

DEVELOPPEMENT ET EXPLOITATION D'UN MODELE HYDROSEDIMENTAIRE EN TROIS DIMENSIONS SUR L'ESTUAIRE DE LA LOIRE

Lot 1 : Construction et exploitation du modèle

Phase 3 : Evaluations morphologiques

Tests de sensibilité

1711822 R23

Décembre 2011

Programme de restauration de l'estuaire en aval de Nantes - études préalables à la tranche expérimentale - Année 2011



Etude cofinancée par l'Union européenne.
L'Europe s'engage en Pays de la Loire avec le Fonds européen de développement régional.



Établissement public du ministère
chargé du développement durable



Programme de restauration de l'estuaire en aval de Nantes - études préalables à la tranche expérimentale - Année 2011



Étude cofinancée par l'Union européenne.
L'Europe s'engage en Pays de la Loire avec le Fonds européen de développement régional.



Établissement public du ministère
chargé du développement durable



**PROGRAMME DE RESTAURATION DE LA LOIRE
ESTUARIEENNE EN AVAL DE NANTES**

**DEVELOPPEMENT ET EXPLOITATION D'UN MODELE
HYDROSEDIMENTAIRE EN TROIS DIMENSIONS SUR
L'ESTUAIRE DE LA LOIRE**



LOT 1 – PHASE 3

TESTS DE SENSIBILITE

DECEMBRE 2011

1 71 1822 R23



Suivi des versions

V2	03/10/2012	RWR	LHM	Version finale
V1	4/12/2011	RWR	LHM	Version provisoire
VERSION	DATE	AUTEUR	RELECTEUR	COMMENTAIRES

SOMMAIRE

OBJET DE L'ETUDE.....	C
SYNTHESE ET CONCLUSIONS	E
1. NOUVELLES ANALYSES SUR LA VITESSE DE CHUTE DES VASES DANS L'ESTUAIRE	1
1.1. RAPPELS SUR LE PARAMETRAGE ACTUEL DE LA VITESSE DE CHUTE	1
1.2. ANALYSE DE LA TROISIEME CAMPAGNE DE MESURES DANS L'ESTUAIRE.....	2
1.2.1. ACTUALISATION DU GRAPHE VITESSE DE CHUTE FONCTION DE LA CONCENTRATION.....	3
1.2.2. ANALYSE DES PARAMETRES DE L'ECOULEMENT LORS DES PRELEVEMENTS.....	4
1.2.3. MODELISATION DU FONCTIONNEMENT DES TUBES D'OWEN.....	7
1.3. MESURES EFFECTUEES POUR LE GPMNSN DANS L'ESTUAIRE EXTERNE SUR LE SITE DE LA LAMBARDE.....	10
1.3.1. DESCRIPTION DE L'INSTRUMENT ET DU PROTOCOLE DE MESURE.....	11
1.3.2. ANALYSE ET RESULTATS DES MESURES.....	11
1.3.3. INTERPRETATION DANS LE CADRE DE CETTE ETUDE.....	12
1.4. PARAMETRAGE DE LA VITESSE DE CHUTE EN FONCTION DU PARAMETRE DE TURBULENCE G	14
1.4.1. ANALYSE DES EVOLUTIONS DU PARAMETRE G DANS LE MODELE	14
1.4.2. PROPOSITION DE TESTS DE SENSIBILITE.....	16
1.4.3. RESULTATS DES TESTS DE SENSIBILITE.....	17
1.5. CONCLUSIONS SUR LE PARAMETRAGE DE LA VITESSE DE CHUTE.....	17
2. TEST DE SENSIBILITE A LA CONDITION AVAL EN M.E.S.....	19
2.1. RAPPEL SUR LA CONDITION LIMITE AVAL ACTUELLE	19
2.2. NOUVELLE PROPOSITION DE CONDITION AVAL	19
2.3. CALCULS ET RESULTATS	21
3. CALCUL DE SENSIBILITE AVEC IMPLANTATION D'UNE PROCEDURE DE DRAGAGE.....	23
3.1. DESCRIPTION DE L'ALGORITHME DE DRAGAGE SIMPLIFIE IMPLANTE.....	23
3.2. RESULTATS DU CALCUL.....	24
3.2.1. ANALYSE DU BILAN DE MASSE	25
3.2.2. ANALYSE DES MASSES DRAGUEES	26
3.2.3. ANALYSE DES CLAPAGES A LA LAMBARDE.....	27
3.3. CONCLUSIONS.....	27
4. BIBLIOGRAPHIE	29
FIGURES HORS-TEXTE	31

LISTE DES TABLEAUX

Aucune entrée de table des matières n'a été trouvée.

LISTE DES FIGURES

FIG. 1.	GRAPHIQUE VITESSE DE CHUTE FONCTION DE LA CONCENTRATION (PARAMETRAGE ET MESURES)	2
FIG. 2.	PARAMETRE G AU PK22 A DIFFERENTES HAUTEURS AU-DESSUS DU FOND	15
FIG. 3.	PARAMETRE G EN FONCTION DE LA VITESSE 2D AU PK 22	15
FIG. 4.	PARAMETRE G EN FONCTION DE LA VITESSE 3D LOCALE AU PK 22.....	16
FIG. 5.	ACTUALISATION DU GRAPHIQUE VITESSE DE CHUTE FONCTION DE LA CONCENTRATION EN MES AVEC LES MESURES HOCER DE 2009	3
FIG. 6.	LOCALISATION DU SITE DE MESURE	4
FIG. 7.	PLACEMENT DES VITESSES DE CHUTES MESUREES DANS LEUR CONTEXTE HYDRODYNAMIQUE	5
FIG. 8.	COMPARAISON A LA VITESSE DE CHUTE MODELISEE POUR LES CONCENTRATIONS MESUREES	6
FIG. 9.	COMPARAISON A LA VITESSE DE CHUTE MODELISEE POUR LES CONCENTRATIONS MESUREES ET LA VITESSE 2D MESUREE.....	7
FIG. 10.	VITESSES DE CHUTES DES SOUS-ECHANTILLONS DES TUBES D'OWEN.....	8
FIG. 11.	VITESSE DE CHUTE DES SOUS-ECHANTILLONS ET LOI MODELISEE.....	9
FIG. 12.	CONCENTRATION DU TUBE D'OWEN AU COURS DU TEMPS	9
FIG. 13.	CONCENTRATION DU TUBE D'OWEN AU COURS DU TEMPS ET SIMULATIONS	10
FIG. 14.	INSERTION DES MESURES DE LA CAMPAGNE 2011 IMDC PAR LABSFLOC DANS LE GRAPHIQUE VITESSE DE CHUTE FONCTION DE LA CONCENTRATION EN MES	12
FIG. 15.	MESURES DE VITESSES DE CHUTES DES MACROS ET MICROFLOCS.....	13
FIG. 16.	ZONE DE DEPOT DES SEDIMENTS SORTIS PAR LA FRONTIERE MARITIME	19
FIG. 17.	ZONES DE DRAGAGES D'ENTRETIEN PORTUAIRE ET DES ACCES.....	23
FIG. 18.	EMPRISE DES ZONES DRAGUEES	24
FIG. 19.	DATE DES PERIODES DE DEBIT RETENUES POUR LE CYCLE DE 8 MOIS REPRESENTATIF	25

oOo

OBJET DE L'ETUDE

Par marché attribué le 29 août 2008, Le GIP Loire Estuaire (GIP LE) 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.

Les axes de ce programme 2007-2013 qui découlent des principaux enseignements des études précédentes sont les suivants :

- le développement de la connaissance et des outils à des fins opérationnelles ;
- le développement des conditions de faisabilité ;
- le développement et la mise en œuvre d'une expérimentation.

Cette mission confiée par le GIP Loire Estuaire à SOGREAH comprend, en lot 1, la construction et l'exploitation d'un modèle 3D de l'estuaire de la Loire. La phase 2 de ce lot consiste notamment à réaliser l'exploitation du modèle global dans l'état actuel, tendanciel et dans le cas du scénario morphologique global défini lors de l'étude de 2006. Les résultats du scénario morphologique global étant prometteurs, il a été demandé de tester ce même scénario sans la création d'estran, (ce qui consiste donc à remonter uniquement le chenal de navigation) afin de d'évaluer la participation de ce levier aux résultats.

La phase 3 de ce lot consiste notamment à réaliser des calculs hydrosédimentaires permettant d'approfondir l'étude du levier vasière à l'échelle de l'estuaire.

Ce rapport décrit les résultats d'une analyse approfondie de trois paramètres jouant un rôle essentiel dans le modèle 3D global de l'estuaire à savoir la vitesse de chute, la condition limite aval en concentration et les dragages d'entretien des accès portuaires.

SYNTHESE ET CONCLUSIONS

Paramétrage de la vitesse de chute

Nous présentons trois nouvelles analyses de ce paramétrage dans la présente étude.

L'analyse des mesures d'une troisième campagne de vitesses de chute réalisée au tube d'Owen par la société Hocer pour le compte du GIP LE en octobre 2009 dans l'estuaire interne a confirmé les valeurs mesurées lors deux campagnes précédentes à l'exception d'un point de mesure jugé douteux sans apporter les éléments complémentaires attendus. Les mesures océanographiques effectuées en parallèle ont permis de confirmer le rôle de la concentration en MES sur l'augmentation des vitesses de chute. L'intensité du courant ne présente pas par contre de corrélation claire. Une analyse plus raffinée des sous-échantillons de mesure indique que les vitesses de chute sont très hétérogènes à l'intérieur d'un même point de mesure. On pourrait envisager de séparer au moins deux populations de floes dans chaque échantillon.

La campagne de mesures d'IMDC a été réalisée avec un instrument à mesure directe (INRREV_LF) qui fournit des vitesses de chute bien supérieures pour les concentrations inférieures à 1 g/l. Cet écart s'explique par les limitations du tube d'Owen aux faibles concentrations.

L'augmentation des vitesses de chute pour les concentrations faibles aurait pour conséquence dans le modèle actuel une exportation moins importante des sédiments vers le large et un retour plus important des sédiments par le fond dans l'estuaire. Cependant, comme signalé par Dearnaley (1994), la modification du paramétrage de la vitesse de chute ne peut pas s'effectuer de manière isolée dans une modélisation numérique sans revoir les autres paramétrages afin de retrouver un calage réaliste du modèle.

Enfin, la faisabilité de l'utilisation d'un paramètre de turbulence local (G) pour paramétrer la floculation a été confirmée mais n'a pas été mise en pratique faute de données de terrain suffisante pour valider la démarche.

Sensibilité à la condition aval en MES

Les calculs d'évaluation de la situation actuelle ont montré que le modèle était capable de faire remonter de la vase dans l'estuaire interne à partir du moment où l'estuaire externe était suffisamment alimenté. Les résultats quantitatifs de masse de vase dans l'estuaire interne sont par contre pour l'instant fortement liés à l'hypothèse de quantité de vase réinjectée en condition limite (puisque l'on fonctionne en recyclage des flux sortant) et sous la forme dont elle est réinjectée (crème de vase liquide ou non et positionnement géographique).

Le travail qui a été effectué ici a d'abord consisté à définir une nouvelle condition à la limite aval qui consiste à supprimer le recyclage des flux de MES sortants et à définir trois zones de stockage dans l'estuaire externe avec une concentration de référence et sans limitation de masse.

Puis le passage d'un calcul de sensibilité sur 8 mois a été réalisé pour évaluer l'intérêt de cette nouvelle condition. Il en ressort que les 3 zones susceptibles d'être des sources de sédiment pour l'estuaire permettent effectivement un rechargement de l'estuaire en période hivernale. Par contre, elles n'expliquent pas à elle seule le rechargement de l'estuaire sur une période annuelle. Cette méthode ne sera donc pas pour l'instant retenue, tant que le fonctionnement du système externe ne sera pas mieux compris.

Sensibilité à l'implantation d'une procédure de dragage

Une procédure simplifiée de dragage des sections aval 1 à 6 et du clapage correspondant sur le site d'immersion de la Lambarde a été mise en place dans le modèle. Le dragage est mis en œuvre une fois par jour (à midi) et consiste à revenir à la cote nominale de dragage qui a été fixée à -12,4mCM. Les quantités draguées en masse sèche sont sauvegardées jour par jour et secteur par secteur. Un algorithme de clapage est également mis en place au niveau de la Lambarde. Il consiste en un dépôt au sol du sédiment dragué. Le sédiment est déposé dans des couches de 40g/l à 200g/l.

Un calcul de sensibilité sur 8 mois a été réalisé avec cette procédure. Globalement, cette procédure conduit à des masses draguées sur les sections 1 à 5 du même ordre de grandeur qu'en nature (0,75 millions de tonnes calculés contre 1,22 millions de tonnes en nature), avec cependant un décalage temporel de l'ordre de la quinzaine de jours. Si l'on considère la section 6 en plus (qui représente 50% des dragages dans les relevés du GPMNSN), alors le modèle drague de manière trop intensive, c'est-à-dire environ le double de ce qui est effectué par le GPMNSN : 4,7 millions de tonnes contre 2,45 millions de tonnes).

Pour conserver des résultats réalistes dans l'estuaire interne, il semble qu'il faudrait au minima ajouter deux conditions au système de dragage simplifié :

- Arrêter les dragages durant la période d'été (la drague n'étant pas disponible à cette période),
- Limiter les dragages journaliers dans le modèle par la quantité possiblement draguée quotidiennement par le GPMNSN,
- Plus généralement, intégrer l'ensemble des règles utilisées par le port pour gérer ses dragages d'entretien.

On peut aussi noter que le sur-dragage actuel dans le modèle qui pourrait être comparé à un équivalent de piégeage de sédiment, semble avoir un effet notable sur la baisse de la masse du bouchon vaseux. Les quantités en jeu sont par contre très importantes.

Enfin, la tenue de la cote du chenal de navigation à sa cote théorique par rapport au calcul de référence où les dépôts peuvent rehausser de manière sensible la cote de celui-ci, permet un flux d'appel provenant de l'aval deux fois supérieur.

1. NOUVELLES ANALYSES SUR LA VITESSE DE CHUTE DES VASES DANS L'ESTUAIRE

1.1. RAPPELS SUR LE PARAMETRAGE ACTUEL DE LA VITESSE DE CHUTE

Le paramétrage de la vitesse de chute dans le modèle a été mis au point et affiné en phase 1 de l'étude lors de l'étape de construction et de calage du modèle 3D global hydrosédimentaire (rapport R7). Il est visualisé sur la figure 1 ci-dessous et décrit par les équations suivantes :

Pour les concentrations modérées jusqu'à la valeur de 2,2 g/l, en état floculé, le paramétrage retenu est le suivant :

$$W_c = k_1 \times C^{m_1} \text{ avec } k_1=0,00075 \text{ et } m_1 = 1.3$$

Pour les concentrations plus fortes entre 2,2 et 40 g/l, les floes se gênent dans leur chute et la vitesse de chute décroît, on parle de vitesse entravée :

$$W_c = W_{c_0} \times (1 - k_2 \times C)^{m_2} \text{ avec } W_{c_0} = 0,0022 ; k_2=0,0055 \text{ et } m_2 = 4,65$$

Au-delà de 40 g/l, c'est la loi de Sanchez de 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 qui peut être transformée en vitesse de chute, qui est tracée sur le graphique.

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. Chapitre 3 : suspension fortement concentrée ou crème de vase définie comme : $40 \text{ kg/m}^3 < C < 325 \text{ kg/m}^3$.

On notera que cette partie est traitée dans le modèle par le processus de tassement, mais elle a permis de fixer une valeur de vitesse de chute à 40 g/l pour la loi précédente et ainsi conserver une continuité des flux verticaux.

L'influence d'une forte turbulence permettant une destruction de ces floes et donnant donc une vitesse de chute moins importante pour une même concentration a été paramétrée de la façon suivante en fonction de la vitesse du courant moyennée sur la verticale (U_{2D}) :

- $U_{2D} < 0,5 \text{ m/s}$: état floculé : Vitesse de chute $W_s = 100\%$ de la vitesse de chute avec floes
- $U_{2D} > 1,1 \text{ m/s}$: état défloculé : Vitesse de chute $W_s = 10\%$ de la vitesse de chute avec floes
- $0,5 \text{ m/s} < U_{2D} < 1,1 \text{ m/s}$: état plus ou moins défloculé : Vitesse de chute $W_s = 100\%$ à 10% de la vitesse de chute avec floes par décroissance linéaire

Ce paramétrage a été ajusté de façon à obtenir une reformation correcte du bouchon vaseux dans l'estuaire interne après une expulsion liée à une crue de 4000 m³/s.

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.

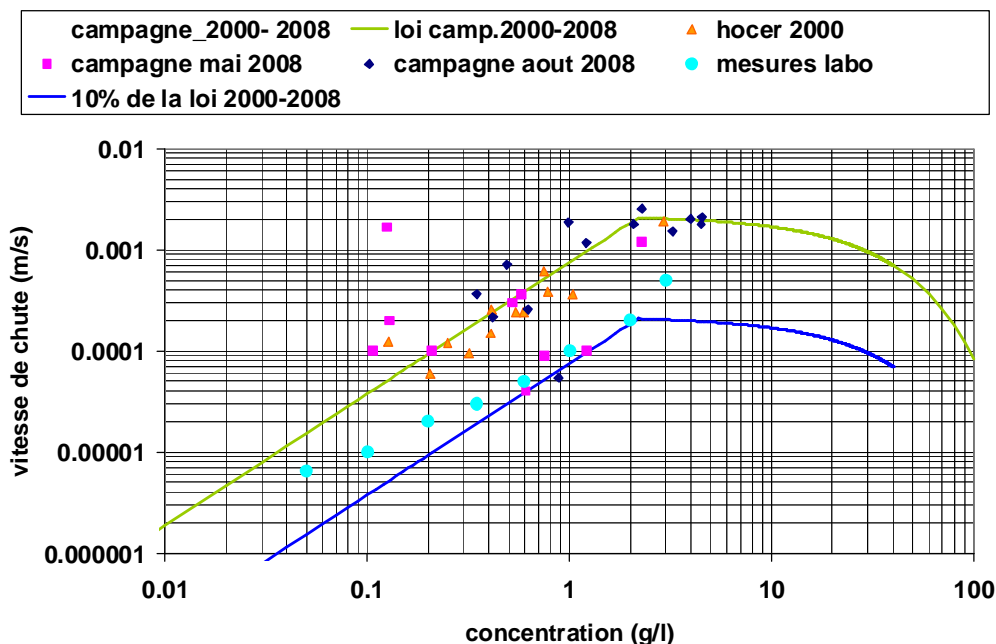


FIG. 1. GRAPHIQUE VITESSE DE CHUTE FONCTION DE LA CONCENTRATION (PARAMETRAGE ET MESURES)

Les tests de sensibilité effectués en phase1 (rapport R7) ont montré que le paramétrage de la vitesse de chute est un élément essentiel de la fiabilité du modèle qui a été discuté en détail au sein du comité d'experts de l'étude. Son développement avait suscité des remarques sur le caractère très empirique de la prise en compte de la turbulence sur la floculation.

Dans la présente étude, nous présentons trois nouvelles analyses de ce paramétrage, à savoir :

- ✓ L'analyse des mesures d'une troisième campagne de vitesses de chute réalisée au tube d'Owen par la société Hocer pour le compte du GIP LE en octobre 2009 dans l'estuaire interne,
- ✓ L'analyse des mesures réalisée à l'aide d'un INSSEV_LF par la société IMDC pour le compte du Grand Port Maritime de Nantes Saint-Nazaire (GPMNSN) en septembre 2009 dans l'estuaire externe sur le site de la Lambarde,
- ✓ L'utilisation d'un paramètre de turbulence local (G) pour paramétrer la floculation.

1.2. ANALYSE DE LA TROISIEME CAMPAGNE DE MESURES DANS L'ESTUAIRE

Le GIP Loire a fait effectuer une troisième campagne de vitesse de chute à la société Hocer le 20 septembre 2009 au Pellerin et a souhaité que Sogreah complète l'analyse déjà faite sur les campagnes précédentes (voir chapitre 1.1). Cette campagne comprend sept mesures de vitesses de chute qui ont

été complétées par rapport aux précédentes par des mesures de profils verticaux de vitesses, salinité et MES. Nous avons donc effectué une analyse plus complète de ces mesures incluant :

- ✓ La mise en place des sept nouveaux points dans le graphique Vitesse de chute fonction de la MES existant,
- ✓ La mise en place d'un graphique temporel des paramètres mesurés et l'analyse des relations des paramètres entre eux : MES, Vitesses de chute, vitesse de l'écoulement, salinité. Comparaison à la vitesse de chute calculée par le modèle pour ces paramètres
- ✓ L'analyse des sous-échantillons de mesure (il y en a dix par point de mesure) à l'aide d'une simulation du fonctionnement du tube d'Owen.

1.2.1. ACTUALISATION DU GRAPHE VITESSE DE CHUTE FONCTION DE LA CONCENTRATION

A la suite de la lecture du rapport de cette troisième campagne, nous avons contacté Hocer pour obtenir des informations complémentaires sur les calculs qui sont effectués car les résultats dans le rapport sont fournis directement sous forme de vitesse de chute sans être rapportés à une concentration de MES. Suite à notre contact, nous avons eu des éclaircissements sur la méthode employée et avons demandé une vérification sur la station C où le prélèvement annoncé à 32 min semble être erroné et doit avoir une incidence sur la vitesse de chute calculée (estimée à une division presque de 2). Nous n'avons pas eu de réponse à ce sujet. Nous afficherons donc en pointillé dans le graphique suivant la valeur de la vitesse de chute obtenue à la station C.

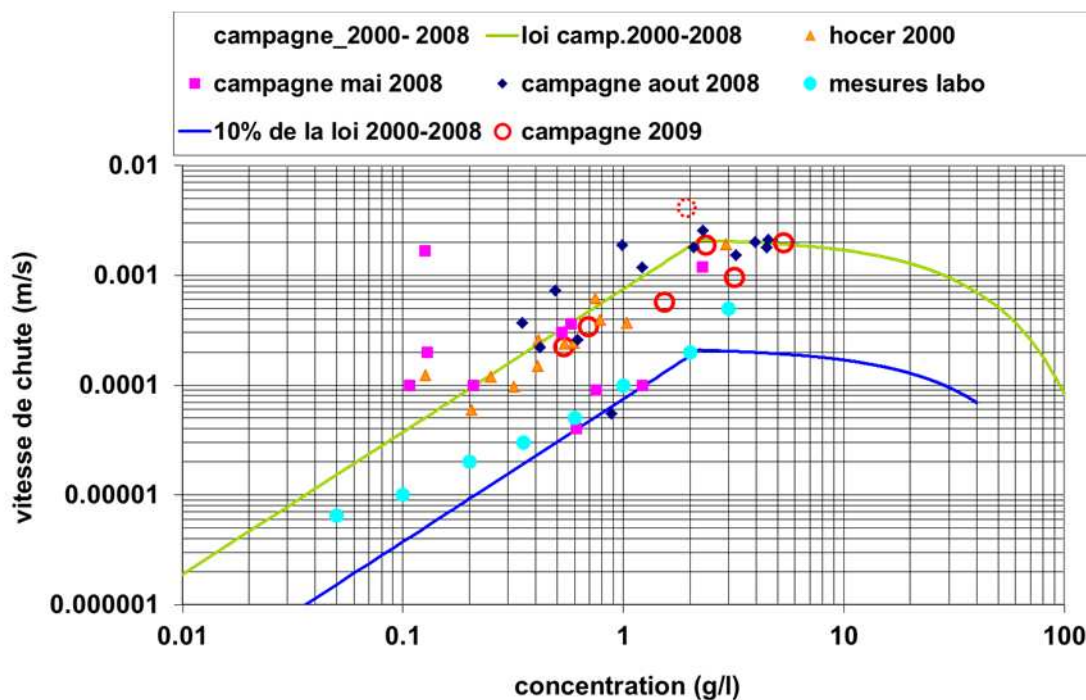


FIG. 2. ACTUALISATION DU GRAPHIQUE VITESSE DE CHUTE FONCTION DE LA CONCENTRATION EN MES AVEC LES MESURES HOCER DE 2009

Ces mesures rentrent dans la continuité des autres mesures déjà obtenues avec le tube d'Owen et confirment la loi utilisée pour des états floculés dans le modèle, c'est-à-dire lorsque la vitesse 2D est inférieure à 0,5 m/s.

1.2.2. ANALYSE DES PARAMETRES DE L'ECOULEMENT LORS DES PRELEVEMENTS



FIG. 3. LOCALISATION DU SITE DE MESURE

Description des opérations par Hocer :

« Les conditions hydrologiques et météorologiques au moment des prélèvements sont les suivantes :

Marée: 94-91, Débit :175 m³/s, Vent W - 25 Km/h, Météo : averses

Basse mer : 14:59 (Heures prévues au droit du Pellerin)

Pleine mer : 19:02 (Heures prévues au droit du Pellerin)

Les mesures ont été réalisées à partir d'un appontement portuaire du Pellerin en un point de l'estuaire situé dans la zone du bouchon vaseux. La cote du fond au droit de cet appontement est de -5,50 m CM lors des mesures.

« Pour chaque point, les prélèvements ont été effectués à marée montante, avec un rythme approximatif d'une mesure par heure. Les prélèvements ont été réalisés durant un cycle commençant 1 heure avant la basse mer soit 13h44 et s'achevant 1 heure après la pleine mer soit 20h20. Dix minutes avant la descente du tube un profil hydrologique était réalisé de façon à connaître la structure verticale de répartition de la salinité et des matières en suspension. Le prélèvement était ainsi optimisé. »

1.2.2.1. SITUATION DES PRELEVEMENTS DANS LES PROFILS VERTICAUX DES DIFFERENTS PARAMETRES MESURES

Sur les figures hors-texte 1.1 à 1.7, les profils verticaux de salinité, température, vitesse et turbidité sont tracés pour les 7 prélèvements.

- Prélèvement A à 13h44, figure 1.1
- Prélèvement B à 14h52, figure 1.2
- Prélèvement C à 15h58, figure 1.3

- Prélèvement D à 17h06, figure 1.4
- Prélèvement E à 18h07, figure 1.5
- Prélèvement F à 19h13, figure 1.6
- Prélèvement G à 20h22, figure 1.7

Les hauteurs à laquelle ont été effectués les prélèvements et la profondeur théorique du fond ont été ajoutés sur les graphes. Les mesures ADCP dépassant la profondeur théorique du fond sont certainement à écarter. On remarque sur ces profils verticaux que la température et la salinité sont assez homogènes sur la verticale. Le profil de turbidité est par contre très marqué et la sonde YSI sature assez rapidement.

Les prélèvements se sont effectués entre -2 et -4 m sous la surface, dans la zone supérieure du bouchon vaseux, avant la forte stratification. Il est un peu dommage de ne pas avoir eu un prélèvement un peu plus profond, puisque un des intérêts affichés de mesurer au niveau du bouchon vaseux était de pouvoir capter des fortes concentrations pour lesquelles on ne dispose pas de mesures de vitesse de chute.

1.2.2.2. EVOLUTION TEMPORELLE DES DIFFERENTS PARAMETRES MESURES

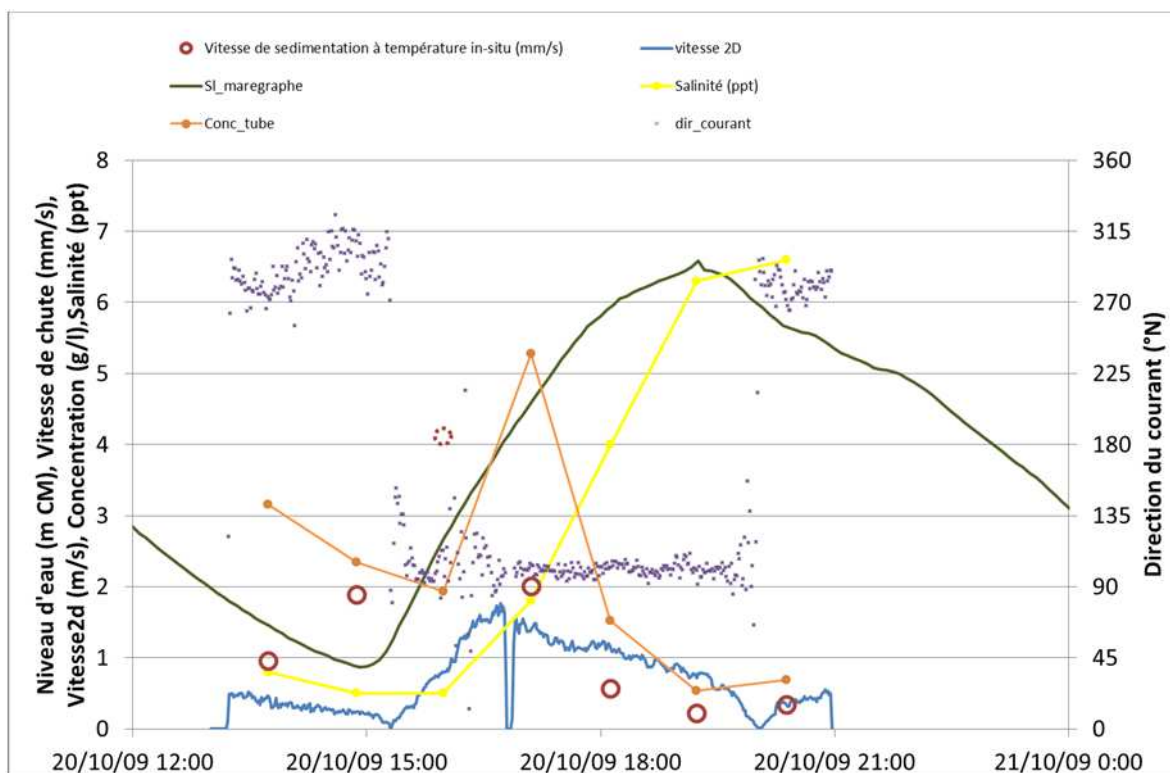


FIG. 4. PLACEMENT DES VITESSES DE CHUTES MESUREES DANS LEUR CONTEXTE HYDRODYNAMIQUE

Les mesures commencent un peu avant la basse mer locale et finissent un peu après la pleine mer locale. Les vitesses mesurées donne un pic de flot à 1,8m/s, et la salinité augmente logiquement de 0,8g/l à 6,5g/l jusqu'au moment de la renverse flot/jusant. La concentration capturée dans le tube d'Owen (attention, les hauteurs de prélèvement ne sont pas les mêmes) diminue dans un premier temps puis augmentent fortement au moment du pic de flot, pour diminuer à nouveau par la suite. La vitesse de chute mesurée semble suivre les variations de la concentration capturée (sauf pour la première mesure) dans le tube avec une saturation de la vitesse de chute à 2 mm/s.

Si l'on compare sur la figure 5 la vitesse de chute mesurée (ronds rouges) à la vitesse de chute modélisée en fonction de la concentration (courbe verte), alors on obtient une comparaison correcte, mis à part pour le premier point et le troisième point douteux. Ce résultat était attendu puisque le premier graphique montrait que les nouvelles mesures venaient confirmer les mesures déjà effectuées et confortait donc la loi utilisée dans le modèle.

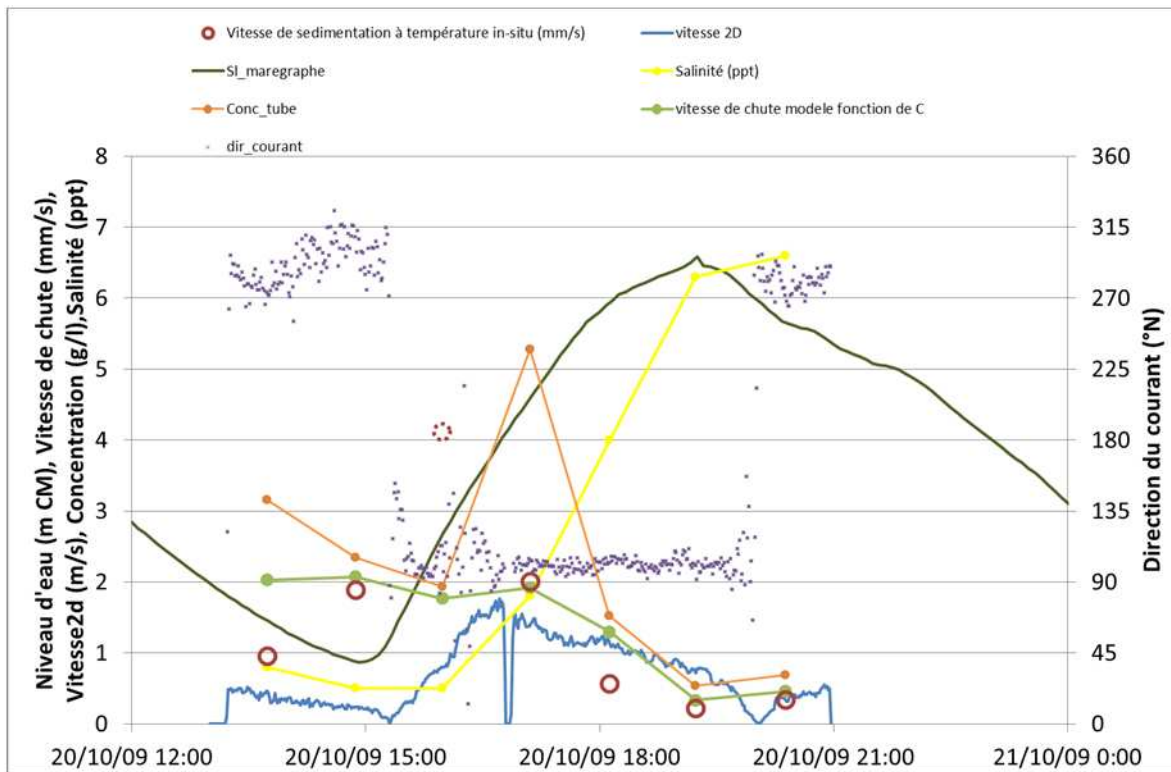


FIG. 5. COMPARAISON A LA VITESSE DE CHUTE MODELISEE POUR LES CONCENTRATIONS MESUREES

Si maintenant, on compare sur la figure 6 la vitesse de chute mesurée (rond rouge) à la vitesse de chute modélisée avec la fonction : Vitesse de chute en fonction de la Concentration et la loi de défloculation en fonction de la vitesse 2D (courbe bleue), alors on voit que l'on sous-estime la vitesse de chute notamment pendant le pic de flot.

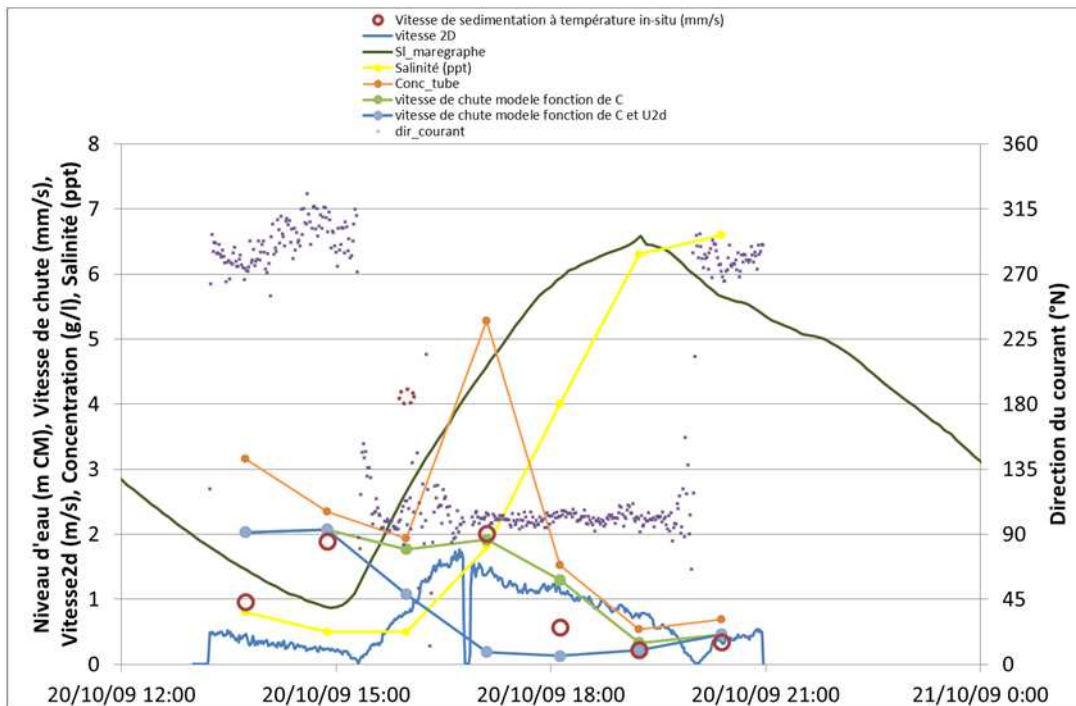


FIG. 6. COMPARAISON A LA VITESSE DE CHUTE MODELISEE POUR LES CONCENTRATIONS MESUREES ET LA VITESSE 2D MESUREE

Il est difficile de voir un effet de défloculation ou d'impact de la vitesse de l'écoulement sur la vitesse de chute. Il est tout de même difficile de conclure à partir de ce graphique, car on note par exemple une diminution de la vitesse de chute à l'étape de pleine mer, alors que l'on s'attendrait à une augmentation de la vitesse de chute par floculation (car on raisonne sur l'ensemble de la colonne d'eau). Cependant, ces mesures se trouvant dans la partie supérieure de l'écoulement, il est normal d'obtenir des concentrations faibles en surface, si les floccs ont chuté dans la partie inférieure de l'écoulement et donc des vitesses de chute faibles !

1.2.3. MODELISATION DU FONCTIONNEMENT DES TUBES D'OWEN

Etant donné la méthode utilisée du tube d'Owen, nous avons réfléchi au fait de pouvoir exploiter l'information issue des sous échantillons. Il est difficile d'étudier directement ces sous échantillons car cela revient à séparer des classes de floccs ou de sédiment. Par contre, il est possible de simuler le comportement des sédiments dans le tube d'Owen, et de comparer les résultats du modèle de vitesse de chute, sur la partie qui reste dans le tube après chaque prélèvement. L'intérêt de ce complément d'analyse est que chaque mesure de station se scinde en 10 mesures complémentaires, que l'on compare directement au résultat de concentration du modèle 3D.

Il ne faut par contre pas perdre de vue que seul le premier échantillon est représentatif de l'échantillon pris en nature, puisque au fur et à mesure que l'on soustrait des sous-échantillons au tube d'Owen, les floccs qui tombent rapidement sont extraits. Les concentrations de plus en plus faibles au cours des extractions de sous-échantillons sont donc moins en moins composées de particules flocculées.

Les vitesses des sous-échantillons calculées sont tracées de la même couleur pour chaque expérience. On voit que la vitesse calculée par la méthode du tube d'Owen correspond presque à la vitesse de chute moyenne calculée pour le premier sous-échantillon, ce qui correspond bien à ce qui est modélisé.

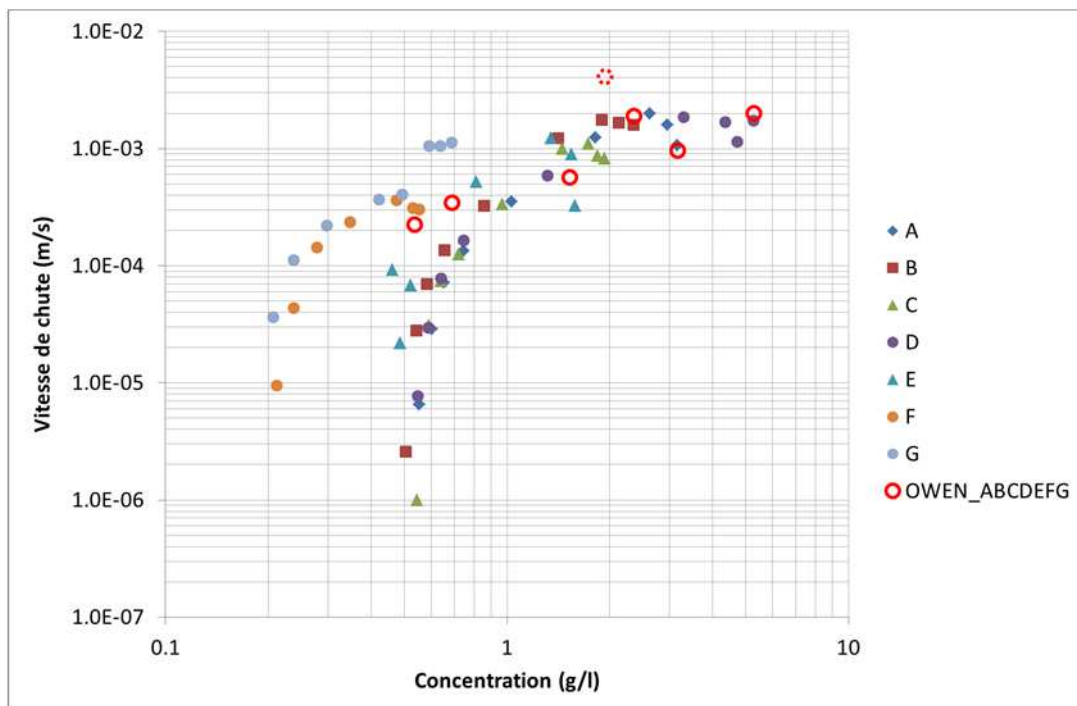


FIG. 7. VITESSES DE CHUTES DES SOUS-ECHANTILLONS DES TUBES D'OWEN

On voit par exemple que pour le premier sous échantillon F, on obtient une vitesse de chute de 0.2mm/s pour une concentration de 0.5 g/l, alors que pour la même concentration on obtient une vitesse de chute de 0.02 mm/s (soit 10 fois moins) dans le cas du 8eme sous échantillon B, voire 100 fois moins pour le dernier sous échantillon B, ou il n'y a plus que de fines particules défloculées.

La loi utilisée dans le modèle pour des états floculés et défloculés (=10% de la vitesse de chute floculée) semble donc assez réaliste comme indiqué sur la figure 11.

Il est intéressant aussi de voir sur ce graphe qu'il y a 2 groupes de mesures : ABCDE qui convergent toutes vers une concentration finale de 0,5 g/l et FG qui démarre avec une concentration initiale plus faible et converge vers une concentration de 0.2g/l. La proportion initiale de floes ne semblent donc pas être la même pour chaque échantillon. La concentration de chaque prélèvement pourrait presque être caractérisée par une concentration floculée et une concentration défloculée.

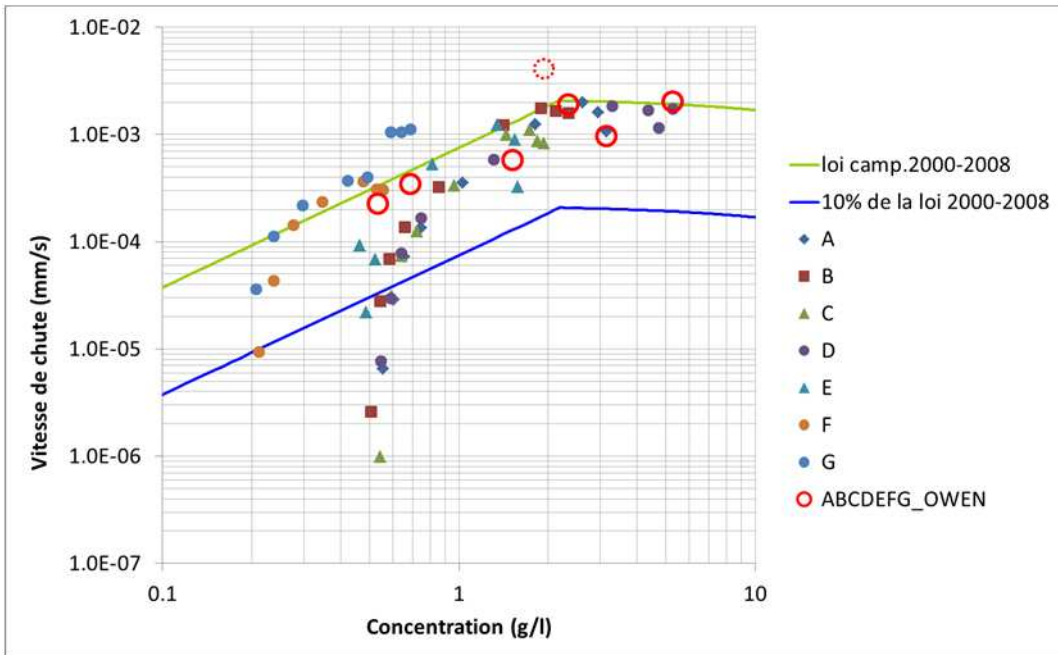


FIG. 8. VITESSE DE CHUTE DES SOUS-ECHANTILLONS ET LOI MODELISEE

On peut voir cela peut être plus facilement en traçant la concentration restant dans le tube d'Owen au cours du temps :

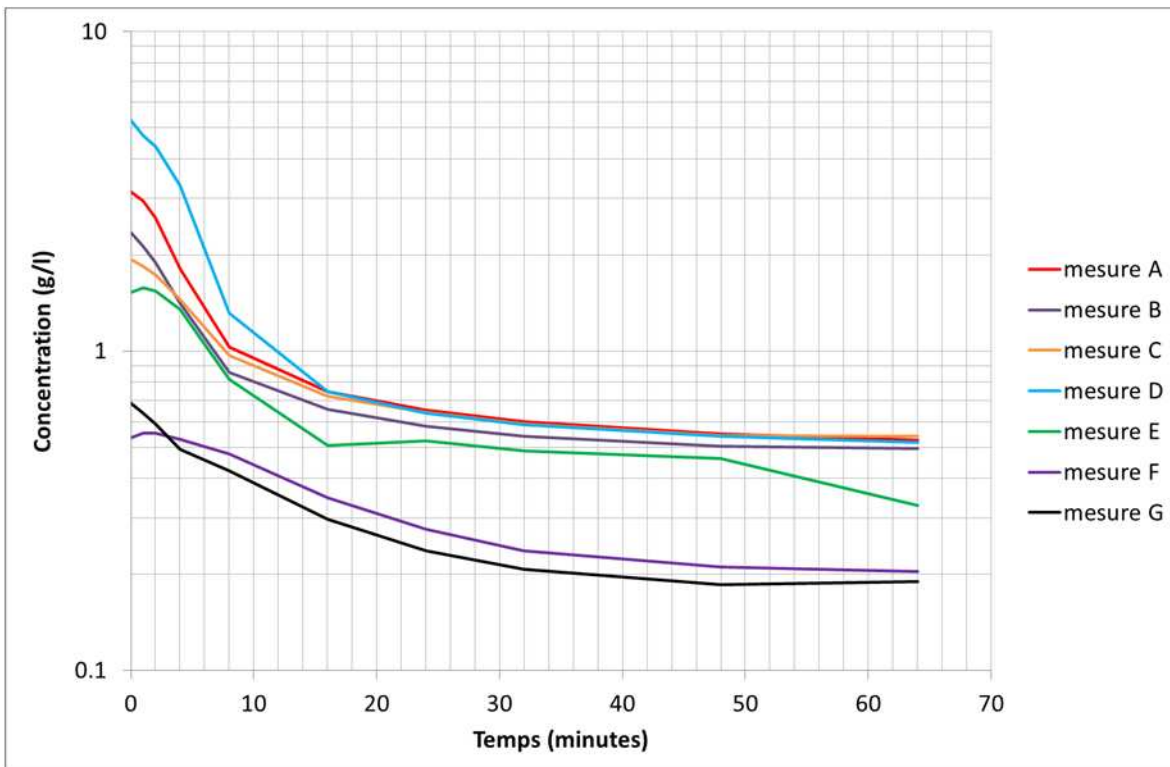


FIG. 9. CONCENTRATION DU TUBE D'OWEN AU COURS DU TEMPS

Nous avons simulé les expériences du tube d'Owen avec notre loi modélisée pour les états floculés (pas d'interaction avec la vitesse).

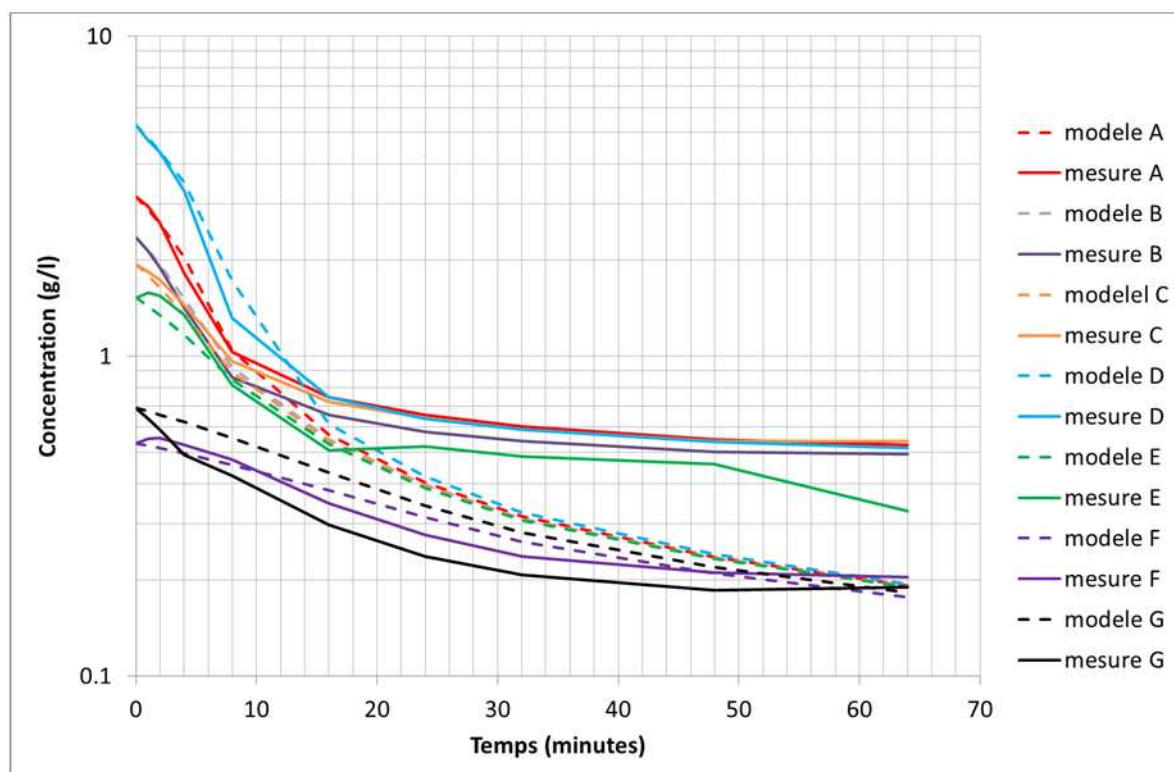


FIG. 10. CONCENTRATION DU TUBE D'OWEN AU COURS DU TEMPS ET SIMULATIONS

On a une bonne représentation de la décroissance temporelle de la concentration dans le premier ¼ d'heure, qui est encore représentatif de l'échantillon prélevé en nature. Pour la suite toutes les expériences tendent vers 0.2g/l comme les expériences F et G, ce qui n'est pas illogique puisque nous utilisons la loi de vitesse de chute fonction de la concentration pour un état dit « floculé », alors que manifestement ce n'est plus le cas pour les expériences ABCDE après ¼ d'heure.

Ces expériences viennent donc confirmer la loi de vitesse de chute en fonction de la concentration utilisée pour les états floculés. Les vitesses de chute en état défloculé se rapprochent de ce qui a été choisi dans le modèle soit 10% de la vitesse de chute floculée.

Le choix de passer d'un état floculé à défloculé en fonction de la vitesse de l'écoulement n'est pas confirmé par ces mesures, mais n'est pas non plus contredit. Cependant, on voit bien que sur ces expériences, une partie de la concentration se trouve en état floculé et une autre partie en état défloculé. Pour aller plus loin dans la modélisation il serait intéressant d'aller dans une logique de séparation de ces deux concentrations.

1.3. MESURES EFFECTUEES POUR LE GPMNSN DANS L'ESTUAIRE EXTERNE SUR LE SITE DE LA LAMBARDE

Dans le cadre d'études en cours pour le Grand Port Maritime de Nantes Saint-Nazaire, des mesures de vitesse de chute ont été effectuées par la société IMDC sur le site de la Lambarde pendant trois jours du 26 au 28 septembre 2011 avec un instrument de mesure INSSEV_LF. Il nous a paru utile d'inclure une analyse de ces données dans le présent rapport et nous avons sollicité le GPMNSN en ce sens qui nous a autorisés à utiliser ces données.

1.3.1. DESCRIPTION DE L'INSTRUMENT ET DU PROTOCOLE DE MESURE

L'INSSEV_LF¹ est un système de mesure hybride comprenant :

- ✓ Une unité de prélèvement d'échantillons de floccs estuariens sur site Van Dorn constitué d'un tube en Perspex de prise d'échantillons d'eau de 2,2 l qui est immergé horizontalement près du fond pour prélever des floccs de vase en minimisant tout risque de dislocation,
- ✓ Un instrument LabsFLOC², mis au point entre 2004 et 2006 par A. Manning (HR Wallingford), installé sur le bateau et constitué d'une colonne de décantation en Perspex de 190mm de haut et 100mm de côté et d'une caméra vidéo faiblement intrusive pour observer les floccs qui sédimentent dans la colonne de décantation.
- ✓ Une pipette en verre inversée de 4mm de diamètre interne et 0,4 m de long permettant d'extraire un volume de sédiments en suspension une fois le tube Van Dorn remonté sur le bateau et de transférer cet échantillon dans le LabsFLOC.

La caméra vidéo de haute résolution prend des images des floccs en silhouette sombre sur un fond clair grâce à un rétro-éclairage avec une profondeur de champ d'un millimètre. La cadence d'acquisition est de 25 Hz avec une taille d'image de 3,3 mm de haut et 4,7mm de large. Les images sont numérisées à la résolution de 640x480 pixels (un pixel égal 6,3 microns) et la mesure dure 6 minutes (360s). Les images sont ensuite traitées par un logiciel de reconnaissance d'image (Digifloc v1.0 sur Matlab) affectant une ellipse équivalente sur chaque flocc et calculant sa vitesse de chute.

Les tests de validation effectués ont montré que le transfert de l'échantillon par la pipette créait une ségrégation naturelle par sédimentation différentielle conduisant à mesurer d'abord les floccs tombant les plus rapidement. De nombreuses précautions sont prises pour assurer la reproductibilité des mesures. Celles-ci sont détaillées dans le rapport de mesures d'IMDC.

La prise d'échantillons s'est accompagné de mesures de profondeur, température et salinité du milieu ambiant ainsi que d'une mesure de la concentration en MES dans l'échantillon analysé. Au total 18 échantillons furent analysés le 1er jour, 16 le deuxième jour et 12 le troisième jour, soit un total de 46 mesures.

1.3.2. ANALYSE ET RESULTATS DES MESURES

L'analyse repose sur une série de recherches scientifiques menées à partir des années 90 qui ont permis de montrer que la population de floccs observable en nature n'était pas homogène et qu'il convenait donc de mesurer la distribution de la taille des floccs observables dans un échantillon. Ainsi pour cette étude, douze classes de taille de floccs ont été utilisées pour un diamètre équivalent (moyenne géométrique de la longueur des axes de l'ellipse) compris entre 40 et 640 microns. Conformément aux travaux de Manning les floccs des quatre classes de diamètre inférieur à 160 microns sont appelés microflocs alors que les floccs des huit classes supérieures sont appelés macroflocs.

Pour chaque flocc, des analyses complémentaires aux mesures de taille et de vitesse de chute permettent d'obtenir la densité effective du flocc, sa porosité, son poids en matière sèche, ses dimensions fractales.

Pour chaque échantillon, la distribution de tous ces paramètres dans les 12 classes de taille est fournie avec le nombre de floccs analysés. Puis, la valeur moyenne des différents paramètres est calculée. Le

¹ acronyme pour IN-Situ SEtting Velocity_LabsFloc

² acronyme pour Laboratory Spectral Flocculation Characteristics

même travail est ensuite effectué en distinguant les microflocs et les macroflocs. L'ensemble de ces données est fourni dans les annexes au rapport d'IMDC.

1.3.3. INTERPRETATION DANS LE CADRE DE CETTE ETUDE

Les valeurs moyennes de ces mesures ont été ajoutées aux mesures effectuées par HOCER à l'aide d'un tube d'Owen dans l'estuaire de la Loire :

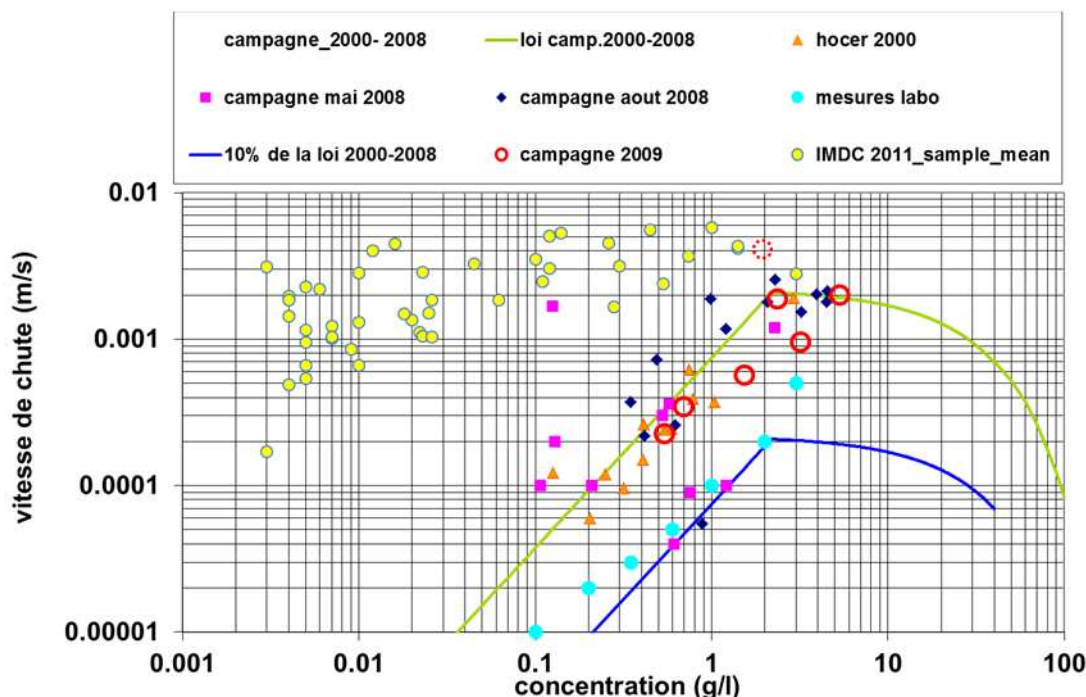


FIG. 11. INSERTION DES MESURES DE LA CAMPAGNE 2011 IMDC PAR LABSFLOC DANS LE GRAPHIQUE VITESSE DE CHUTE FONCTION DE LA CONCENTRATION EN MES

Un écart important est noté entre les deux séries de mesures dès que la concentration devient inférieure à 1 g/l. Cet écart augmente lorsque la concentration en MES diminue ; Il atteint un facteur 100 pour une concentration de 0,1 g/l avec des vitesses de chute mesurées par IMDC de l'ordre de 3 à 5 mm/s pour cette concentration.

La figure suivante présente le détail des mesures d'IMDC en séparant les microflocs des macroflocs et en distinguant les échantillons prélevés pendant une opération de clapage à l'aide d'un point central vert. On observe que les microflocs dominent la moyenne pour la plupart des échantillons et qu'il ne semble pas y avoir d'écart notable entre un échantillon provenant du panache de clapage ou d'un échantillon pris à un autre moment ou à un autre endroit.

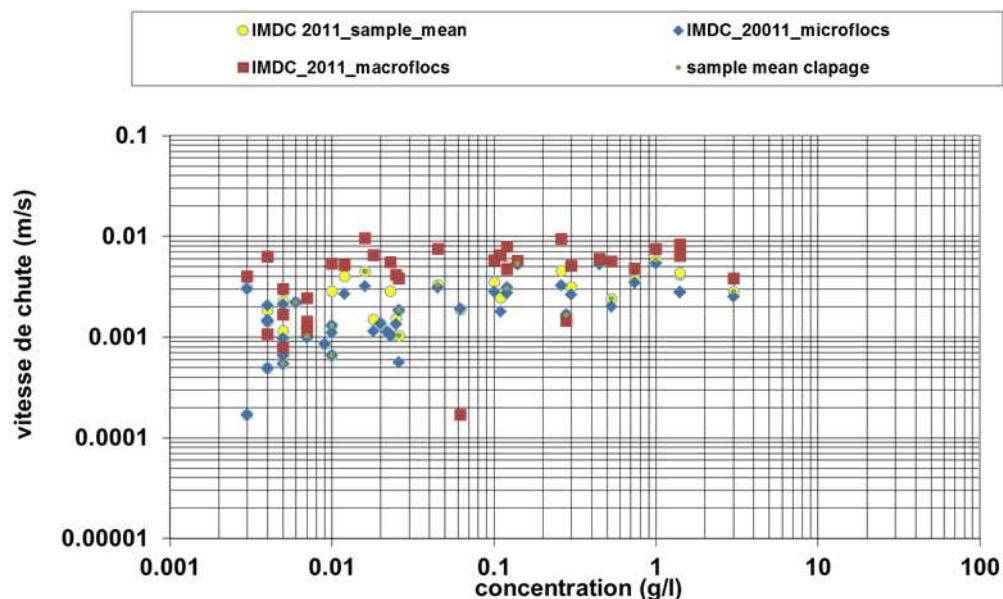


FIG. 12. MESURES DE VITESSES DE CHUTES DES MACROS ET MICROFLOCS

L'écart observé entre les deux techniques de mesure interroge sur leur pertinence respective pour le paramétrage de la vitesse de chute dans le modèle. Pour éclairer ce point, nous nous sommes reportés à l'analyse des différentes techniques de mesures effectuées dans le cadre du projet européen et incluant trois jours de mesures en septembre 1993 dans l'estuaire de l'Elbe en Allemagne. Des premiers résultats furent présentés à la conférence INTERCOH'94 dans une session spéciale et les résultats finaux rapportés dans Dyer et al. (1996).

Dyer et al. (1996) rapportent les résultats de trois jours de mesures dans l'estuaire de l'Elbe du 9 au 11 juin 1993 avec 10 instruments de mesure incluant trois tubes d'Owen, 4 autres tubes à sédimentation et trois instruments de mesure vidéo dont l'INSSEV. La comparaison indique que les tubes d'Owen fournissent des vitesses de chute d'un ordre de grandeur inférieur aux mesures vidéo directes et peuvent être en désaccord entre eux notamment pour les faibles concentrations. Deux instruments dont l'INSSEV paraissent particulièrement prometteurs et nécessitent des développements avant de pouvoir être utilisés en ingénierie. A défaut le tube d'Owen reste la seule méthode disponible et une attention particulière dans le protocole de mesure doit être observée pour obtenir des résultats fiables.

Dearnaley(1994) retrace l'historique de l'introduction du tube d'Owen en ingénierie et en discute les limitations. Il présente ensuite le détail des mesures qu'il a réalisées dans l'estuaire de l'Elbe avec un tube d'Owen par la méthode gravitaire habituelle (en incluant l'analyse des sous-échantillons) et par l'analyse d'images vidéo. Il confirme que les vitesses mesurées par la méthode habituelle sont d'un ordre de grandeur inférieur à celles mesurées par vidéo. Il explique cette différence par l'existence de courants de retour verticaux importants dirigés du bas vers le haut qui réduisent les masses se déposant au fond du tube. Ces courants de retour liés au confinement de l'échantillon dans le tube lui paraissent irréalistes et il en conclut donc qu'il faut maintenant développer les méthodes vidéo non-intrusives pour s'approcher de vitesses de chute plus réalistes.

Il termine en attirant l'attention sur le fait que les modélisations numériques hydrosédimentaires combinent un grand nombre de lois empiriques qui s'équilibrent après calibration pour fournir des ordres de grandeur réalistes. La modification d'un des paramétrages comme celui de la vitesse de chute par l'adoption d'une technique de mesure vidéo au lieu du tube d'Owen aura donc des conséquences importantes sur les autres paramétrages (vitesse critique d'érosion, consolidation, etc..).

1.4. PARAMETRAGE DE LA VITESSE DE CHUTE EN FONCTION DU PARAMETRE DE TURBULENCE G

L'idée développée ici est de lier la floculation / défloculation directement à des seuils de turbulence locale en utilisant la même diminution de vitesse de chute que celle utilisée actuellement ce qui permettrait d'avoir une différenciation verticale de ce phénomène et de simuler une approche plus physique du phénomène. Des tests sur plusieurs couples de seuils (seuil haut et bas du paramètre G) permettraient d'évaluer la sensibilité au paramètre et de sélectionner le paramétrage le plus réaliste.

1.4.1. ANALYSE DES EVOLUTIONS DU PARAMETRE G DANS LE MODELE

Pour quantifier l'effet de la turbulence, nous suivrons ici l'approche de Van Leussen (1994) qui ne considère pas le gradient de vitesse, qui fluctue rapidement, mais un gradient de vitesse absolu, défini par Camp et Stein en 1943 qui est égal à : $G = \sqrt{\frac{\varepsilon}{\vartheta}}$. Ce paramètre est lié au taux de dissipation, ε , qui a un rôle important dans la cassure des floes, et au diamètre moyen du floc qui est relié à la taille η des tourbillons qui dissipent l'énergie, avec $\eta = \left(\frac{\vartheta^3}{\varepsilon}\right)^{\frac{1}{4}}$ avec ϑ la viscosité moléculaire, d'après Kolmogorov (1941).

Pratiquement dans le code, d'après R. Soulsby : $\varepsilon = \left(\frac{\tau}{\rho}\right) \times \left(\frac{dU}{dz}\right)$

G peut donc s'écrire : $G = \sqrt{U_*^2 / \vartheta \times \left(\frac{dU}{DZ}\right)}$

Pour effectuer un choix des seuils du paramètre G, nous avons effectué un calcul sur l'état actuel, pour lequel nous avons sorti le paramètre G (en 3D) calculé au cours du temps, sur la période du 29/03/2007 au 07/05/2007 (débit de 1600 à 500 m³/s), période pour laquelle les relevés de profondeur du port par sonde bi-fréquence 33-210 kHz indiquent une remontée importante de sédiment.

Une pré-analyse de ce paramètre va nous permettre de cibler des seuils à utiliser en comparaison à ceux utilisés sur la vitesse moyenne. Nous nous sommes principalement basés sur le pk 22 pour l'analyse du paramètre G car il s'agit d'une zone clé pour la remontée du sédiment entre le bouchon vaseux aval et la formation du bouchon vaseux amont. Cependant, il sera présenté aussi des résultats suivant les pks à la suite.

Pour exemple, voici le paramètre G sorti temporellement au Pk 22 à différents niveaux du fond et le paramètre G moyen (intégré verticalement). G est choisi arbitrairement positif lorsque l'écoulement se dirige vers l'amont (flot) et négatif lorsque l'écoulement se dirige vers l'aval (jusant).

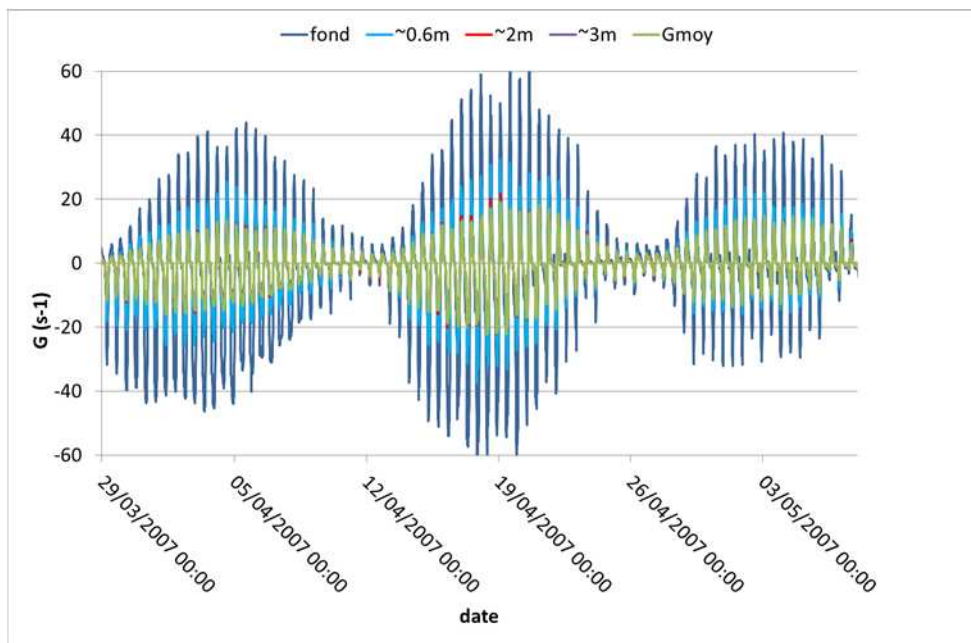


FIG. 13. PARAMETRE G AU PK22 A DIFFERENTES HAUTEURS AU-DESSUS DU FOND

On voit nettement, une turbulence plus importante sur les plans du fond, et une turbulence proche de la turbulence moyenne sur le reste de l'écoulement. Les valeurs obtenues du paramètre G sont conformes à ce qui peut être attendu d'après la thèse de Lenormand de 1993 qui indique que: « Généralement les valeurs de G sont comprises entre 1 et 50 s⁻¹ : les valeurs 1 à 10 s⁻¹ sont représentatives de G à mi-hauteur dans la colonne d'eau et G est supérieur à 10 s⁻¹ dans les régions très turbulentes et particulièrement près du fond. Aux périodes des étales, G est alors compris entre 0 et 1 s⁻¹. »

Pour essayer de trouver une correspondance avec la formulation appliquée à partir de la vitesse moyenne, nous avons tracé le paramètre G fonction de la vitesse 2D.

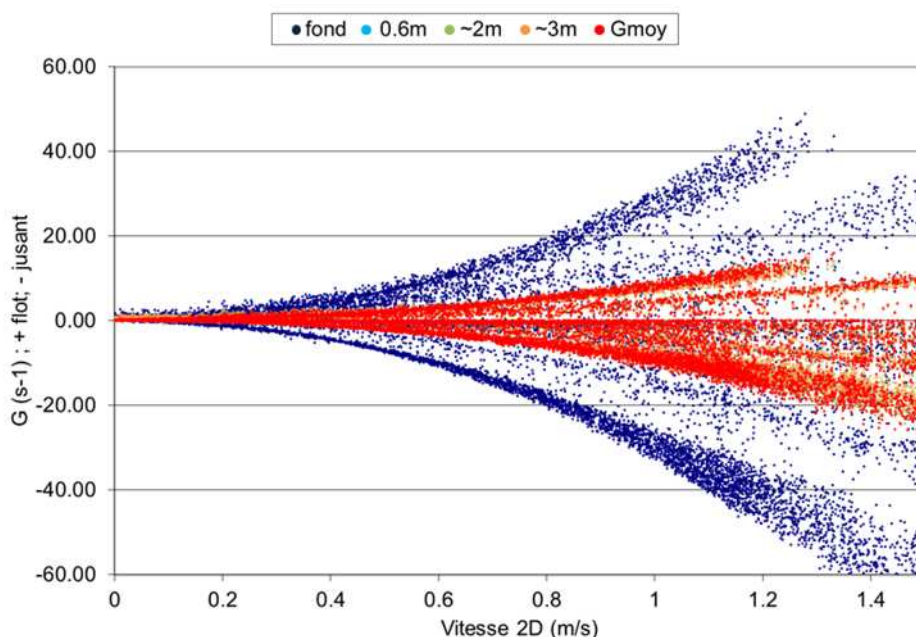


FIG. 14. PARAMETRE G EN FONCTION DE LA VITESSE 2D AU PK 22

A part pour le plan du fond, on voit que le paramètre G répond de manière assez similaire au paramètre G moyen. Par contre si l'on fait la même chose en fonction de la vitesse locale 3D on obtient :

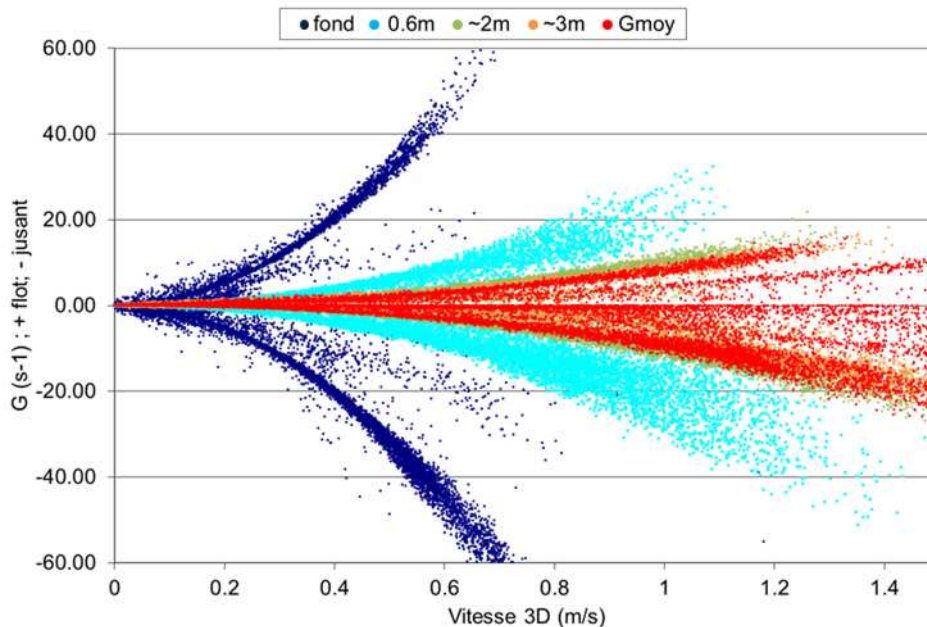


FIG. 15. PARAMETRE G EN FONCTION DE LA VITESSE 3D LOCALE AU PK 22

Cette fois ci on voit de manière plus importante que le paramètre G prend une forte intensité pour de faibles vitesses locales sur le premier mètre proche du fond.

Cela explique de façon simple que la relation utilisée (basée sur la vitesse 2D) jusqu'à maintenant mais appliquée à la vitesse 3D au lieu de la vitesse 2D avait donnée de mauvais résultats (voir rapport R9, tests de sensibilité), puisque nous ne sommes pas du tout dans les mêmes gammes de vitesses suivant la hauteur de référence, ce qui empêchait la destruction des floes sur le bas de l'écoulement. L'utilisation du paramètre G en 3D sera donc plus probante que l'utilisation de la vitesse en 3D.

1.4.2. PROPOSITION DE TESTS DE SENSIBILITE

Pour démarrer avec des seuils de G assez proches de ce que nous cherchons, nous allons tout de même chercher à cibler les temps de dépassement similaires de la vitesse 2D par rapport à ceux du paramètre G, bien que nous ayons démontré qu'il n'y aura pas de correspondance directe entre G en 3D et la vitesse moyenne. Pour cela nous avons calculé les pourcentages de temps de dépassement des deux vitesses critiques 0,5 et 1,1 m/s pendant la durée de la simulation et nous avons recherché les valeurs de G permettant de retrouver ces pourcentages.

Un premier ajustement a porté sur le paramètre G moyen et a permis d'aboutir aux valeurs 2 et 8 s-1 (voir tableaux ci-dessous):

	m/s	% du temps		s-1	% du temps
vitesse 2d	>0.5	18	Gmoyen	>2	17
vitesse 2d	<-0.5	52	Gmoyen	<-2	41
vitesse 2d	>1.1	6	Gmoyen	>8	6
vitesse 2d	<-1.1	25	Gmoyen	<-8	24

LOT 1-PHASE 3 : TESTS DE SENSIBILITE

Le premier test sera donc :

- Si $G < 2. s^{-1}$: $Ws = 100\%$ de la vitesse de chute floculée
- Si $G > 8. s^{-1}$: $Ws = 10\%$ de la vitesse de chute floculée

Si l'on se base sur le paramètre G au fond pour le seuil bas et G en haut de l'écoulement pour le seuil haut, on obtient les paramètres G suivants :

	m/s	% du temps		s-1	% du temps
vitesse 2d	>0.5	18	Gfond	>5	18
vitesse 2d	<-0.5	52	Gfond	<-5	41
vitesse 2d	>1.1	6	Gsurface	>8	6
vitesse 2d	<-1.1	25	Gsurface	<-8	24

Dans le cas où le premier test se sera révélé prometteur, nous pourrions alors envisager un second test avec les limites suivantes :

- Si $G < 5. s^{-1}$: $Ws = 100\%$ de la vitesse de chute floculée
- Si $G > 8. s^{-1}$: $Ws = 10\%$ de la vitesse de chute floculée

Notons que chaque calcul sera analysé séquentiellement pour ajuster à chaque fois la relation Ws (G) pour le test d'après. Nous proposons donc, au titre de la stratégie initiale, un jeu de paramètre complémentaire à tester qui pourrait être :

- Si $G < 5. s^{-1}$: $Ws = 100\%$ de la vitesse de chute floculée
- Si $G > 10. s^{-1}$: $Ws = 10\%$ de la vitesse de chute floculée

Qui sera probablement modifié à l'issue des deux premiers calculs

	m/s	% du temps		s-1	% du temps
vitesse 2d	>0.5	18	Gfond	>5	18
vitesse 2d	<-0.5	52	Gfond	<-5	41
vitesse 2d	>1.1	6	Gsurface	>10	4
vitesse 2d	<-1.1	25	Gsurface	<-10	20

1.4.3. RESULTATS DES TESTS DE SENSIBILITE

Ces tests n'ont pas été réalisés. Le comité d'expert a jugé qu'il été prématuré de relier le phénomène de floculation/défloculation à la turbulence, sans avoir de mesures spécifiques complémentaires.

1.5. CONCLUSIONS SUR LE PARAMETRAGE DE LA VITESSE DE CHUTE

L'analyse de deux nouvelles campagnes de mesures en nature réalisées à l'automne 2009 a permis de compléter la série de mesures déjà disponible. La campagne d'Hocer a été réalisée comme les précédentes et fournit des résultats comparables sans apporter les éléments complémentaires attendus. La campagne d'IMDC a été réalisée avec un instrument à mesure directe qui fournit des vitesses de chute bien supérieures pour les concentrations inférieures à 1 g/l. Cet écart s'explique par les limitations du tube d'Owen aux faibles concentrations.

L'augmentation des vitesses de chute pour les concentrations faibles aurait pour conséquence dans le modèle actuel une exportation moins importante des sédiments vers le large et un retour plus important des sédiments par le fond dans l'estuaire. Cependant, comme signalé par Dearnaley (1994), la modification du paramétrage de la vitesse de chute ne peut pas s'effectuer de manière isolée dans une modélisation numérique sans revoir les autres paramétrages afin de retrouver un calage réaliste du modèle.

Enfin, la faisabilité de l'utilisation d'un paramètre de turbulence local (G) pour paramétrer la floculation a été confirmée mais n'a pas été mise en pratique faute de données de terrain suffisante pour valider la démarche.

2. TEST DE SENSIBILITE A LA CONDITION AVAL EN M.E.S.

2.1. RAPPEL SUR LA CONDITION LIMITE AVAL ACTUELLE

Les calculs d'évaluation de la situation actuelle ont montré que le modèle était capable de faire remonter de la vase dans l'estuaire interne à partir du moment où l'estuaire externe était suffisamment alimenté. C'est pourquoi une condition limite aval a été mise en place en phase 2 lors de l'exploitation du modèle sur l'état actuel (rapport R10) de la façon suivante : la masse de sédiment qui sort par les frontières maritimes est réintroduite dans le modèle sous forme de dépôt au large de Saint-Nazaire (dans un rayon compris entre 15 et 20 km) dans l'estuaire externe comme indiqué sur la figure ci-dessous.

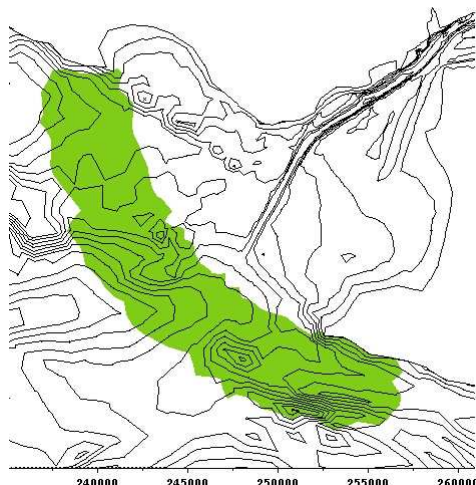


FIG. 16. ZONE DE DEPOT DES SEDIMENTS SORTIS PAR LA FRONTIERE MARITIME

Les résultats quantitatifs de masse de vase dans l'estuaire interne sont par contre pour l'instant fortement liés à l'hypothèse de quantité de vase réinjectée en condition limite (puisque l'on fonctionne en recyclage des flux sortant) et sous la forme dont elle est réinjectée (crème de vase liquide ou non et positionnement géographique).

Le travail a été effectué ici en deux temps avec tout d'abord la définition d'une nouvelle condition à la limite aval permettant de s'affranchir des hypothèses ci-dessus puis le passage d'un calcul de sensibilité pour évaluer l'intérêt de cette condition.

2.2. NOUVELLE PROPOSITION DE CONDITION AVAL

Nous avons tout d'abord effectué une recherche des zones cartographiées comme étant des stocks de vase dans l'estuaire externe.

Il existe peu de données sédimentologiques récentes sur l'estuaire externe, nous avons utilisé la carte de Vanney (thèse de 1970) reproduite en figure 2.1 et une compilation de données de plusieurs auteurs effectuée par Sanchez (2008) en figure 2.2. Celles-ci indiquent plusieurs zones fortement vaseuses (figure 2.1):

- La zone 1 : au nord qui se trouve en sortie de l'estuaire de la Vilaine
- La zone 2 : qui se situe dans la grande fosse « les bouquets » à l'ouest de la Lambarde
- La zone 3 : zone de la Lambarde
- La zone 4 : baie de Saint-Michel-Chefchef et chenal sud de la Loire
- La zone 5 : baie de Bourgneuf

La carte de Vanney retranscrit un état des années 60 (prélèvements 1962 à 1967), ce qui ne permet pas de tirer des conclusions sur toutes les zones. Notamment le chenal sud de la Loire et la baie de saint-Michel-Chef-chef (zone 4), pour lequel le fonctionnement du chenal principal (Nord ou sud) a fortement changé. Cette zone est de toute façon assez proche de l'estuaire interne pour pouvoir créer des conditions de recyclage assez naturellement dans le modèle, sans avoir à forcer une zone de source de sédiment.

Les zones 1, 2, 3 et 5 sont par contre intéressantes et certainement peu liées à l'état de l'estuaire interne à cette date. Elles peuvent être alors aussi des sources de sédiment pour l'estuaire interne dans certaines conditions. Afin d'estimer les zones pouvant avoir un rôle de source pour l'estuaire de la Loire, nous avons tracé des cartes de débit unitaire (2D) et de vitesse de fond, en flot et jusant pour une vive-eau (coeff. 95) de revif et cela pour 2 débits : 200 m³/s et 2300 m³/s (**figure 2.3 à 2.6**). Nous avons ensuite tracé à main levée sur ces cartes l'emprise de la veine d'eau venant alimenter l'estuaire au flot ou inversement au jusant.

On voit nettement que les zones 2 et 3 se trouvent pleinement dans la veine de flot qui vient charger l'estuaire. La zone 1 au nord se trouve en limite et il sera donc plus difficile de trancher sur son influence, il fera donc partie d'un test de sensibilité. La zone 5 (baie de Bourgneuf) semble déconnectée de manière directe avec l'estuaire interne de la Loire (on n'exclut pas une expulsion de la zone 5 au jusant qui soit reprise au flot dans la veine se dirigeant vers l'estuaire, mais celle-ci passera de toute façon forcément par la zone 2 et 3).

Nous avons d'autre part calculé des flux d'eau sur 4 sections encadrant l'entrée de l'estuaire interne (**figure 7**). Ces flux cumulés dans le temps sur les 8 mois d'exploitations confirment des entrées de volume d'eau par l'ouest et nord-ouest, la section sud étant plutôt une section de sortie.

A partir de ces résultats, nous avons défini trois zones de stockage (**figure 2.8**) pour lesquelles nous proposons de leur appliquer un stock illimité, mais à une concentration de référence qui sera la variable de sensibilité permettant de définir la quantité qui sera puisée au cours du calcul. Les flux sortant aux limites seront par contre complètement libres.

Ce concept nous permet de nous affranchir d'un recyclage des flux aux limites qui rendait le modèle complètement dépendant de la quantité initiale du sédiment mise dans le modèle et forçait celui-ci à faire circuler une quantité de vase dans l'estuaire externe. Le modèle sera ainsi beaucoup moins forcé, puisque libre de faire sortir une quantité de vase (initiale ou puisée) trop importante. De plus, la condition limite ne sera plus liée qu'à deux paramètres: les zones géographiques des stockage et la concentration appliquée à ces zones. Nous pourrons de plus quantifier sur chaque zone la quantité de sédiment puisée au cours du calcul.

Afin d'estimer quelle quantité de sédiment pourrait être puisée pour chacune de ces zones lors d'un calcul d'exploitation, nous avons utilisé les contraintes qui ont été calculées sur chacune des zones sur un calcul pour définir les flux d'érosion. Nous avons tracé (**figures 2.9, 2.10 et 2.11**) le cumul de ces

masses érodées pour les zones 1, 2 et 3 et cela pour 3 concentrations de référence : 200, 250 et 300g/l. On voit l'effet très important de la concentration de référence sur les quantités de sédiment possiblement puisées.

2.3. CALCULS ET RESULTATS

A l'issue de la présentation de cette nouvelle condition aval, le GIPLE a demandé d'effectuer un calcul de sensibilité avec les 3 zones aval décrites et une concentration de 300 g/l. Un calcul d'exploitation de 8 mois a donc été effectué et comparé au calcul de référence avec recyclage des matériaux sortant par la frontière maritime. Les résultats des cubatures générales sont présentées en *figure 2.13*.

On voit notamment que la courbe de masse de la section dite « large » suit le rythme de la série temporelle des houles. Le modèle se charge à partir des trois zones dès que les houles sont importantes. Ce chargement en matériaux permet en partie de recharger l'estuaire en période hivernale. Par contre on voit qu'en période estivale ces zones ne permettent pas d'alimenter l'estuaire qui perd du sédiment au cours du temps.

La figure 2.14 montre les masses sorties par la frontière maritime. On voit qu'en période hivernale le nouveau test fait sortir plus de sédiment par la frontière et par contre quasiment pas en période estivale. Le cas de référence continue de faire sortir du sédiment par la frontière maritime en période estivale, car il est recyclé.

En conclusion, les 3 zones susceptibles d'être des sources de sédiment pour l'estuaire permettent effectivement un rechargement de l'estuaire en période hivernale, mais elles n'expliquent pas à elle seule le rechargement de l'estuaire sur une période annuelle. Cette méthode ne sera donc pas pour l'instant retenue, tant que le fonctionnement du système externe ne sera pas plus élucidé.

3. CALCUL DE SENSIBILITE AVEC IMPLANTATION D'UNE PROCEDURE DE DRAGAGE

La discussion en comité d'expert du 20 mai 2011 des premiers résultats de calcul de sensibilité à la condition aval a conduit à la demande d'examiner la possibilité d'effectuer un calcul de sensibilité du modèle à des dragages d'entretien des installations portuaires de la zone aval.

Ce calcul consiste à implanter un principe simplifié de dragage, pour évaluer le comportement du modèle si l'on enlève le sédiment qui reste en place dans le chenal de navigation au-dessus d'une certaine cote pour aller le claper sur le site de la Lambarde. Le modèle n'est donc pas modifié d'autre part sur son principe général, c'est-à-dire que les sédiments sortant par la frontière maritime au large sont toujours redéposés dans l'estuaire externe.

3.1. DESCRIPTION DE L'ALGORITHME DE DRAGAGE SIMPLIFIE IMPLANTE

Le dragage est effectué dans le modèle pour les zones 1 à 6 :

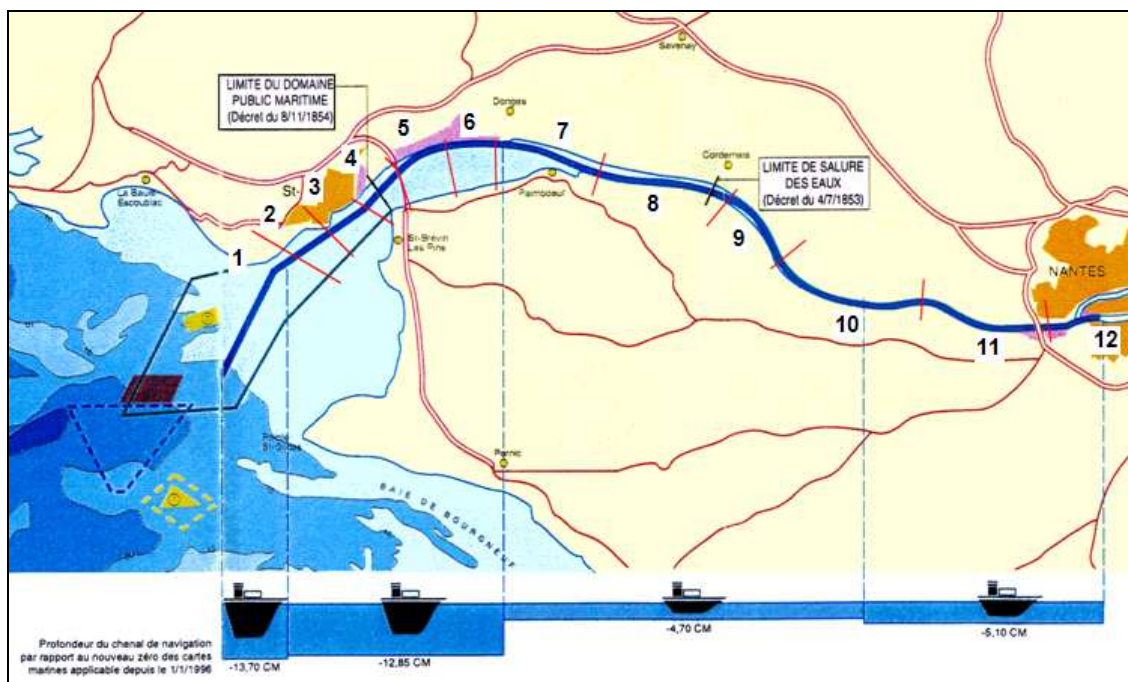


FIG. 17. ZONES DE DRAGAGES D'ENTRETIEN PORTUAIRE ET DES ACCES

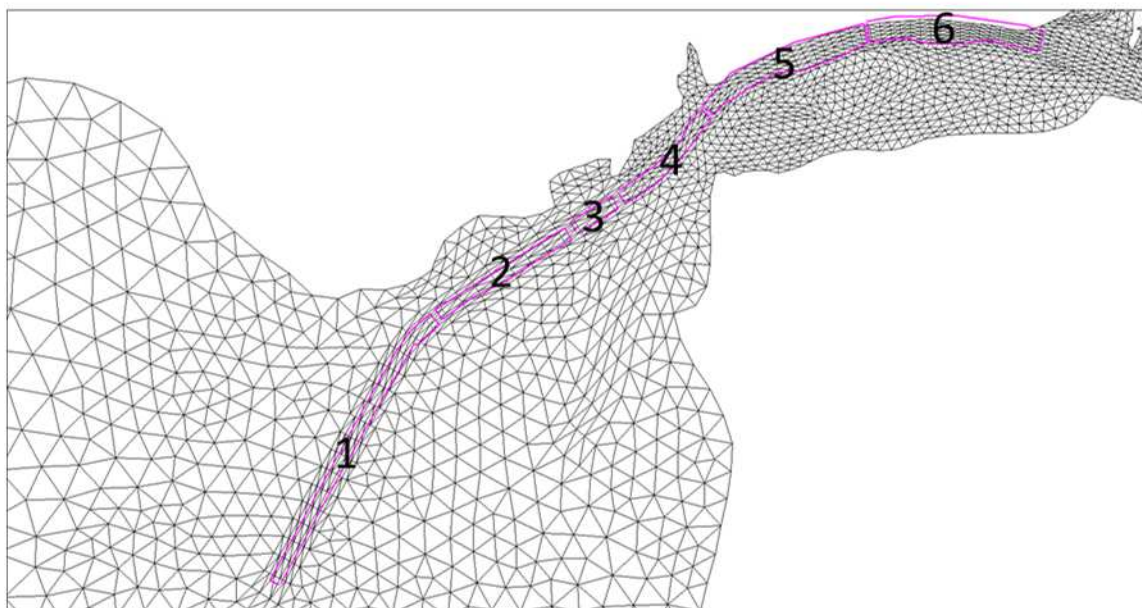


FIG. 18. EMPRISE DES ZONES DRAGUEES

On notera que les zones 5 et 6 sont plus grandes dans le modèle que dans la réalité car elles englobent les cercles d'évitage et la totalité des installations portuaires (dont les produits de dragages sont remis dans le chenal de navigation), en plus du chenal de navigation.

Le dragage est mis en œuvre une fois par jour (à midi) et consiste à revenir à la cote nominale de dragage qui a été fixée à -12,4mCM. La cote nominale est celle définie par le toit de la crème de vase ayant une concentration supérieure à 200g/l. Le dragage s'effectue dans les couches de sédiment dont la concentration est supérieure à cette limite. Les concentrations inférieures restent sur place. Les quantités draguées en masse sèche sont sauvegardées jour par jour et secteur par secteur.

Un algorithme de clapage est également mis en place au niveau de la Lambarde. Il consiste en un dépôt au sol du sédiment dragué. Le sédiment est déposé dans des couches de 40g/l à 200g/l.

3.2. RESULTATS DU CALCUL

Un calcul hydro-sédimentaire long a été effectué (8 mois exploitable) sur l'état actuel avec le cycle de forçage mis au point précédemment. Cette période d'exploitation inclut notamment les forçages de l'année 2007 sur les 5 premiers mois et les forçages de l'été 2009 :

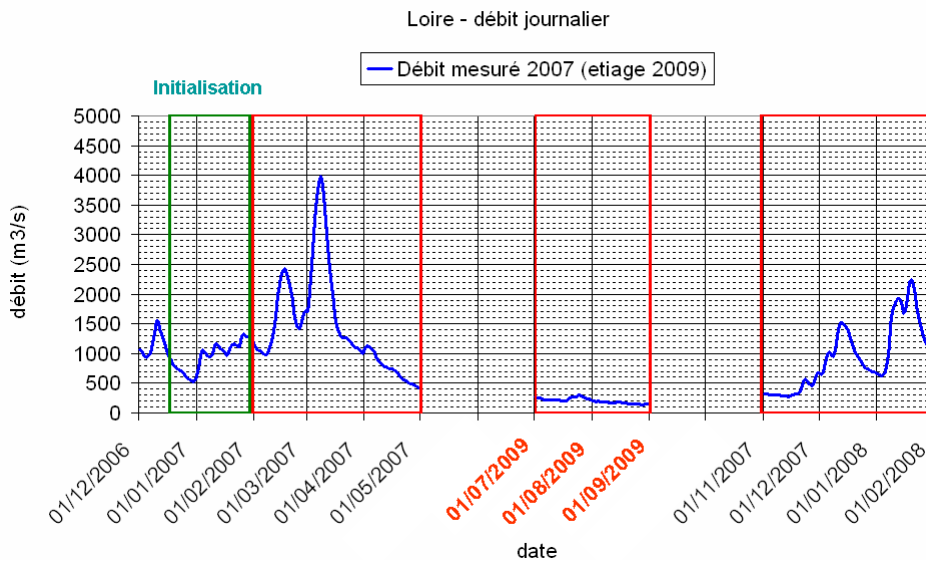


FIG. 19. DATE DES PERIODES DE DEBIT RETENUES POUR LE CYCLE DE 8 MOIS REPRESENTATIF

3.2.1. ANALYSE DU BILAN DE MASSE

Les figures hors-texte 3.1 à 3.5 fournissent les principaux paramètres du bilan de masse.

Figure 3.1 : cubatures des dépôts + suspension

On voit que l'estuaire (sections 4 à 12) se charge durant ces 8 mois d'une masse de 0,4 million de tonnes contre environ 3 millions de tonnes dans un calcul sans dragages. Cependant la répartition par zone reste cohérente par rapport aux calculs sans dragages.

On voit principalement que dans le calcul de référence, les sections 4-5-6, qui stockent la vase suite à la crue deviennent un zone source pour la reformation du bouchon vaseux (la courbe des sections 4-5-6 décroît pour une augmentation de la courbe des sections 11-12).

Dans le calcul avec dragage, le stock de la section 4-5-6 est épuisé par un dragage journalier qui est parfois plus important que le volume transportable quotidiennement par les dragues.

Figure 3.2 et 3.3 : cubatures des suspensions

Le bouchon vaseux est diminué, il n'est plus que de 0,4 millions de tonnes en été contre environ 0,8 dans un calcul sans dragage. Les masses minimum ne sont pas fortement modifiées car ce sont les maximums de MES en vives-eaux qui sont diminués.

Figure 3.4 et 3.5 : Flux entrant/sortant de l'estuaire

On voit que le fait de draguer dans le modèle et donc d'entretenir des fonds plus profonds dans le chenal de navigation permet de doubler le flux entrant par l'aval de l'estuaire. Cette masse entrante supplémentaire, transitant par une phase de dépôt dans le chenal de navigation, est donc instantanément draguée dans le modèle et ne permet pas de faire croître la masse du bouchon vaseux.

3.2.2. ANALYSE DES MASSES DRAGUEES

Pour chaque section nous avons répertorié la partie vaseuse des dragages exportés à la Lambarde pour les périodes réelles correspondant aux forçages (périodes encadrées en rouge dans la figure du forçage en débit).

Nous avons d'autre part enregistré au cours du calcul les dragages effectués quotidiennement pour tenir la cote objectif. Nous avons comparé le cumul de ces données sur les figures 3.6 à 3.11. Chaque petit triangle vert correspond à un dragage effectué par le GPMNSN. La courbe noire correspond au cumul des dragages effectués dans le modèle quotidiennement.

Figure 3.6 : Section 1

On voit une bonne représentation des dragages modélisés dans toute la période avant l'été, avec cependant un décalage temporel: le modèle drague plus tôt que ce qui est fait par le GPMNSN. On notera que pendant cette période de crue, la drague est quasiment monopolisée sur les sections 5 et 6, ce qui l'empêche peut-être de venir intervenir sur la section 1 qui semble être moins problématique. A l'automne, les dragages modélisés sont sous-estimés, car le bouchon vaseux est fortement diminué à cause du sur-dragage du modèle dans la période hivernale.

Figure 3.7 : Section 2

Aucun dragage n'est effectué en section 2 par le GPMNSN sur les périodes modélisées. Les dragages simulés sont similaires à la section 1.

Figure 3.8 : Section 3

Aucun dragage n'est effectué en section 3 par le GPMNSN sur les périodes modélisées. Les dragages simulés sont eux aussi quasiment négligeables.

Figure 3.9 : Section 4

La section 4 est draguée en fin de crue par le GPMNSN, alors qu'elle ne l'est pas dans le modèle. Les sections 5 et 6 étant draguées quotidiennement dans le modèle, la vase a tendance à transiter jusqu'à celles-ci. De plus la section 4 qui est très petite correspond à la zone face au port de Saint-Nazaire, c'est-à-dire que les dragages du port y sont déversés. Le modèle ne modélisant pas le port, il est normal de ne pas retrouver cette masse à draguer.

Figure 3.10 : Section 5

La section 5 est draguée en période de débit important, comme dans le modèle que ce soit pour les périodes, ou en quantité. Cependant à l'automne, le bouchon vaseux ayant trop diminué dans le modèle, les dragages sont sous-estimés.

Figure 3.11 : Section 6

La section 6 est fortement draguée et assez continuellement par le GPMNSN, mis à part la période d'été. Le modèle indique que pour tenir la cote objectif sur toute la largeur du chenal et sur toute la section 6, il effectue des dragages quotidiens de très forte importance : entre 20 000 et 50 000 tonnes/jour en période de morte-eau, alors qu'un chargement total par jour de drague se situe entre 10 000 et 20 000 tonnes de vase (figure 3.12).

On voit donc que le modèle simule des moyens de dragage trop importants par rapport à ce qui peut être effectué, ce qui permet d'ailleurs de diminuer la masse du bouchon vaseux dans le calcul.

Il est surtout remarquable que le modèle continue à draguer même en période d'été, alors que l'on a vu dans les calculs précédents que la section 6 a tendance à s'éroder (à moyen terme) pour de faibles débits. Cela signifie que la zone 6 est une zone de transit de la vase et de piégeage temporaire pour les faibles débits, et qu'elle est donc une source pour le bouchon vaseux.

Figure 3.13 : Section 1 à 5 cumulées et sections 1 à 6

Globalement, on voit que si l'on considère les sections 1 à 5, les dragages simulés sont très représentatifs (0,75 millions de tonnes contre 1,22 millions de tonnes), avec cependant un décalage temporel de l'ordre de la quinzaine de jours.

Si l'on considère la section 6 en plus (qui représente 50% des dragages dans les relevés du GPMNSN), alors le modèle drague de manière trop intensive, c'est-à-dire environ le double de ce qui est effectué par le GPMNSN : 4,7 millions de tonnes contre 2,45 millions de tonnes).

On peut remarquer aussi sur le cumul total S1 à S6 qu'en période de dragage, la pente du cumul est assez constante, ce qui doit correspondre à la capacité de dragage du port. D'un autre côté, durant les 50 premiers jours, pendant les débits importants, la pente est 2 fois plus faible. Il serait donc intéressant de connaître les raisons qui font que l'on drague moins à ce moment.

3.2.3. ANALYSE DES CLAPAGES A LA LAMBARDE

La masse en place sur le point de clapage à la Lambarde est représentée sur la figure 3.14. La comparaison de la masse clapée (environ 5 millions de tonnes) et de la masse qui reste au point de clapage (environ 0,1 Millions de tonnes) indique un taux de stabilité très faible en comparaison des pourcentages observé en nature (environ 20%). On notera aussi une forte relation entre le signal de houle et la stabilité du site.

Rappelons que le maillage du modèle n'a pas été raffiné dans la zone (clapage sur un seul point du maillage) et que le modèle n'a pas été calé pour ce processus.

Une étude de modélisation en parallèle réalisée pour le port dont l'un des objectifs est d'obtenir cette stabilité, nous a permis ultérieurement de régler différents paramètres et d'obtenir des résultats de bonne qualité. Cette expérience pourra être utilisée pour améliorer le modèle pour de futurs calculs.

3.3. CONCLUSIONS

L'intégration d'un principe simple de dragage est assez représentative de ce qui se passe en réalité pour les sections 1 à 5. La section 6 est plus complexe car ce n'est plus la cote objectif qui semble être le moteur principal du fonctionnement mais plus les moyens de dragage. On voit par contre que ce dragage trop intensif de la section 6 dans le modèle, conduit à des résultats dans l'estuaire interne qui s'écartent de la réalité avec un bouchon vaseux très fortement diminué.

Pour conserver des résultats réalistes dans l'estuaire interne, il semble qu'il faudrait au minima ajouter deux conditions au système de dragage simplifié :

- Arrêter les dragages durant la période d'été (la drague n'étant pas disponible à cette période),
- Limiter les dragages journaliers dans le modèle par la quantité possiblement draguée quotidiennement par le GPMNSN,

- Plus généralement, intégrer l'ensemble des règles utilisées par le port pour gérer ses dragages d'entretien.

On peut aussi noter que le sur-dragage actuel dans le modèle qui pourrait être comparé à un équivalent de piégeage de sédiment, semble avoir un effet notable sur la baisse de la masse du bouchon vaseux. Les quantités en jeu sont par contre très importantes.

Enfin, la tenue de la cote du chenal de navigation à sa cote théorique par rapport au calcul de référence où les dépôts peuvent rehausser de manière sensible la cote de celui-ci, permet un flux d'appel provenant de l'aval deux fois supérieur.

4. BIBLIOGRAPHIE

Dearnaley, M.P., 1994. Direct measurements of settling velocities in the Owen tube: a comparison with gravimetric analysis. In Cohesive Sediments : 4th nearshore and estuarine cohesive sediment transport conference, INTERCOH'94. N. Burt, R. Parker, J. Watts eds., John Wileys & sons, 75-85

Dyer, K.R. et al., 1996. A comparison of in situ techniques for estuarine floc settling velocity measurements. Journal of Sea Res., 36 (1/2), 15-29

IMDC, 2010. Campagne de mesures à la Lambarde. Dépouillement des vitesses de chute des sédiments. Rapport partiel 12 de juillet 2010 établie pour le compte du Grand Port Maritime de Nantes Saint-Nazaire.

Sogreah, 2009. Développement et exploitation d'un modèle hydrosédimentaire en trois dimensions sur l'estuaire de la Loire. Lot 1 : construction et exploitation du modèle. Phase 1 : construction du modèle. Construction et calage simple. Rapport n°171 1822 R7 de décembre 2009 établi pour le compte du GIP Loire Estuaire

FIGURES HORS-TEXTE

