaque maille. La figure 116 représente le spectre associé à l'ensemble des prélèvements ayant été classés en vases, vases sableuses, sables moyens, sables grossiers ainsi que les proportions de chacune des classes sédimentaires au sein de ces faciès pour les 2 options de discrétisations retenues.

Définition de la concentration du sédiment associée à chaque type de faciès

Une fois définie la composition granulométrique discrétisée du sédiment, il faut encore préciser la concentration sèche du sédiment à l'initialisation du modèle.

Un examen des données d'une campagne COLMATAGE (IFREMER /GIPSA) en 2010 permet de suggérer une relation entre la fraction de vase dans le sédiment et sa concentration sèche :

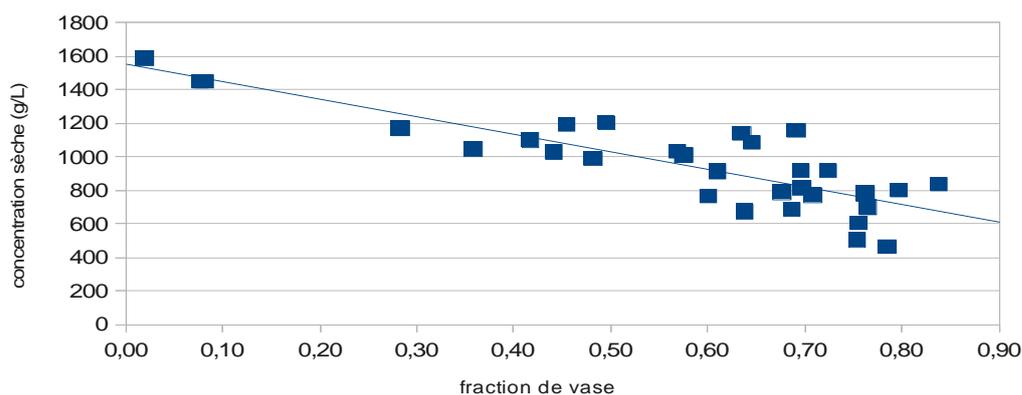


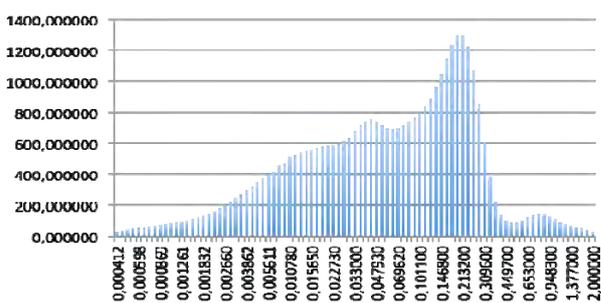
Figure 115 : Concentration sèche du sédiment en g/l en fonction de sa fraction de vase. Données issues de prélèvements réalisés à l'embouchure de la Seine (COLMATAGE 2010)

Cette corrélation nous permet proposer une concentration sèche pour chaque type de faciès du sédiment initial, connaissant la fraction de vases dans chaque type de faciès. Les résultats sont portés dans le tableau ci-après.

Enfin, le faciès majoritaire dans chacune des mailles étant déterminé, il devient possible de renseigner la concentration sèche pour chaque maille du modèle.

Remarque : ce travail sera à mettre à jour dès la sortie de la carte sédimentaire de 2010 (Projet COLMATAGE, 2012), et la démarche devra être étendue à la baie de Seine en s'appuyant sur la carte de Larssonneur et sur d'autres prélèvements sédimentaires.

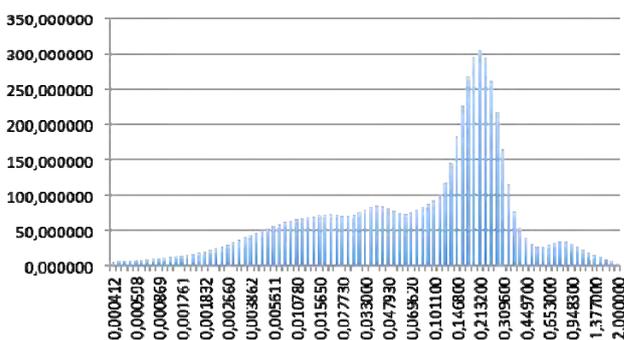
vases



fines	0,479180
sables fins	0,221366
sables moyens	0,253617738
sables grossiers	0,039427705
graviers	0,006409282

fines 1	0,260282884
fines 2	0,218896591
sables fins	0,221365699
sables moyens	0,253617738
sables grossiers	0,039427705
graviers	0,006409282

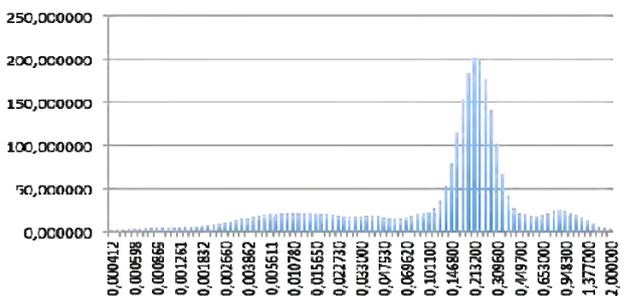
vases sableuses



fines	0,378819
sables fins	0,173472
sables moyens	0,371614603
sables grossiers	0,068318741
graviers	0,007775247

fines 1	0,223323357
fines 2	0,155495631
sables fins	0,173472422
sables moyens	0,371614603
sables grossiers	0,068318741
graviers	0,007775247

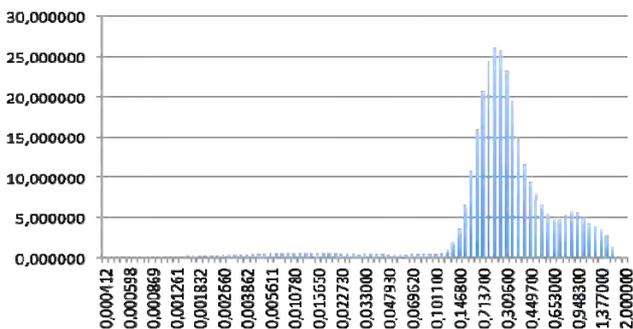
sables moyens



fines	0,241614
sables fins	0,116236
sables moyens	0,525912789
sables grossiers	0,103357287
graviers	0,012880162

fines 1	0,164427347
fines 2	0,077191546
sables fins	0,116235869
sables moyens	0,525912789
sables grossiers	0,103357287
graviers	0,012880162

sables grossiers



fines	0,049576
sables fins	0,030407
sables moyens	0,628495396
sables grossiers	0,266336621
graviers	0,025184759

fines 1	0,034728471
fines 2	0,014847906
sables fins	0,030406848
sables moyens	0,628495396
sables grossiers	0,266336621
graviers	0,025184759

Figure 116 : Sommes des spectres granulométriques des prélèvements appartenant au même faciès, et proportion de chacune des classes retenues dans le modèle

Faciès (typologie de Lesourd)	Concentration sèche en g/l
vases	1050
vases sableuses	1150
sables vaseux	1200
sables fins	1350
sables moyens	1310
sables grossiers	1730
graviers	1000
galets-coquilles	950
substrat dur	2600

Concentration sèche du sédiment initial, associée à chacun des faciès de la typologie de Lesourd.

Premier test du modèle hydrosédimentaire avec une seule classe de sédiment (vases pures)

Dans un premier temps, le modèle multiclasse a été appliqué dans une configuration volontairement simplifiée, de façon à évaluer la capacité du nouveau modèle à reconstituer le bouchon vaseux. Une seule classe de vase est considérée, et un premier paramétrage approximatif, déterminé sur la base de notre expertise, a été adopté. La vitesse de chute est constante égale à 0.5 mm/s, la contrainte critique d'érosion est 0.4 Pa. Le processus de consolidation n'est pas explicitement pris en compte, et de ce fait, le principe d'une contrainte critique de dépôt, choisie à 1 Pa, a été retenu.

Une période de 3 mois et demi a été simulée, et les résultats présentés ci-après correspondent à la marée du 18 avril 2007, de coefficient 112, intervenant après une petite crue au début de la simulation. Un mois et demi s'est écoulé depuis l'initialisation du modèle. La condition initiale, constituée d'un stock de crème de vase dans le chenal entre Tancarville et Caudebec, a très rapidement été balayée par la crue au début de la simulation, de telle sorte que les distributions de MES qui sont montrées révèlent la reconstitution par le modèle d'un bouchon vaseux, bien marqué, dont le positionnement pour un débit moyen n'est pas irréaliste. Les concentrations obtenues semblent aussi dans le bon ordre de grandeur. On observe aussi une forte stratification des MES à pleine mer ou même en jusant, et au contraire un meilleur mélange vertical en flot.

Il ne s'agit là que d'un premier essai, et de nombreux tests de robustesse des résultats restent à réaliser (est-ce qu'un piégeage de particules fines sur les rives ou vers le large se produit, au prix d'une réduction progressive du bouchon vaseux ?), et naturellement la validation des simulations sur la base des observations décrites dans le présent rapport doit être menée.

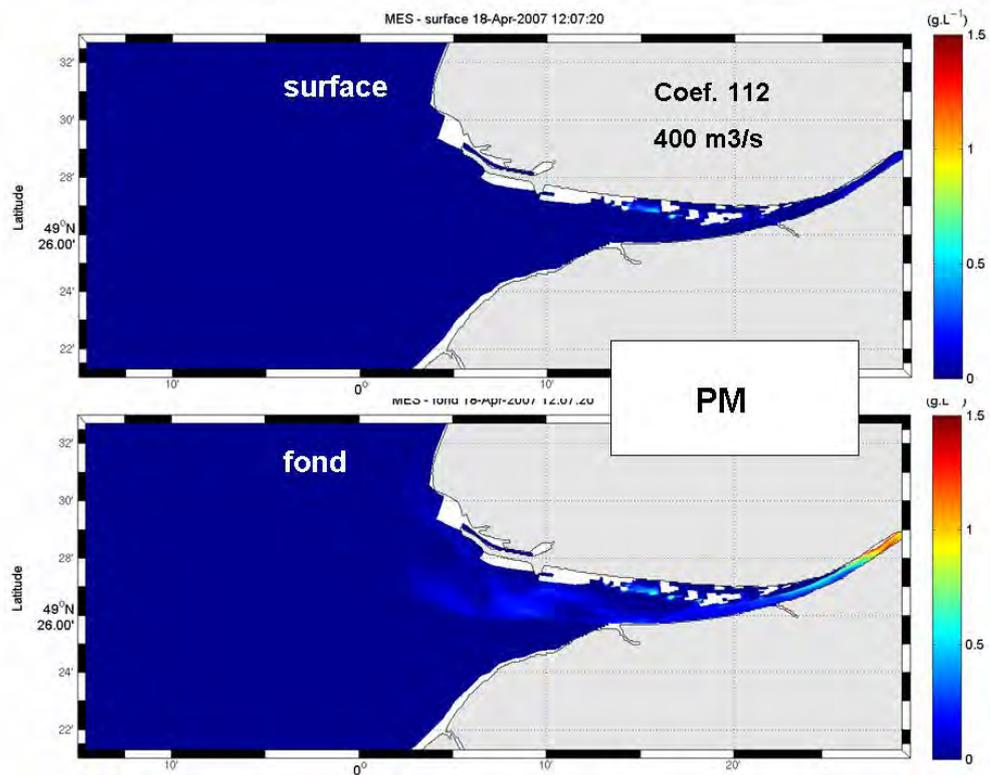


Figure 117 : Résultat du modèle hydrosédimentaire MARS-SIAM3D de l'estuaire de la Seine : concentration en MES à pleine mer de vive eau - débit moyen de la Seine

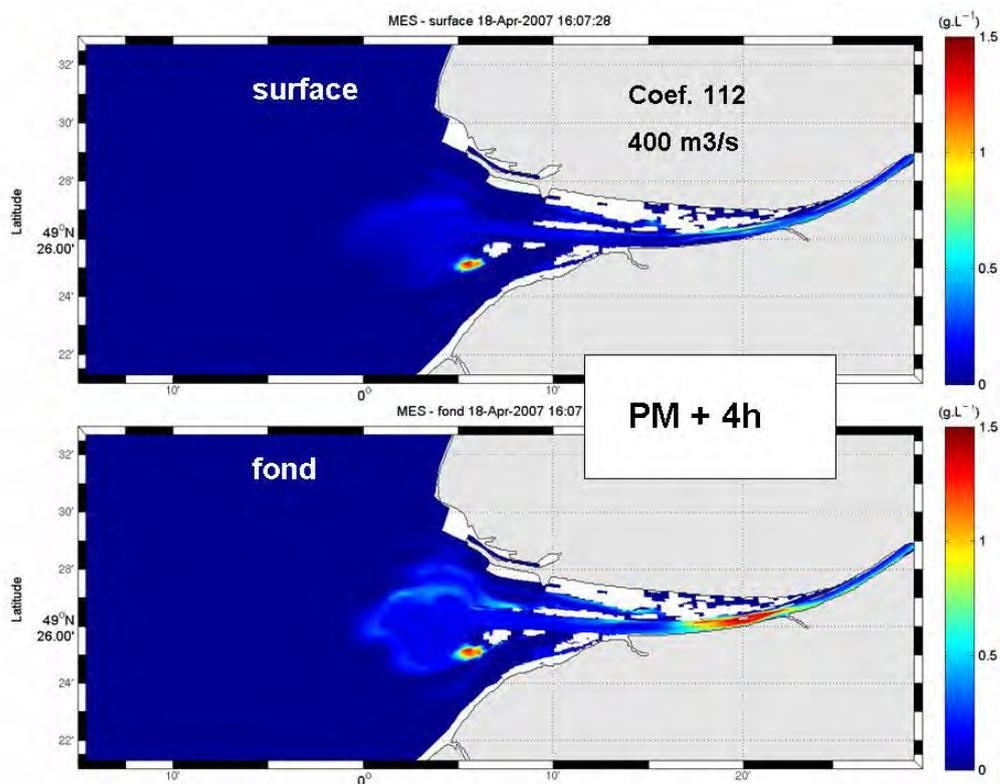


Figure 118 : Résultat du modèle hydrosédimentaire MARS-SIAM3D de l'estuaire de la Seine : concentration en MES, 4 h après pleine mer de vive eau (jusant) - débit moyen de la Seine

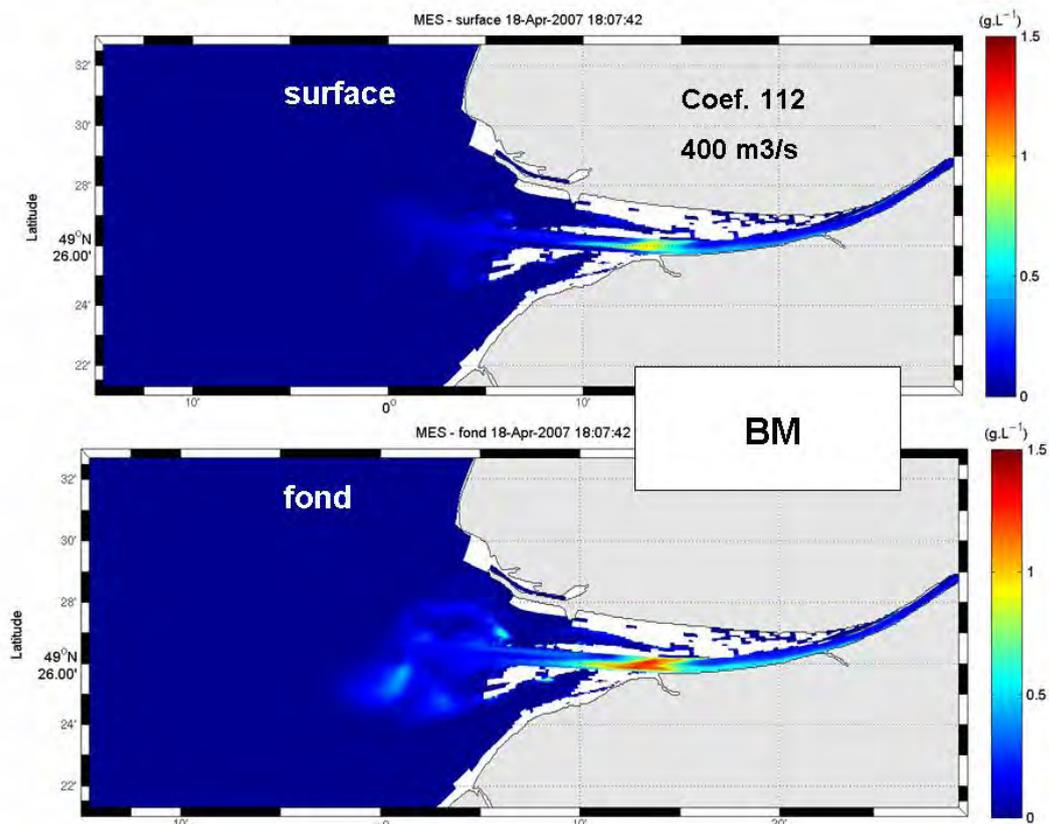


Figure 119 : Résultat du modèle hydrosédimentaire MARS-SIAM3D de l'estuaire de la Seine : concentration en MES à basse mer de vive eau - débit moyen de la Seine

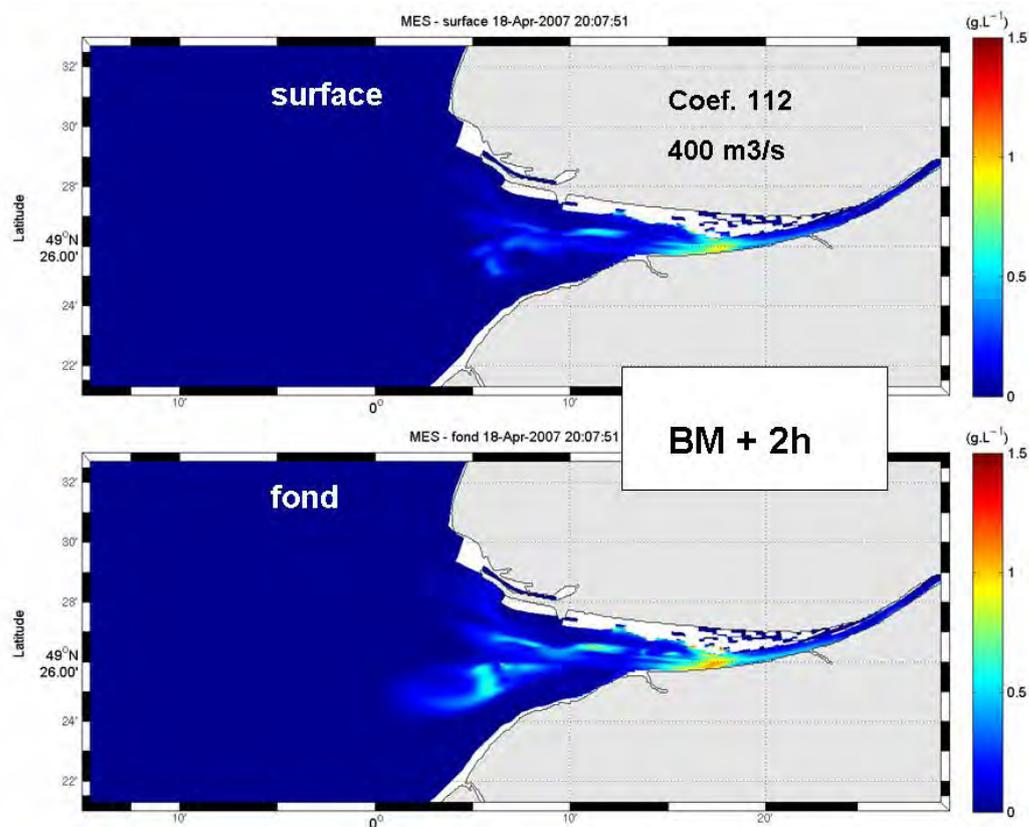


Figure 120 : Résultat du modèle hydrosédimentaire MARS-SIAM3D de l'estuaire de la Seine : concentration en MES 2 h après basse mer de vive eau (flot) - débit moyen de la Seine

Etude de la tendance au charriage

Compte tenu de l'importance des faciès de sable fin à l'embouchure de la Seine, il nous a paru pertinent d'y évaluer les tendances au transport de sable. Il est rappelé que de nombreuses formulations des transports de sable à l'équilibre ont été proposées dans la littérature, et même si les différences entre les différentes formules sont grandes (un facteur 2 à 3 !), elles expriment toutes une variation très non linéaire en fonction du courant : typiquement, le transport de sable varie comme la puissance 5 du courant. Il en résulte que dans un environnement macrotidal, la tendance au transport résiduel de sable dépend beaucoup plus de l'asymétrie du courant et de la dominance flot/jusant que du courant résiduel de marée. Ainsi, sur la figure 121 ont été cartographiées les tendances résiduelles au transport de sable sous la forme de moyenne au cours d'une marée de vive eau du courant de fond élevé à la puissance 5, comparé à la moyenne du courant de fond qui représente le courant résiduel. Dans les deux cas, la valeur est affectée du signe de la composante "longitudinale" (approximativement est-ouest, bien que le maillage soit curviligne), de façon à identifier les secteurs de flot dominant et ceux de jusant dominant.

On relève que le courant résiduel de fond est orienté dans le sens du jusant, en particulier entre les digues, ce qui résulte d'un effet recherché à travers la construction des digues submersibles. Cette distribution des courants résiduels en vive eau serait sans doute très différente en morte eau, les courants résiduels de densité générant un transport vers l'amont au fond. En ce qui concerne les sables, transportés au voisinage du fond et donc sensibles aux courants de fond, on observe que la tendance au transport est principalement orientée vers l'amont, en particulier dans le chenal nord et dans le chenal de navigation en amont de Honfleur, et que seul le secteur de l'engainement est de jusant dominant. En fait dans ce secteur de l'engainement ce sont plutôt des vases qui sont draguées dans le chenal, en raison de piégeages liés aux affaiblissements des vitesses lorsque les sections de l'embouchure s'accroissent notablement. Dans la suite, ce type de calcul sera poursuivi pour évaluer la robustesse des structures de circulations ainsi mises en évidence, et des seuils de mise en mouvement des sédiments pourront être introduits.

Le terme de *tendance au transport* est préféré puisque dans ces évaluations, la présence ou non de sable sur le fond est ignorée. Lorsque le modèle sera appliqué dans une version mixte sable/vase, les transports de sable seront alors confrontés aux tendances au transport préalablement calculées.

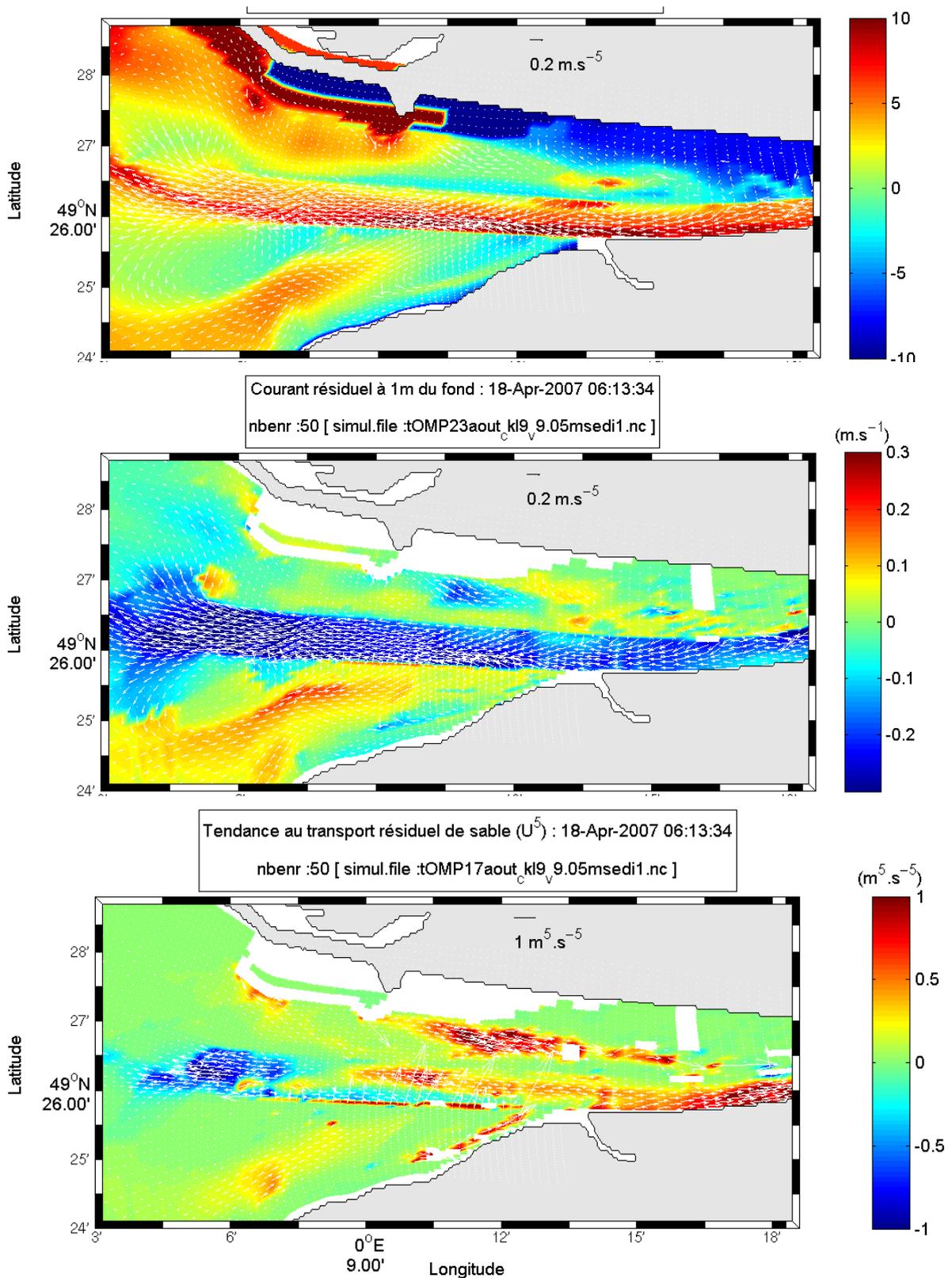


Figure 121: Simulation du courant résiduel et des tendances au transport de sable en vive eau après une petite crue. En haut: courant résiduel sur fond de bathymétrie (en m, référence zéro hydrographique). Au milieu: courant résiduel, avec fond de couleur représentant son intensité, et signe de la composante ouest-est. En bas : tendance au transport, en $m^5.s^{-5}$, avec fond de couleur représentant son intensité comptée positivement lorsqu'elle est vers l'est, négativement sinon.

8- Synthèse et perspectives

Rappel des objectifs

Compte tenu du double enjeu de la modélisation hydrosédimentaire de l'estuaire de la Seine, à savoir l'évolution morphologique du système en fonction de scénarios d'évolution des forçages climatiques ou anthropiques, et la mise en place d'une « modélisation d'habitat » qui soit à même de fournir une prédiction de l'évolution des habitats benthiques et pélagiques de l'estuaire et de la baie de Seine orientale, en commençant par la nature des fonds sédimentaires, il était nécessaire de faire évoluer le modèle hydrosédimentaire mis en place dans Seine-Aval III, et de le valider sur la base d'observations nouvelles, postérieures à la construction de Port 2000.

Concernant la modélisation morphosédimentaire, il a été jugé nécessaire :

- d'accroître la résolution du modèle, en particulier dans l'estuaire amont en respectant les méandres,
- de l'étendre à l'ensemble de la baie de Seine, par exemple pour rendre possible l'évaluation de l'impact d'un rejet de dragage au large, ou encore pour évaluer les incidences sur le littoral du Calvados,
- de prendre en compte la diversité des classes granulométriques.

Le programme d'observations envisagé était focalisé sur une réactualisation des connaissances sur le bouchon vaseux, après modification du système lié à Port 2000, et une description des structures turbides dans le secteur des bancs d'embouchure, des ambiguïtés subsistant notamment dans les fosses de flot Nord et Sud. Enfin, si l'évolution long terme de la morphologie de l'embouchure est bien décrite grâce à la réactualisation bisannuelle de la bathymétrie par les GPM, les fluctuations saisonnières ou événementielles susceptibles de générer des flux sédimentaires importants ou des remaniements impactant le benthos étaient mal connues, et un programme de mesures altimétriques, commun au projet COLMATAGE de Seine-Aval IV, a été proposé.

Actions réalisées

Pour répondre à ces objectifs, la stratégie adoptée consistait à mettre en œuvre en parallèle une approche de modélisation mathématique et une double approche expérimentale, observations in situ d'une part, par imagerie satellite d'autre part.

Observations in situ

Deux campagnes de mesures en continu de turbidité et autres paramètres hydrologiques ont été menées, sur des durées de l'ordre de 6 mois chacune, à la fois dans le chenal de navigation, les fosses de flot Nord et Sud et la marge extérieure des bancs d'embouchure. En particulier, un système original de mesures simultanées de MES en surface et au fond a été implanté sur l'appontement de Fatouville. En 4 stations, des mesures d'érosion/dépôt par ALTUS ont complété les informations ainsi acquises dans la colonne d'eau.

Imagerie satellite

Depuis 2003, des images de couleur de l'eau sont acquises quotidiennement sur toute la surface de l'océan à une résolution de 250 m, et dans une gamme de fréquence qui donne accès aux fortes concentrations de la bande côtière (satellite MODIS de la NASA). Avec le concours de la société HOCER, un protocole de traitement des images, de calibration et de fusion avec les informations du large acquises à une résolution de 1 km (baie de Seine et Manche) a été élaboré. Un catalogue des images de distribution en surface des concentrations en MES en baie de Seine et dans l'embouchure de l'estuaire, constitué de 474 images réparties de 2003 à 2010 a

été constitué, avec, pour chacune des situations, un référencement des conditions environnementales du jour (vent, vagues, marée, débit).

Exploitation du modèle hydrosédimentaire Seine-Aval III

Le paramétrage du modèle hydrosédimentaire SiAM-3D a fait l'objet d'une amélioration (vitesse de chute, taille caractéristique des sables), et par ailleurs a été utilisé pour évaluer des indicateurs d'état hydro-morpho-sédimentaire utiles à l'application de la DCE dans les zones de transition, en appui à des réflexions menées au sein du projet Liteau BEEST.

Développement d'un nouveau modèle hydrosédimentaire

En dehors des campagnes de mesure in situ, l'effort majeur a porté sur le développement du nouveau modèle hydrosédimentaire, sur la base du code hydrodynamique MARS-3D, dans sa toute nouvelle version curviligne qui permet de raffiner dans l'estuaire et à la côte, sans impliquer un nombre considérable de points de calcul au large. L'utilisation de la base MARS plutôt que SiAM permet d'accéder à une résolution en calcul parallèle, devenu indispensable compte tenu de l'augmentation du nombre de maille, tandis que le code sédimentaire SiAM a été intégralement intégré dans le nouveau modèle.

La construction du maillage curviligne non orthogonal et l'implantation du code sur la baie de Seine ont été réalisées, et le modèle a fait l'objet d'une validation en termes d'hydrodynamique et d'hydrologie. Dans une version simplifiée, le modèle sédimentaire a donné des premiers résultats de bouchon vaseux. Malheureusement, la mise au point du code en version curviligne non orthogonal et sa compatibilité avec les techniques de parallélisation ont pris plus de temps que prévu, de telle sorte que les applications sédimentaires du modèle, en particulier pour la morphodynamique, n'ont pu être avancées.

Résultats majeurs

Mesures de turbidité in situ

La synthèse des données de turbidité dans l'estuaire amont a conduit à une évaluation de l'incertitude des relations entre débit solide et débit liquide de la Seine, et à une chronique pluriannuelle des turbidités (1997-2004) dans l'estuaire, avec une bonne cohérence entre Rouen et Caudebec, et la confirmation de piégeages saisonniers dans le secteur des îles entre Poses et Rouen. En ce qui concerne les apports de la Risle, une relation débit/concentration amont est proposée et l'apport solide annuel évalué à 5700 t par an ; par ailleurs, le stock de MES dans l'estuaire a pu être estimé à 25 000 t en vive eau.

Les mesures en continu issues des campagnes MODEL ont permis d'avoir une bien meilleure idée des MES dans le secteur d'embouchure. Parmi les faits majeurs relevés :

- concentrations en MES très élevées, a priori supérieures à celles estimées auparavant, dépassant à chaque vive eau les 3 g/l en surface et 5 g/l au fond à Fatouville,
- fortes concentrations aussi dans la Fosse Nord, avec des resuspensions locales indépendantes du bouchon vaseux pendant la période de mesures,
- concentrations plus faibles dans la Fosse Sud (sans doute moins vaseuse), qui restent corrélées à la marée, même si les vagues entraînent aussi des resuspensions,
- positionnement réactualisé et plus précis du bouchon vaseux, (par exemple, pour un débit de $250 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, une position la plus aval au droit de Fatouville)
- intérêt fort d'une mesure simultanée surface/fond au même point, qui permet une bien meilleure compréhension des phénomènes et une paramétrisation de la décantation des particules ; de même, la série de mesures acquises au fond au même endroit que MAREL-Honfleur dont l'enregistrement comportait des « trous » à chaque basse mer de vive eau doit permettre de revisiter ces mesures MAREL en les complétant par expertise,

- sensibilité des turbidités à la station de La Carosse, permettant de hiérarchiser l'importance relative des forçages principaux que sont la marée, le vent, les vagues et le débit de la Seine.

Mesures de turbidité satellite MODIS 250 m – 1 km

Le protocole élaboré pour le traitement des images à 250 m pourra être utilisé pour poursuivre l'exploitation de cette source d'information dans le proche avenir. L'examen des images rassemblées dans le catalogue montre une très forte variabilité du panache de MES dans le secteur d'embouchure, et l'effet important du vent (et des vagues), en particulier sur les resuspensions sur la côte normande.

Modélisation mathématique

L'exploitation du modèle hydrosédimentaire Seine-Aval III a permis de produire des cartes de salinité ou de turbidité moyenne ou de leurs valeurs percentiles, ou encore leurs variances, sur la base de simulations de plusieurs années. Ces cartes sont précieuses pour une caractérisation d'habitats.

Le nouveau modèle hydrosédimentaire MARS-SiAM-3D a été validé sur le plan hydrodynamique : la simulation de la propagation de la marée dans l'estuaire, jusqu'à Poses est excellente et les comparaisons des courants calculés avec les mesures ADCP sur toute la colonne d'eau, en quelques points, sont très bonnes. Les premières validations en salinité sont également bonnes, mais méritent d'être poursuivies en exploitant le « trésor » de données accumulées.

Une première version sédimentaire du modèle a été expérimentée, conduisant à une simulation du bouchon vaseux très encourageante, révélant des structures très fines et la simultanéité entre un maximum de turbidité bien localisé et des resuspensions sur les bancs d'embouchure, comme le montrent aussi les images satellite.

Perspectives

Nul doute que l'ensemble de données acquises dans la colonne d'eau, associées aux données altimétriques (érosions/dépôts) obtenues en conjonction avec le projet COLMATAGE de Seine-Aval IV et analysées dans le rapport final de ce projet, constitue une base solide pour la calibration et la validation des modèles hydrosédimentaires qui seront mis en œuvre dans le secteur de l'estuaire et la baie de Seine.

Concernant les données de turbidité par satellite, il faut considérer que les valeurs fournies sont très approximatives : nous n'avons pas été en mesure de produire une marge d'incertitude, et il sera nécessaire de le faire ultérieurement. Un effort supplémentaire doit être consenti sur l'identification de données simultanées *in situ* et par imagerie satellite, peut-être en profitant mieux des dernières données MODEL, car la quantité d'informations contenues dans ces images est exceptionnelle. Ce n'est qu'après cette étape supplémentaire de calibration qu'il sera opportun de tenter un traitement statistique de ces images, avec une difficulté réelle liée à une très grande variabilité générée par les multiples forçages très présents dans le secteur (vent, vagues, marée, débit) : l'exercice est d'autant plus difficile que la dimension spatiale de la zone est assez faible. Par ailleurs, un protocole de traitement des images MODIS à 250 m de résolution a été produit, et il serait intéressant de poursuivre son exploitation pour traiter les images à venir, par exemple au prix d'une réactualisation annuelle du catalogue d'images.

Naturellement, c'est surtout l'exploitation du nouveau modèle hydrosédimentaire qui mérite le plus d'effort. Le projet MODEL prévoyait une exploitation morphodynamique de ce modèle qui n'a pas été abordée. Dans un premier temps, il est proposé de tester la version multiclassées (sables/vase) du modèle, de la valider, et parallèlement de poursuivre la validation de la version monoclassée (vase seule) en termes de turbidité générée et de remaniement des fonds.

L'exploitation morphodynamique du modèle pourra alors être initiée, en simulant d'abord les évolutions morphologiques constatées dans le passé, puis en caractérisant des évolutions futures en fonction de différents scénarios de forçage. En dehors des évolutions morphologiques, ce sont aussi les variations de nature du sédiment superficiel qui seront explorées, en termes de granulométrie ou de compaction du sédiment : ces simulations doivent permettre de caractériser les habitats benthiques (biotopes) de l'estuaire et son embouchure (toute la baie de Seine orientale) et de préparer la modélisation des habitats eux-mêmes.

Le modèle pourra aussi être exploité pour tester l'impact de certains aménagements ou usages anthropiques du milieu, ou encore l'impact du changement climatique, susceptible de se décliner localement en variation des débits amont solide et liquide et en élévation du niveau moyen de la mer. L'utilisation du modèle, déjà mis en œuvre par le GIP Seine-Aval, doit rester partagée entre Ifremer et le GIPSA, et pourrait être étendue à d'autres partenaires.

9- Références et publications

Sont indiqués en gras les publications explicitement liées au projet MODEL ou les noms des chercheurs impliqués dans le projet.

Avoine, J., 1986. Evaluation des apports fluviaux dans l'estuaire de Seine. *IFREMER. Actes de Colloques*, **4**, 117-124.

Cugier Ph., **Le Hir P.** (2002). Development of a 3D hydrodynamic model for coastal ecosystem modelling. Application to the Plume of the Seine river (France). *Estuar. Coast. And Shelf Sci.* 55:673-695.

Deloffre, J., Lafite, R., Lesueur, P., Lesourd, S., Verney, R., Guézennec, L., 2005. Sedimentary processes on an intertidal mudflat in the upper macrotidal Seine estuary, France. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, **64**, (4), 710-720.

Doxaran D., Froidefond J-M, Castaing P. et M. Babin, 2009. Dynamics of the turbidity maximum zone in macrotidal estuary (the Gironde, France): Observation from field and MODIS satellite data ; *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 81 (2009) 321-332.

Dupont, J.P., Guézennec, L., **Lafite, R., Le Hir, P.**, 2001. Matériaux fins : le cheminement des particules en suspension. *Fascicule du Programme Seine-Aval, Ifremer (éd)*, 39pp.

Gohin F., Druon J.N., and Lampert, L. : A five channel chlorophyll algorithm applied to SeaWiFS data processed by SeaDAS in coastal waters, *International Journal of Remote Sensing*, Vol. 23 , 8, pp 1639-1661, 2002.

Gohin F., Loyer S., Lunven M., Labry C., Froidefond J.M., Delmas D., Huret M., Herbland A. : Satellite-derived parameters for biological modelling in coastal waters: Illustration over the eastern continental shelf of the Bay of Biscay. , *Remote Sensing of Environment*, volume 95, Issue 1, pp 29-46, 2005.

Gourrion, J. (2005). Hydrodynamique bidimensionnelle en coordonnées curvilignes non-orthogonales. Rapport de post-doctorat Ifremer.

Guézennec, L., 1999. Hydrodynamique et transport en suspension du matériel particulaire fin dans la zone fluviale d'un estuaire macrotidal : exemple de l'estuaire de la Seine (France). *Thèse de Doctorat, Université de Rouen*, 238pp.

HOCER (2010). Etude de la distribution des turbidités de surface déduites des images satellite MODIS (NASA) à 250m. Rapport final. HCR/BT/10020/R, 733p.

HOCER (2011). Calibration des turbidités de surface déduites des images satellite MODIS (NASA) à 250m et fusion avec les images à 1km. Rapport final. HCR/BT/10/099/RF, 762p.

Kervella S. , 2009. Dynamique des sédiments fins et mixtes des zones intertidales de la baie de Marennes-Oléron : caractérisation des sédiments, processus hydro-sédimentaires et modélisation appliqué. Thèse de Doctorat, Université de La Rochelle, 292p.

Kervella Y., Le Hir P., 2011. Création d'un maillage curviligne avec ICEM CFD 12.1. Rapport interne IFREMER/DYNECO, 41p.

Kervella Y., 2011. Simulation et analyse du fonctionnement hydrosédimentaire de l'estuaire de la Seine dans la période actuelle. Rapport de contrat post-doctoral 2010-2011, 49p.

Kervella Y., Khojasteh Pour Fard I., Le Hir P., Renault E., Lemoine J.-P., 2012. Modélisation hydrodynamique tridimensionnelle en coordonnées curvilignes non-orthogonales de l'estuaire de la Seine. CR XIIèmes Journées nationales Génie Côtier-Génie Civil, Cherbourg, 12-14 juin 2012.

Khojasteh Pour Fard, I., 2012. Echanges dissous et particulaires entre l'estuaire de la Loire et les eaux côtières adjacentes. Thèse en préparation, Université de Bordeaux.

Lafite, R., Tiphagne, K., Dupont, J.P., 2001. Calibration des flux particulaires et dissous dans l'estuaire de la Seine en vue de l'exploitation des données issues d'un réseau automatique de mesure en continu de la qualité des eaux. 76pp.

Lazure, P. and Dumas, F. (2008). *An external-internal mode coupling for a 3D hydrodynamical model for applications at regional scale (MARS)*. *Advances in Water Resources*, 31, pp 233-250.

Le Hir P., 2009. Simulation des flux particulaires à l'embouchure de l'estuaire de la Seine : exercice d'estimation des incertitudes. Comptes-rendus 31è journées de l'Hydraulique « Hydrodynamique et gestion des sédiments dans les estuaires, les baies et les deltas », SHF, 9p.

Le Hir P., Cayocca F., Waeles B., 2011. Dynamics of sand and mud mixtures : a multiprocess-based modelling strategy. Continental Shelf Research. Continental Shelf Research 31, S135-S149

Lemoine, J.-P. et Guillerme, D. (2010). Description de la couverture sédimentaire de l'estuaire de la Seine en fonction des classes et du maillage utilisé dans le modèle curvilinéaire MARS3D Seine-Aval. Publication interne.

Massei, N., Laignel, B., **Deloffre, J.**, Mesquita, J., Motelay, A., **Lafite., R.**, Durand, A., 2009. Long-term hydrological changes of the Seine River flow (France) and their relation to the North Atlantic Oscillation over the period 1950-2008. *International Journal of Climatology*, 1-10.

Meybeck, M., de Marsily, G., Fustec, E., 1998. *La Seine en son bassin : fonctionnement écologique d'un système fluvial anthropisé. Elsevier, Paris, 749pp.*

Pétus C., Chust G., Gohin F., Doxaran D., Froidefond J.M., Sagarminaga Y. (2010) Estimating turbidity and total suspended matter in the Adour River plume (South Bay of Biscay) using MODIS 250-m imagery, Continental Shelf Research, 30, 379-392.

Renault E., 2011. Validation hydrodynamique du modèle curvilinéaire de l'estuaire de la Seine. Rapport de Master 2 professionnel, Ifremer-Université de Bretagne Sud, 51p.

Silva Jacinto R., 2001. Action des vagues sur les estrans et vasières. Application à l'estuaire de la Seine. Thèse de l'université de Rouen. 231p

Simon et Pineau, 1999. Amélioration du modèle de prédiction de la marée en Manche. Rapport d'étude du SHOM 28/05/99 n°282 EPSHOM/CH/ET/NP

Thouvenin B., Boutier B., Chiffolleau J.F., Cossa D., Gonzalez J.L., Romana L.A., Auger D., Averty B., Chartier E., Crochet S., Tomasino C., Truquet I., Laurier F., 2002. Contribution à l'étude de la dynamique et de la spéciation des contaminants. Rapport Seine Aval des activités 2001.

Thouvenin B., Boutier B., Chiffolleau J.F., Gonzalez J.L., Michel P., Cossa D., Romana L.A., Auger D., Averty B., Chartier E., Crochet S. et Truquet I. 2003. Contribution à l'étude de la dynamique et de la spéciation des contaminants. Rapport d'activité 2002. Programme Seine Aval 2. Thème Analyse des risques chimiques et microbiologiques.

Waeles B., **Le Hir P.**, 2006. Simulation des activités de dragage et de leur impact sédimentaire à l'aide d'une modélisation morphodynamique de l'embouchure de la Seine. Proc. IXèmes Journées Nationales Génie Civil - Génie Côtier, Brest, Centre Français du Littoral/CETMEF/UBO Ed., 471-481.

Waeles B., **Le Hir P.**, Lesueur P., Delsinne N., 2007. Modelling sand/mud transport and morphodynamics in the Seine river mouth (France): an attempt using a process-based approach. *Hydrobiologia* (2007) 588:69-82.

Waeles B., **Le Hir P.**, Lesueur P., 2008. A 3D morphodynamic process-based modelling of a mixed sand/mud coastal environment: the Seine estuary, France. *In* Sediment and Ecohydraulics: INTERCOH 2005, Kusuda, Yamanishi, Spearman and Gailani (Eds), Elsevier, Proc. in Marine Science N°9, 477-498.

Communications

Le Hir P., Bassoullet P., Jestin H., Répécaud M., 2009. Nouvelles mesures de turbidité dans l'embouchure de la Seine, en vue de réactualiser la validation du modèle hydrosédimentaire. Séminaire Seine-Aval, Rouen, 8-10 sept.

Le Hir P., 2009. Simulation des flux particuliers à l'embouchure de l'estuaire de la Seine : exercice d'estimation des incertitudes. 31^e journées de l'Hydraulique « Hydrodynamique et gestion des sédiments dans les estuaires, les baies et les deltas », colloque de la SHF, Paris 22-23 sept.

Le Hir P., 2010. Impact du changement climatique en milieu estuarien Sea Tech Week 2010, séminaire "Océan, climat et vulnérabilité", Brest 22- 23 juin 2010

Le Hir P., Y. Kervella, P. Bryère, P. Bassoullet, H. Jestin, F. Gohin, R. Lafite, J. Deloffre, B. Thouvenin, 2010. Projet MODEL : Modélisation validée de l'hydro-morpho-sédimentologie, base physique d'une modélisation environnementale de l'estuaire de la Seine. Séminaire Seine-Aval, Rouen, 13-14 septembre.

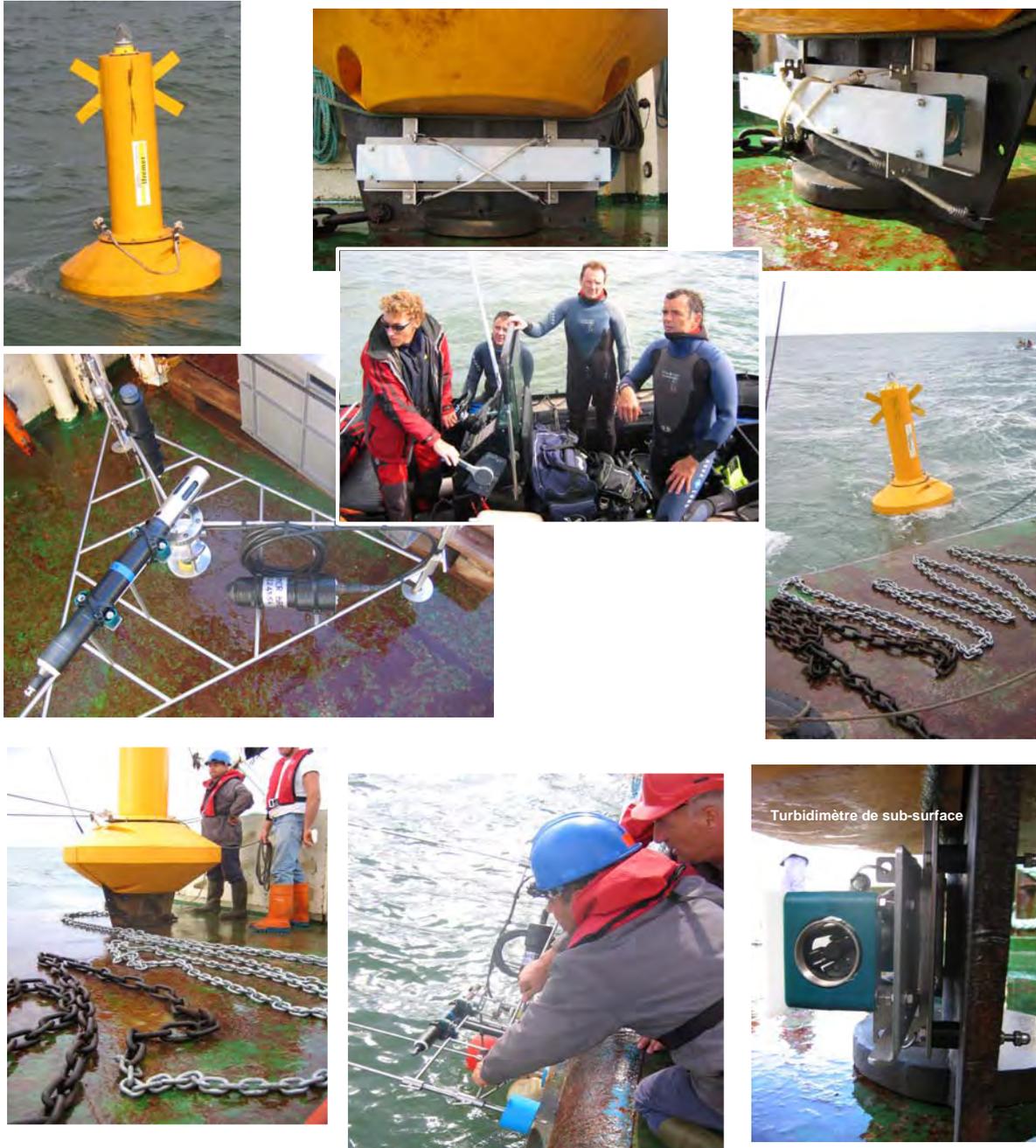
Le Hir P., 2010. Impact du changement climatique en milieu estuarien. 8^{èmes} Journées Scientifiques et Techniques du CETMEF, Brest, 8-9 décembre 2010.

Le Hir P., A. Sottolichio, V. Foussard, 2011. Computation of HydroMorphoSedimentary indicators of Good Ecological Status in estuaries, from mathematical process-based models. ELET-ECSA conference, Bordeaux, Oct.

Posters

Bassoullet, Le Hir P., Jestin H., Verney R., 2009. Mesures de vagues et d'érosion-dépôt dans l'embouchure de la Seine : 9 mois de mesures en continu à l'aide d'altimètres ALTUS, dans le cadre du projet Seine-Aval IV « COLMATAGE ».

Verney R., Voineson G., Jestin H., Bassoullet P., Le Hir P. Laboratory investigation of sediment bed features with an acoustic echosounder (ALTUS). INTERCOH'09, 10th Int. Conf. on Cohesive Sediment Transport Processes, Rio de Janeiro, 3-8 mai



Photos : Ph. Bassoullet / H Jestin

Mise en place de la station « Ratier » (Système ALTUS et turbidimètres fond et surface) le 09/09/2010 – N/O Côtes de la Manche

Crédit photo couverture : Ifremer, Physed, P. Le Hir
Pour tout renseignement, veuillez contacter la coordination scientifique : cdegremont@seine-aval.fr

Le GIP Seine-Aval ne saurait être tenu responsable d'évènements pouvant résulter de l'utilisation et de l'interprétation des informations mises à disposition.

Le GIP Seine-Aval est financé par :

