

## SOMMAIRE

---

OBJET DE L'ETUDE .....	A
SYNTHESE ET CONCLUSIONS .....	C
1. INTRODUCTION .....	1
2. CONSTRUCTION DU MODELE .....	3
2.1. DEFINITION DE L'EMPRISE DU MODELE .....	4
2.1.1. EMPRISE LONGITUDINALE .....	4
2.1.2. EMPRISE LATERALE – ZONES SUBMERSIBLES .....	4
2.1.3. EMPRISE GLOBALE.....	5
2.2. DEFINITION DE LA MOZAÏQUE BATHYMETRIQUE UTILISEE.....	6
2.3. SIMPLIFICATION BATHYMETRIQUE ET MAILLAGE DES ZONES SUBMERSIBLES PRISES EN COMPTE .....	6
2.3.1. SIMPLIFICATION BATHYMETRIQUE .....	6
2.3.2. CONSTRUCTION DU MAILLAGE .....	6
2.3.3. MNT CORRESPONDANTS.....	7
2.4. SCHEMATISATION ET MAILLAGE DES SECTIONS EN TRAVERS.....	7
2.4.1. SCHEMATISATION – METHODOLOGIE .....	7
2.4.2. EXEMPLE DE TRAVAIL SUR UN PROFIL .....	8
2.4.3. MAILLAGE ET BATHYMETRIE .....	8
2.5. MAILLAGE DE L'ESTUAIRE EXTERNE .....	8
2.6. FINALISATION DU MNT DE L'ETAT ACTUEL DE LA LOIRE .....	8
2.7. DEFINITION DU MAILLAGE VERTICAL .....	9
3. CALAGE HYDRODYNAMIQUE .....	11
3.1. FORÇAGE EN SURFACE PAR LE VENT .....	11
3.2. CONDITIONS AUX LIMITES AMONT ET AVAL .....	12
3.3. MISE EN PLACE DES ZONES DE FROTTEMENT .....	13
3.3.1. FROTTEMENT CONSIDERE DANS L'HYPOTHESE DE FONDS SABLEUX .....	13
3.3.2. PRISE EN COMPTE DE LA CREME DE VASE .....	15
3.4. METHODOLOGIE DE CALAGE.....	17
3.4.1. PARTIE AVAL A NANTES .....	17
3.4.2. PARTIE AMONT A L'ENTREE DE NANTES (PK 53) .....	17
3.5. RESULTATS DU CALAGE .....	18
3.5.1. RESULTATS DE CALAGE .....	18
3.6. ANALYSE QUANTITATIVE DU CALAGE .....	20
3.6.1. DEBIT DE 125 M <sup>3</sup> /S.....	21
3.6.2. DEBIT DE 200 M <sup>3</sup> /S.....	21
3.6.3. DEBIT DE 800 M <sup>3</sup> /S.....	22
3.6.4. DEBIT DE 2000 M <sup>3</sup> /S.....	22
3.6.5. DEBIT DE 4000 M <sup>3</sup> /S.....	23

<b>4. VALIDATION HYDRODYNAMIQUE.....</b>	<b>25</b>
4.1. METHODOLOGIE EN DEBIT VARIABLE .....	25
4.2. RESULTATS DE LA VALIDATION .....	25
4.2.1. ANALYSE QUANTITATIVE.....	26
<b>5. CALAGE HYDRODYNAMIQUE ET SALINITE .....</b>	<b>29</b>
5.1. MODELE DE TURBULENCE : MODELE MULTICOUCHE .....	30
5.1.1. PRINCIPE TECHNIQUE DU MODELE MULTICOUCHE .....	31
5.1.2. VERIFICATION DU BON FONCTIONNEMENT DU MODELE SUR DES EXPERIENCES EN LABORATOIRE .....	32
5.2. SIMULATION DE LA PERIODE D'OCTOBRE 2000.....	33
5.3. SIMULATION DE LA PERIODE DE JANVIER 2004 .....	33
<b>6. VALIDATION HYDRODYNAMIQUE ET SALINITE.....</b>	<b>35</b>
6.1. ANALYSE DES PROFILS VERTICAUX A MONTOIR DANS LE MODELE.....	35
6.2. TENTATIVE DE COMPARAISON AUX PROFILS VERTICAUX DE VITESSES A MONTOIR ..	35
6.3. TENTATIVE DE COMPARAISON AUX PROFILS VERTICAUX DE SALINITE DANS L'ESTUAIRE .....	36
<b>7. CALAGE HYDRODYNAMIQUE, SALINITE ET SEDIMENTOLOGIE .....</b>	<b>37</b>
7.1. DESCRIPTION DES PROCESSUS SEDIMENTAIRES .....	37
7.1.1. CALCUL DES FLUX D'EROSION .....	38
7.1.2. TASSEMENT.....	43
7.1.3. CALCUL DES FLUX DE DEPOT .....	49
7.1.4. VITESSE DE CHUTE .....	50
7.1.5. GLISSEMENT.....	54
7.1.6. PRISE EN COMPTE DE LA HOULE.....	55
7.2. DESCRIPTION ET FORÇAGE DE LA PERIODE DE CALAGE .....	56
7.2.1. MESURES DISPONIBLES.....	57
7.2.2. CONDITIONS INITIALES.....	57
7.2.3. FORÇAGES .....	57
7.3. RESULTATS DE CALAGE .....	59
7.3.1. PARAMETRES MODIFIES.....	59
7.3.2. ANALYSE DES RESULTATS .....	60
<b>8. REMARQUES POST-CALAGE .....</b>	<b>63</b>
8.1. INFLUENCE DE LA PROFONDEUR DU CHENAL DE NAVIGATION .....	63
8.2. CONSEQUENCE SUR LE CALAGE SIMPLE DE LA POSITION ERRONEE DU MAREGRAPHE DIT DE NANTES .....	63
<b>FIGURES NUMEROTEES PAR CHAPITRE .....</b>	<b>65</b>

## LISTE DES TABLEAUX

---

TABLEAU 1 - HAUTEUR DE RUGOSITE EQUIVALENTE DE NIKURADSE POUR LES ETIERS, PRAIRIES ET ROSELIERES.....	14
TABLEAU 2 - STATISTIQUES SUR 24 HEURES POUR UN DEBIT DE 125 M <sup>3</sup> /S.....	21
TABLEAU 3 - STATISTIQUES SUR 15 JOURS POUR UN DEBIT DE 125 M <sup>3</sup> /S.....	21
TABLEAU 4 - STATISTIQUES SUR 24 HEURES POUR UN DEBIT DE 200 M <sup>3</sup> /S.....	21
TABLEAU 5 - STATISTIQUES SUR 15 JOURS POUR UN DEBIT DE 200 M <sup>3</sup> /S.....	21
TABLEAU 6 - STATISTIQUES SUR 24 HEURES POUR UN DEBIT DE 800 M <sup>3</sup> /S.....	22
TABLEAU 7 - STATISTIQUES SUR 15 JOURS POUR UN DEBIT DE 800 M <sup>3</sup> /S.....	22
TABLEAU 8 - STATISTIQUES SUR 24 HEURES POUR UN DEBIT DE 2000 M <sup>3</sup> /S.....	22
TABLEAU 9 - STATISTIQUES SUR 15 JOURS POUR UN DEBIT DE 2000 M <sup>3</sup> /S.....	22
TABLEAU 10 - STATISTIQUES SUR 24 HEURES POUR UN DEBIT DE 4000 M <sup>3</sup> /S.....	23
TABLEAU 11 - STATISTIQUES SUR 15 JOURS POUR UN DEBIT DE 4000 M <sup>3</sup> /S.....	23
TABLEAU 12 - STATISTIQUE POUR LE MOIS DE SEPTEMBRE 2007.....	26
TABLEAU 13 - STATISTIQUES POUR LE MOIS D'OCTOBRE 2007.....	27

## LISTE DES FIGURES

---

FIG. 1. EMPRISE DES ZONES SUBMERSIBLES CONSIDEREES.....	4
FIG. 2. EMPRISE DES ZONES SUBMERSIBLES MODELISEES.....	5
FIG. 3. EMPRISE GLOBALE DU MODELE.....	5
FIG. 4. EXEMPLE DE TRAVAIL DE SCHEMATISATION D'UN PROFIL EN TRAVERS.....	8
FIG. 5. REPRESENTATION VERTICALE DU MAILLAGE DE L'ETUDE PRECEDENTE (10 PLANS EN REPRESENTATION SIGMA).....	9
FIG. 6. MAILLAGE VERTICAL : REPARTITION SIGMA ET PLANS HORIZONTAUX.....	10
FIG. 7. EXEMPLE D'APPLICATION DU VENT DANS LE MODELE.....	12
FIG. 8. MAREGRAPHES DISPONIBLE POUR LE CALAGE DU MODELE.....	13
FIG. 9. POSITION DE LA CREME DE VASE FONCTION DU DEBIT DE LA LOIRE.....	16
FIG. 10. SCHEMATISATION DES LONGUEURS DE MELANGE.....	31
FIG. 11. ILLUSTRATION DES SIMULATION D'EXPERIENXCES EN MILIEU STATIFIE.....	32
FIG. 12. POSITION DES STATIONS FIXES DE MESURES EN OCTOBRE 2000.....	33
FIG. 13. POSITION DES STATIONS FIXES EN JANVIER 2004.....	34
FIG. 14. TAUX D'EROSION VOLUMIQUE EN FONCTION DE LA CONTARINTE HYDRODYNAMIQUE, SANCHEZ(2008).....	39
FIG. 15. AJUSTEMENT D'UN FONCTION DE RIGIDITE INITIALE FONCTION DE LA CONCENTRATION.....	40
FIG. 16. VERIFICATION DES CONTRAINTES CRITIQUES D'EROSION CALCULEES AVEC LA LOI DE RIGIDITE INITIALE PROPOSEE.....	41
FIG. 17. AJUSTEMENT DE LA LOI DE TENDANCE DU TAUX D'EROSION.....	42
FIG. 18. AJUSTEMENT DU TAUX D'EROSION.....	43

FIG. 19.	COMPARAISON DES PROFILS DE CONSOLIDATIONS MESURES ET CEUX CALCULES PAR LE MODELE POUR UNE HAUTEUR INITIALE DE 0,5M ET UNE CONCENTRATION INITIALE DE 100G/L.....	45
FIG. 20.	COMPARAISON DES PROFILS DE CONSOLIDATIONS MESURES ET CEUX CALCULES PAR LE MODELE POUR UNE HAUTEUR INITIALE DE 1M ET UNE CONCENTRATION INITIALE DE 100G/L.....	45
FIG. 21.	COMPARAISON DES PROFILS DE CONSOLIDATIONS MESURES ET CEUX CALCULES PAR LE MODELE POUR UNE HAUTEUR INITIALE DE 2M ET UNE CONCENTRATION INITIALE DE 100G/L.....	46
FIG. 22.	COMPARAISON DES PROFILS DE CONSOLIDATIONS MESURES ET CEUX CALCULES PAR LE MODELE POUR UNE HAUTEUR INITIALE DE 0,5M ET UNE CONCENTRATION INITIALE DE 200G/L.....	46
FIG. 23.	COMPARAISON DES PROFILS DE CONSOLIDATIONS MESURES ET CEUX CALCULES PAR LE MODELE POUR UNE HAUTEUR INITIALE DE 1M ET UNE CONCENTRATION INITIALE DE 200G/L.....	47
FIG. 24.	COMPARAISON DES PROFILS DE CONSOLIDATIONS MESURES ET CEUX CALCULES PAR LE MODELE POUR UNE HAUTEUR INITIALE DE 2M ET UNE CONCENTRATION INITIALE DE 200G/L.....	47
FIG. 25.	CONCENTRATION MOYENNE DES COLONNES AYANT UNE HAUTEUR INITIALE DE 1 METRE.....	49
FIG. 26.	CONCENTRATION MOYENNE DES COLONNES AYANT UNE CONCENTRATION INITIALE DE 100 G/L	49
FIG. 27.	POSITION DES POINTS DE MESURE DE VITESSE DE CHUTE LORS DE LA CAMPAGNE DE DECEMBRE 2000	50
FIG. 28.	POSITION DES POINTS DE MESURE DE VITESSE DE CHUTE LORS DE LA CAMPAGNE DE MAI 2008	51
FIG. 29.	POSITION DES POINTS DE MESURE DE VITESSE DE CHUTE LORS DE LA CAMPAGNE DE NOVEMBRE 2008.....	51
FIG. 30.	VARIATION DES VITESSES DE CHUTE EN FONCTION DE LA CONCENTRATION ET DE LA SALINITE (ECHELLE SEMI-LOG).....	52
FIG. 31.	VARIATION DES VITESSES DE CHUTE EN FONCTION DE LA CONCENTRATION ET DE LA SALINITE..	53
FIG. 32.	AJUSTEMENT DE LA LOI DE THORN (1981) SUR LES MESURES (ECHELLE LOG-LOG).....	53
FIG. 33.	AJUSTEMENT DE LA LOI DE THORN (1981) SUR LES MESURES (ECHELLE LOG-LOG).....	54
FIG. 34.	EXEMPLE DE PLANS DE HOULE ENREGISTRES DANS LA BIBLIOTHEQUE.....	55
FIG. 35.	POINTS DE FORÇAGES UTILISES ISSUS DE PREVIMER ET D'ANEMOC.....	56
FIG. 36.	POSITION DES POINTS D'EXTRACTION ISSUS DE LA BASE PREVIMER.....	58
FIG. 37.	MESURES DE VITESSES DE CHUTE AVEC LE TUBE D'OWEN ET EN LABORATOIRE.....	59

oOo

---

## OBJET DE L'ETUDE

---

Par marché attribué le 29 août 2008, le GIP Loire Estuaire a confié à SOGREAH une étude portant principalement sur le développement et l'exploitation d'un modèle hydrosédimentaire en trois dimensions sur l'estuaire de la Loire dans le cadre de son « Programme de restauration de la Loire estuarienne en aval de Nantes ». Ce marché comprend également des prestations d'études de scénarios et de leviers d'aménagement s'appuyant sur ce modèle.

Cette mission confiée par le GIP Loire Estuaire à SOGREAH comprend, en lot 1, la construction et l'exploitation d'un modèle hydrosédimentaire en 3D de l'estuaire de la Loire. La phase 1 de ce lot consiste notamment à réaliser la construction et le calage de ce modèle.

Ce premier rapport rend compte de la construction du modèle général et de son calage simple dans lequel le frottement appliqué sur les fonds est fixé en fonction du débit de la Loire.



---

## SYNTHESE ET CONCLUSIONS

---

Le modèle « général » de la Loire a été calé en mode « simple », c'est-à-dire que les coefficients de frottement attribués aux fonds de l'estuaire sont appliqués en fonction de la position actuelle connue de la crème de vase pour un débit donné. Il s'agit en fait d'une première étape de calage qui est suivie par le calage dit « couplé ». (Voir rapport R8).

Les résultats de ce modèle ne sont donc valables que si la géométrie et la bathymétrie utilisée de l'estuaire ne modifient pas fortement la position de la crème de vase connue dans l'état actuel.

La bathymétrie utilisée dans ce modèle est issue du levé MNTU 2002 du GIP Loire Estuaire étendu de l'estuaire externe à l'aval à Ancenis à l'amont, et de levés plus récents du Grand Port Maritime de Nantes Saint-Nazaire sur les tronçons SGC5 et SGC6 en remplacement des levés précédents qui dataient de 1987. Il est à noter que la bathymétrie résultante ne correspond pas nécessairement aux fonds durs mais parfois au toit de crème de vase.

Le calage du modèle hydrodynamique du modèle qui s'est effectué sur une période assez proche de la date de réalisation des levés bathymétriques exploités a donné des résultats très acceptables en termes de propagation de marée dans l'estuaire et notamment du large jusqu'à Nantes.

Cependant, les frottements appliqués pour pouvoir retrouver les lignes d'eau mesurées à l'amont de Nantes montrent clairement que la bathymétrie amont ne peut à la fois être représentative d'une bathymétrie de crue et d'une bathymétrie d'étiage. L'incision du lit en étiage n'étant pas modélisée, des frottements exagérément faibles ont dû être appliqués pour obtenir les lignes d'eau mesurées en étiage.

La validation du modèle hydrodynamique a été effectuée sur une période issue de l'année 2007. Cette validation donne de bons résultats jusqu'à Nantes. Par contre les évolutions du fond à l'amont de Nantes entre 1996 et 2006, mises en évidence dans le rapport : « Programme de restauration de la Loire entre Nantes et les Ponts de Cé - Expertise hydrosédimentaire pour la redéfinition d'un cadre d'objectifs et d'interventions » (Philippe Lefort, 2009), se retrouvent dans les résultats du modèle avec un décalage des lignes d'eau lors de cette validation.

Le calage en hydrodynamique et salinité a permis d'obtenir grâce à l'utilisation d'un modèle de longueur de mélange multicouche, les fortes stratifications obtenues en crue ainsi que les remontées salines par densité lors des périodes de mortes-eaux.

La validation en hydrodynamique et salinité s'est effectuée sur des profils verticaux de courant et de salinité. La dynamique générale de l'estuaire semble retrouvée avec tout de même des stratifications plus marquées en nature.

Le calage en hydrodynamique, salinité et sédimentologie s'est effectué sur une période de 5 mois, comprenant une crue de 4000 m<sup>3</sup>/s. La dynamique du bouchon vaseux mise en

évidence par le réseau de mesures en continu de l'estuaire de la Loire a été retrouvée qualitativement. Pour approfondir le calage quantitativement, le réseau de mesures devra être calibré (loi de conversion NTU/MES). Le principal résultat sédimentologique obtenu est que le modèle est capable de régénérer un bouchon vaseux après une forte crue et avec le même ordre de grandeur qu'avant la crue.

On notera que la remontée de sédiment dans l'estuaire est très sensible à la cote du chenal de navigation, et que pour l'instant dans le calage simple, les fonds durs incluent une certaine épaisseur de vase présente lors des levés.

Cette première étape de calage dit « simple » permet d'obtenir des résultats cohérents et comparables aux mesures disponibles. Il s'agit d'une base solide pour entamer le calage « couplé ».



---

# 1. INTRODUCTION

---

Dans le cadre de cette étude deux types de modèles sont construits :

- **Un modèle dit « général »** mis en place dans le lot 1, qui permettra de simuler la dynamique estuarienne à l'échelle de l'estuaire.
- **Un modèle dit « raffiné »** mis en place dans pour le lot 2 qui basé sur le modèle général viendra raffiner la zone d'intérêt ce qui permettra de fournir des résultats à l'échelle estuarienne et des résultats à l'échelle du levier.

**Ce rapport fait référence au modèle « général »** de la Loire dans son état actuel, c'est-à-dire le modèle conçu pour le lot 1 et le lot 3. Tout au long de cette note, il sera simplement nommé le « modèle ».

Il est prévu d'effectuer deux types de calage sur ce modèle :

- **Un calage dit « simple »** : le calage dit simple signifie que les coefficients de frottement attribués aux fonds de l'estuaire sont appliqués en fonction de la position connue de la crème de vase pour un débit donné. Ce modèle est une première étape de calage, et les résultats de ce modèle ne sont valables que si la géométrie et la bathymétrie utilisée de l'estuaire ne modifient pas fortement la position de la crème de vase connue dans l'état actuel.
- **Un calage dit « couplé »** : ce qui signifie que le frottement lié à la crème de vase est estimé localement en chaque point de calcul en fonction du dépôt de vase calculé simultanément. Le frottement est alors complètement couplé au dépôt. Ce modèle est alors complètement exploitable pour n'importe quelle configuration de l'estuaire.

**Ce rapport rend compte du calage « simple »**

La construction du modèle est incluse dans le chapitre 2 de ce rapport. Par la suite le calage s'est effectué en trois étapes successives :

- Calage et validation hydrodynamique : chapitre 3 et 4
- Calage et validation hydrodynamique et salinité : chapitre 5 et 6
- Calage hydrodynamique, salinité et sédimentologie : chapitre 7

Des remarques et tests post-calage sont décrits au chapitre 8.

**LOT 1 – PHASE 1: CONSTRUCTION ET CALAGE SIMPLE**

---

---

## 2. CONSTRUCTION DU MODELE

---

Toutes les cotes indiquées dans ce document se trouvent dans le système de référentiel altimétrique Cote Marine 96 à Saint-Nazaire.

Le système de Point Kilométrique (PK) utilisé est celui ayant son origine à Saint-Nazaire.

Comparativement au modèle construit en 2005 à l'occasion de l'étude précédente, ce modèle est optimisé du point de vue du nombre de points de calculs par plan horizontal tandis qu'il est plus raffiné selon la verticale.

En effet, plusieurs souhaits indiqués dans l'appel d'offre et réaffirmés par le GIP Loire Estuaire lors de la réunion de démarrage portent sur le fait que le modèle doit :

- Avoir des temps de calculs raisonnables (environ trois jours pour simuler un mois exploitable, hors période d'initialisation) ;
- Tenir compte des zones latérales submersibles ;
- Représenter plus finement la stratification verticale.

La construction du modèle a été adaptée aux objectifs visés, et a nécessité un long travail qui est passé par les étapes successives suivantes :

- Définition de l'emprise du modèle, notamment au niveau des zones submersibles puisqu'elle est inchangée longitudinalement ;
- Définition de la mosaïque bathymétrique utilisée ;
- Simplification bathymétrique et maillage des zones submersibles prises en compte ;
- Schématisation et maillage des sections en travers sur tout le linéaire de la Loire, de l'extrémité aval du chenal d'accès au port de Saint-Nazaire à Ancenis, à la limite amont du modèle;
- Maillage de l'estuaire externe, de Bilho à la limite maritime du modèle ;
- Finalisation du Modèle Numérique de Terrain de l'état actuel de la Loire par assemblage des zones préalablement traitées ;
- Définition du maillage vertical.

La méthodologie mise en œuvre au cours de chacune de ces étapes est détaillée ci-après.

## 2.1. DEFINITION DE L'EMPRISE DU MODELE

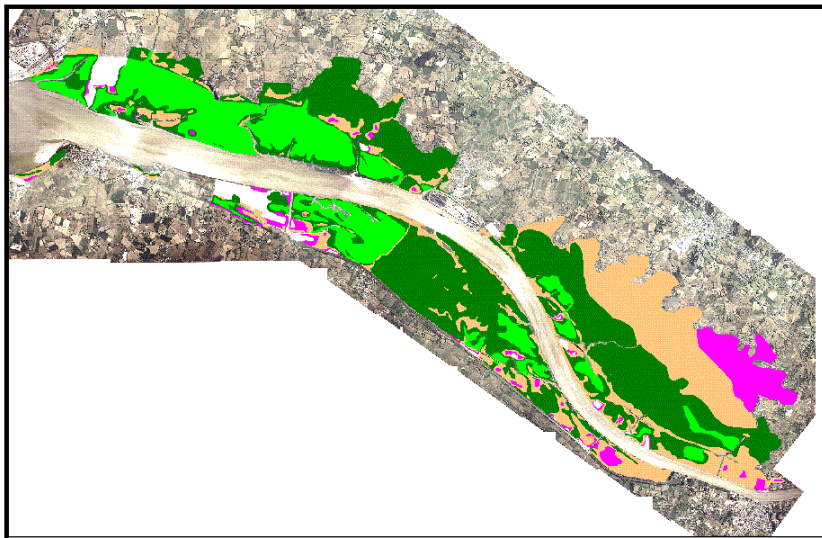
### 2.1.1. EMPRISE LONGITUDINALE

L'emprise longitudinale s'étend de 40 km au large de Saint-Nazaire à l'aval jusqu'à Ancenis à l'amont. Cette emprise est en effet adaptée au contexte vis-à-vis des conditions aux limites à imposer puisque la limite maritime se trouve suffisamment loin de la zone d'expulsion du panache turbide tandis que la limite fluviale se situe à la limite théorique de remontée de la marée.

### 2.1.2. EMPRISE LATERALE – ZONES SUBMERSIBLES

La principale motivation du GIP Loire Estuaire dans la demande de prise en compte de l'ensemble des zones inondables est de tenir compte de la zone de stockage que peuvent former certaines prairies par grand coefficient de marée.

L'emprise de ces zones, définie par le GIP Loire Estuaire, est représentée sur la figure ci-dessous :

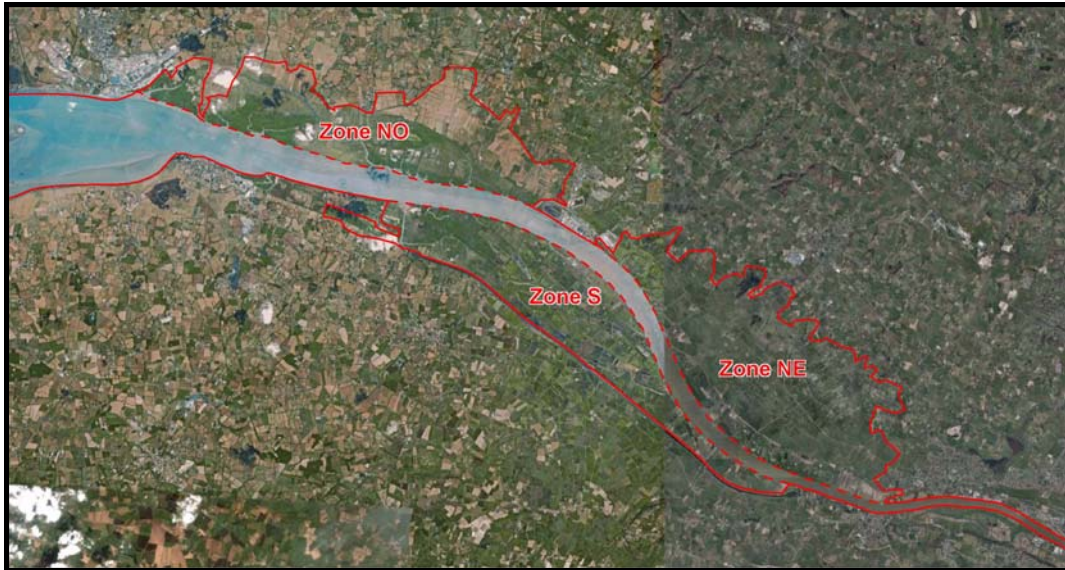


*Fig. 1. EMPRISE DES ZONES SUBMERSIBLES CONSIDEREES.*

Trois grandes zones se dégagent clairement :

- Une première zone qui s'étend de Donges à Cordemais sur les rives Nord de la Loire : elle constitue la « Zone NO » (Zone Nord-ouest) ;
- Une seconde zone qui s'étale de Cordemais à Le Pellerin, toujours sur les rives Nord de la Loire : elle constitue la « Zone NE » (Zone Nord-est) ;
- Une troisième et dernière zone, cette fois sur les rives Sud de Loire, et qui va de Le Carnet à la Martinière ; elle constitue la « Zone S » (Zone Sud).

Ces trois grandes zones, dont l'emprise est illustrée sur la figure 2 ci-dessous, feront l'objet d'un traitement particulier détaillé au paragraphe 2.3.



*Fig. 2. EMPRISE DES ZONES SUBMERSIBLES MODELISEES.*

### 2.1.3. EMPRISE GLOBALE

L'emprise globale résultante du modèle est représentée sur la figure 3 ci-dessous ainsi qu'en **figure 1.1** en annexe :



*Fig. 3. EMPRISE GLOBALE DU MODELE.*

## 2.2. DEFINITION DE LA MOZAÏQUE BATHYMETRIQUE UTILISEE

La bathymétrie utilisée pour la construction du modèle est finalement une combinaison des données suivantes :

- Les levés SHOM pour la partie maritime du modèle ;
- Le levé MNTU 2002 étendu du GIP Loire Estuaire de l'estuaire externe à l'aval à Ancenis à l'amont ;
- Des levés plus récents du PANSN sur les tronçons SGC5 et SGC6 en remplacement des levés précédents qui étaient de 1987.

Il est à noter que la bathymétrie résultante ne correspond pas nécessairement aux fonds durs mais parfois au toit de crème de vase. Les nouveaux levés bathymétriques effectués par Mesuris en 2009 qui permettent de minimiser les chances de présence de crème de vase lors des périodes de mesures, sont arrivés en cours d'étude. Il a été fait le choix avec le GIP Loire Estuaire de ne pas les inclure à ce stade pour des raisons de planning.

Le calage simple présenté est donc effectué sur cette bathymétrie qui inclut par endroits une certaine épaisseur de crème de vase.

## 2.3. SIMPLIFICATION BATHYMETRIQUE ET MAILLAGE DES ZONES SUBMERSIBLES PRISES EN COMPTE

### 2.3.1. SIMPLIFICATION BATHYMETRIQUE

Pour représenter les zones inondables à l'échelle du modèle, il faut effectuer un travail de simplification qui consiste à gommer toutes les variations très locales de bathymétrie, afin que tout point du maillage interpolé sur la bathymétrie de la zone soit représentatif de la moyenne bathymétrique réelle à l'échelle de la maille. Les grandes lignes de talweg et de sommets sont donc forcées par des lignes de contraintes afin de respecter les entrées principales de remplissage et de vidange ainsi que les dépressions.

Les zones submersibles sont donc représentées de manière schématique afin de représenter au mieux les zones de stockage et les zones principales de transit entre elles, sans que celles-ci soient pour autant finement décrites. Certaines singularités ne sont donc pas représentées soit lorsqu'elles sont sans intérêt d'un point de vue hydraulique, soit lorsqu'elles sont de faibles dimensions par rapport à la taille de maille du modèle. C'est le cas par exemple des étiers non connectés à des zones de stockage, des connexions hydrauliques entre prairies, des murets et fossés, etc.

Il est à noter que la frontière entre le lit mineur de la Loire et ces zones submersibles a été fixée à la cote +4,86 M CM, qui correspond à la limite entre la slikke et le schorre.

### 2.3.2. CONSTRUCTION DU MAILLAGE

L'une des priorités de cette étude étant de respecter des temps de calculs raisonnables, l'enjeu majeur dans la construction de ces zones submersibles consiste à représenter une bathymétrie simplifiée mais réaliste tout en utilisant le moins de nœuds possible.

Finalement, l'ensemble de ces zones submersibles est représenté grâce à 2127 nœuds et des mailles triangulaires dont la taille varie approximativement entre 75 et 500 mètres.

Le détail pour chacune des trois zones est le suivant :

- Zone NO : ..... 716 nœuds ;
- Zone NE : ..... 667 nœuds ;
- Zone S : ..... 744 nœuds.

### 2.3.3. MNT CORRESPONDANTS

Le Modèle Numérique de Terrain (MNT) résultant pour chacune de ces zones est illustré **figures 1.2 à 1.7**.

## 2.4. SCHEMATISATION ET MAILLAGE DES SECTIONS EN TRAVERS

### 2.4.1. SCHEMATISATION – METHODOLOGIE

Toujours dans l'optique de respecter des temps de calcul raisonnables, le raffinement horizontal du maillage du lit mineur de la Loire peut être optimisé de manière à réduire fortement le nombre de nœuds sans que cela se répercute sur les résultats attendus. En effet, ce modèle est un modèle général dont l'objectif est de répondre à la dynamique globale de l'estuaire.

Cette simplification du maillage passe par un lourd travail de schématisation des sections en travers du lit mineur à l'aide de seulement quelques nœuds placés à intervalles réguliers. Il n'est plus possible d'effectuer une interpolation directe sur la bathymétrie et seul un travail manuel de simplification des sections permet d'être représentatif.

Une section en travers tous les 250 mètres est ainsi extraite de la mosaïque bathymétrique de l'aval du chenal d'accès au port de Saint-Nazaire à Ancenis.

Chaque section, représentée par un nombre fixe de points, devra être hydrauliquement comparable à la section réelle. Ce respect hydraulique passe par l'application de trois critères clefs :

- La cote du point le plus bas dans le chenal doit être respectée pour représenter la pente réelle longitudinalement, ce qui est crucial en étiage ;
- La section sous une cote de référence toujours en eau doit être respectée à moins de 1 % près ;
- Le volume oscillant doit être respecté.

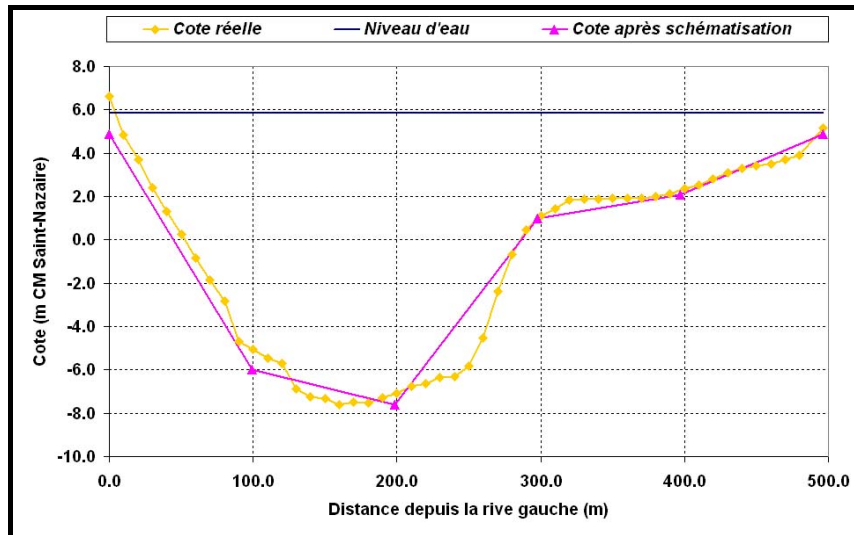
Le nombre de points définissant chaque section varie le long de l'estuaire en fonction de sa largeur de manière à ce que deux points soient espacés transversalement d'une distance comprise entre 50 et 150 mètres selon la précision recherchée.

Finalement, sur l'ensemble du lit mineur auquel s'ajoutent quelques chenaux secondaires à l'amont de Nantes, un total de 530 sections a été schématisé.



## 2.4.2. EXEMPLE DE TRAVAIL SUR UN PROFIL

A titre d'exemple, la figure ci-dessous illustre ce travail de schématisation d'une section située entre Cordemais et La Martinière.



*Fig. 4. EXEMPLE DE TRAVAIL DE SCHEMATISATION D'UN PROFIL EN TRAVERS.*

A ce niveau, la discrétisation transversale conduit à avoir des points espacés de 100 mètres dont la cote de ceux des deux extrémités est à + 4,86 m CM. En effet, cette section se situe entre deux zones submersibles, Nord-est et Sud, avec lesquelles il convient d'assurer un parfait raccord.

## 2.4.3. MAILLAGE ET BATHYMETRIE

Une fois l'ensemble des profils schématisé, chaque point de chaque section est alors relié à son point correspondant sur le profil précédent et le profil suivant.

Des lignes longitudinales sont ainsi créées dans le sens de l'écoulement et des points bathymétriques sont alors créés sur ces lignes par interpolation de la bathymétrie se trouvant à l'intersection de ces lignes et des profils en travers.

## 2.5. MAILLAGE DE L'ESTUAIRE EXTERNE

Le traitement de l'estuaire externe a fait l'objet d'un positionnement judicieux des points de calcul de manière à respecter une fois de plus des temps de calcul raisonnables tout en assurant une représentation la plus fine possible des singularités présentes dans l'estuaire externe, de la limite maritime du modèle au banc de Bilho.

## 2.6. FINALISATION DU MNT DE L'ETAT ACTUEL DE LA LOIRE

L'aboutissement de la construction du MNT de l'état actuel de la Loire passe maintenant par l'assemblage de chacune des zones traitées indépendamment :



- Les zones submersibles ;
- Le lit mineur ;
- L'estuaire externe.

Cet assemblage est toutefois une tâche relativement aisée dans le sens où ces zones sont à la fois complémentaires du point de vue de leur emprise et continues du point de vue de la bathymétrie au niveau des limites à connecter.

Finalement, le MNT résultant possède les caractéristiques suivantes :

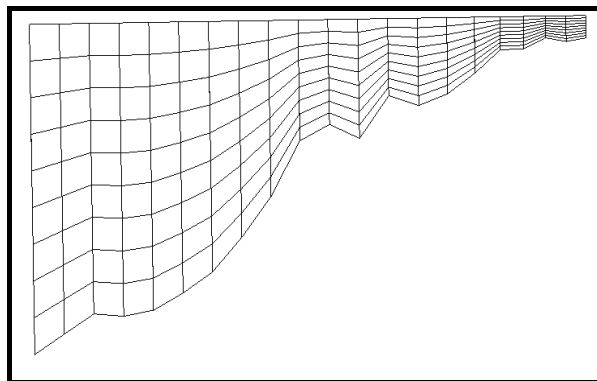
- Dimensions : 90 kilomètres de rivière et 40 kilomètres en pleine mer ;
- Emprise : d'Ancenis à l'amont à l'ensemble de la Grande Baie à l'aval, en incluant la Baie de Bourgneuf au Sud et la pointe de Croisic au Nord ;
- Système de coordonnées : Lambert II Carto ;
- Référencement altimétrique : Zéro hydrographique de Saint-Nazaire 1996
- Bathymétrie : basée sur la mosaïque bathymétrique dont la construction est décrite au Paragraphe 2.2 ;
- Maillage horizontal : composé de 7052 nœuds et 12855 éléments triangulaires, ou mailles, dont la taille varie entre 50 mètres et 2500 mètres.

Une illustration détaillée de ce modèle de l'état actuel de la Loire est exposée sur les **figures 1.8 à 1.16**.

## 2.7. DEFINITION DU MAILLAGE VERTICAL

Une fois le maillage horizontal terminé, il ne reste plus qu'à définir un empilement adéquat de ces plans horizontaux pour générer le maillage tridimensionnel qui servira de support aux calculs hydrosédimentaires de l'estuaire de la Loire.

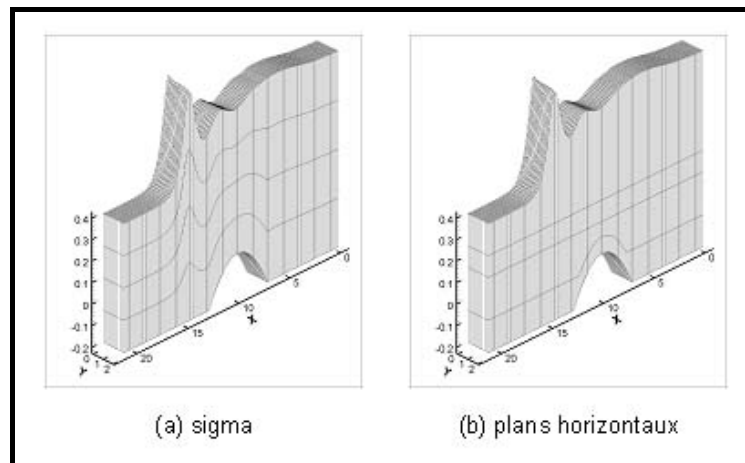
Une meilleure représentation de la stratification passe avant tout par une discrétisation verticale plus fine que celle du modèle de l'étude précédente qui présentait 10 plans en représentation sigma, comme la montre la figure ci-dessous.



**Fig. 5. REPRESENTATION VERTICALE DU MAILLAGE DE L'ETUDE PRECEDENTE (10 PLANS EN REPRESENTATION SIGMA).**

Mais elle passe aussi par une répartition des plans mieux adaptée aux phénomènes de stratification observés lors l'étude précédente. Pour cela, nous avons proposé de combiner :

- L'utilisation de plans fixes horizontaux dans la partie basse (figure 6b) pour permettre de mieux représenter les zones de stratification densimétrique ;
- L'utilisation d'une répartition sigma (figure 6a) pour la partie haute de l'écoulement pour permettre de mieux représenter les écoulements sur les zones peu immergées.



**Fig. 6. MAILLAGE VERTICAL : REPARTITION SIGMA ET PLANS HORIZONTAUX.**

De plus, afin que la stratification soit représentée au mieux, il est important que la zone de fort gradient se trouve dans la zone couverte par les plans horizontaux. Il semble donc opportun de remonter les plans fixes le plus haut possible, à la limite des zones d'estrans, pour espérer englober les gradients observés sur les profils de janvier 2004 et décembre 2000 (forts débits).

Plusieurs tests ont été effectués, sur différentes combinaisons de structure de maillage (voir rapport de compilation des notes d'avancement)

Une illustration du maillage finalement retenu (sur un profil des fonds de l'estuaire simplifié) est présentée en **figure 1.17**.

---

### 3.

## CALAGE HYDRODYNAMIQUE

---

D'après le cahier des charges, le calage simple doit être effectué sur cinq périodes réelles représentatives des débits suivants : 125, 200, 850, 2000 et 4000 m<sup>3</sup>/s.

Le calage hydrodynamique, première étape du calage simple, a pour but principal de régler les coefficients de frottement par zone afin de représenter correctement la propagation de la marée à l'intérieur de l'estuaire. Cette dernière sera ainsi calée sur les mesures des huit marégraphes suivants : Saint-Nazaire, Donges, Cordemais, Le Pellerin, Nantes, Sainte-Luce-sur-Loire, Mauves-sur-Loire et Ancenis.

La loi de frottement retenue est de type Nikuradse à l'aval de Sainte-Luce-sur-Loire et de type Strickler à l'amont.

En effet, avec la faible résolution du modèle à l'amont, la valeur du frottement ne peut pas tenir compte uniquement d'un paramètre physique lié à la rugosité locale des fonds. Le frottement tient compte de tout ce que le maillage ne voit pas : végétation sur les berges, épis, pont (seuils et piles), différences entre sections modélisées et sections réelles, même si elles ont été approchées au mieux. La variation bathymétrique annuelle a aussi un impact très important qui est aussi compensé par le frottement. Les profils transversaux (lorsque le lit n'est pas contraint latéralement) ont tendance à se creuser ponctuellement en étiage (incision du lit) et à s'égaliser en crue. La respiration d'un fond de chenal peut varier annuellement de plus de 2 m entre crue et étiage sur un fleuve comme la Loire.

La formulation de Nikuradse est plus physique en trois dimensions puisque rapportée à la vitesse du fond en comparaison à une formulation de type Strickler qui se rapporte à la vitesse moyenne verticale. Par contre, dès que la valeur de frottement englobe d'autres pertes de charges que celles dues au frottement du fond, il est plus pertinent d'utiliser une formulation en Strickler ce qui permet d'appliquer une perte de charge en relation à la vitesse moyenne de l'écoulement.

#### 3.1. FORÇAGE EN SURFACE PAR LE VENT

Suivant les périodes simulées, les séries de vent temporelles sont issues autant que possible du point d'extraction CROISIC1 de la base Prévimer, soit des mesures effectuées à la pointe de Chemoulin.

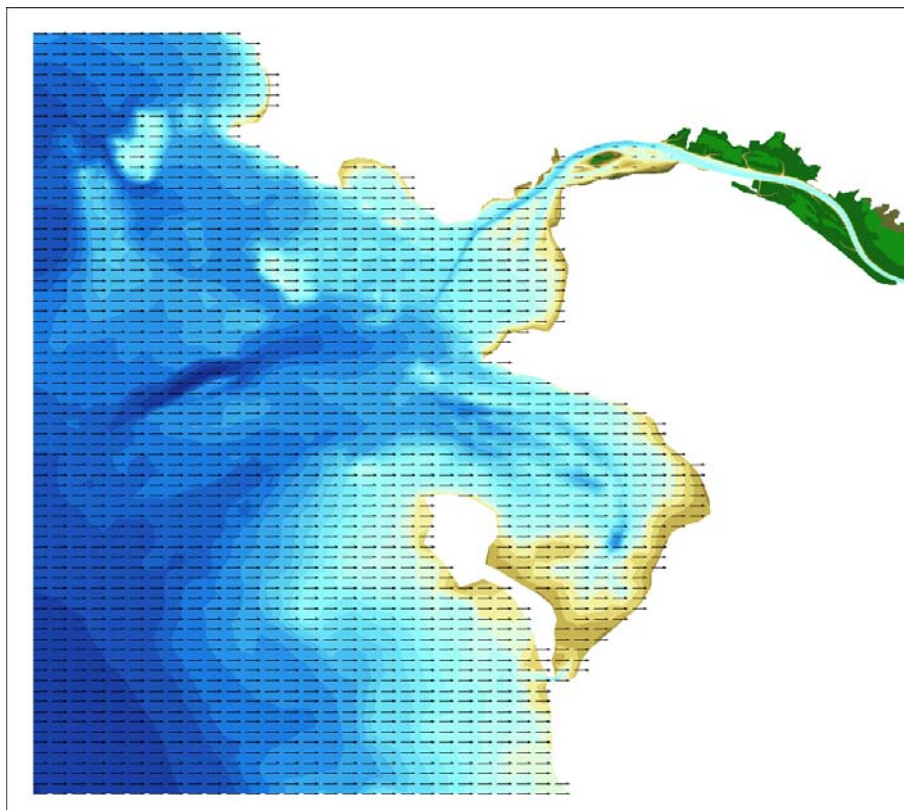
La direction du vent imposée dans le modèle est constante spatialement sur l'ensemble du modèle. Par contre son intensité est augmentée dans le cas des mesures prises sur terre (point de Chemoulin) selon la formulation de Hsu et Powell :

$$U_{mer} = 1,62 + 1,17 U_{terre}$$

Cette valeur de l'intensité du vent en mer, appliquée de manière homogène sur toute la partie maritime du modèle, est ensuite interpolée depuis l'extrémité aval du chenal d'accès au port de Saint-Nazaire jusqu'à Donges aval où elle atteint une valeur nulle.

En effet, le but de la prise en compte du vent dans le modèle n'est pas de simuler des régimes de surcote dans l'estuaire, auquel cas il faudrait un modèle hydrométéorologique bien plus élaboré. D'autre part, la surcote est déjà prise en compte par l'évolution temporelle du niveau moyen aux conditions aux limites. Le but de la prise en compte dans du vent dans le modèle 3D hydrosédimentaire est de pouvoir générer dans l'estuaire externe les circulations d'eau tridimensionnelles susceptibles de modifier significativement les circulations résiduelles de la marée astronomique. Un tel effet du vent devient par contre négligeable dans l'estuaire interne où les effets de stratification haline et turbide conjugués à la marée et aux débits de la Loire sont prépondérants

La figure ci-dessous illustre ce principe pour un vent d'Ouest :



*Fig. 7. EXEMPLE D'APPLICATION DU VENT DANS LE MODELE.*

### 3.2. CONDITIONS AUX LIMITES AMONT ET AVAL

Le débit journalier mesuré à Montjean est imposé à la limite amont du modèle (Ancenis).

La marée astronomique est imposée la limite maritime, avec le niveau moyen calculé à partir de la mesure de la marée à Saint-Nazaire sur la période. Les constantes harmoniques (amplitudes et phases) aux conditions aux limites utilisées proviennent du LEGI (Laboratoire d'Écoulements géophysiques et Industrielles, équipe MEOM) qui

dispose d'un modèle du golfe de Gascogne forcé par des marégraphes de pleine mer. Les données obtenues auprès du LEGI correspondent à l'année 2000 entière en chaque nœud frontière du modèle, avec un pas de temps de 10 minutes.

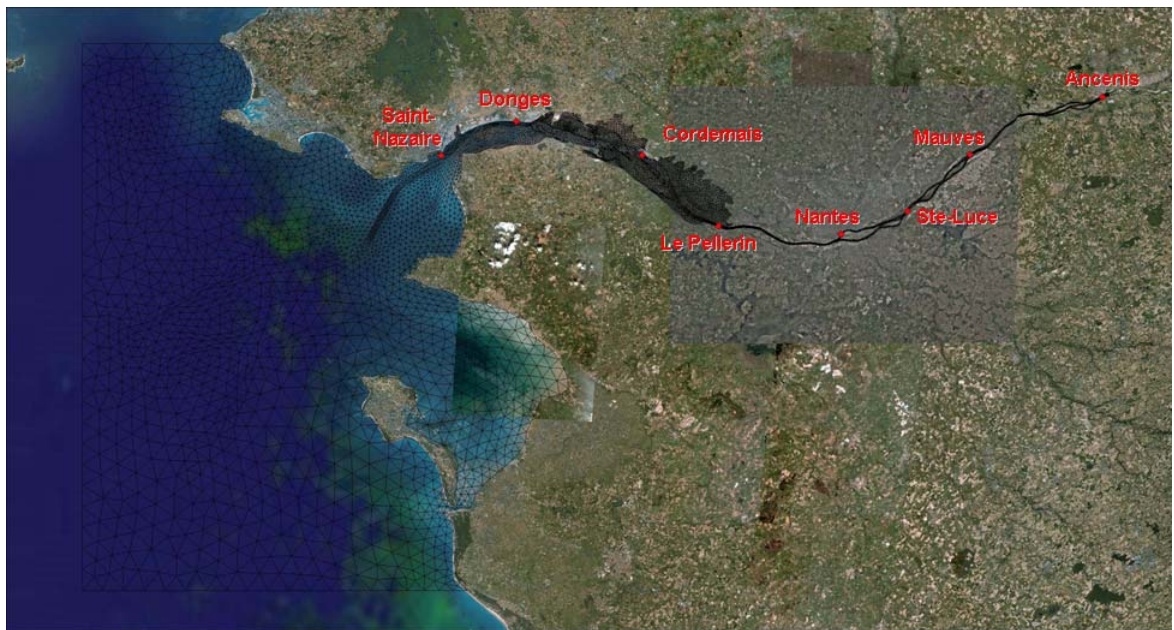
Sur la base de ce jeu de données, une analyse harmonique a permis d'établir les composantes harmoniques de 49 ondes en chaque nœud frontière du modèle. Ces composantes harmoniques sont alors utilisés par un modèle de prédiction qui a été développé par SOGREAH et intégré dans nos modèles.

### 3.3. MISE EN PLACE DES ZONES DE FROTTEMENT

#### 3.3.1. FROTTEMENT CONSIDERE DANS L'HYPOTHESE DE FONDS SABLEUX

##### 3.3.1.1. FROTTEMENT LONGITUDINAL

Neuf zones de frottement sont définies. Nous disposons des données de cinq marégraphes et trois limnigraphes dont un (Ancenis) est situé à la limite amont du modèle.



**Fig. 8. MAREGRAPHES DISPONIBLE POUR LE CALAGE DU MODELE**

La répartition du frottement le long de l'estuaire se fait en interpolant longitudinalement les valeurs de coefficients fixés à ces différents niveaux :

- A la limite entre la partie maritime du modèle et l'estuaire externe ;
- Au PK 11 – Donges aval ;
- Au PK 14.5 – Donges amont ;
- Au PK 25 – Cordemais ;
- Au PK 38 – Le Pellerin ;
- Au PK 53 – Nantes aval ;

- Au PK 53.75 – Nantes ;
- Au PK 56 – Nantes amont
- Au PK 61 – Sainte-Luce-sur-Loire ;
- Au PK 70,5 – Mauves-sur-Loire ;
- A l'extrémité amont du modèle – Ancenis.

Cette méthode d'interpolation permet, contrairement à celle employée lors de l'étude précédente, de ne pas avoir de changements trop rapides dans les valeurs des coefficients de frottement.

### 3.3.1.2. FROTTEMENT LATERAL

#### 3.3.1.2.1. FRONTIERES SOLIDE DU MODELE

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

#### 3.3.1.2.2. LATERALEMENT AU SEIN DU LIT MINEUR

Latéralement au sein du lit mineur de l'estuaire, comme par exemple au niveau du banc de Bilho, il n'est pas prévu de différencier le frottement en fond de chenal. En effet, seules des mesures de répartition des flux entre chenal principal et chenal secondaire pourraient permettre de différencier le frottement, avec le risque de ne pouvoir identifier le phénomène de frottement devant la forte différence morphologique de section qu'il existe entre ces deux chenaux.

#### 3.3.1.2.3. FROTTEMENT SUR LES ZONES SUBMERSIBLES

Bien que l'étude du modèle historique de 1947 ait montré que la variation de frottement sur les estrans n'a pas d'influence significative sur les niveaux d'eau dans le lit mineur, nous appliquons sur les zones submersibles un frottement qui dépend de la végétation, bien qu'il n'y ait pas pour l'instant de calage possible pour ces valeurs. Les valeurs de rugosité mises en jeu sont présentées dans le tableau ci-dessous :

	Etiers	Prairies	Roselières
<b>Nikuradse ks (m)</b>	0,00002	0,2	0,4

Tableau 1 - HAUTEUR DE RUGOSITE EQUIVALENTE DE NIKURADSE POUR LES ETIERS, PRAIRIES ET ROSELIERES

### 3.3.2. PRISE EN COMPTE DE LA CREME DE VASE

La prise en compte de la crème de vase lors du calage simple implique d'imposer un coefficient de frottement moindre au niveau de la zone sur laquelle on suppose sa présence, en fonction du débit de la Loire.

#### 3.3.2.1. EMPRISE LATERALE

Suite à la visite de terrain réalisée le 11 mars 2009, nous avons décidé de modifier l'emprise latérale d'application de la crème de vase. En effet, en plus d'appliquer un frottement représentatif de la présence de crème de vase au fond du lit mineur, nous faisons de même sur toutes les zones marnantes situées de part et d'autre du lit mineur, depuis l'aval de Bilho jusqu'à Nantes, entre les cotes +1,0 m CM et +4,86 m CM.

Au fond du lit mineur, l'application du frottement représentatif de la présence de crème de vase suppose avant tout de définir l'emprise latérale de la crème de vase en fonction de sa position le long de l'estuaire. La définition de cette emprise latérale se fait par l'intermédiaire d'une cote limite en dessous de laquelle est appliqué ce frottement moindre. Les cotes retenues sont les suivantes :

- Du PK -12 au PK 2 : Zlim = -7,0 m CM ;
- Au PK 11 : Zlim = -5,0 m CM ;
- Du PK 13 au PK 14,5 : Zlim = -3,5 m CM ;
- Du PK 17,5 au PK 25 : Zlim = -2,0 m CM ;
- Du PK 26 au PK 38 : Zlim = -2,5 m CM ;
- Du PK 39 au PK 61 : Zlim = -3,0 m CM.

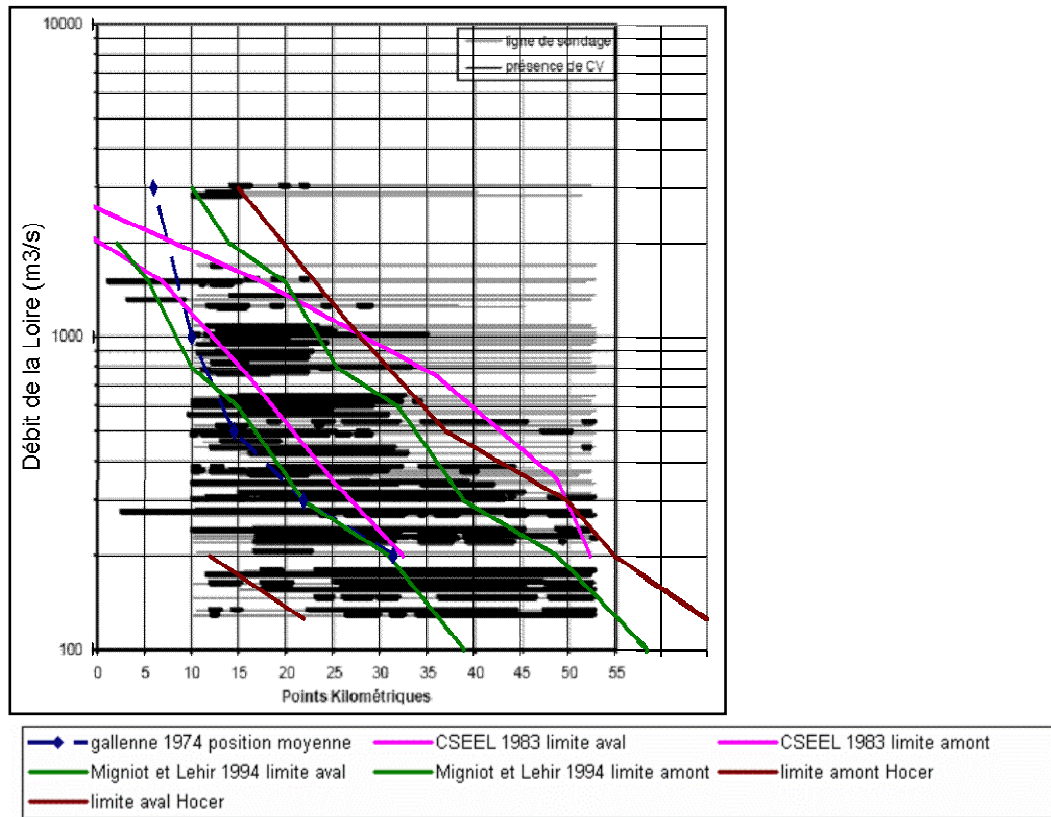
Entre chacun de ces PK, la cote limite est ensuite interpolée à partir des valeurs encadrantes.

#### 3.3.2.2. EMPRISE LONGITUDINALE

Il est ensuite nécessaire de définir, pour chaque débit considéré, l'emprise longitudinale sur laquelle on suppose la présence de crème de vase. Un travail référençant la position de la crème de vase en fonction du débit de la Loire a été réalisé par Hocer dans son étude : « analyse des données relatives à la crème de vase de l'estuaire de la Loire, 2009. Nous avons utilisé une position découlant à la fois des résultats de cette étude (bandes d'échosondeur) et de positions théoriques connues dans la littérature.

##### 3.3.2.2.1. LIMITE AMONT

La limite amont de crème de vase utilisée découle donc de celle matérialisée en marron sur le graphique ci-dessous, sauf pour les débits 800 et 2000 m<sup>3</sup>/s pour lesquels elle correspond désormais au PK le plus faible des observations faites pour ces débits :



**Fig. 9. POSITION DE LA CREME DE VASE FONCTION DU DEBIT DE LA LOIRE**

Les points kilométriques définissant ces limites sont extrapolés pour les faibles débits (< 200 m<sup>3</sup>/s) pour lesquels on conserve la taille de lentille observée vers 200 m<sup>3</sup>/s.

**3.3.2.2.2. LIMITE AVAL**

Elle constitue quant à elle, en plus d'une représentation de la longueur de la lentille, un paramètre de calage à part entière.

**3.3.2.2.3. EMPRISE RESULTANTE**

L'emprise longitudinale de crême de vase considérée pour chacun des cinq débits étudiés est la suivante :

<b>Débit (m<sup>3</sup>/s)</b>	125	200	800	2000	4000
<b>Limite aval (PK)</b>	17,5	13,0	2,0	-5,0	-12,0
<b>Limite amont (PK)</b>	60,0	56,5	22,0	13,0	11,0



La valeur du coefficient de frottement appliqué sur ces zones est de 0,00002 mètres.

### 3.4. METHODOLOGIE DE CALAGE

Le calage des niveaux s'effectue sur 5 périodes de débits représentatives de débits de 125, 200, 800, 2000 et 4000 m<sup>3</sup>/s pour lesquelles des mesures sont disponibles.

- Du 15 au 31 janvier 2004 pour un débit moyen sur la période d'environ 4000 m<sup>3</sup>/s ;
- Du 6 au 21 décembre 2000 pour un débit moyen sur la période d'environ 2000 m<sup>3</sup>/s,
- Du 22 octobre au 6 novembre 2000 pour un débit moyen sur la période d'environ 800 m<sup>3</sup>/s ;
- Du 22 septembre au 7 octobre 2000 pour un débit moyen sur la période d'environ 200 m<sup>3</sup>/s ;
- Du 30 août au 14 septembre 1996 pour un débit moyen sur la période d'environ 125 m<sup>3</sup>/s.

Pour chaque période le calage s'effectue d'abord sur une période de 24 heures pour laquelle la marée est bien représentée à Saint-Nazaire. En effet, le but est de caler les coefficients de frottement entre chaque marégraphe pour obtenir la bonne propagation de la marée à l'intérieur de l'estuaire, il faut donc avoir le meilleur signal possible de marée à l'aval pour cette étape. Une fois le calage effectué sur 24 heures, il est vérifié sur l'ensemble de la période de 15 jours.

#### 3.4.1. PARTIE AVAL A NANTES

Le calage du frottement est effectué en premier lieu sur la période de débit la plus importante pour permettre de caler les valeurs des coefficients de frottement de la manière la plus réaliste possible sur un estuaire sans vase. C'est en effet en période de fort débit que la présence de crème de vase est la plus faible à l'intérieur de l'estuaire interne.

Il est dans un second temps réalisé sur les périodes de débits plus faibles pour lesquels on conserve le frottement calculé précédemment en débit fort mais sur lequel on applique, pour chacun des quatre autres débits considérés (2000, 800, 200 et 125 m<sup>3</sup>/s), une nouvelle valeur du frottement au niveau des zones sur lesquelles on suppose la présence de crème de vase.

La première période choisie pour caler le frottement « sans crème de vase » est donc la période du 15 au 31 janvier 2004 pour un débit moyen d'environ 4 000 m<sup>3</sup>/s sur toute la période.

Sur la base de la carte de frottement établie précédemment, le modèle est alors testé sur les quatre autres périodes de calage en ajoutant la crème de vase à sa position théorique en fonction du débit.

#### 3.4.2. PARTIE AMONT A L'ENTREE DE NANTES (PK 53)

Sur la partie amont, le calage se fait classiquement sur la valeur du coefficient de frottement à appliquer pour obtenir les niveaux d'eau observés. On accepte de modifier les

coefficients de frottement sur cette partie amont en fonction du débit étant donné la représentation simplifiée du lit et les pertes de charges locales à prendre en compte (seuil, épis, piles de ponts...). Les coefficients sont ajustés pour obtenir la ligne d'eau souhaitée. La cohérence des valeurs appliquées est discutée après.

### 3.5. RESULTATS DU CALAGE

Le tableau des coefficients de frottement obtenus (hors crème de vase) pour les différents débits est présenté ci-dessous :

PK/débits	125 m <sup>3</sup> /s	200 m <sup>3</sup> /s	800 m <sup>3</sup> /s	2000 m <sup>3</sup> /s	4000 m <sup>3</sup> /s	frottement
AVAL	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	nikuradse
PK11	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	nikuradse
PK13	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	nikuradse
PK14.5-10m	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	nikuradse
PK14.5	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	nikuradse
PK25	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	nikuradse
PK38	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	nikuradse
PK52	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	nikuradse
PK52.75	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	nikuradse
PK53	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	nikuradse
PK53.75	0.4	1	0.4	0.4	1	nikuradse
PK56	0.8	2	0.8	0.8	2	nikuradse
PK56.5	0.6	0.6	0.6	0.6	0.1	nikuradse
PK61	0.6	0.6	0.6	0.6	0.1	nikuradse
PK61+10m	23	23	27	27	33	Strickler
PK62.5	23	23	27	27	33	Strickler
PK70.5	23	23	27	27	33	Strickler
PK72	90	60	42	40	51	Strickler
AMONT	90	60	42	40	51	Strickler

Les cartes de frottement résultantes tenant compte de la crème de vase sont présentées sur les **figures 2.1 à 2.5**.

#### 3.5.1. RESULTATS DE CALAGE

Les résultats sont présentés sur 24 heures et sur 15 jours pour les débits de :

- 4000 m<sup>3</sup>/s : **figures 2.6 à 2.21**
- 2000 m<sup>3</sup>/s : **figures 2.22 à 2.37**
- 800 m<sup>3</sup>/s : **figures 2.38 à 2.53**
- 200 m<sup>3</sup>/s : **figures 2.54 à 2.69**
- 125 m<sup>3</sup>/s : **figures 2.70 à 2.85**

On peut séparer le modèle en 2 parties:

- La partie aval de Nantes: zone d'intérêt de recirculation estuarienne

- La partie amont de Nantes : zone modélisée pour conserver le volume oscillant

Sur la partie aval de Nantes :

On observe sur le calage de la propagation (période de 24 heures), une bonne déformation de l'onde de marée entre Saint-Nazaire et Le Pellerin quel que soit le débit.

Les mesures au marégraphe de Nantes sont bien reproduites pour les débits de 125, 200 et 800 m<sup>3</sup>/s, par contre elles le sont moins pour les débits de crue. Les pleines mers sont systématiquement trop hautes, ce qui est quasi impossible à régler avec du frottement si l'amplitude de marée est par contre respectée.

Deux faits peuvent expliquer cela :

- Les fonds durs pouvant actuellement inclure une certaine épaisseur de vase qui ne devrait pas être présente en crue peut impliquer un rehaussement du niveau de pleine mer.
- Nous avons appris suite au calage, que le marégraphe dit de « Nantes » dans les fichiers du Grand Port Maritime de Nantes-Saint-Nazaire, correspond au marégraphe de Chantenay « usine-brulée » et non au marégraphe de Nantes Belem comme supposé jusqu'ici. Le positionnement de Chantenay se trouvant plus à l'aval que celui de Nantes Belem, cela explique le décalage de niveau de pleine mer. L'influence de cette erreur sur le calage est étudiée au chapitre 8.2.

La modélisation sur la période de 15 jours donne le même type de résultats, mais avec l'imperfection des conditions aux limites qui se retrouve généralement dès Saint-Nazaire.

Sur la partie maritime, le frottement a très peu d'influence sur les résultats à Saint-Nazaire. La courbe de marée obtenue à Saint-Nazaire est principalement due à la bathymétrie et aux conditions aux limites. La bathymétrie étant issue des points de sonde du SHOM, il sera difficile d'obtenir mieux actuellement. Si la marée n'est pas « parfaite » à Saint-Nazaire (on constate une dissymétrie récurrente sur les mesures entre revif et déchet, plus ou moins forte selon les périodes, que l'on ne retrouve pas sur les résultats du modèle), de notre avis, cela provient surtout des conditions aux limites. Nous sommes toujours en veille pour l'acquisition possible de meilleures conditions aux limites.

Sur la partie amont de Nantes :

La partie amont à Nantes est beaucoup moins raffinée, elle est principalement modélisée pour représenter le volume oscillant. Sur cette partie, on voit que l'on est obligé de faire varier le coefficient de frottement en fonction du débit. En effet, les pertes de charges dues aux épis, piles de pont, végétation sur le lit majeur, ne sont pas prises en compte dans le maillage et le sont donc dans le frottement.

Par contre, on voit tout de même que l'on arrive à des coefficients de frottement assez déconnectés de la physique pour le tronçon amont lorsque l'on est en étiage. Cela est dû à la bathymétrie qui en nature possède une respiration naturelle du lit à l'échelle des saisons : une bathymétrie d'étiage correspond à un lit incisé et profond, alors qu'une bathymétrie de crue donne un lit large et moins profond. Une seule bathymétrie étant modélisée et ne correspondant pas à une bathymétrie d'étiage (il faudrait d'ailleurs un maillage beaucoup plus fin pour modéliser un lit incisé), il est normal que pour obtenir une ligne d'eau d'étiage, on soit obligé d'appliquer une rugosité très faible.

Le but n'étant pas d'obtenir exactement la ligne d'eau à l'amont de Nantes, mais un volume oscillant réaliste, ces frottements seront revus à la baisse dans le calage couplé.

### 3.6. ANALYSE QUANTITATIVE DU CALAGE

Le calage hydrodynamique est quantifié par des méthodes statistiques d'erreur moyenne quadratique (RMSE), d'écart-type et de pourcentage de temps pendant lequel l'écart entre modèle et mesures respecte un critère X donné (CF(X), POF(X), NOF(X), où X correspond à une erreur acceptable définie par l'utilisateur).

L'erreur quadratique moyenne et l'écart-type sont des variables statistiques classiques qui permettent de caractériser la précision. Le NOS (National Ocean Service) américain a introduit les variables CF, POF, NOF qui apportent quant à elles une nouvelle vision pour quantifier le calage.

CF(X) indique le pourcentage de temps pendant lequel l'erreur est comprise dans des limites acceptables. POF(X) et NOF(X) représentent le pourcentage de temps pendant lequel l'erreur est respectivement supérieure et inférieure à X. POF(2X) et NOF(2X) représentent quant à eux le pourcentage de temps pendant lequel l'erreur est respectivement supérieure et inférieure à 2X, c'est-à-dire considérée comme assez importante.

Variable	Explication
Erreur	L'erreur est définie comme la différence entre les valeurs obtenues par TELEMAC r et les données d : $e_i = r_i - d_i$
RMSE	Erreur quadratique moyenne. $RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N e_i^2}$
Ecart-type	Ecart-type (SD). $SD = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (e_i - \bar{e})^2}$
CF(X)	Fraction (pourcentage) d'erreurs compris dans l'intervalle [-X ;X]
POF(X)	Fraction (pourcentage) d'erreurs supérieures à X
NOF(X)	Fraction (pourcentage) d'erreurs inférieures à -X

Pour chacun des débits étudiés (4000, 2000, 800, 200 et 125 m<sup>3</sup>/s), ces différentes variables sont calculées dans un premier temps sur une période de 24 heures pour laquelle la marée est bien représentée par le modèle à Saint-Nazaire, ce qui permet de valider la propagation dans l'estuaire de Saint-Nazaire à l'amont. Dans un second temps, ces statistiques ont été effectuées sur la période de quinze jours exploitable, pour estimer la validité du modèle complet (de l'imposition des conditions aux limites au large jusqu'à Ancenis) pour n'importe quel coefficient.

La valeur choisie pour X est 0,20 mètres et la tolérance sur le déphasage en temps entre modèle et mesure est de plus ou moins 10 minutes.

### 3.6.1. DEBIT DE 125 M<sup>3</sup>/S

X=0,2	St-Nazaire	Donges	Cordemais	Le Pellerin	Nantes	Ste-Luce	Mauves	Ancenis
Ecart type	0.03	0.02	0.04	0.04	0.08	0.13	0.08	0.07
RMSE	0.04	0.02	0.04	0.04	0.08	0.17	0.19	0.16
CF(X)	100%	100%	100%	100%	97%	71%	68%	75%
POF(X)	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	25%
NOF(X)	0%	0%	0%	0%	3%	29%	32%	0%
POF(2X)	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
NOF(2X)	0%	0%	0%	0%	0%	0%	1%	0%

Tableau 2 - STATISTIQUES SUR 24 HEURES POUR UN DEBIT DE 125 M<sup>3</sup>/S

X=0,2	St-Nazaire	Donges	Cordemais	Le Pellerin	Nantes	Ste-Luce	Mauves	Ancenis
Ecart type	0.07	0.06	0.06	0.07	0.09	0.16	0.11	0.09
RMSE	0.08	0.06	0.06	0.07	0.09	0.17	0.19	0.15
CF(X)	96%	99%	99%	99%	94%	77%	72%	82%
POF(X)	3%	0%	0%	0%	3%	3%	0%	18%
NOF(X)	1%	1%	1%	1%	3%	20%	28%	0%
POF(2X)	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
NOF(2X)	0%	0%	0%	0%	0%	5%	4%	0%

Tableau 3 - STATISTIQUES SUR 15 JOURS POUR UN DEBIT DE 125 M<sup>3</sup>/S

### 3.6.2. DEBIT DE 200 M<sup>3</sup>/S

X=0,2	St-Nazaire	Donges	Cordemais	Le Pellerin	Nantes	Ste-Luce	Mauves	Ancenis
Ecart type	0.05	0.03	0.04	0.05	0.03	N/A	0.11	0.07
RMSE	0.06	0.04	0.04	0.05	0.03	N/A	0.16	0.08
CF(X)	100%	100%	100%	99%	100%	N/A	83%	100%
POF(X)	0%	0%	0%	1%	0%	N/A	0%	0%
NOF(X)	0%	0%	0%	0%	0%	N/A	17%	0%
POF(2X)	0%	0%	0%	0%	0%	N/A	0%	0%
NOF(2X)	0%	0%	0%	0%	0%	N/A	3%	0%

Tableau 4 - STATISTIQUES SUR 24 HEURES POUR UN DEBIT DE 200 M<sup>3</sup>/S

X=0,2	St-Nazaire	Donges	Cordemais	Le Pellerin	Nantes	Ste-Luce	Mauves	Ancenis
Ecart type	0.10	0.09	0.10	0.10	0.12	N/A	0.14	0.10
RMSE	0.12	0.11	0.10	0.11	0.12	N/A	0.16	0.10
CF(X)	88%	91%	93%	94%	89%	N/A	77%	94%
POF(X)	12%	8%	5%	6%	4%	N/A	4%	6%
NOF(X)	0%	1%	2%	0%	7%	N/A	19%	0%
POF(2X)	0%	0%	0%	1%	1%	N/A	0%	0%
NOF(2X)	0%	0%	0%	0%	0%	N/A	2%	0%

Tableau 5 - STATISTIQUES SUR 15 JOURS POUR UN DEBIT DE 200 M<sup>3</sup>/S

### 3.6.3. DEBIT DE 800 M<sup>3</sup>/S

X=0,2	St-Nazaire	Donges	Cordemais	Le Pellerin	Nantes	Ste-Luce	Mauves	Ancenis
Ecart type	0.04	0.03	0.04	0.05	0.02	N/A	0.05	0.03
RMSE	0.04	0.03	0.04	0.05	0.02	N/A	0.06	0.10
CF(X)	100%	100%	100%	100%	100%	N/A	100%	100%
POF(X)	0%	0%	0%	0%	0%	N/A	0%	0%
NOF(X)	0%	0%	0%	0%	0%	N/A	0%	0%
POF(2X)	0%	0%	0%	0%	0%	N/A	0%	0%
NOF(2X)	0%	0%	0%	0%	0%	N/A	0%	0%

Tableau 6 - STATISTIQUES SUR 24 HEURES POUR UN DEBIT DE 800 M<sup>3</sup>/S

X=0,2	St-Nazaire	Donges	Cordemais	Le Pellerin	Nantes	Ste-Luce	Mauves	Ancenis
Ecart type	0.12	0.13	0.12	0.11	0.10	N/A	0.10	0.10
RMSE	0.15	0.15	0.13	0.12	0.11	N/A	0.10	0.10
CF(X)	85%	86%	86%	87%	90%	N/A	93%	100%
POF(X)	15%	13%	11%	12%	10%	N/A	5%	0%
NOF(X)	0%	1%	2%	1%	0%	N/A	2%	0%
POF(2X)	3%	4%	1%	1%	1%	N/A	0%	0%
NOF(2X)	0%	0%	0%	0%	0%	N/A	0%	0%

Tableau 7 - STATISTIQUES SUR 15 JOURS POUR UN DEBIT DE 800 M<sup>3</sup>/S

### 3.6.4. DEBIT DE 2000 M<sup>3</sup>/S

X=0,2	St-Nazaire	Donges	Cordemais	Le Pellerin	Nantes	Ste-Luce	Mauves	Ancenis
Ecart type	0.10	0.11	0.11	0.17	0.23	N/A	0.13	0.04
RMSE	0.11	0.11	0.11	0.18	0.25	N/A	0.13	0.16
CF(X)	91%	92%	92%	73%	57%	N/A	86%	87%
POF(X)	9%	8%	0%	5%	10%	N/A	5%	0%
NOF(X)	0%	0%	8%	22%	34%	N/A	8%	13%
POF(2X)	0%	0%	0%	0%	2%	N/A	0%	0%
NOF(2X)	0%	0%	0%	2%	13%	N/A	0%	0%

Tableau 8 - STATISTIQUES SUR 24 HEURES POUR UN DEBIT DE 2000 M<sup>3</sup>/S

X=0,2	St-Nazaire	Donges	Cordemais	Le Pellerin	Nantes	Ste-Luce	Mauves	Ancenis
Ecart type	0.14	0.14	0.15	0.18	0.18	N/A	0.11	0.07
RMSE	0.00	0.18	0.17	0.17	0.20	N/A	0.00	0.26
CF(X)	73%	79%	81%	74%	72%	N/A	85%	99%
POF(X)	27%	20%	18%	23%	24%	N/A	14%	0%
NOF(X)	0%	0%	1%	3%	5%	N/A	1%	1%
POF(2X)	5%	3%	4%	7%	5%	N/A	0%	0%
NOF(2X)	0%	0%	0%	0%	1%	N/A	0%	0%

Tableau 9 - STATISTIQUES SUR 15 JOURS POUR UN DEBIT DE 2000 M<sup>3</sup>/S

**LOT 1 – PHASE 1: CONSTRUCTION ET CALAGE SIMPLE**3.6.5. DEBIT DE 4000 M<sup>3</sup>/S

X=0,2	St-Nazaire	Donges	Cordemais	Le Pellerin	Nantes	Ste-Luce	Mauves	Ancenis
Ecart type	0.08	0.07	0.06	0.06	0.06	0.13	0.11	0.03
RMSE	0.08	0.07	0.06	0.06	0.26	0.13	0.12	0.04
CF(X)	97%	99%	100%	99%	23%	88%	87%	100%
POF(X)	3%	0%	0%	1%	77%	6%	0%	0%
NOF(X)	0%	1%	0%	0%	0%	6%	13%	0%
POF(2X)	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
NOF(2X)	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%

Tableau 10 - STATISTIQUES SUR 24 HEURES POUR UN DEBIT DE 4000 M<sup>3</sup>/S

X=0,2	St-Nazaire	Donges	Cordemais	Le Pellerin	Nantes	Ste-Luce	Mauves	Ancenis
Ecart type	0.09	0.09	0.09	0.10	0.14	0.16	0.11	0.09
RMSE	0.10	0.09	0.09	0.14	0.40	0.20	0.12	0.10
CF(X)	92%	95%	94%	85%	10%	71%	90%	94%
POF(X)	7%	4%	5%	15%	90%	27%	8%	6%
NOF(X)	0%	1%	1%	0%	0%	2%	1%	0%
POF(2X)	0%	0%	0%	1%	40%	5%	0%	0%
NOF(2X)	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%

Tableau 11 - STATISTIQUES SUR 15 JOURS POUR UN DEBIT DE 4000 M<sup>3</sup>/S

**LOT 1 – PHASE 1: CONSTRUCTION ET CALAGE SIMPLE**

---



---

## 4. VALIDATION HYDRODYNAMIQUE

---

Conformément au cahier des charges, le calage simple en hydrodynamique passe par une étape de validation du modèle.

Ce calcul de validation est effectué sur la période réelle couvrant les mois de septembre et octobre 2007, au cours de laquelle le débit de la Loire varie entre 310 et 862 m<sup>3</sup>/s.

### 4.1. METHODOLOGIE EN DEBIT VARIABLE

Avec le calage, nous avons obtenu cinq cartes de frottement correspondant à 5 débits représentatifs.

Pour simuler une période à débit variable, nous avons créé une bibliothèque de frottement qui correspond à l'interpolation des 5 cartes, tout en tenant compte du déplacement de la crème de vase en fonction du débit.

En effet, comme nous l'avons déjà détaillé dans le calage du modèle, la procédure globale de mise en œuvre du frottement est longue et complexe puisqu'elle intègre les différentes étapes successives :

- Application du frottement au fond considéré dans l'hypothèse de fonds sableux ;
- Affectation du frottement latéral sur les frontières solides du modèle, sur la base du frottement au fond appliqué dans l'hypothèse de fonds sableux ;
- Modification du frottement au fond pour une prise en compte de la présence de crème de vase.

Mise en œuvre à chaque pas de temps du calcul, elle serait donc relativement lourde et coûteuse en ressource informatique. C'est pourquoi il a été décidé de générer au démarrage du calcul une bibliothèque de frottement qui puisse être ensuite utilisée par un simple accès en lecture. Elle a été construite par pas de 25 m<sup>3</sup>/s pour des débits allant de 125 à 4 000 m<sup>3</sup>/s.

Une illustration de l'évolution du frottement en fonction du débit est présentée sur les **figures 3.1 à 3.12**.

### 4.2. RESULTATS DE LA VALIDATION

Les résultats de ce calcul de validation en termes de niveaux d'eau sont présentés sur les **figures 3.13 à 3.20** pour le mois de septembre 2007 et sur les **figures 3.21 à 3.28** pour le mois d'octobre 2007.

Pour des raisons de lisibilité, les graphiques exposés distinguent les mois de septembre et octobre. L'analyse quantitative sur cette période de validation distinguera également les mois de septembre et octobre.

Le modèle reproduit convenablement la propagation de la marée le long de l'estuaire, de Saint-Nazaire à Nantes, que ce soit en termes de phase et de profil global à l'échelle des deux mois de marée modélisés.

Au-delà de Nantes, le constat est plus mitigé puisqu'il existe un déphasage compris entre 20 et 40 minutes au niveau des stations de Sainte-Luce-sur-Loire et Mauves-sur-Loire. (Cependant, le GIP Loire Estuaire examine la possibilité d'un décalage temporel sur les mesures de certains limnigraphes).

A Ancenis, malgré un décalage systématique de 20 à 30 cm entre mesures et modèle, le profil global de la marée à l'échelle des deux mois modélisés est similaire à celui des mesures.

Nous rappelons à ce stade que les bathymétries utilisées à l'amont datent de 1996-2000. L'évolution du lit amont entre 2000 et 2007 n'est pas négligeable. En effet, l'étude menée par le GIP Loire Estuaire : « Programme de restauration de la Loire entre Nantes et les Ponts de Cé - Expertise hydrosédimentaire pour la redéfinition d'un cadre d'objectifs et d'interventions » (Philippe Lefort, 2009), montre clairement que par exemple à Ancenis pour un coefficient 80 et un débit de 800 m<sup>3</sup>/s, les basses mers sont, en 2006, 30cm plus basses que les basses mers obtenues en 1996. A l'aval vers Sainte –Luce c'est par contre l'inverse, les basses mers sont plus hautes en 2006.

Ces évolutions du lit observées entre 1996 et 2006 vont exactement dans le même sens et le même ordre de grandeur que le décalage que trouve le modèle en simulant une période de 2007 sur une bathymétrie de 1996-2000.

#### 4.2.1. ANALYSE QUANTITATIVE

Les résultats de l'analyse quantitative du calage, sont réalisés avec la même valeur pour X que celle employée lors de la phase de calage (0,20 m).

X=0.20m	St-Nazaire	Donges	Cordemais	Le Pellerin	Nantes	Ste-Luce	Mauves	Ancenis
<b>Ecart type</b>	0.08	0.08	0.08	0.09	0.13	0.37	0.21	0.10
<b>RMSE</b>	0.09	0.09	0.08	0.09	0.13	0.37	0.23	0.29
<b>CF(X)</b>	94%	93%	96%	94%	85%	48%	56%	18%
<b>POF(X)</b>	6%	7%	3%	5%	9%	33%	32%	82%
<b>NOF(X)</b>	0%	0%	0%	1%	5%	18%	13%	0%
<b>POF(2X)</b>	0%	0%	0%	0%	1%	11%	1%	5%
<b>NOF(2X)</b>	0%	0%	0%	0%	0%	13%	5%	0%

Tableau 12 - STATISTIQUE POUR LE MOIS DE SEPTEMBRE 2007

**LOT 1 – PHASE 1: CONSTRUCTION ET CALAGE SIMPLE**

X=0.20m	St-Nazaire	Donges	Cordemais	Le Pellerin	Nantes	Ste-Luce	Mauves	Ancenis
<b>Ecart type</b>	0.08	0.08	0.08	0.09	0.13	0.37	0.21	0.10
<b>RMSE</b>	0.09	0.09	0.08	0.09	0.13	0.37	0.23	0.29
<b>CF(X)</b>	94%	93%	96%	94%	85%	48%	56%	18%
<b>POF(X)</b>	6%	7%	3%	5%	9%	33%	32%	82%
<b>NOF(X)</b>	0%	0%	0%	1%	5%	18%	13%	0%
<b>POF(2X)</b>	0%	0%	0%	0%	1%	11%	1%	5%
<b>NOF(2X)</b>	0%	0%	0%	0%	0%	13%	5%	0%

Tableau 13 - STATISTIQUES POUR LE MOIS D'OCTOBRE 2007

Que ce soit sur le mois de septembre ou le mois d'octobre, le pourcentage de temps pendant lequel l'erreur est comprise dans l'intervalle  $[-X ; X]$  est bon de Saint-Nazaire à Nantes avec toutefois une légère décroissance vers l'amont. Cette tendance traduit bien le fait que le modèle reproduit bien le signal de marée à l'échelle des deux mois modélisés, que ce soit en termes d'enveloppe ou en termes de phase. En termes d'amplitude, les écarts existant entre modèle et mesures sont majoritairement inférieurs à 0,20 m à Saint-Nazaire avant de dépasser plus fréquemment ce seuil lorsqu'on se rapproche de Nantes.

Pour la partie amont, les médiocres résultats statistiques obtenus sont dus aux raisons invoquées précédemment car la dynamique de propagation est bien représentée mais hors du paramètre X à cause du décalage bathymétrique entre les années 1996-2000 et 2007.



---

## 5. CALAGE HYDRODYNAMIQUE ET SALINITE

---

Le calage en salinité couplé à l'hydrodynamique s'est effectué sur les mesures des stations fixes pour les périodes d'étiage-débit moyen d'octobre 2000 et de crue de janvier 2004.

Les mesures sont décrites dans le rapport de note de calage du modèle de l'étude effectuée en 2006 pour le compte du GIP Loire Estuaire.

Le calage de la salinité s'effectue principalement par le choix du modèle de turbulence utilisé et des coefficients associés.

3 modèles de turbulence, 3 fonctions d'amortissement et 3 structures de maillage ont été testés :

- Modèle de longueur de mélange de Nézu & Nakagawa avec la fonction d'amortissement de Munk & Anderson
- Modèle de longueur de mélange de Nézu & Nakagawa avec la fonction d'amortissement de Toorman
- Modèle de longueur de mélange de Nézu & Nakagawa avec la fonction d'amortissement de Lefheldt & Bloss
- Modèle K-epsilon (coefficients de Rody)
- Modèle de longueur de mélange multicouche

Il est possible de consulter les résultats de ces modèles dans les notes d'avancement du 27 mars et 7 mai 2009 placées en **Annexe 1 et 2**.

Seul le modèle de turbulence vertical retenu à l'issue du calage et les résultats associés sont décrits ici.

Le modèle multicouche a été retenu à l'issue du calage pour les avantages qu'il procure :

- Bonne représentation des stratifications (en comparaison à la longueur de mélange classique)
- Temps de calcul 2 à 3 fois plus rapide que le modèle K-epsilon
- Robustesse aux forçages aux limites : réponse au frottement et aux forces d'entraînement du vent

## 5.1. MODELE DE TURBULENCE : MODELE MULTICOUCHE

En juillet 2009, SOGREAH a proposé pour les applications sur la Loire estuarienne l'usage d'un modèle de longueur de mélange multicouche tel que ceux utilisés dans les modèles océaniques bi-couches ou multi couches (tel que BIDYN et TRIDYM ...).

Le principe repose sur des principes physiques : Le modèle de longueur de mélange classique consiste à faire l'hypothèse qu'une échelle de la turbulence domine la dynamique de mélange. Cette hypothèse est reprise par les modèles K-L. Seul l'énergie des tourbillons est calculée (K), pas son échelle de dissipation qui est fixée (L).

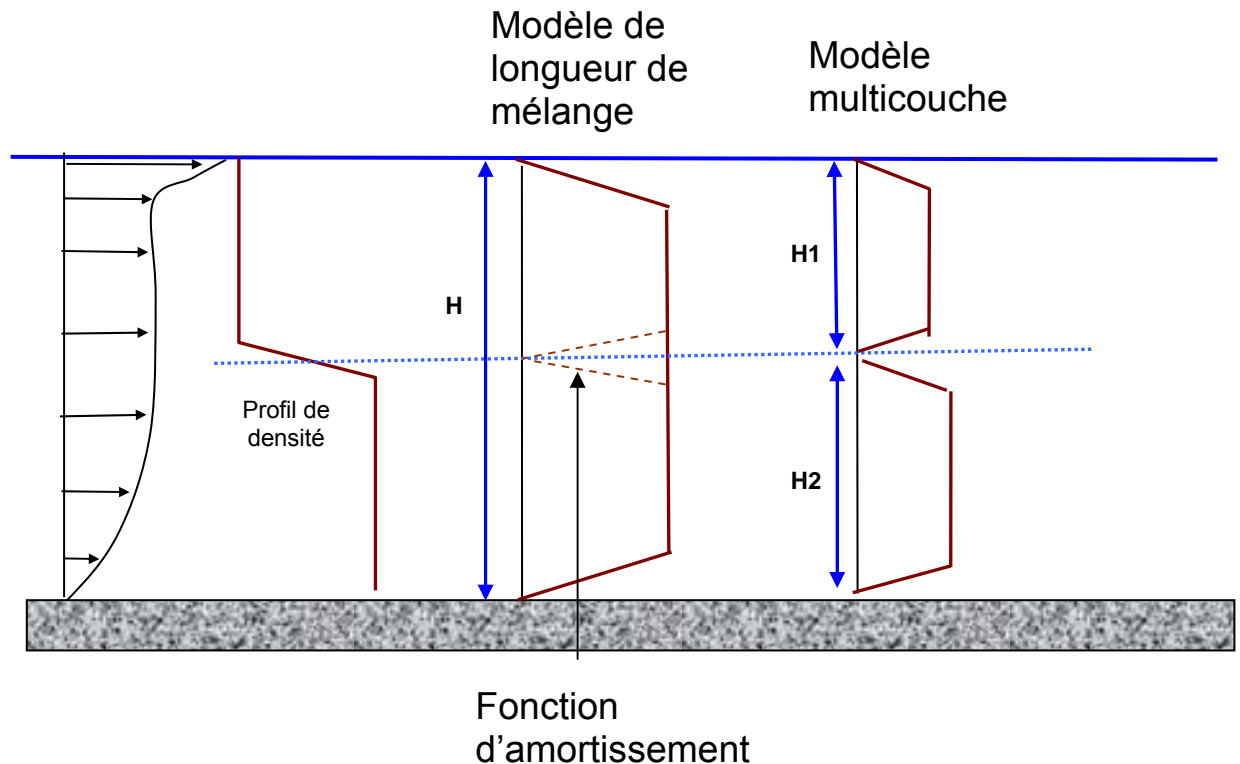
L'application en milieu océanique et fluviale a été développée dans un contexte non stratifié. La longueur de mélange a été déterminée à partir de la source d'émission de cette turbulence : la couche limite de fond. On a alors  $L_m = K * 0.2 * H$  ( $K = \text{cste de Karman} = 0.41$ ).

La prise en compte des effets de stratification dans ce type de modèle a été réalisée au travers de caractéristiques d'inhibition par effet de cisaillement et se traduit par une fonction d'amortissement dont différents auteurs ont développé des formulations (tels que Lehfeldt et Bloss) sur la base de différents jeux de mesures expérimentales ou in situ. Cette fonction s'applique au modèle de turbulence par convolution directe avec la viscosité turbulente.

Cependant, les applications qui sont faites couramment oublient les hypothèses de base retenues. Pour appliquer un modèle de longueur de mélange il faut en principe connaître la taille de l'échelle de dissipation dominante. C'est ce qui est corrigé dans les modèles bicouche océaniques qui servent à représenter l'évolution des thermoclines de très grands bassins océaniques. La longueur de mélange verticale au dessus de la thermocline est conditionnée par l'épaisseur de la thermocline et non pas par l'épaisseur de la hauteur d'eau océanique.

Nous proposons donc de reprendre ce principe afin de l'appliquer au cas estuarien en cas de stratification forte.

L'objet n'est pas de remplacer le rôle de la fonction d'amortissement, mais de tenter de corriger l'évaluation initiale de la longueur de mélange verticale en calculant de manière automatique la bonne échelle de dissipation sur la verticale.



*Fig. 10. SCHEMATISATION DES LONGUEURS DE MELANGE*

### 5.1.1. PRINCIPE TECHNIQUE DU MODELE MULTICOUCHE

Le principe de la longueur de mélange est de mettre en relation la viscosité turbulente à la taille des tourbillons pour une turbulence pleinement développée.

La correction appliquée à la longueur de mélange est basée sur une fonction à seuil. Si la stratification est suffisamment forte, alors les échanges entre les couches supérieure et inférieure sont faibles et la production turbulente verticale dans la couche supérieure est supposée indépendante de la couche inférieure. La longueur de mélange est alors calculée en appliquant la longueur de mélange de manière indépendante dans les deux cas.

La mise en œuvre se fait sur la base de l'analyse du profil vertical du nombre de Richardson.

On recherche les couches définies par  $RI < Cst$  – Cette constante est ajustable mais par une analyse basée sur les gradients de température, nous avons choisi la valeur 0.2.

Plusieurs ouvrages ou publications confirment l'ordre de grandeur choisi avec une valeur de 0.25 :

- E.W.Tedford, J.R. Carpenter, R. Pawlowicz, R. Pieters and G.A. Lawrence (2009), Observation and analysis of shear instability in the Fraser River estuary, Journal of Geophysical Research, Vol. 114
- M. Lesieur (1994), ouvrage: La Turbulence, presse universitaire de Grenoble

Pour chacune de ces couches, on calcule son épaisseur et on applique alors le principe de longueur de mélange.

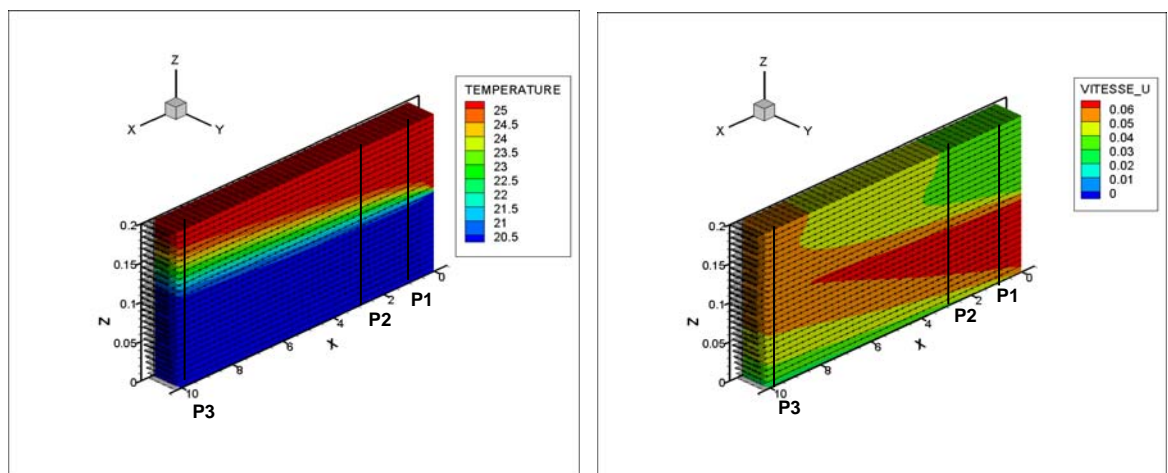
Si le nombre de Richardson est inférieur à 0.2, traduisant un effet faible de la stratification, le modèle n'a pas pour vocation d'agir et c'est le modèle classique de longueur de mélange basé sur la hauteur d'eau qui est appliqué. Dans ce cas, la fonction d'amortissement est appliquée réduisant la diffusion turbulente selon la formulation employée.

Si le nombre de Richardson est supérieur à 0.2, nous considérons l'effet de la stratification comme dominant et toute turbulence verticale inhibée. Le cisaillement est total.

### 5.1.2. VERIFICATION DU BON FONCTIONNEMENT DU MODELE SUR DES EXPERIENCES EN LABORATOIRE

Le modèle de turbulence multicouche a été validé sur des expériences laboratoires en milieu stratifié : P.L. Viollet (1980), Turbulent Mixing in a two Layer stratified shear flow, Second international symposium on stratified flows, The Norwegian Institute of Technology Trondheim, Norway, 24-27 June, 1980.

Il s'agit d'un écoulement à surface libre en canal, dont l'entrée est forcée par un double profil logarithmique en vitesse (séparation par une plaque horizontale à mi-hauteur de l'écoulement) dont la température est de valeur différente dans les 2 zones :



**Fig. 11. ILLUSTRATION DES SIMULATION D'EXPERIENCES EN MILIEU STATIFIE**

Trois profils verticaux de vitesse et de température ont été relevés lors de cette expérience.

Les résultats de la modélisation sur ces 3 profils sont présentés en **figures 4.1 à 4.3** pour 3 modèles de turbulence : longueur de mélange, K-epsilon et modèle multicouche.

On voit clairement que le modèle de longueur de mélange (avec la fonction d'amortissement de Lefelhd & Bloss) a tendance à trop mélanger verticalement la vitesse et la température dès le premier profil. Alors que, la fonction d'amortissement de Lefelhd & Bloss est à notre connaissance une des fonctions d'amortissement qui permet les plus fortes stratifications.

Le modèle K-epsilon et le modèle multi-couches donnent quasiment les mêmes résultats que ce soit en vitesse comme en température avec des profils relativement stratifiés. Les



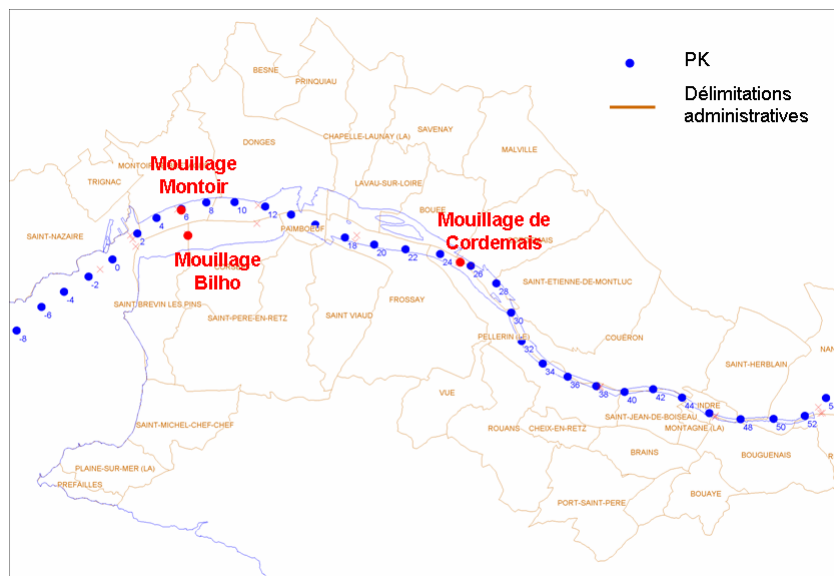
temps de calcul sont par contre entre 2 et 3 fois plus longs pour le modèle de K-epsilon pour lequel il faut résoudre la convection-diffusion de deux variables supplémentaires.

## 5.2. SIMULATION DE LA PERIODE D'OCTOBRE 2000

Les résultats sont présentés sur les **figures 4.4, 4.5 et 4.6**.

La période d'octobre 2000 pour laquelle les débits varient entre 300 et 1100 m<sup>3</sup>/s est très intéressante au niveau des mesures de salinité. En effet, les trois points fixes de mesure (Bilho, Montoir et Cordemais) en fond et surface montrent clairement :

- En vive-eau : une période de mélange importante associée à une amplitude importante de la salinité en aval de l'estuaire. Par contre à Cordemais, malgré la forte amplitude des marées, la salinité remonte assez peu.
- En morte-eau : les mesures sont très stratifiées entre fond et surface, et surtout on assiste à Cordemais à une forte remontée de la salinité par densité lorsque les débits sont faibles.



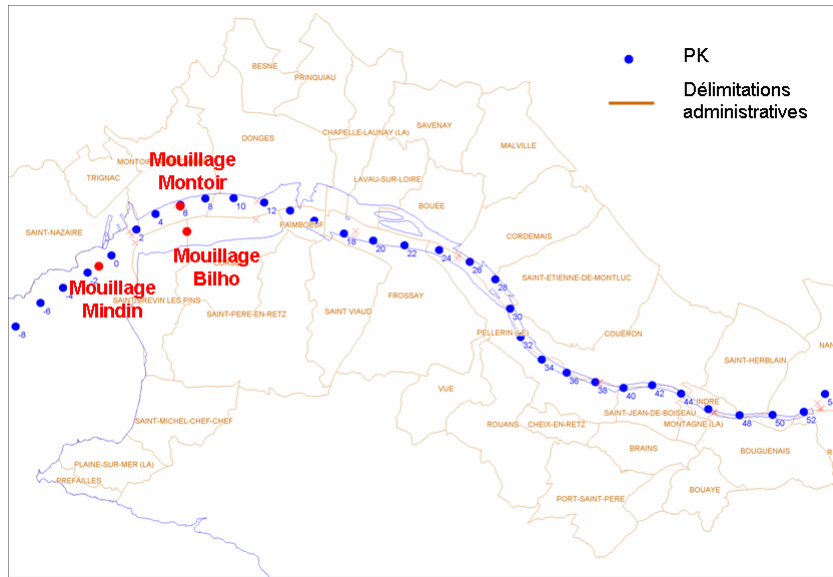
**Fig. 12. POSITION DES STATIONS FIXES DE MESURES EN OCTOBRE 2000**

L'ensemble de ces phénomènes sont réobtenus avec le modèle, seule la salinité à Bilho reste un peu surévaluée.

## 5.3. SIMULATION DE LA PERIODE DE JANVIER 2004

Les résultats sont présentés sur les **figures 4.7, 4.8 et 4.9**.

La période de crue de janvier 2004 montre une forte stratification haline dans le chenal de navigation au niveau de Mindin et Montoir en morte-eau. En vive-eau la stratification est moins importante mais est présente. La salinité, même lors des périodes de débits supérieures 4000 m<sup>3</sup>/s, remonte par densité par le fond du chenal de navigation.



*Fig. 13. POSITION DES STATIONS FIXES EN JANVIER 2004*

Les brusques périodes de mélange vertical sont dues à des coups de vent dépassant les 10 m/s. Le modèle reproduit d'ailleurs assez bien ce mélange dû au vent.

L'ensemble de ces phénomènes sont bien reproduits avec le modèle, seule la salinité sur Bilho reste un peu sous évaluée au fond.

---

## 6. VALIDATION HYDRODYNAMIQUE ET SALINITE

---

La validation hydrodynamique et salinité s'est effectuée sur les profils verticaux mesurés lors des radiales ADCP (ADCP embarqués) durant la crue de janvier 2004.

### 6.1. ANALYSE DES PROFILS VERTICAUX A MONTOIR DANS LE MODELE

Des extractions ont été effectuées au niveau de Montoir dans le chenal de navigation sur la période de Janvier 2004.

Des profils verticaux de vitesse et de salinité ont été sortis de PM-5 à PM +6 heures pour 4 combinaisons de coefficient de marée et de débit (**figures 6.1, 6.2, 6.3 et 6.4**) :

- 2 janvier 2004 : coefficient 42, débit à Montjean : 1310 m<sup>3</sup>/s
- 9 janvier 2004 : coefficient 77, débit à Montjean : 1120 m<sup>3</sup>/s
- 24 janvier 2004 : coefficient 95, débit à Montjean : 4310 m<sup>3</sup>/s
- 29 janvier 2004 : coefficient 41, débit à Montjean : 4240 m<sup>3</sup>/s

Cet ensemble de figures décrit le comportement vertical du modèle dans le chenal de navigation en vive-eau et morte-eau pour deux gammes de débits: 1200 et 4200 m<sup>3</sup>/s.

Le comportement du modèle est conforme aux attentes avec notamment de fortes inversions de vitesse dans la partie inférieure de la colonne d'eau lors des périodes de jusant. L'asymétrie flot / jusant est donc très marquée en fond de chenal dans tous les cas, et elle est amoindrie dans le cas de la vive-eau cumulée avec le débit de pointe de crue ce qui est compréhensible. Cette forte asymétrie de fond s'analyse en parallèle avec les fortes stratifications de salinité observées dans le chenal de navigation à Montoir et décrites dans ces mêmes figures. Ces profils verticaux expliquent de même le fort piégeage sédimentaire dans le chenal de navigation pour ces débits que ce soit dans le modèle comme en nature.

### 6.2. TENTATIVE DE COMPARAISON AUX PROFILS VERTICAUX DE VITESSES A MONTOIR

La comparaison aux mesures n'a pas été triviale étant donné que l'ADCP fixe lors de la campagne de mesure se trouve hors du chenal de navigation, ce qui ne permet pas d'apprécier la dynamique verticale de l'écoulement principal. C'est pourquoi, les figures des radiales de Montoir ont été ajoutées pour compléter l'information. Malheureusement, nous ne disposons pas d'extraction de ces coupes verticales au centre du chenal qui permette d'effectuer une comparaison autre que visuelle.

La position des mesures et le point de comparaison du modèle sont répertoriés dans la **figure 6.5**

Les mesures du 24 janvier 2004 sont comparées dans les **figures 6.6 à 6.10**.

Sur chaque figure est présenté :

- dans l'encadré en haut à gauche : le profil vertical de vitesse au centre du chenal dans le modèle (courbes rouges) avec les résultats à +/- 15 min, le profil vertical hors chenal issu de l'ADCP fixe de Montoir (courbes bleues).
- dans l'encadré à droite : les coupes des radiales en direction et intensité issues de l'ADCP embarqué.

On note un très bon comportement général du modèle que ce soit :

- au niveau du placement de pic d'intensité de vitesse dans la colonne d'eau (**figure 6.6** : en fond de chenal ; **figure 6.7** : au milieu de la colonne d'eau ; **figures 6.8, 6.9 et 6.10** : en surface)
- au niveau de la répartition verticale des directions (lorsqu'il ya de l'intensité), avec même la reproduction de doubles inversions de direction sur la verticale

### 6.3. TENTATIVE DE COMPARAISON AUX PROFILS VERTICAUX DE SALINITE DANS L'ESTUAIRE

La comparaison de profils verticaux de salinité s'est effectuée par rapport à des profils ponctuels issus des campagnes de radiales du 21, 22, 24, 28 et 29 janvier 2004. La position de chaque radiale est présentée en **figure 6.11**.

Les **figures 6.12 et 6.13** comparent les profils de salinité à Mindin et Montoir à pleine mer et basse mer.

Les **figures 6.14 et 6.15** comparent les profils de salinité dans l'estuaire externe en flot et jusant.

Etant donné la diversification spatiale et temporelle des comparaisons en profils verticaux de salinité, il est possible de conclure à une très forte amélioration de la représentation de la salinité par le modèle 3D dans l'estuaire par rapport à l'étude de 2006.

---

## 7. CALAGE HYDRODYNAMIQUE, SALINITE ET SEDIMENTOLOGIE

---

Cette étape de modélisation : hydrodynamique, salinité et sédimentologie en calage non couplé, n'est pas nécessaire pour l'exploitation future du modèle, par contre il s'agit d'une étape nécessaire pour prérégler les paramètres sédimentologiques avant de passer à l'étape du couplage complet. C'est pourquoi seul un calage est réalisé dans cette étape. Le modèle hydrosédimentaire est réellement calé et validé en mode couplé.

### 7.1. DESCRIPTION DES PROCESSUS SEDIMENTAIRES

La prise en compte du sédiment cohésif, comme un traceur actif, agit de manière totalement couplée avec l'hydrodynamique et la salinité : la concentration en sédiment fait varier la densité calculée dans le modèle tandis que les flux d'érosion et de dépôt font évoluer la cote du fond qui est prise en compte à chaque instant par l'hydrodynamique.

Pour déterminer les mouvements des sédiments cohésifs, l'équation de conservation de la masse du sédiment résolue est :

$$\frac{\partial c}{\partial t} + u \frac{\partial c}{\partial x} + v \frac{\partial c}{\partial y} + w \frac{\partial c}{\partial z} + \frac{\partial W_s c}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \varepsilon_x \frac{\partial c}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \varepsilon_y \frac{\partial c}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \varepsilon_z \frac{\partial c}{\partial z} \right)$$

La vitesse de chute du sédiment  $W_s$  représente les effets de la gravité, des forces de traînées visqueuses et des interactions entre particules sur le mouvement des sédiments.

$\varepsilon_x$ ,  $\varepsilon_y$  et  $\varepsilon_z$  sont des coefficients qui caractérisent la diffusion turbulente du sédiment. L'expression de ces coefficients dépend du modèle de turbulence verticale choisi. Le modèle de turbulence utilisé est celui de longueur de mélange multicouches présenté dans le chapitre calage en hydrodynamique et salinité. Cependant des tests ont été effectués avec le modèle k-epsilon et avec un modèle de longueur de mélange classique. Les résultats de ces tests sont présentés dans les notes d'avancement du 5 août et du 9 septembre 2009 qui sont placés en **Annexe 3 et 4**.

Le terme  $\frac{\partial W_s c}{\partial z}$  qui apparaît dans l'équation est traité dans l'étape de diffusion de manière à respecter la physique du phénomène. En effet ( $W_s C$ ) est le flux de sédiments traduisant l'effet descendant de la gravité et il s'oppose à  $\left( \varepsilon_z \frac{\partial c}{\partial z} \right)$ , le flux de sédiments induit par le mouvement turbulent. Le gradient de concentration vertical qui apparaît dans la colonne d'eau résulte de l'équilibre entre ces deux flux.

### 7.1.1. CALCUL DES FLUX D'EROSION

La publication de Sanchez M., Levacher D., « Erosion d'une vase de l'estuaire de la Loire sous l'action du courant », Bull Eng Envir (2008) 67, p597-, nous permet de proposer une loi d'érosion qui est calée sur des mesures effectuées sur une vase de la Loire (Trentemoult) pour six concentrations différentes.

Le taux volumique d'érosion est calculé à l'aide de deux formulations complémentaires : celle de Cerco et al. (2000) pour les faibles taux d'érosion et celle suggérée par Metha et Partheniades (1982) pour les taux d'érosion élevés. Sur la base d'observations expérimentales, le raccordement de ces deux formulations se fait pour une valeur seuil  $E_{v0}$  du taux volumique d'érosion de  $3 \cdot 10^{-7}$  ms<sup>-1</sup> (ce qui représente une érosion d'une couche de sédiment de 1mm par heure). La valeur  $\tau_{oe}$  est rattachée à la rigidité initiale  $\tau_y$  et à la masse volumique  $\rho$  de la vase à travers l'équation :

$$\tau_{oe} = e_1 \tau_y \left( \frac{\rho - \rho_w}{\rho_w} \right)^{e_2}$$

Cette loi permet de définir les couches de vase érodable par une action prolongée du courant (de plusieurs jours). La loi du taux volumique d'érosion s'écrit comme suit :

$$E_v = \begin{cases} E_{v0} (\tau_0 / \tau_{oe})^\alpha, & \text{si } \tau_0 < \tau_{oe} \\ E_{v0} \exp[\alpha(\tau_0 / \tau_{oe} - 1)], & \text{si } \tau_0 \geq \tau_{oe} \end{cases}$$

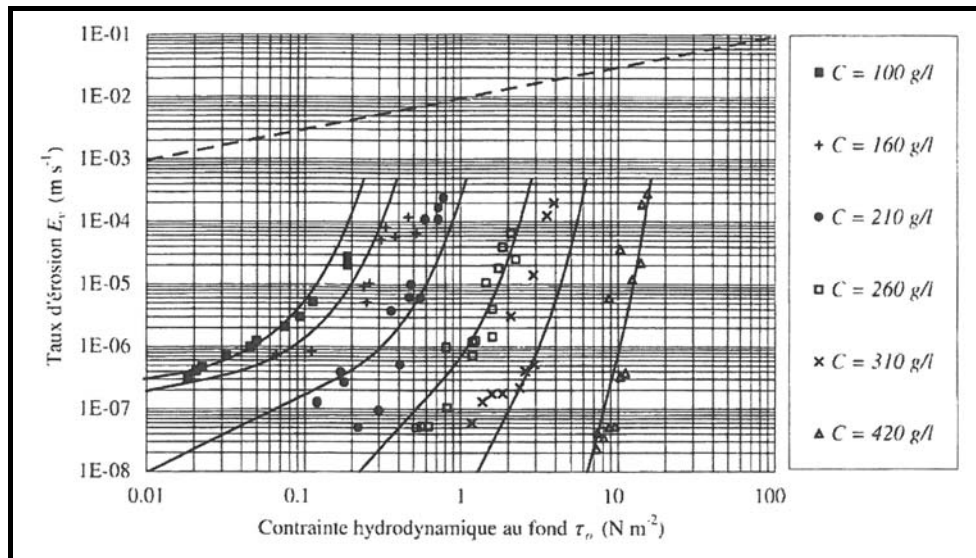
Le paramètre  $\alpha$  est rattaché à  $\tau_{oe}$  par l'expression homogène suivante :

$$\alpha = e_3 \tau_y \left( \frac{\sqrt{\tau_{oe} / \rho_w}}{\nu} \varepsilon \right)$$

Où  $\nu$  est la viscosité cinématique de l'eau et  $\varepsilon$  la rugosité hydraulique de la surface de la vase. Un ajustement non linéaire respectant le critère des moindres carrés permet d'évaluer les constantes empiriques suivantes :

$$e_1=0.294 ; e_2=1.11 ; e_3=0.114$$

La figure ci-dessous montre les points expérimentaux et la loi ajustée (trait continu) :



**Fig. 14. TAUX D'ÉROSION VOLUMIQUE EN FONCTION DE LA CONTRAINTE HYDRODYNAMIQUE, SANCHEZ(2008)**

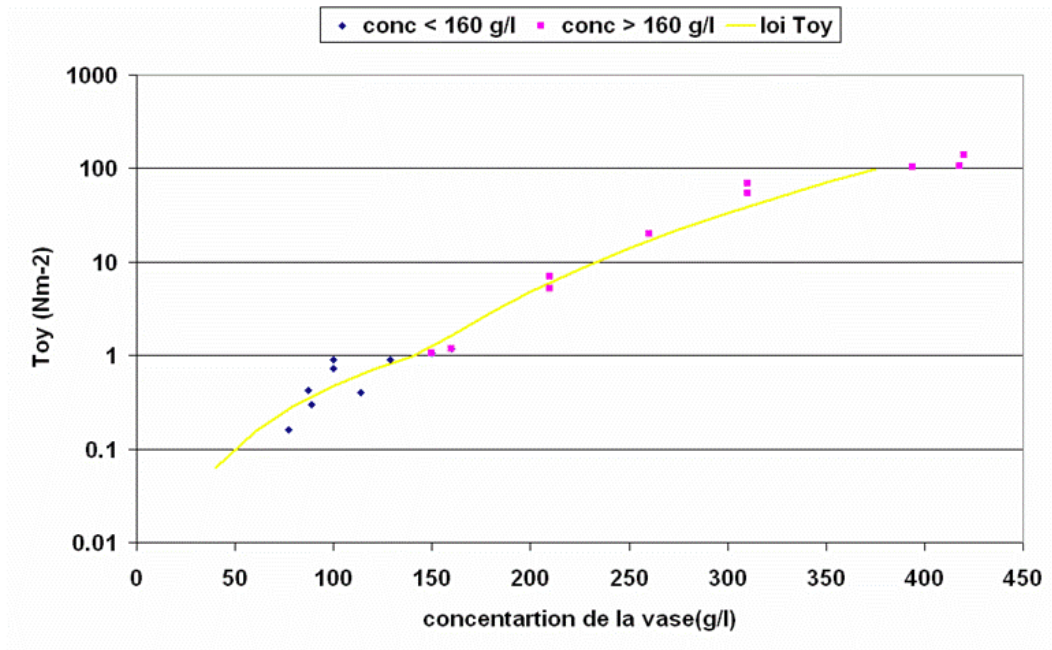
Lors de la réunion du comité d'experts du 22 janvier 2009, les experts ont émis un doute sur la pertinence d'une loi d'érosion sans seuil d'érosion critique et nous ont demandé de retravailler les mesures obtenues par Sanchez afin d'établir une loi d'érosion avec seuil critique. Pour cela plusieurs étapes ont été nécessaires :

Première étape : Définir  $\tau_{oe}$  (contrainte d'érosion) fonction de la concentration du sédiment

La loi donnant la relation entre  $\tau_{oe}$  et  $\tau_{oy}$  (rigidité initiale) a été établie par Sanchez :

$$\tau_{oe} = e_1 \tau_y \left( \frac{\rho - \rho_w}{\rho_w} \right)^{e_2}$$

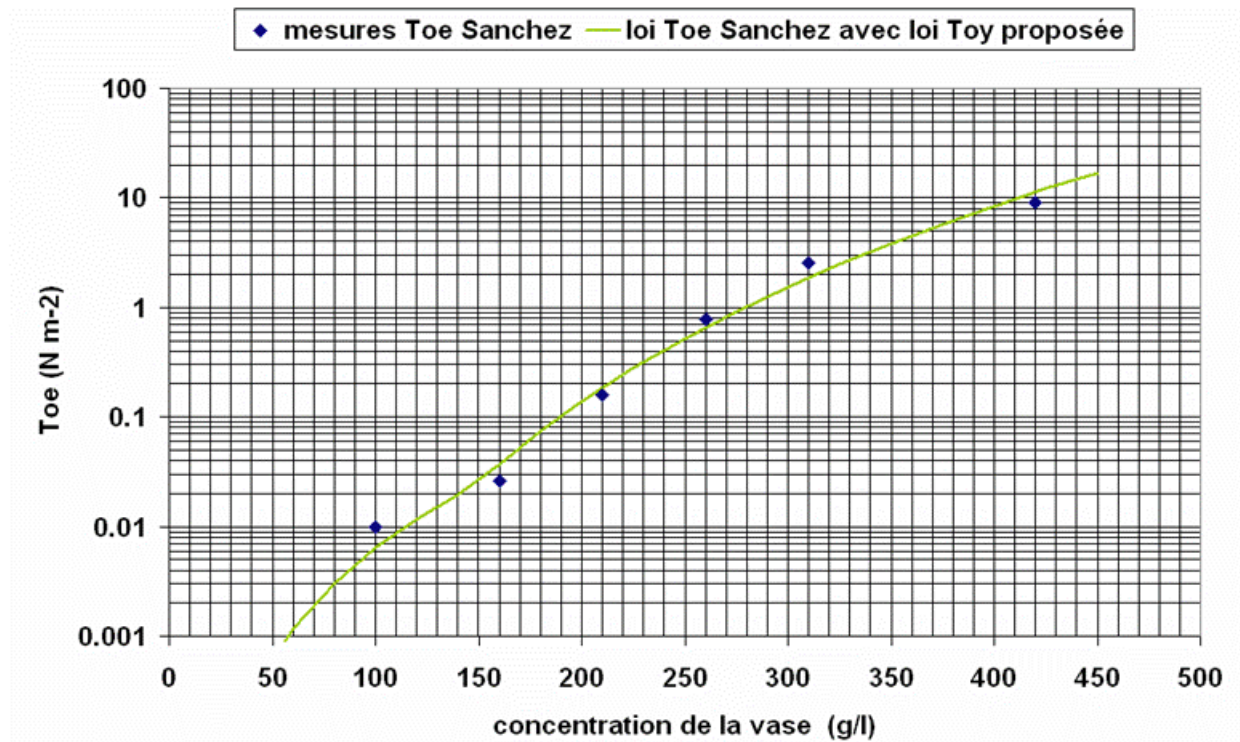
Cependant la loi donnant  $\tau_{oy}$  fonction de la concentration du sol n'a pas été fournie. Nous avons donc réuni les données disponibles pour établir deux lois en puissance, une pour les concentrations supérieures à  $160 \text{ g/l}$  et une autre pour les concentrations inférieures à  $160 \text{ g/l}$  (figure 2).



**Fig. 15. AJUSTEMENT D'UN FONCTION DE RIGIDITE INITIALE FONCTION DE LA CONCENTRATION**

On applique alors cette loi de Toy à la formule Toe de Sanchez :  $\tau_{oe} = e_1 \tau_y \left( \frac{\rho - \rho_w}{\rho_w} \right)^{e_2}$  ,  
 et on vérifie que cet ensemble de lois vérifie les points de mesure de l'expérience de Sanchez.



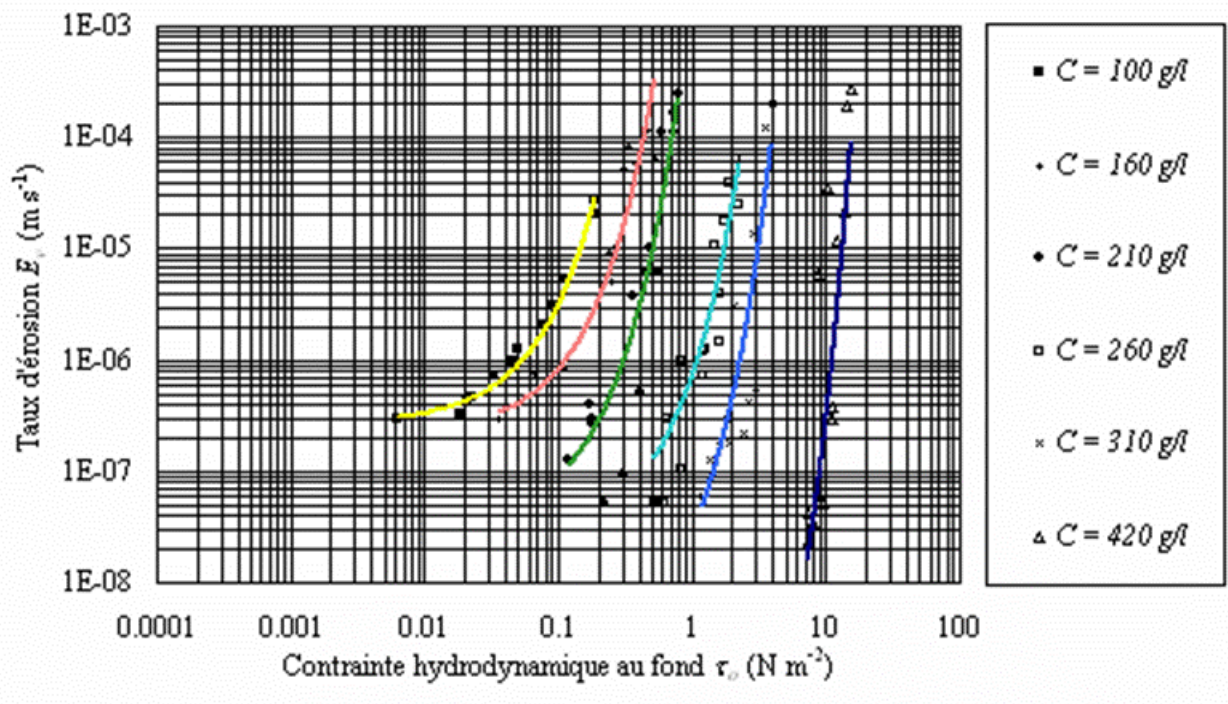


**Fig. 16. VERIFICATION DES CONTRAINTES CRITIQUES D'EROSION CALCULEES AVEC LA LOI DE RIGIDITE INITIALE PROPOSEE**

Il est à noter que pour des vases inférieures à 100 g/l, nous ne disposons pas de mesures et qu'il s'agit d'extrapolation des formules. Les valeurs de Toe pour les vases inférieures à 100g/l resteront donc un paramètre de calage pour le modèle.

Deuxième étape : définir une loi de tendance du taux volumique d'érosion ( $E_v$ ) fonction de la contrainte hydrodynamique au fond ( $T_o$ )

On établit une loi de tendance de la forme  $E_v = a \times \exp^{(b \times T_o)}$  pour chaque série de mesures :



**Fig. 17. AJUSTEMENT DE LA LOI DE TENDANCE DU TAUX D'EROSION**

Il faut alors établir une loi pour le coefficient 'a' fonction de la concentration de la vase et une loi pour le coefficient 'b' fonction de la concentration de la vase.

Le coefficient 'b' est établi grâce à 3 lois exponentielles :

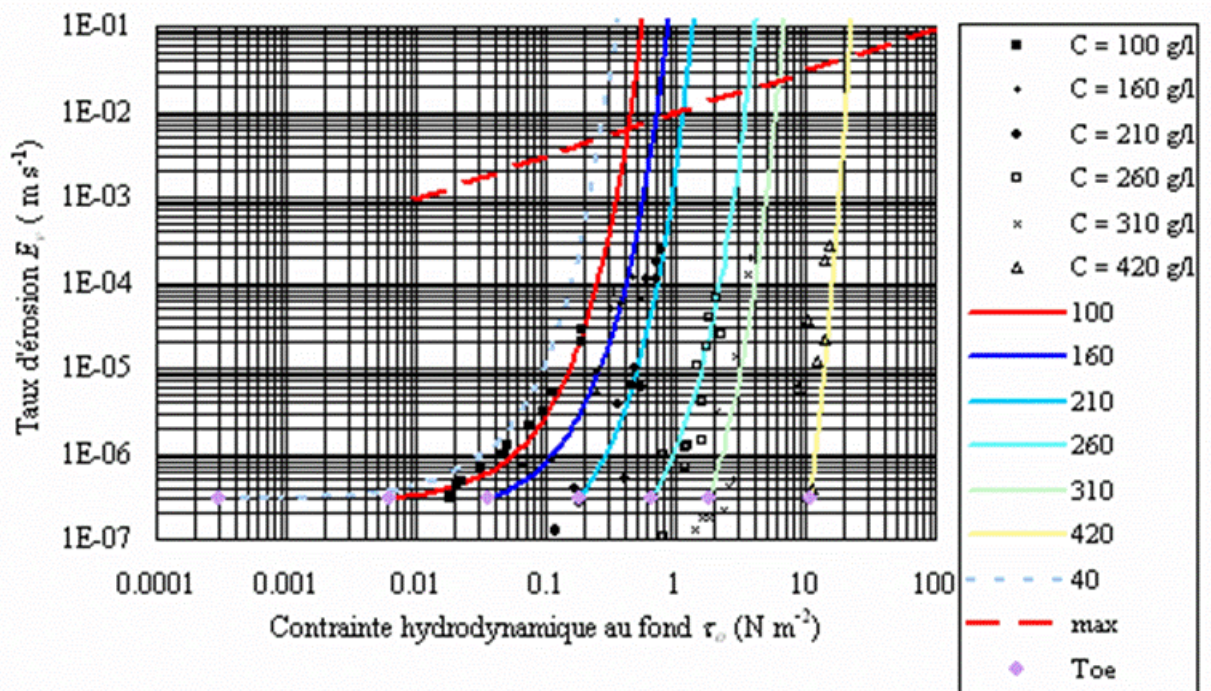
$$b(C_{vase}) = 48.635 \times \exp^{(-0.00713C_{vase})} \quad \text{pour } C_{vase} < 210 \text{ g/l}$$

$$b(C_{vase}) = 1628.587 \times \exp^{(-0.02361C_{vase})} \quad \text{pour } 210 \text{ g/l} < C_{vase} < 260 \text{ g/l}$$

$$b(C_{vase}) = 27.054 \times \exp^{(-0.00763C_{vase})} \quad \text{pour } C_{vase} < 260 \text{ g/l}$$

Le coefficient 'a' est calculé pour obtenir  $E_v = 3 \cdot 10^{-7} \text{ m s}^{-1}$  lorsque  $T_o = T_{oe}$ , qui est la définition de la contrainte critique d'érosion prise par Sanchez.

Il n'y a plus qu'à retracer les lois d'érosion volumique fonction de la contrainte pour les vases de concentration testées par Sanchez et vérifier que cette loi vérifie les mesures :



*Fig. 18. AJUSTEMENT DU TAUX D'EROSION*

Il est à noter que les flux d'érosion sont bornés par la courbe rouge en pointillés qui est le maximum de  $E_v$  d'après Kranenburg et Winterwerp (1997).

## 7.1.2. TASSEMENT

Le modèle de tassement qui est utilisé dans le modèle 3D est basé sur un système de nombre de couches fixes (16) dont la concentration moyenne et la contrainte critique sont fixes dans le temps. Seule la masse dans chaque couche varie dans le temps via une fonction de transfert de masse définie pour chaque couche qui permet de lisser temporellement le tassement par rapport à un modèle dont les couches sont définies par un temps de séjour. Les dépôts provenant de la matière en suspension se font toujours dans la couche supérieure.

La fonction de transfert est de la forme :  $\frac{dh}{dt} = a$  avec « a » un coefficient en  $jours^{-1}$  à caler pour chaque couche.

### 7.1.2.1. CALAGE DU MODELE DE TASSEMENT

La définition du paramètre 'a' a pu être calculée directement en utilisant la publication de Sanchez M., Grimigni P et Delanoe Y., « Distribution des sédiments cohésifs en relation avec la vitesse de la phase solide dans l'estuaire de la Loire », VIII journées Nationales Génie Civil-Génie Côtier, Compiègne 7 et 9 septembre 2004.

En effet, le chapitre 3 de la publication traite de la suspension fortement concentrée ou crème de vase définie comme :  $40 \text{ kg/m}^3 < C < 325 \text{ kg/m}^3$ .

Pour cette gamme de concentration, le débit solide  $Q_c$  à travers une interface de concentration  $C$  constante dans le temps à l'intérieur d'une crème de vase en cours de tassement est donnée par :

$$Q_c = VC \left[ A_2 A_1 \left( \frac{C}{\rho_s} \right)^{A_3} - 1 \right]$$

Avec  $A_1 = 1.60 \text{ m.s}^{-1}$ ,  $A_2 = 72$  et  $A_3 = 0.65$  pour une vase de la Loire.

Cette valeur  $Q_c$  correspond exactement au taux de transfert entre 2 couches du modèle de tassement, qui dans ce cas serait de la forme  $dh/dt=a$ .

La valeur de  $Q_c$  a donc été calculée pour chaque couche du modèle et appliquée pour chaque couche à la place du paramètre « a ».

La vérification de ce paramétrage s'est effectuée sur six essais en colonne de tassement réalisés par Migniot sur une vase de Donges.

- Hauteur initiale 0,5 m , Concentration initiale 100 g/l
- Hauteur initiale 1 m , Concentration initiale 100 g/l
- Hauteur initiale 2 m , Concentration initiale 100 g/l
- Hauteur initiale 0,5m , Concentration initiale 200 g/l
- Hauteur initiale 1 m , Concentration initiale 200 g/l
- Hauteur initiale 2 m , Concentration initiale 200 g/l

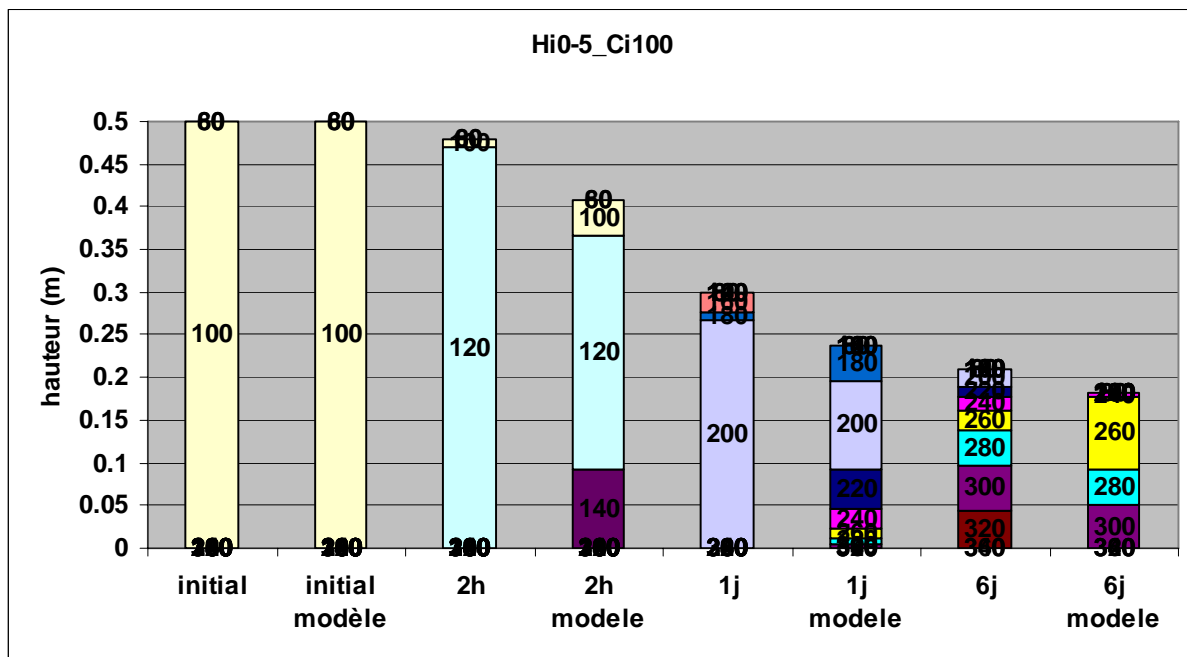


Fig. 19. COMPARAISON DES PROFILS DE CONSOLIDATIONS MESURES ET CEUX CALCULES PAR LE MODELE POUR UNE HAUTEUR INITIALE DE 0,5M ET UNE CONCENTRATION INITIALE DE 100G/L

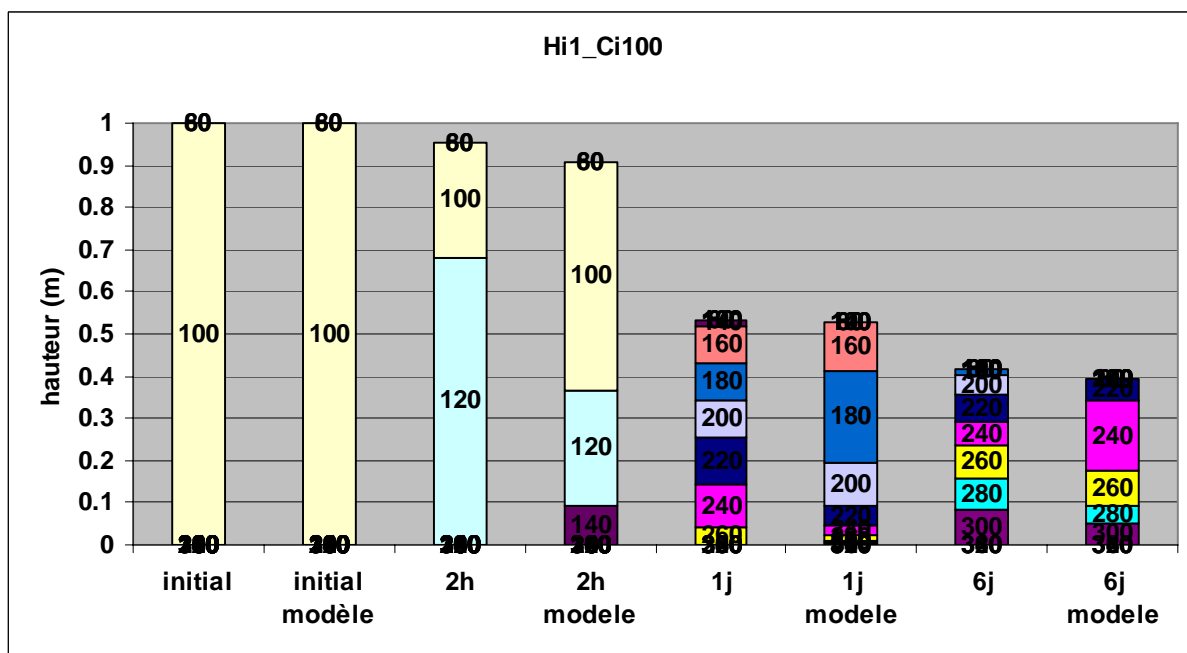


Fig. 20. COMPARAISON DES PROFILS DE CONSOLIDATIONS MESURES ET CEUX CALCULES PAR LE MODELE POUR UNE HAUTEUR INITIALE DE 1M ET UNE CONCENTRATION INITIALE DE 100G/L

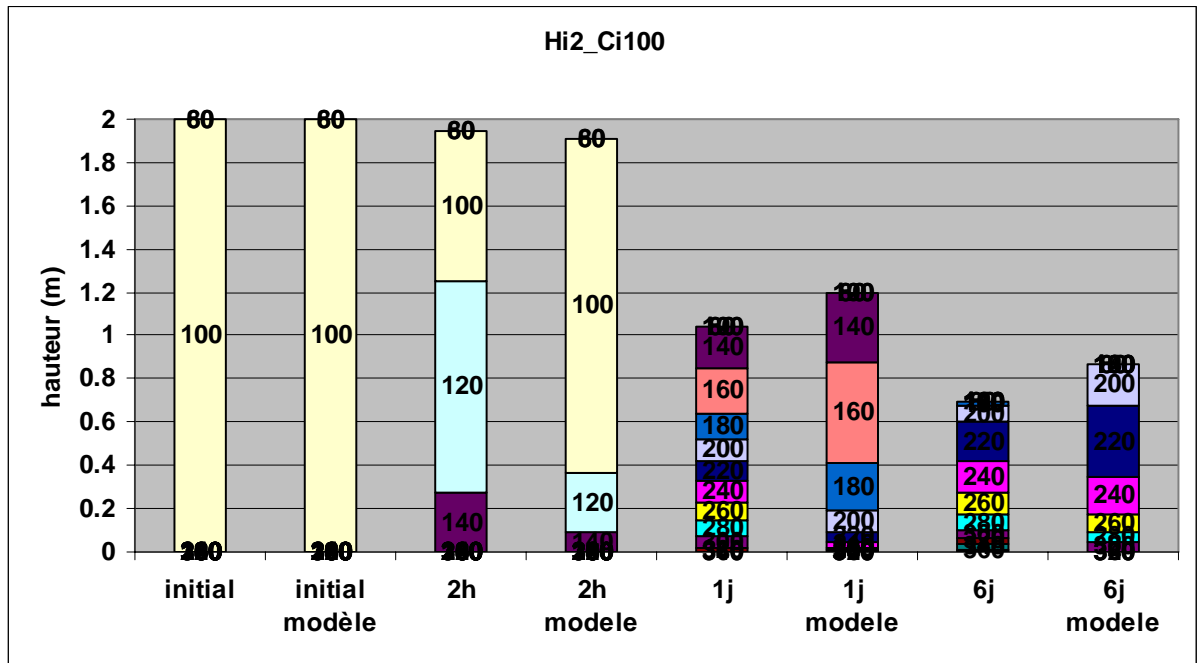


Fig. 21. COMPARAISON DES PROFILS DE CONSOLIDATIONS MESURES ET CEUX CALCULES PAR LE MODELE POUR UNE HAUTEUR INITIALE DE 2M ET UNE CONCENTRATION INITIALE DE 100G/L

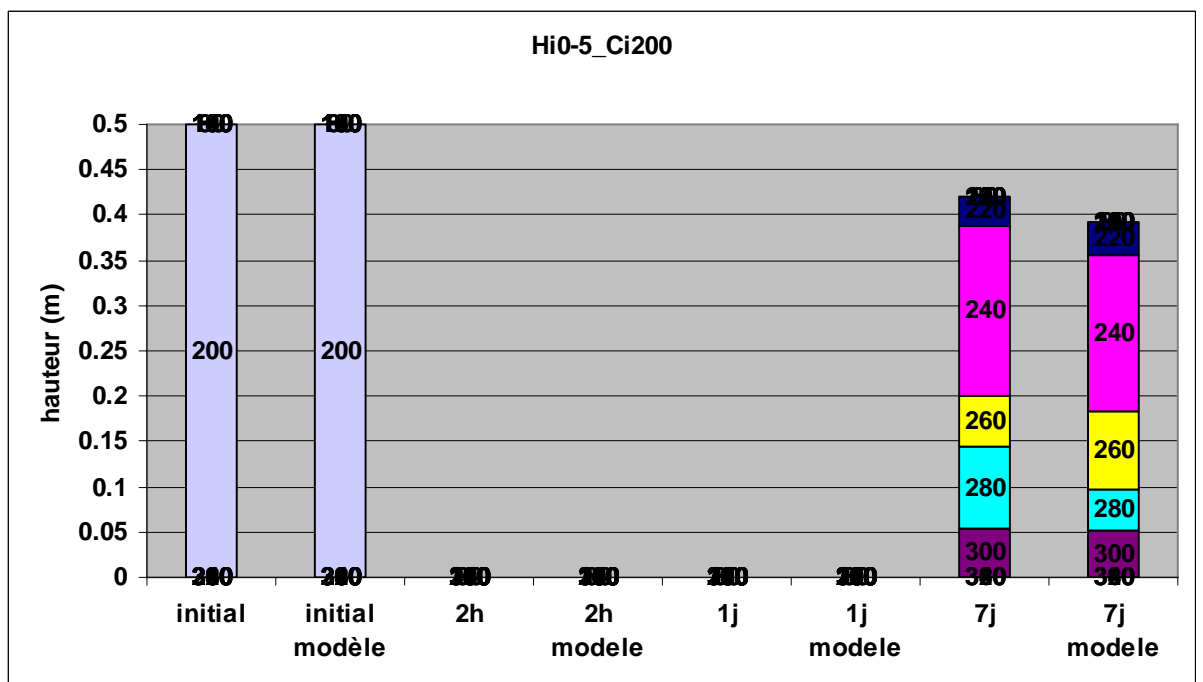
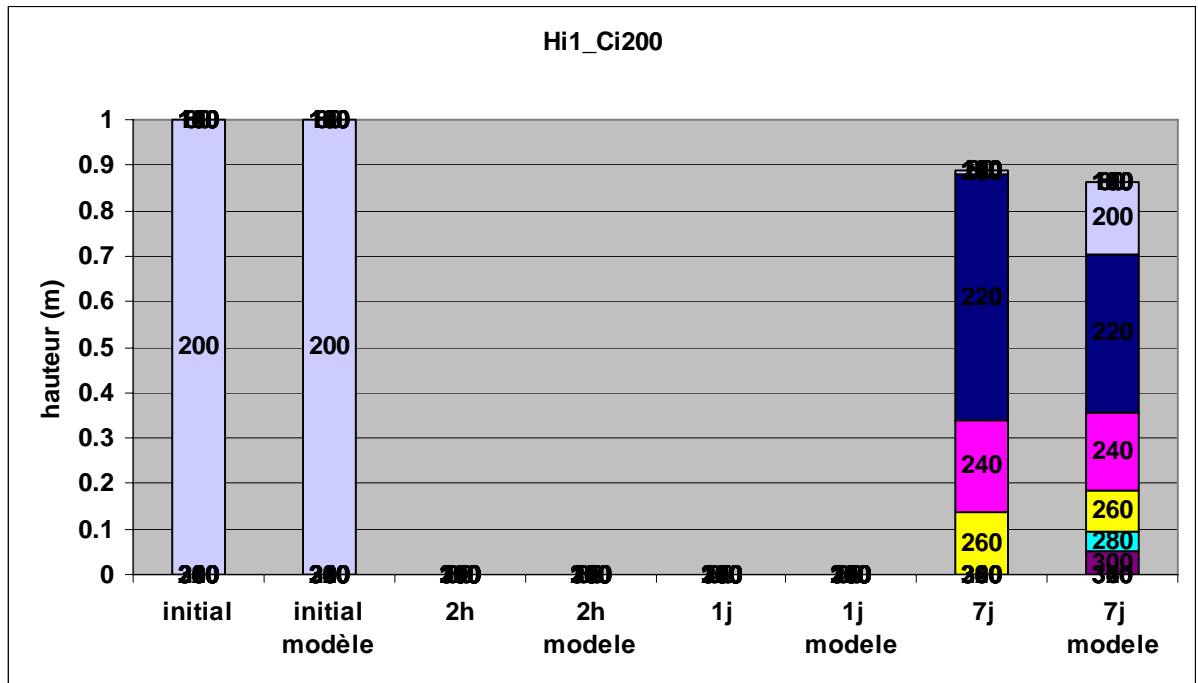
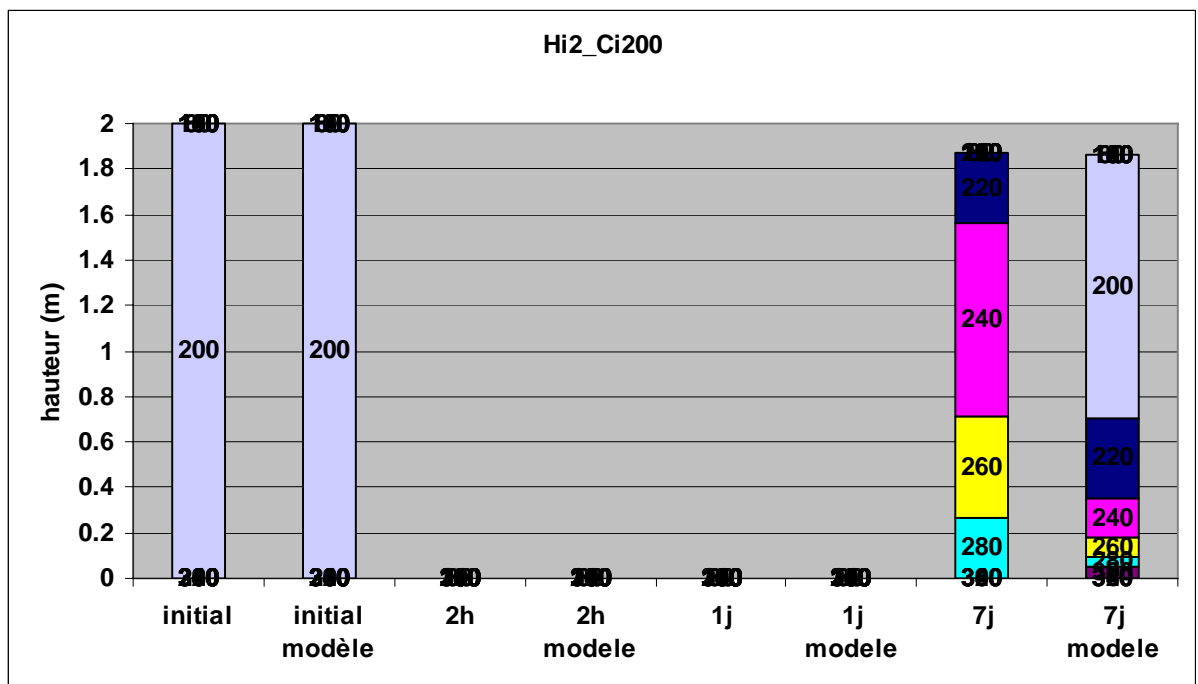


Fig. 22. COMPARAISON DES PROFILS DE CONSOLIDATIONS MESURES ET CEUX CALCULES PAR LE MODELE POUR UNE HAUTEUR INITIALE DE 0,5M ET UNE CONCENTRATION INITIALE DE 200G/L





**Fig. 23. COMPARAISON DES PROFILS DE CONSOLIDATIONS MESURES ET CEUX CALCULES PAR LE MODELE POUR UNE HAUTEUR INITIALE DE 1M ET UNE CONCENTRATION INITIALE DE 200G/L**



**Fig. 24. COMPARAISON DES PROFILS DE CONSOLIDATIONS MESURES ET CEUX CALCULES PAR LE MODELE POUR UNE HAUTEUR INITIALE DE 2M ET UNE CONCENTRATION INITIALE DE 200G/L**

L'ensemble de ces résultats est de très bonne qualité car l'erreur de concentration à une cote donnée dans les colonnes est rarement supérieure à 40g/l en utilisant directement la valeur de  $Q_c$  correspondant à la concentration de la couche. Cette formulation proposée par Sanchez semble être utilisable directement dans le modèle pour des concentrations allant de 40 à 325 g/L.

Sanchez constate que la concentration  $C_{min}$  correspondant au début du phénomène de tassement est proche de 40 g/L. Cette concentration est associée au maximum de  $Q_c$ . La limite de la crème de vase se situera donc dans le modèle à 40 g/l, c'est à dire que la première couche du modèle multicouche sera à 40 g/l.

Toute la partie crème de vase (40 à 325 g/l) sera donc modélisée dans le modèle multicouche de tassement qui est immobile spatialement à ce stade.

Les 16 couches représentant la crème de vase dans le modèle sont discrétisées de la sorte:

Couches 1 à 4 : crème de vase dite liquide : 40 g/l; 60 g/l; 80 g/l; 100g/l

Couches 5 à 13 : crème de vase dite stricto-sensu : 120g/l; 140 g/l; 160g/l; 180g/l; 200g/l; 225g/l; 250 g/l; 275 g/l; 300g/l

Couches 14 à 16 : crème de vase dite consolidée : 325g/l; 350 g/l; 375 g/l

#### 7.1.2.2. AMELIORATION POUR LES CAS DE FAIBLES HAUTEURS DE DEPOT

L'utilisation de ce modèle de tassement dans le modèle 3D a cependant vu rapidement ses limites, en conditions réelles, c'est-à-dire hors colonne de tassement.

En effet, en colonne de tassement, chaque couche de sédiment est remplie d'une quantité non négligeable de sédiment, avec des masses de sédiment bien supérieures aux taux de transfert 'a' calculés. Par contre, lorsque l'on réalise une simulation dans des conditions réelles, à chaque pas de temps les quantités de sédiment déposées sont faibles et bien souvent inférieures aux taux de transfert 'a', ce qui revient à consolider instantanément l'ensemble des dépôts dans la couche inférieure. Les dépôts se retrouvent donc rapidement totalement consolidés.

En plus d'être peu réaliste, tant que les masses de dépôt sont inférieures aux paramètres 'a' de taux de transfert, le tassement devient totalement lié au pas de temps puisque le passage à la couche inférieure est instantané.

Il convient donc de diminuer les taux de transfert, lorsque les masses dans les couches sont inférieures au temps de transfert 'a'. Nous proposons d'utiliser un taux de transfert de la forme 'ah' avec h la hauteur de dépôt dans la couche, tant que 'ah' est inférieur à 'a'.

Pour rester cohérent avec les taux de transfert 'a' calculés par Sanchez, un paramètre 'b' sera utilisé : ainsi le taux de transfert entre chaque couche sera :

$dh/dt = a \min(1, h/b)$  ce qui signifie que pour une hauteur  $> b$  on a une loi de la forme  $dh/dt = a$  et pour une hauteur  $< b$  on a une loi de la forme  $dh/dt = a/b h$

Nous avons calé le paramètre 'b' à la valeur 0,25 m sur les mesures de concentration moyenne des colonnes ayant les hauteurs les plus faibles et les concentrations les plus faibles en favorisant la bonne représentation des processus de tassement à l'ordre de la journée :



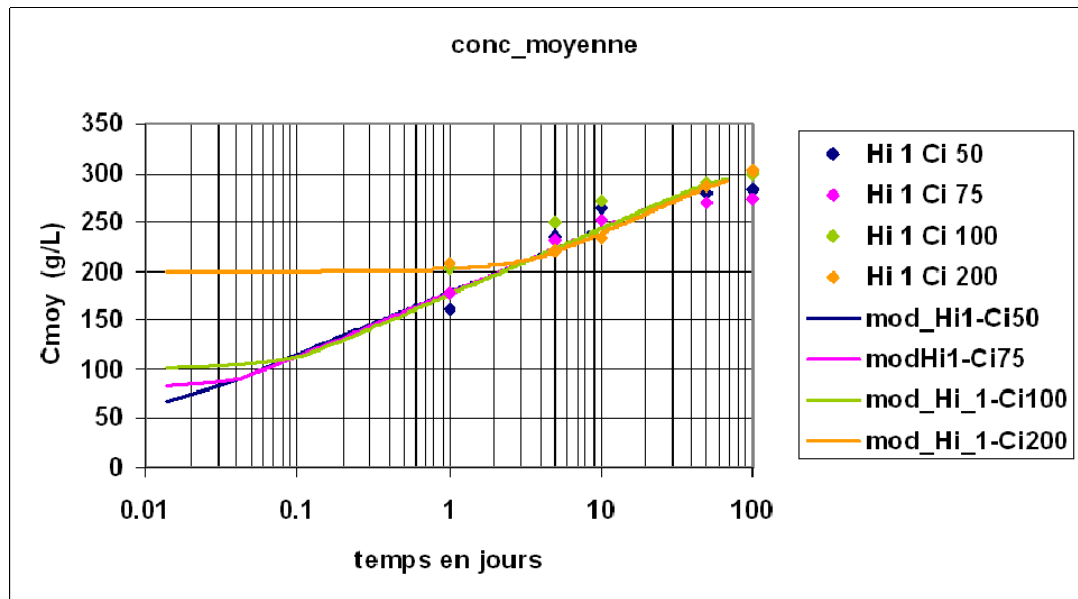


Fig. 25. **CONCENTRATION MOYENNE DES COLONNES AYANT UNE HAUTEUR INITIALE DE 1 METRE**

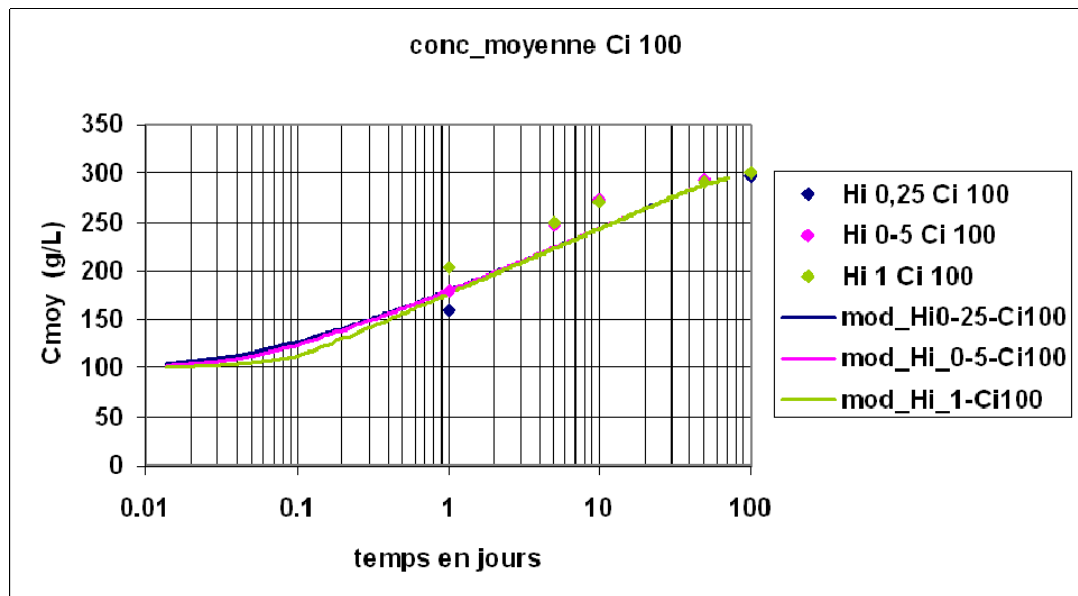


Fig. 26. **CONCENTRATION MOYENNE DES COLONNES AYANT UNE CONCENTRATION INITIALE DE 100 G/L**

### 7.1.3. CALCUL DES FLUX DE DEPOT

L'interface « suspension / crème de vase », qui correspond dans le modèle à l'interface « eau / sol », est définie par une concentration fixe de 40 g/l, pour être en accord avec le modèle de tassement et la théorie de Sanchez qui constate que la concentration  $C_{min}$  correspondant au début du phénomène de tassement est proche de 40 g/l.

Le flux de dépôt entre le fond de la partie en suspension et la première couche du sol sera donc calculé de manière à respecter cette définition d'interface. Il y aura donc transfert de matière dès que la concentration du sédiment au fond de la phase en suspension dépasse 40 g/l.

Le calcul du flux de dépôt est en accord avec le flux descendant dans la colonne d'eau :

$$\text{Flux de dépôt} = W_s C_{\text{fond}}$$

#### 7.1.4. VITESSE DE CHUTE

##### 7.1.4.1. MESURES DISPONIBLES

Actuellement, trois campagnes de vitesses de chute effectuées avec le tube d'Owen par HOCER sont disponibles. Ces campagnes ont été réalisées sur différents sites de l'estuaire pour des conditions variables de débit et de salinité.

La première campagne a été réalisée du 8 au 12 Décembre 2000, débit 2390 à 2060 m<sup>3</sup>/s, coefficient de marée 62 à 100



**Fig. 27. POSITION DES POINTS DE MESURE DE VITESSE DE CHUTE LORS DE LA CAMPAGNE DE DECEMBRE 2000**

Elle a fourni des résultats cohérents et solides utilisés dans la modélisation de 2006 et mis en évidence sur quelques points une accélération des vitesses de chute lorsque le sédiment passait de l'eau douce à l'eau salée à concentration en MES constante. Cela nous a amenés en 2006 à améliorer notre formulation de la vitesse de chute et à augmenter les dépôts à l'aval nous rapprochant ainsi des observations de terrain.

Suite à ce travail, le GIP Loire Estuaire a fait procéder à deux nouvelles campagnes de mesures en 2008 à partir de recommandations faites par Sogreah pour explorer cet effet de la salinité sur la vitesse de chute des sédiments sur une large gamme de concentrations.

Il s'agit de la campagne du 5 au 7 mai 2008 : débit 1520 à 1250 m<sup>3</sup>/s, coefficient de marée 100 à 104



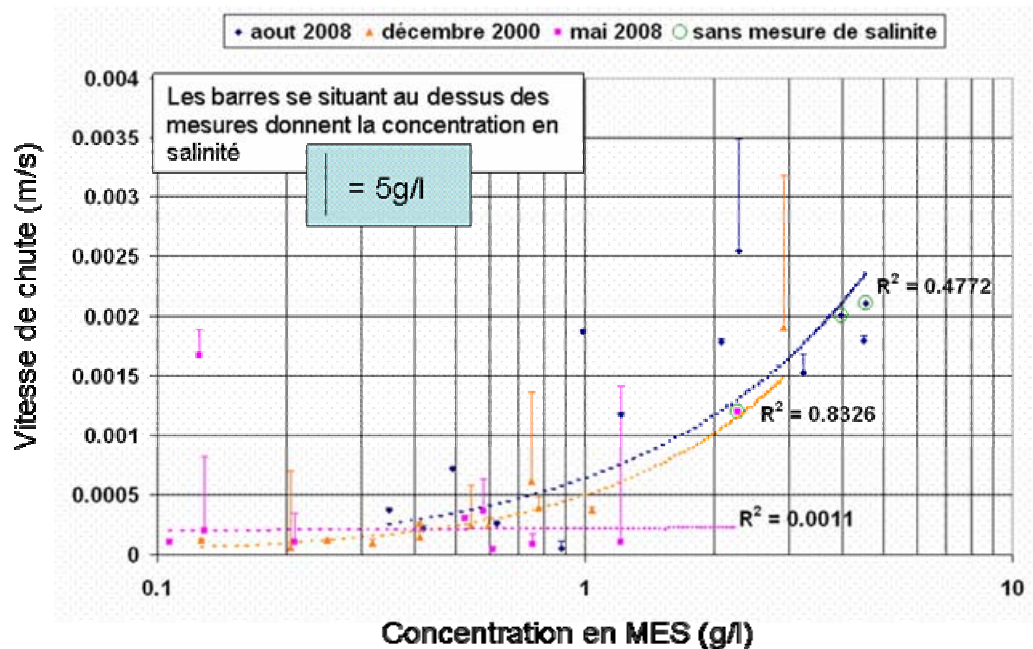
*Fig. 28. POSITION DES POINTS DE MESURE DE VITESSE DE CHUTE LORS DE LA CAMPAGNE DE MAI 2008*

Et de la campagne du 18 au 20 aout 2008 : débit 296 à 275 m<sup>3</sup>/s, coefficient de marée 91 à 93



*Fig. 29. POSITION DES POINTS DE MESURE DE VITESSE DE CHUTE LORS DE LA CAMPAGNE DE NOVEMBRE 2008*

L'ensemble des mesures sont reportées sur le graphique suivant. Une courbe de tendance en loi puissance a été ajoutée pour chaque campagne de mesure. Une barre au dessus de chaque mesure donne l'importance de la salinité du prélèvement.



**Fig. 30. VARIATION DES VITESSES DE CHUTE EN FONCTION DE LA CONCENTRATION ET DE LA SALINITE (ECHELLE SEMI-LOG)**

- MESURES DE MAI 2008 :

La cohérence des nouvelles mesures paraît très faible au regard des précédentes. En effet un coefficient de corrélation de 0,83 avait été obtenu en 2000 y compris avec les mesures en eau salée. Ce coefficient tombe à 0 pour la campagne de mai 2008 pour laquelle on n'observe aucune influence de la concentration sur la vitesse de chute. De la même façon, la salinité n'est pas non plus un facteur explicatif des variations mesurées qui peuvent être très importantes aussi bien pour les faibles concentrations (voir les trois points entre 0,1 et 0,2 g/l) que pour les concentrations importantes (voir les 2 points entre 1 et 3 g/l). De plus les vitesses de chute mesurées entre 0,6 et 0,8 g/l semblent anormalement faibles.

- MESURES D'AOUT 2008 :

Sur cette campagne, la corrélation est meilleure que la précédente avec un coefficient atteignant 0,47. La dispersion reste importante d'autant plus que la quasi-totalité des mesures a été effectuée en eau douce.

La dispersion des mesures ne nous permet pas de conclure sur la pertinence ou non d'une loi augmentant la vitesse de chute en fonction de la salinité (la salinité permettant généralement d'accélérer le phénomène de floculation). Nous avons donc décidé de ne pas tenir compte de la salinité pour ajuster une loi empirique.

#### 7.1.4.2. AJUSTEMENT SUR LA LOI DE THORN/ MEHTA

Nous avons calé une loi de vitesse de chute fonction de la concentration, seule. Nous avons choisi pour cela d'utiliser le type de loi proposé par Krone (1962) et utilisé par Thorn (1981)- Mehta (1986) sur l'estuaire de la Severn, dont la forme de loi correspond assez bien à notre jeu de données.



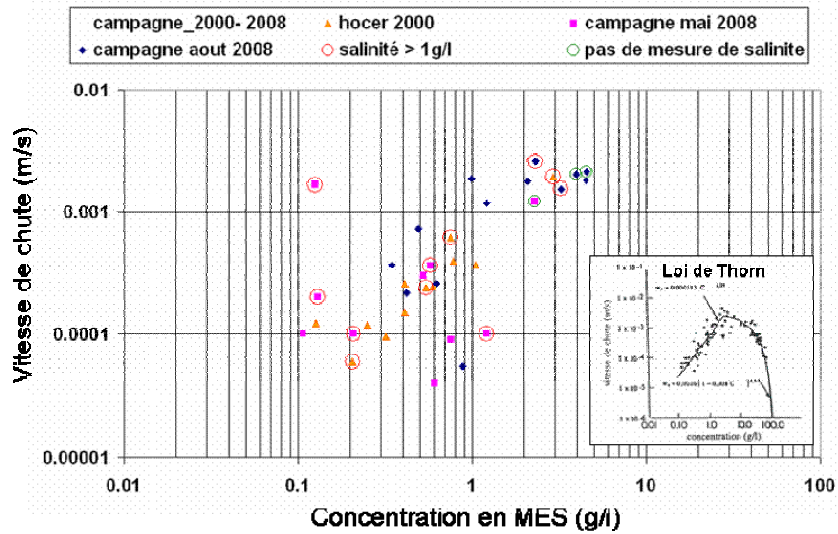


Fig. 31. VARIATION DES VITESSES DE CHUTE EN FONCTION DE LA CONCENTRATION ET DE LA SALINITE

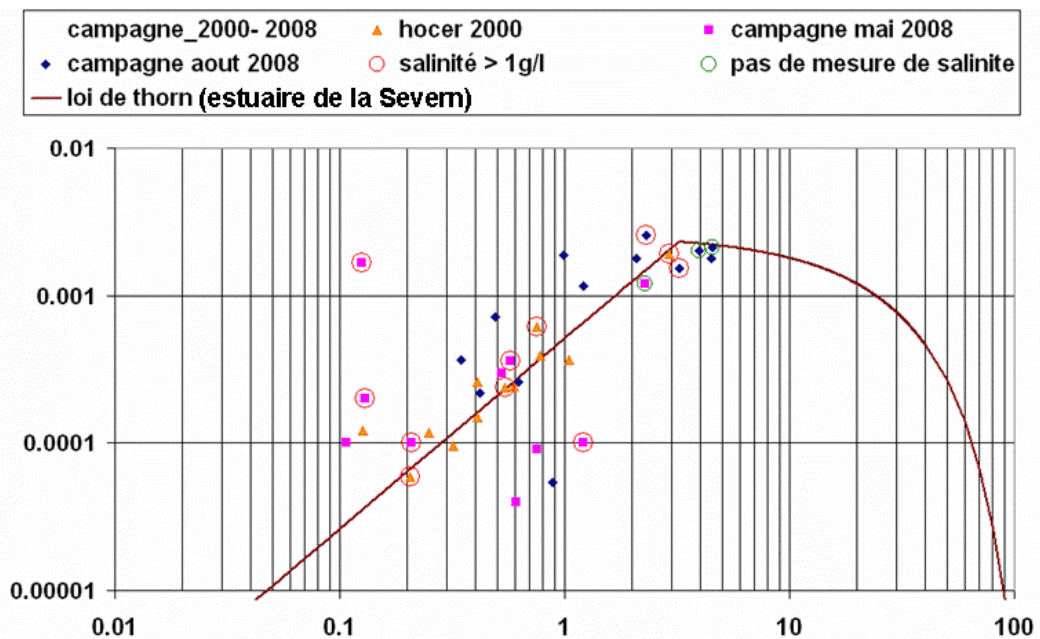


Fig. 32. AJUSTEMENT DE LA LOI DE THORN (1981) SUR LES MESURES (ECHELLE LOG-LOG)

Pour les concentrations modérées, nous obtenons :

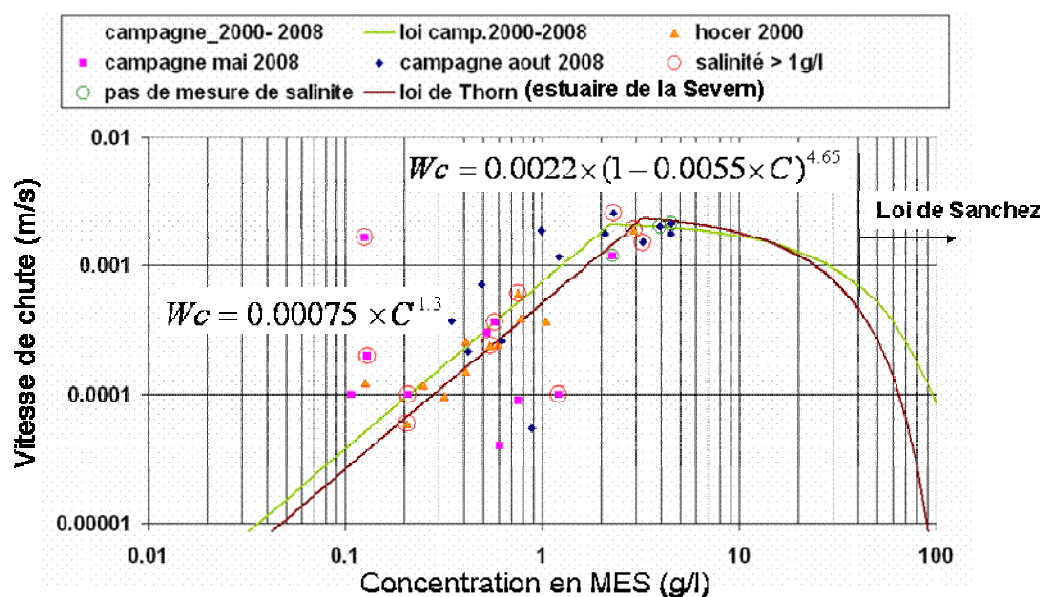
$$W_c = k_1 \times C^{m_1} \text{ avec } m_1 \approx 4/3$$

Pour les concentrations plus fortes, les floes se gênent dans leur chute et la vitesse de chute décroît, on parle de vitesse entravée :

$Wc = Wc_0 \times (1 - k_2 \times C)^{m_2}$  avec  $m_2$  qui dépend de la taille de particules. Dyer (1986) cite la valeur de 4,65 pour les petites particules et de 2,32 pour les plus grosses.

Pour caler notre loi, nous allons utiliser la première loi de la forme  $Wc = k_1 \times C^{m_1}$  jusqu'à la valeur de 2,2 g/l qui semble être la valeur à partir de laquelle les vitesses de chute saturent et commenceraient à diminuer (ce serait à vérifier lors d'une troisième campagne de mesure). La deuxième loi  $Wc = Wc_0 \times (1 - k_2 \times C)^{m_2}$  sera utilisée pour les concentrations supérieures à 2,2 g/l et devra rejoindre la loi de Sanchez pour les concentrations supérieures à 40 g/l.

La loi présentée en vert ci-dessous est donc celle qui est parait la plus représentative des données dont nous disposons :



**Fig. 33. AJUSTEMENT DE LA LOI DE THORN (1981) SUR LES MESURES (ECHELLE LOG-LOG)**

### 7.1.5. GLISSEMENT

Sans glissement, les sédiments se déposent rapidement sur les pentes du chenal de navigation, sans être repris par les courants de marée. Une formulation simplifiée de glissement a été programmée : les dépôts se trouvant dans la première couche (couche des dépôts frais) sont transférés dans le sens de la pente la plus forte dès lors qu'une pente critique est dépassée (2,5% a été retenu dans notre cas).

Rappelons que le dépôt frais ne peut apparaître qu'en présence d'eau. En effet, le glissement hors d'eau pourrait s'apparenter à de l'écroulement. Son comportement étant beaucoup plus complexe, car fortement lié à la rhéologie locale, nous n'en tiendrons pas compte.

### 7.1.6. PRISE EN COMPTE DE LA HOULE

La houle est prise en compte dans le calcul de la sédimentologie par une modification locale de la vitesse de cisaillement, ce qui induit une érosion plus importante du sédiment au sol.

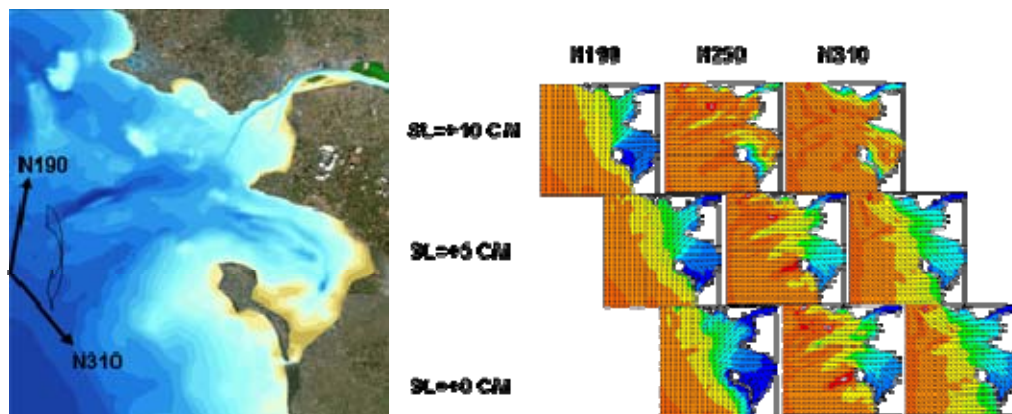
Comme il est actuellement encore très pénalisant en termes de temps de calcul d'effectuer des calculs de propagation de houle en temps réel et en couplage avec les calculs hydrosédimentaires 3D, nous utilisons un système de bibliothèque pour laquelle tout un ensemble de calculs de propagations ont effectués à l'avance.

Les propagations de houle ont été effectuées sur les directions comprises entre N190 et N310 avec un pas de 10°, pour des plans d'eau compris entre 0 et 10 m CM avec un pas de 0,25m : soit au total 528 plans de houle.

Sur chaque direction, une houle unitaire ( $H_s = 1\text{m}$ ) est propagée avec la période la plus représentative de la direction de propagation choisie :

N190/7s ; N200/7s; N210/7s ; N220/10s; N230/10s; N240/10s ; N250/12s; N260/12s ; N270/10s; N280/10s; N290/10s; N300/10s; N310/10s

Soit au total 528 plans de houles sont précalculés.

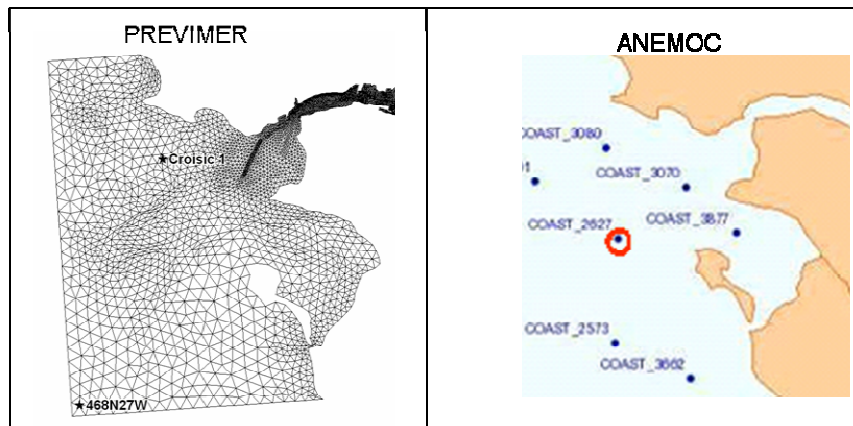


*Fig. 34. EXEMPLE DE PLANS DE HOULE ENREGISTRES DANS LA BIBLIOTHEQUE*

L'interpolation de la houle (multiplication de  $H_s$  et  $T_p$ ) à chaque temps se fait suivant la donnée d'un houlogramme proche de la frontière de propagation et fonction du niveau d'eau à chaque point du maillage. A chaque pas de temps du calcul et en chaque nœud du modèle, une hauteur, une période et une direction de houle sont interpolées.

Nous avons utilisé actuellement comme forçage temporel les séries de données :

- issues des calculs ANEMOC point coast\_2627 pour la période 1979-2002
- issues des calculs PREVIMER point 268N27W pour la période 2004-2007



**Fig. 35. POINTS DE FORÇAGES UTILISES ISSUS DE PREVIMER ET D'ANEMOC**

La variation de la vitesse de cisailment évolue en chaque nœud via la formulation de Soulsby :

$$\tau_m = \tau_c \left[ 1 + 1.2 \left( \frac{\tau_w}{\tau_c + \tau_w} \right)^{3.2} \right]$$

$$\tau_{\max} = \left[ (\tau_m + \tau_w \cos \Phi)^2 + (\tau_w \sin \Phi)^2 \right]^{1/2}$$

Avec :

$\tau_c$     Contrainte due au courant seul

$\tau_w$     Contrainte due à la houle

$\tau_m$     Contrainte moyenne dans le sens du courant

$\tau_{\max}$     Contrainte maximale lors du cycle d'une vague

$\Phi$     Différence de direction entre courant et houle

## 7.2. DESCRIPTION ET FORÇAGE DE LA PERIODE DE CALAGE

Il a été décidé en accord avec le comité d'experts d'effectuer le calage du modèle hydrosédimentaire sur une période plus longue que les périodes utilisées pour l'hydrodynamique et la salinité. Une période de 5 mois a été choisie dans la période d'activité du réseau de mesure en continu. Cette période intègre une crue d'hiver et permettra principalement de voir si suite à celle-ci, le modèle a la capacité de recharger le bouchon vaseux depuis l'estuaire.



La période simulée s'étale du 14 décembre 2006 au 11 mai 2007. La **figure 7.1** représente la mesure de la marée à Saint-Nazaire et le débit de la Loire à Montjean. Cette période permet de simuler l'intégralité de la crue du début d'année 2007 et de revenir à des débits avoisinant les 500 m<sup>3</sup>/s début mai.

#### 7.2.1. MESURES DISPONIBLES

La **figure 7.2** donne les mesures issues du réseau de mesure en continu sur l'année 2007 (Cordemais n'ayant pas fonctionné sur la période simulée).

La **figure 7.3** récapitule les bandes disponibles qui ont été analysées. Ces bandes montrent la quasi absence de vase au-dessus du PK 16 dans le chenal de navigation pendant la crue, alors que dès le 30 mars, les bandes montrent une formation de lentille de crème de vase entre les PK 10 et 24.

#### 7.2.2. CONDITIONS INITIALES

La **figure 7.4** présente les conditions initiales sédimentaires appliquées. Elles ont certainement été surévaluées, mais comme la simulation débute avec quasiment 4 mois de débit supérieur à 1000 m<sup>3</sup>/s, l'idée est que la quasi-totalité doit être expulsée. Pour savoir si le modèle a la capacité de faire remonter du sédiment après la crue, il ne faut pas que celui-ci soit en déficit de sédiment à l'aval.

Il a été appliqué :

- Entre les PK 0 et 33 : 1,25 Mt de vase liquide (1,6m de 40 à 100 g/l) dans le chenal de navigation, ce qui correspond à la masse moyenne estimée pour la lentille de crème de vase, sur les PK où elle est le plus souvent recensée.
- Entre le PK 57 et 20 km à l'aval de Saint-Nazaire : 12 cm de vase stricto-sensu (100 à 375 g/l, soit 1 cm /couche) : 11,8Mt.

#### 7.2.3. FORÇAGES

##### 7.2.3.1. DEBITS

Le débit journalier mesuré à Montjean est imposé à la limite amont du modèle (Ancenis).

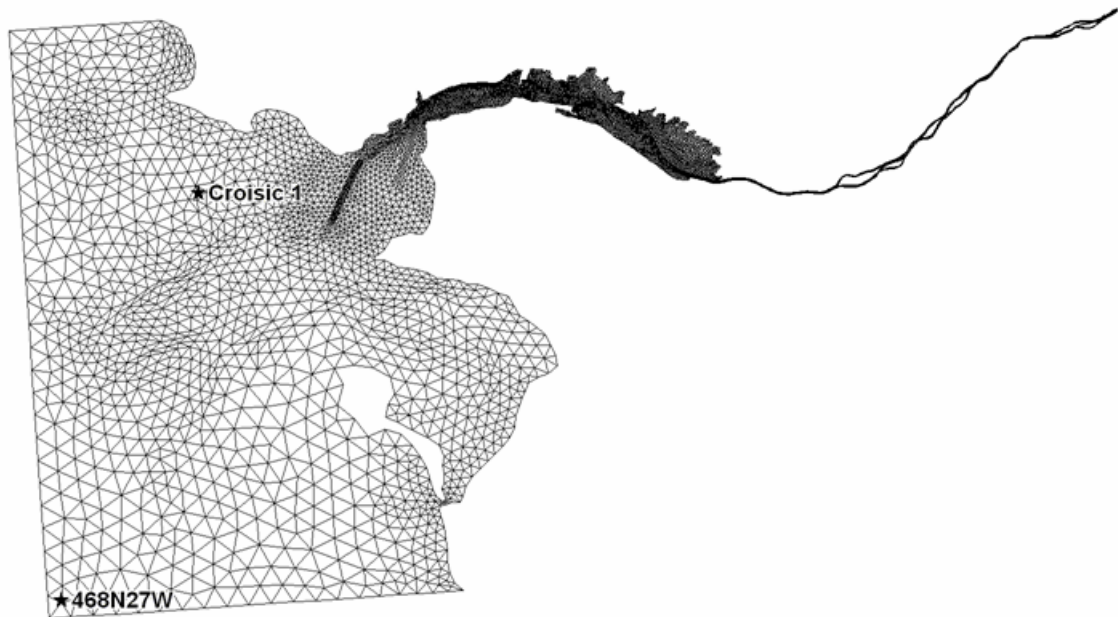
##### 7.2.3.2. MAREE ET NIVEAU MOYEN

La marée astronomique est imposée à la limite maritime, avec le niveau moyen calculé à partir de la mesure de la marée à Saint-Nazaire sur la période.

##### 7.2.3.3. VENT ET HOULE

Le vent est imposé à partir des résultats de calcul issus de la base de données PREVIMER au point nommé : CROISIC1

La houle est imposée à partir des résultats de calcul issus de la base de données PREVIMER au point nommé : W27N468



*Fig. 36. POSITION DES POINTS D'EXTRACTION ISSUS DE LA BASE PREVIMER*

#### 7.2.3.4. CONCENTRATION EN MES ET SALINITE

En condition maritime, la concentration en salinité est imposée à 35g/l et la concentration en MES est imposée à 0 g/l.

En condition amont, la salinité est imposée à 0g/l.

Pour la MES, le signal mesuré par le réseau en continu à Trentemoult a été utilisé. En effet, on voit sur la **figure 7.5** que la turbidité à Trentemoult est fonction du débit lorsque le débit est supérieur à 800 m<sup>3</sup>/s. Sous 800 m<sup>3</sup>/s, l'influence du bouchon vaseux doit être observée. L'objectif est donc d'établir une loi de concentration fonction du débit pour compléter les données lorsque les mesures sont manquantes à Trentemoult et lorsque le débit est inférieur à 800 m<sup>3</sup>/s.

La **figure 7.6** montre les mesures de Trentemoult, épurées des conditions de faible débit, et la loi de concentration moyenne calée. On remarque les deux boucles de concentration qui correspondent aux deux pics de crue, comme ils avaient été décrits dans l'étude précédente.

Il est maintenant possible de recomposer un signal complet qui sera appliqué à Montjean. Celui-ci est présenté sur la **figure 7.7**.

A titre de comparaison, nous avons replacé, sur la **figure 7.8**, ces mesures et la loi calculée dans le diagramme que nous avons utilisé pour l'étude précédente. Les deux boucles rentrent bien dans le cycle représentatif qui avait été utilisé. Nous avons aussi décidé à partir de ce graphique de borner la concentration de notre loi moyenne à 30 mg/l pour les débits inférieurs à 800 m<sup>3</sup>/s.

### 7.3. RESULTATS DE CALAGE

#### 7.3.1. PARAMETRES MODIFIES

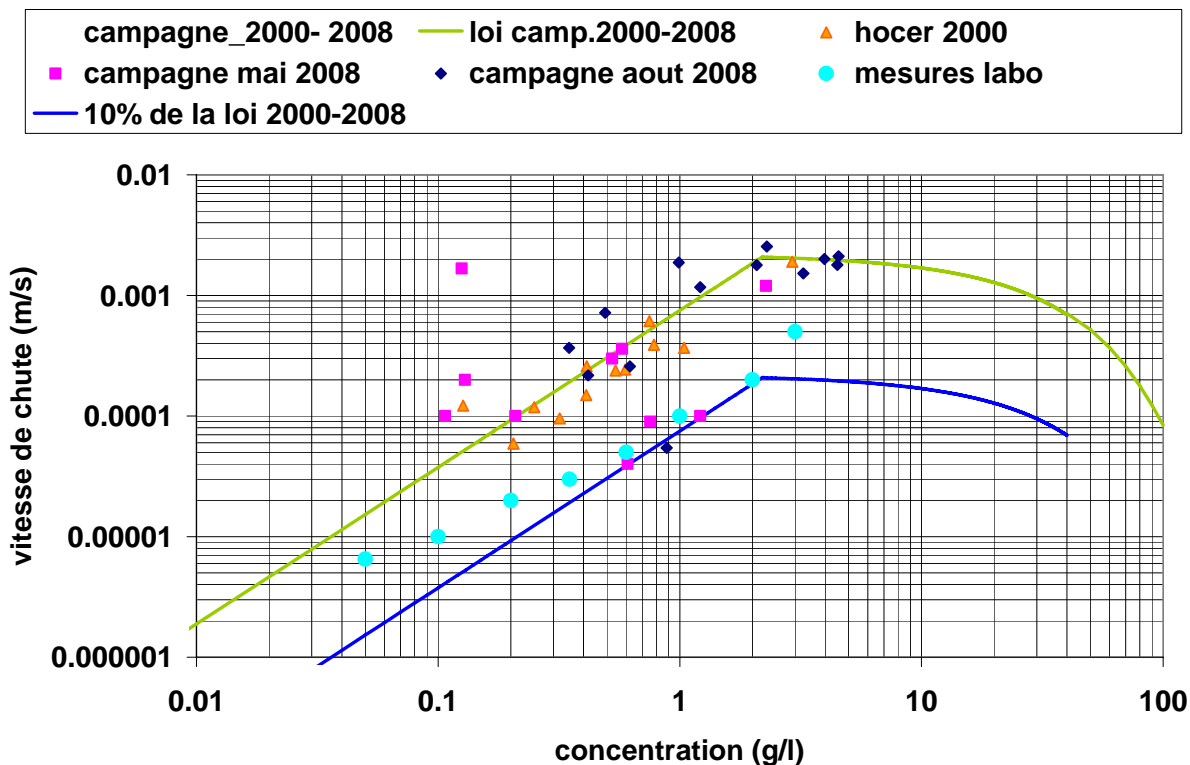
Plus de 16 tests, sur les paramètres sédimentologiques ont été effectués pour obtenir une remontée de sédiment acceptable dans l'estuaire suite à la crue de 4000 m<sup>3</sup>/s.

Ces tests concernant : les contraintes d'érosion, le tassement, la vitesse de chute et la méthode d'érosion sont consultables dans les notes d'avancement du 9 septembre et du 15 octobre 2009, placés en **Annexe 4 et 5**.

Le paramètre clé qui a permis de permettre une meilleure remontée du sédiment est la prise en compte de la défloculation.

La vitesse de chute mesurée au tube d'Owen permet de tenir compte des floccs. C'est sur ces mesures que la courbe de vitesse de chute fonction de la concentration a été définie. Par contre une forte turbulence permet une destruction de ces floccs et donne donc une vitesse de chute moins importante pour une même concentration.

Si on ajoute sur le graphique des mesures de vitesses de chute d'une vase de Loire obtenues en laboratoire pour lesquelles il n'y a normalement pas de floculation, on voit que celles-ci sont bien plus faibles que celles mesurées généralement au tube d'Owen. Certains points bas mesurés au tube d'Owen correspondent aux mesures effectuées en laboratoire, il doit s'agir de mesures pour lesquels il n'y avait pas de floculation au sein de l'écoulement.



**Fig. 37. MESURES DE VITESSES DE CHUTE AVEC LE TUBE D'OWEN ET EN LABORATOIRE**

De manière simplifiée, nous avons pris comme tracé sur le graphique une valeur de la vitesse de chute égale à 10% de la valeur mesuré avec présence de floc.

La défloculation est reliée de manière simpliste à une vitesse moyenne de l'écoulement :

$U < 0,5 \text{ m/s}$  : état floculé : Vitesse de chute = 100% de la vitesse de chute avec floes

$U > 1,1 \text{ m/s}$  : état défloculé : Vitesse de chute = 10% de la vitesse de chute avec floes

$0,5 \text{ m/s} < U < 1,1 \text{ m/s}$  : état plus ou moins défloculé : Vitesse de chute = 100% à 10% de la vitesse de chute avec floes

Il existe des formulations plus physiques qui permettent de relier le taux de turbulence à la floculation-défloculation. La formulation de Van Leussen a été testée par exemple mais avec le seul jeu de paramètre connu pour la vase de l'Ems. Les résultats sont prometteurs, mais pas probants. En effet, il faudrait des mesures spécifiques sur une vase de Loire pour pouvoir caler les différents paramètres de cette formulation.

Nous continuerons donc dans cette première phase avec cette version simplifiée de la prise en compte de la défloculation.

### 7.3.2. ANALYSE DES RESULTATS

#### 7.3.2.1. ANALYSE DES CUBATURES

Afin de mieux comprendre les transferts de masse en suspension et en dépôt au sein de l'estuaire, nous avons effectué des cubatures temporelles sur des zones qui sont représentées sur la **figure 7.9**. Ces zones sont basées sur la définition des zones de dragages utilisées par le Grand Port Maritime de Nantes Saint-Nazaire.

Pour faciliter la compréhension sur les graphiques, certaines zones ont été regroupées :

Zone 1, 2 et 3

Zone 4, 5 et 6

Zone 7, 8, 9, 10 et 11

La **figure 7.10** représente l'évolution temporelle des cubatures totales : suspension + dépôts des zones regroupées.

On peut remarquer que suite à l'initialisation (14/12/2006 à 13/01/2007) :

Sur la période du 13 janvier au 12 février 2007 (débit de 1000 à 1250 m<sup>3</sup>/s) :

La section du large, chargée fortement en sédiment à l'initialisation continue expulser du sédiment par la frontière maritime.

Par contre la section 123 transfère du sédiment vers la section 456 qui elle-même en transfère une partie à la section 7891011. Pour ces débits, on obtient donc flux net dirigé vers l'amont.

Sur la période du 12 février au 27 février 2007 (premier pic de crue à 2500 m<sup>3</sup>/s) :

On obtient une inversion des transferts. La section 7891011 transfère quasiment la totalité de ses sédiments mobilisés vers la section 456 qui les transfère vers la section 123. On a donc un flux net vers l'aval durant ce premier pic de crue.

Sur la période du 27 février au 14 mars 2007 (second pic de crue à 4000 m<sup>3</sup>/s) :

La section 7891011 ne se vide plus, l'ensemble des sédiments mobilisables ont déjà été transférés lors de la première crue. Une forte quantité de sédiment arrive de l'amont durant ce pic de crue, mais elle traverse de façon transparente cette section 7891011.

La section 456 accumule une partie des sédiments provenant de l'amont. La section aval 123 a quant à elle tendance à se vider vers le large.

Sur la période du 14 mars au 11 mai 2007 (débits allant de 2000 à 500 m<sup>3</sup>/s) :

Les transferts notables se passent exclusivement entre la zone 456 et la zone 7891011 avec un flux net vers l'amont. Ce flux net sur cette période correspond à un transfert de masse de 580 000 tonnes.

Sur l'ensemble du calcul, on voit sur la **figure 7.11** que le bouchon turbide peut atteindre 500 000 tonnes, et qu'il a la capacité de se régénérer après la crue dans les mêmes quantités.

Sur la **figure 7.12**, on voit qu'au dessus de 0mCM, il y a peu d'accumulation de sédiment lorsque le débit dépasse 1500 m<sup>3</sup>/s et de même lorsque le débit est inférieur à 500 m<sup>3</sup>/s. Entre 500 et 1500 m<sup>3</sup>/s, l'évolution paraît assez constante au cours du temps quelle que soit la zone.

#### 7.3.2.2. COMPARAISON AUX MESURES DU RESEAU EN CONTINU

Il est à noter que les mesures NTU de turbidité du réseau de mesure en continu ont été transformées en MES en utilisant la relation  $MES=1,2*NTU$ . Cependant, cette relation peut donner un ordre de grandeur mais peut conduire à de forts biais sur la MES estimée surtout sur les fortes turbidités. En effet, un calage de cette loi est nécessaire en effectuant des prélèvements bouteilles en parallèle aux mesures du réseau en continu. Cette opération commanditée par le GIP est à venir et n'est pas encore disponible.

La comparaison des MES est donc qualitative (présence du bouchon vaseux ou pas, pics de forte concentration), mais pas quantitative pour l'instant.

La **figure 7.13** montre la courbe de MES à Le Pellerin qui indique une bonne adéquation avec la remontée du bouchon turbide en fin de calcul. Les premiers pics de turbidité en milieu de calculs étant dus aux apports amont apportés par la crue.

La **figure 7.14** montre les courbes de MES et de salinité au niveau de Paimboeuf. On note tout d'abord une remontée saline cohérente avec les mesures suite à la crue. Cette remontée semble légèrement sous estimée par moment dans le calcul. On notera qu'il s'agit de mesures et de points de sonde effectués à la surface.

Au niveau de la MES, la dynamique mort-eau / vive-eau et avant / après crue est retrouvée.

Les zooms : **figures 7.15 et 7.16**, montrent une forte augmentation du pic de jusant (qui est en majeure partie due à la convection) et un pic de flot comparable aux mesures. Un décalage temporel sur la station de mesure est par contre en cours d'analyse par le GIP.

#### 7.3.2.3. CARTES DE DEPOT

La **figure 7.17** montre des dépôts peu importants en amont le 9 mai 2007 en comparaison aux relevés du port, mais il surtout important de voir qu'à des dates précédentes (6 mai, 20 avril soit peu après la crue) de fortes remontées de sédiment ont eu lieu.

---

## 8. REMARQUES POST-CALAGE

---

### 8.1. INFLUENCE DE LA PROFONDEUR DU CHENAL DE NAVIGATION

Les fonds du chenal de navigation ont été baissés uniformément et artificiellement de 1,5m jusqu'à Nantes pour estimer l'importance de la non-actualisation des fonds durs dans cette première phase. Ce calcul a montré que le taux de transfert vers la zone 7891011 a été multiplié par 2,3 et que le bouchon turbide a augmenté de 100.000 tonnes après la crue en comparaison au cas de référence.

Si cet abaissement du fond de chenal est très schématique et surévalué en comparaison à l'abaissement plus complexe à réaliser en fonction des derniers levés bathymétriques de Mesuris en 2008-2009, les résultats de ce calcul montrent l'importance de la cote de fond dur du chenal de navigation sur la remontée des sédiments vers l'amont.

### 8.2. CONSEQUENCE SUR LE CALAGE SIMPLE DE LA POSITION ERRONEE DU MAREGRAPHE DIT DE NANTES

Le marégraphe intitulé « Nantes » dans les fichiers du Grand Port Maritime de Nantes-Saint-Nazaire correspond en fait au marégraphe de Chantenay « Usine Brulée » et non au marégraphe de Nantes Belem comme supposé jusqu'ici dans le calage.

L'influence de cet écart de positionnement du marégraphe de Chantenay sur le calage simple présenté dans ce rapport est donc évaluée ici.

Les courbes de marée simulées à Nantes Belem et à Chantenay sont comparées aux mesures du marégraphe de Chantenay « usine brulée » sur les **figures 7.1 à 7.10**.

L'analyse statistique avec le point de sonde à Chantenay a été de même effectuée. Elle est alors comparée avec celle effectuée avec le point de sonde à Nantes Belem qui avait permis le calage sur les **figures 7.11 et 7.12**.

On voit que ce déplacement de position de point de sonde apporte principalement un calage détérioré d'environ 12 à 13% sur le pourcentage du temps pendant lequel l'erreur est comprise dans l'intervalle [-0.2;0.2] pour les débits d'étiages.

Pour le débit de crue, le calage est amélioré en statistique, car les pleines mers sont facilement obtenues avec la bonne position du point de sonde, ce qui était quasiment impossible avec la mauvaise position du point de sonde.

La conséquence de cette erreur de position de point de sonde est qu'un frottement trop faible a été appliqué sur le tronçon Le Pellerin-Nantes, pour pouvoir obtenir la courbe de marée de Chantenay à Nantes Belem.





FIGURES NUMEROTEES PAR CHAPITRE

