

10^{èmes} JOURNÉES DE L'HYDRODYNAMIQUE

Nantes, 7, 8 et 9 mars 2005

**MODELE NUMERIQUE BI ESPECE 2D POUR
LES ECOULEMENTS A DENSITE VARIABLE FLUIDE-
PARTICULES: APPLICATION AU CLAPAGE**

***NUMERICAL BI COMPONENT MODEL 2D FOR FLOW
WITH VARIABLE DENSITY FLUID/PARTICLES: STUDY
CASE FOR DUMPED DREDGED MATERIALS***

**Par Isabelle FAROUT-FRESON*, Emmanuel LEFRANCOIS*, Gouri DHATT*,
Philippe SERGENT****

* Université Technologique de Compiègne Centre de Recherche Royalieu Laboratoire ROBERVAL GSM
Hydraulique Numérique rue Personne de Roberval 60200 Compiègne

Tel (33) 03-44-23-45-52 Fax (33) 03-44-23-52-84 isabelle.freson@utc.fr,

** Centre d'Etude Technique Maritime Et Fluvial 2 boulevard Gambetta BP 60039 60321 Compiègne cedex
Tel (33) 03-44-92-60-30 Fax (33) 03-44-92-60-70

Résumé

Les écoulements naturels sont souvent des écoulements mixtes fluide/particules ; nous nous intéressons ici aux mélanges contenant un fluide incompressible et une certaine masse de particules solides considérées comme fluidisées. Le modèle proposé est basé sur l'écriture moyennée des équations hydrodynamiques bi phasiques couplé à une équation de transport munie d'une vitesse numérique de chute spécifiquement adaptée au clapage de rejets de dragage w_f . La discrétisation spatiale est obtenue par éléments finis Q4 avec pénalité sur la pression. La discrétisation en temps est basée sur un schéma temporel stable d'Euler implicite. La solution non linéaire des équations hydrodynamiques est obtenue par une technique de linéarisation de Newton-Raphson. La stratégie de résolution entre l'hydrodynamique et le transport est réalisée en considérant la variation de la densité au sein du mélange de façon purement explicite afin d'obtenir un modèle couplé de manière séquentielle. Calibré sur la phase de chute de trois clapages expérimentaux in situ, le modèle donne de très bons résultats sur la phase de chute avec plus de trente essais in situ avec ou sans courant ambiant (Villaret et al.1997, Boutin 1999).

Summary

The natural flows are generally assimilated as a mixture of both fluid and particles flows; we are interested here in the mixture composed of incompressible fluid and a certain mass of fluidised solid. The proposed model is based on the averaged form of the hydrodynamic biphasic equations, coupled with a sediment transport equation with a specific numerical settling velocity adapted for the dumped dredged material case w_f . Spatial discretization is based on finite element method using a penalty on pressure. Temporal discretization uses a stable upward Euler scheme. Linearization is obtained with Newton-Raphson method. Finally, both models (hydrodynamic and transport) are coupled considering the variation of density with a forward scheme. The model gives a very good agreement of convective descent with nearly thirty experiments in situ realised by Villaret LNHE-EDF for material 100% sand, 100% silt or mixture sand/silt without or with a horizontally ambient current.

I-INTRODUCTION

S'appuyant sur les observations de clapage en nature de Bokuniewicz et al. (1978) ou in situ de Johnson et al. (1995), Truitt (1988), Villaret et al. (1997) et Boutin (1999) les rejets de dragage par clapage en eau peu profonde suivent les trois phases caractéristiques suivantes (illustration Figure 1) :

- Une phase de chute très rapide pendant laquelle le matériel chute dans la colonne d'eau sous l'influence de la gravité
- Une phase d'effondrement dynamique à l'arrivée sur le fond
- Une phase de transport sur le fond régie par un courant de densité radial par rapport au point d'impact.

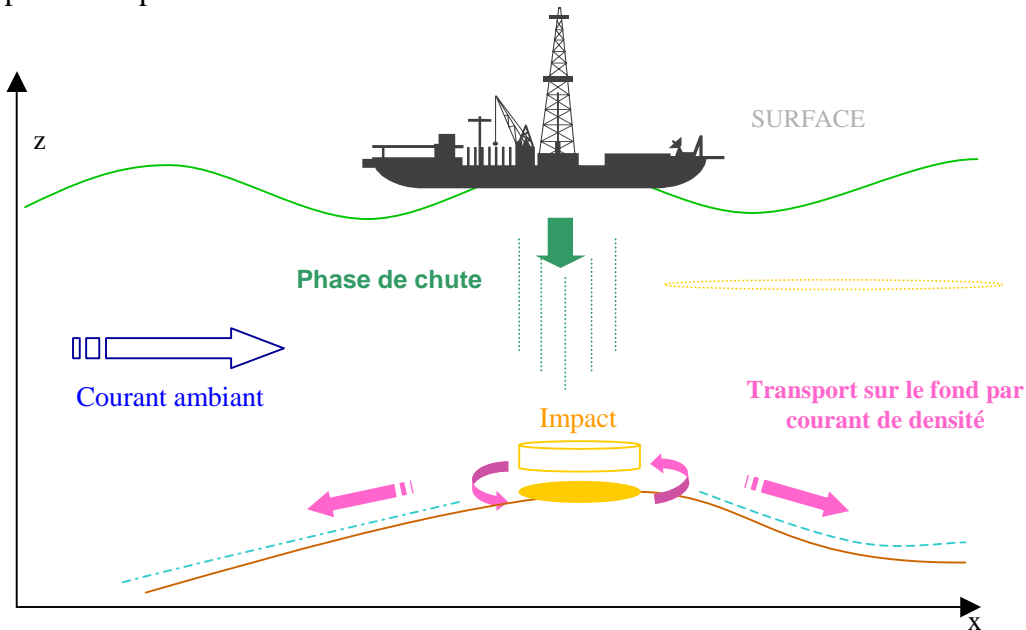


Figure 1 : Rejets de dragage par clapage en mer

Les principales modélisations existantes (Krischnappan, Drapeau, STFATE,) s'appuient sur des approximations d'ordre semi empirique ou géométrique et ne parviennent pas à simuler correctement la phase de chute de ces rejets considérée comme le moteur principal des phases ascendantes et de la phase de transport sur le fond. Une bonne simulation des dépôts nécessite une bonne simulation du transport et donc de la phase de chute.

L'analyse de R. Boutin sur le sujet montre que les vitesses de chute des rejets observés en milieu naturel, sont élevées et comprises entre 25 et 280cm/s et ne peuvent être modélisées par les lois classiques de vitesse de chute sédimentaire (Mac Nown, Tambo et Watanabe, Migniot cité par Rouas, Van Leussen, Zaki-Richardson).

Le modèle bi espèce 2D formulé ci-après utilise une loi de type suspension mais adaptée spécifiquement au cas du clapage et permet d'obtenir une phase de chute cohérente pour tous les types de rejets qu'ils soient 100% sable, sablo vaseux ou 100% vase et avec ou sans courant ambiant.

Nous nous sommes particulièrement intéressés aux rejets de type sablo vaseux eau/sédiments de type sable/sédiments de type vase qui constituent l'essentiel des rejets de dragage français.

II-APPROCHE BI PHASIQUE D'UN MELANGE EAU/SEDIMENTS

Considérons un volume de contrôle V , dont le mélange est constitué d'une composante fluide (l'eau de mer) et d'une composante sédimentaire (sédiments supposés fluidisés) de densités réelles respectives ρ_{f_0}, ρ_{s_0} sont des paramètres fixes. Les proportions de masse fluide et solide par rapport au volume V sont définies par leur densité apparente par (Figure 2)

$$\begin{cases} \rho_s = \frac{m_s}{V} \\ \rho_f = \frac{m_f}{V} \end{cases} \begin{cases} m_s = V_s \rho_{s_0} \\ m_f = V_f \rho_{f_0} \end{cases} \quad (1)$$

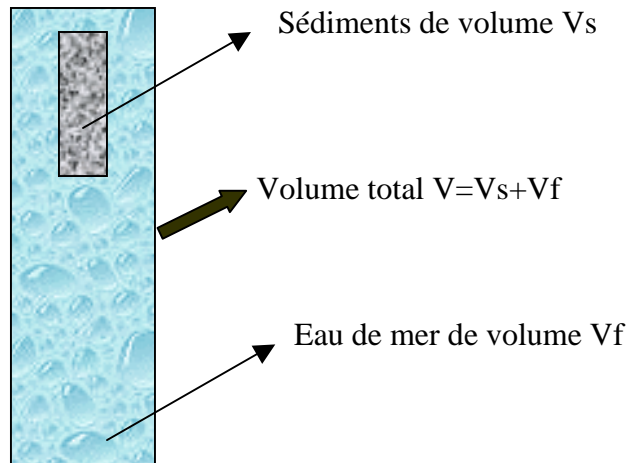


Figure 2 : Représentation bi phasique d'un rejet de dragage par le volume respectif de chaque composant

Le modèle bi phasique de l'écoulement du mélange utilise une approche continue pour chaque phase. Celles-ci peuvent alors être représentées par les équations de conservation de la masse et de la quantité de mouvement de chacune d'elle. Tous les effets thermodynamiques sont ici négligés.

$$\begin{cases} \text{Phase sédiment : } \begin{cases} \frac{\partial \rho_s}{\partial t} + \text{div}(\rho_s \vec{u}_s) = 0 \\ \frac{\partial \rho_s \vec{u}_s}{\partial t} + \text{div}(\rho_s \vec{u}_s \otimes \vec{u}_s - \overline{\overline{\sigma}}_s) + \vec{F}_{sf} - \rho_s \vec{g} = \vec{0} \end{cases} \\ \text{Phase fluide : } \begin{cases} \frac{\partial \rho_f}{\partial t} + \text{div}(\rho_f \vec{u}_f) = 0 \\ \frac{\partial \rho_f \vec{u}_f}{\partial t} + \text{div}(\rho_f \vec{u}_f \otimes \vec{u}_f - \overline{\overline{\sigma}}_f) + \vec{F}_{fs} - \rho_f \vec{g} = \vec{0} \end{cases} \end{cases} \quad (2)$$

Les termes \vec{F}_{sf} et \vec{F}_{fs} représentent les forces d'interaction entre la phase fluide et la phase solide (Figure 3) et les tenseurs des contraintes sont évalués pour chaque composant selon la formulation d'ANDERSON et JACKSON

$$\begin{cases} \sigma_f = -p_f + \tau_f = -p_f + 2\mu_f \dot{\epsilon}_f \\ \sigma_s = -p_s + \tau_s = -p_s + 2\mu_s \dot{\epsilon}_s \end{cases} \quad (3)$$

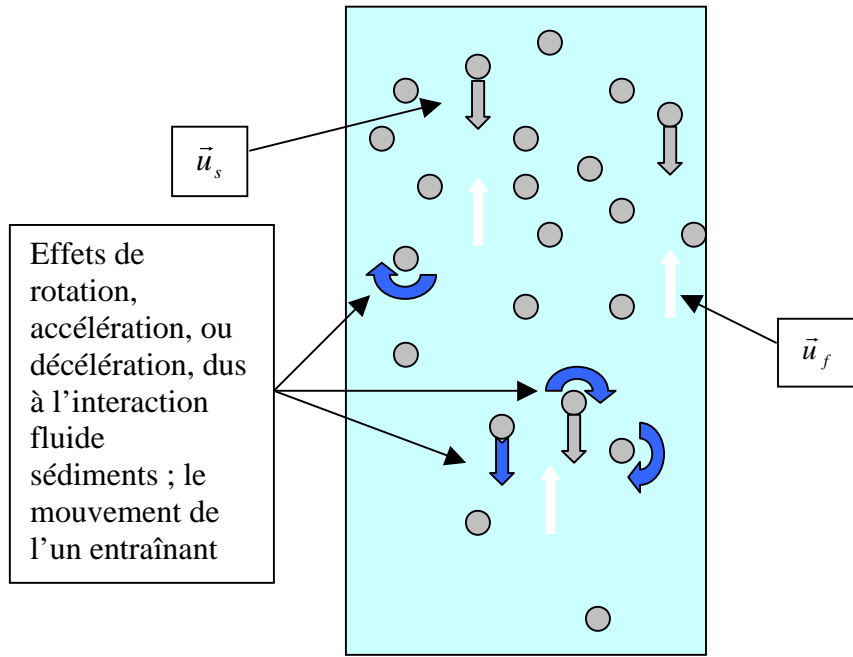


Figure 3 : Effets dus aux interactions fluide particules modélisés par \vec{F}_{sf} et \vec{F}_{fs}

III- MODELE MATHEMATIQUE

Le modèle bi espèce est un dérivé moyenné du modèle biphasique. Les deux phases sont toujours présentes mais ne sont plus explicitement caractérisées de manière individuelle. Les grandeurs permettent ici de déterminer l'évolution moyenne d'un mélange de deux phases et non l'évolution de chaque phase ! Les variables hydrodynamiques du modèle bi espèce, telles que la vitesse du mélange $\vec{u}^{(m)}$ ou la pression p , sont définies selon une moyenne par pondération de la fraction massique de particules solides du mélange C .

La densité moyenne du mélange est représentée par

$$\rho = \rho_s + \rho_f \quad (4)$$

Les fractions massiques des parts de masse fluide et sédimentaire au sein du mélange sont

$$\begin{cases} C = C_s = \frac{\rho_s}{\rho} \quad (kg / kg) \\ C_f = 1 - C = \frac{\rho_f}{\rho} \quad (kg / kg) \end{cases} \quad (5)$$

La vitesse du mélange est définie par

$$\vec{u}^{(m)} = C\vec{u}_s + (1 - C)\vec{u}_f \quad (6)$$

Une répartition des pressions est établie par composant

$$\begin{cases} p_s = Cp \\ p_f = (1 - C)p \end{cases} \quad (7)$$

Enfin, la pression moyenne du mélange est définie par :

$$p = p_s + p_f \quad (8)$$

Les équations hydrodynamiques moyennes du modèle sont obtenues par la somme respective des équations de conservation de la quantité de mouvement et de la masse des phases fluide et solide du modèle biphasique. Elles aboutissent aux équations de Navier Stokes avec la prise en compte d'un terme de gravité et une densité variable moyenne reliée à la fraction massique sédimentaire par l'intermédiaire des densités fixes selon la formulation

$$\rho = \frac{\rho_{f_0} \rho_{s_0}}{C \rho_{s_0} + (1-C) \rho_{f_0}} \quad (9)$$

L'évolution de C est quant à elle entièrement déterminée par l'équation de conservation de la masse sédimentaire $\frac{\partial \rho_s}{\partial t} + \text{div}(\rho_s \bar{u}_s) = 0 \Leftrightarrow \frac{\partial(\rho C)}{\partial t} + \text{div}((\rho C) \bar{u}_s) = 0$ avec

$$\bar{u}_s = \bar{u}^{(m)} + \tilde{u}_s \text{ où } \tilde{u}_s = (1-C)(\bar{u}_s - \bar{u}_f) \quad (10)$$

Comme dans la théorie de la turbulence, la vitesse sédimentaire est ici décomposée en une vitesse moyenne $\bar{u}^{(m)}$ et une vitesse de fluctuation \tilde{u}_s , qui gère tous les effets secondaires dus aux interactions entre les particules sédimentaires et le fluide. Ces effets sont essentiellement des effets d'entraînement d'une phase par rapport à l'autre, qui se manifestent principalement par diffusion et convection.

D'après la seconde loi de FICK, les effets diffusifs peuvent être modélisés par

$$-k_{diff} \bar{\nabla} C \quad (11)$$

Quant aux autres effets, ils sont représentés par une vitesse d'entraînement supplémentaire \bar{u}_{sf} pour laquelle une relation spécifique est établie pour le clapage des rejets de dragage.

Nous considérons donc ici que :

$$\tilde{u}_s = \bar{u}_{sf} - k_{diff} \bar{\nabla} C \quad (12)$$

Insérée dans l'équation de conservation de la masse sédimentaire nous obtenons finalement la loi de conservation de C par convection et diffusion :

$$\frac{\partial(\rho C)}{\partial t} + \text{div}((\bar{u}^{(m)} + \bar{u}_{sf}) \rho C - k_{diff} \bar{\nabla} C) = 0 \quad (13)$$

Après le calcul d'une moyenne massique des équations biphasique, nous obtenons le modèle bi espèce :

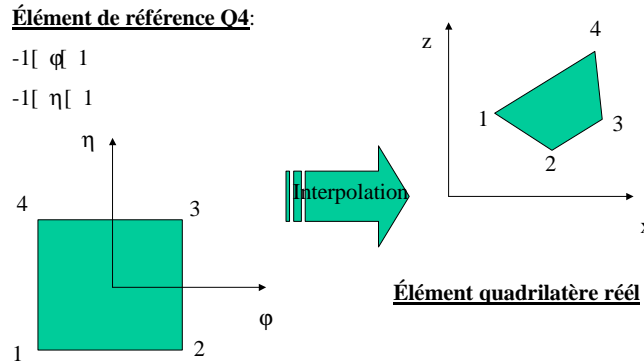
$$\begin{cases} \frac{\partial \rho \bar{u}}{\partial t} + \text{div}(\rho \bar{u} \otimes \bar{u} + p \bar{1} - 2\mu \bar{\epsilon}) - \rho \bar{g} = \bar{0} \\ \text{div}(\rho \bar{u}) = \frac{P}{\lambda} \\ \frac{\partial(\rho C)}{\partial t} + \text{div}((\bar{u} + \bar{u}_{sf}) \rho C - k_{diff} \bar{\nabla} C) = 0 \end{cases} \quad (14)$$

Les variables du modèle ainsi constitué sont les suivantes :

- la vitesse du mélange en moyenne massique $\bar{u}(x,t)$,
- la pression $p(x,t)$
- la fraction massique de sédiment au sein du mélange $C(x,t)$.

IV-MODELE ELEMENTS FINIS

La discrétisation spatiale du modèle est basé sur la méthode des éléments finis avec des éléments quadrilatères à 4 nœuds Q4 pour l'approximation des vitesses et de la fraction



massique des sédiments. La pression est une variable locale condensée au centre de chaque élément et éliminée au niveau élémentaire.

Après assemblage sur la totalité des éléments, nous obtenons le système suivant :

$$\text{Partie hydrodynamique } [M_U] \{\dot{U}\} + [K_U \{U\}] \{U\} = \{F_U\} \quad (15)$$

$$\text{Partie Transport } [M_C] \{\dot{C}\} = -[K_C] \{C\}$$

Une méthode d'Euler implicite est utilisée pour la discrétisation en temps. Les termes non linéaires sont traités par une technique de linéarisation de Newton Raphson.

La stratégie de résolution entre l'hydrodynamique et le transport sédimentaire du modèle bi espèce 2D considère la variation de la densité au sein du mélange de façon purement explicite comme indiqué sur la Figure 4 ci dessous, nous permettant ainsi d'obtenir un modèle couplé de manière purement séquentielle.

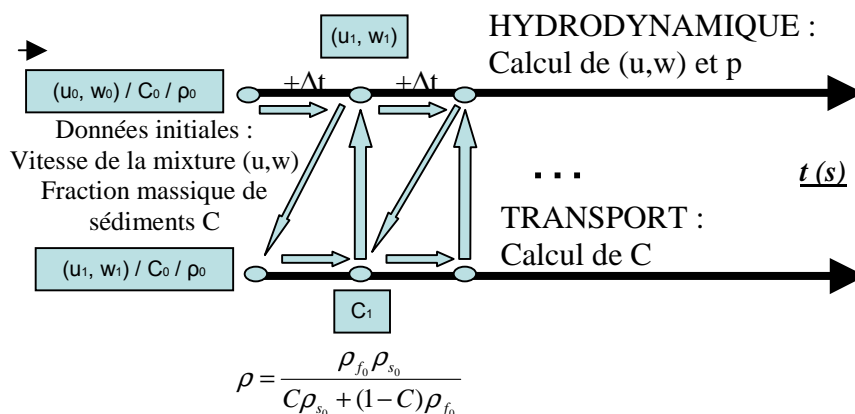


Figure 4 : Stratégie de résolution du modèle bi espèce 2D

V-APPLICATION AU CLAPAGE

Nous avons adopté pour tous les rejets une formulation de type suspension $w_{susp} = KC^n$ utilisée en sédimentologie classique et adaptée au phénomène du clapage par :

$$w_{sf} = K_{sf} (C^v)^n \quad \left\{ \begin{array}{l} w_{sf} = -\alpha_{sf} C^v w_s \\ w_s = f(D_{50}) \end{array} \right. \quad (16)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} n = 1 \\ K_{sf} = -\alpha_{sf} w_s \end{array} \right.$$

Avec :

C^v (g/l) Concentration initiale du rejet

α_{sf} Coefficient numérique propre aux simulations de clapage

Rejets 100% sable I, 100% vase ou sablo vaseux $\alpha_{sf} = 0.0225$

Rejets 100% sable II avec courant ambiant $\alpha_{sf} = 0.0075$

D_{50} Diamètre moyen des grains de sédiment composant le mélange

w_s Vitesse sédimentaire d'une particule sédimentaire moyenne du mélange

f Fonction dépendant entre autre du diamètre moyen sédimentaire et défini selon le type de rejet comme suit :

$$f(D_{50}) \left\{ \begin{array}{l} \text{rejets 100\% sable} \Rightarrow \text{Van Rijn formulation (1}_1) \\ \text{rejets sablo-vaseux} \Rightarrow w_s = \varphi_{s,sable} w_{s,sable} + (1 - \varphi_{s,sable}) w_{s,vase} \quad (1_2) \\ \text{rejets 100\% vase} \Rightarrow \text{Stokes formulation (1}_3) \end{array} \right. \quad (17)$$

Formulation de Van Rijn:

$$\left\{ \begin{array}{l} w_{s,sable} = \frac{\left(\frac{\rho_{sable} - \rho_{f_0}}{\rho_{f_0}} \right) g D_{50}^2}{18 \nu_{f_0}} \quad D_{50} < 100 \mu m \\ w_{s,sable} = \frac{10}{D_{50}} \nu_{f_0} \left(\sqrt{1 + 0.01 \frac{\rho_{sable} - \rho_{f_0}}{\rho_{f_0}} \frac{g D_{50}^3}{18 \nu_{f_0}^2}} - 1 \right) \quad 100 \mu m \leq D_{50} \leq 1000 \mu m \\ w_{s,sable} = 1.1 \sqrt{\frac{\rho_{sable} - \rho_{f_0}}{\rho_{f_0}} g D_{50}} \quad D_{50} > 1000 \mu m \end{array} \right. \quad (18)$$

Formulation de Stokes :

$$w_{s,vase} = \frac{1}{18} \frac{\rho_{vase} - \rho_{f_0}}{\rho_{f_0}} \left(\frac{(D_{50}^{vase})^2 g}{\nu_{f_0}} \right) \quad (19)$$

ρ_{sable} (kg/m³), ρ_{vase} (kg/m³) Densités volumiques du sable, de la vase

$\rho_{f_0} = 1000 \text{ kg/m}^3$ densité volumique du fluide (eau)

$\nu_{f_0} = 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$, $g = 10 \text{ m}^2/\text{s}$ Viscosité cinématique de l'eau et gravité

Spécificité des mélanges sablo vaseux calcul de la vitesse sédimentaire w_s

Le modèle bi espèce 2D est un modèle numérique dont les équations prennent initialement en compte deux espèces (espèce fluide et espèce sédimentaire) au sein d'un mélange.

Les rejets sablo vaseux ont la particularité d'être un mélange fluide/sédiment dont la partie sédimentaire est elle-même un mélange de deux types de sédiment. Pour que les équations puissent traiter ce type de rejet, il est nécessaire de calculer les nouvelles propriétés de cette partie sédimentaire.

Pour cela, nous nous plaçons dans l'espace qui nous intéresse, c'est à dire le volume de sédiment, et nous calculons la fraction volumique correspondant au sédiment de type sable $\varphi_{s,sable}$ et la fraction volumique correspondant au sédiment de type vase $\varphi_{s,vase}$.

Le volume total du mélange V_{total} , le volume de vase au sein du mélange V_{vase} , le volume d'eau au sein du mélange V_{eau} font parties des données expérimentales fournies à partir desquelles on obtient le volume de sable au sein du mélange $V_{sable} = V_{total} - V_{vase} - V_{eau}$, et le volume sédimentaire du mélange $V_{solide} = V_{vase} + V_{sable}$ qui nous sert de référence pour le calcul de nos fractions volumiques sédimentaires.

$$\varphi_{s,vase} = \frac{V_{vase}}{V_{solide}}, \varphi_{s,sable} = \frac{V_{sable}}{V_{solide}} = 1 - \varphi_{s,vase} \quad (20)$$

Pour la vase, la vitesse sédimentaire $w_{s,vase}$ est calculée par la formule de Stokes. Pour le sable, la vitesse sédimentaire $w_{s,sable}$ est donnée par la formulation de Van Rijn, et la vitesse sédimentaire moyenne attribuée à l'ensemble des sédiments composant le mélange sablo vaseux est calculé par pondération convexe selon la formulation ci dessous

$$w_s = \varphi_{sable} w_{s,sable} + (1 - \varphi_{sable}) w_{s,vase} \quad (21)$$

Exemple de calcul : Prenons le cas du rejet V3 (Farout-Fréson 2004, Villaret 1997) considérant un mélange sablo vaseux constitué d'une vase de diamètre moyen $D_{50}^{vase} = 15\mu m$ et 60% de sable de diamètre moyen $D_{50}^{sable} = 90\mu m$. Les volumes initiaux du rejet sont les

$$\text{suivants } \begin{cases} V_{total} = 45l \\ V_{vase} = 18l \\ V_{liquide} = 23.43l \end{cases} . \text{ Nous calculons le volume sédimentaire de référence}$$

$V_{sable} = V_{total} - V_{vase} - V_{eau} = 3.57l \Rightarrow V_{solide} = V_{vase} + V_{sable} = 21.57l$. Nous obtenons les fractions

$$\text{volumiques souhaitées } \begin{cases} \varphi_{s,sable} = 0.1655 \\ \varphi_{s,vase} = 0.8344 \end{cases} . \text{ Les vitesses sédimentaires de chacun des}$$

constituants sableux et vaseux sont obtenues par les formulations

$$\text{appropriées } \begin{cases} w_{s,sable} = 0.008m/s \\ w_{s,vase} \approx 0.00003m/s \end{cases} . \text{ La vitesse sédimentaire moyenne attribuée au mélange}$$

sablo vaseux 60% sable est donc $w_s = \varphi_{s,sable} w_{s,sable} + \varphi_{s,vase} w_{s,vase} = 0.00134m/s$.

Connaissant la vitesse sédimentaire moyenne du mélange, on peut estimer la valeur de la vitesse de chute numérique w_{sf} à attribuer au rejet considéré.

VI-RESULTATS

Clapages expérimentaux LNHE-EDF

Le canal n°5 du LNHE EDF est un canal d'une longueur de 80m pour une largeur de 1m50, dans lequel peuvent être simulées, à l'échelle 1/25^{ème}, des opérations de clapage par un dispositif mis au point par R. BOUTIN, dans le cadre de sa thèse de doctorat.

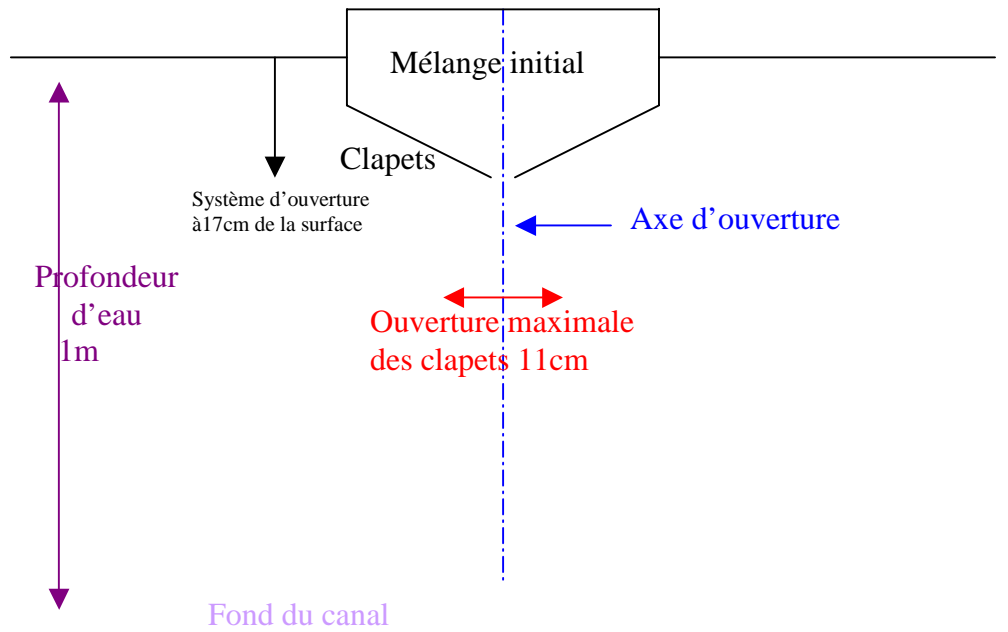


Figure 5 : Vue en coupe (Ox, Oz) du dispositif de clapage

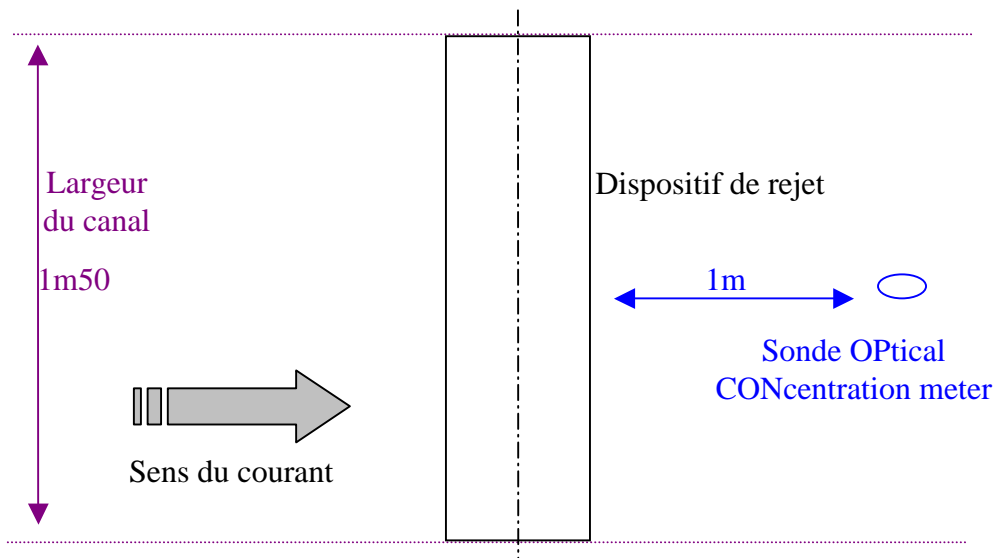


Figure 6 : vue de dessus du dispositif de clapage

Ce dispositif a été utilisé pour toutes les séries d'essais réalisées par Roland BOUTIN pour les rejets 100% vase dès 1996, puis par Catherine VILLARET pour tous les rejets 100% sable et sablo vaseux.

Simulations bi espèce 2D

Dans ce modèle aucuns phénomènes d'érosion/dépôt sur le fond ne sont pris en considération, et aucun échange ne s'effectue avec la surface, et, l'expression du problème bi espèce complet est donnée par les équations 14 et les conditions suivantes:

$$\begin{aligned} & \text{conditions aux limites :} & (22) \\ & (w - w_{sf})C - k_z \frac{\partial C}{\partial n} = 0 \text{ sur } \partial\Omega_{\text{surface}} \cup \partial\Omega_{\text{fond}} \quad \begin{cases} u_n = 0 \\ \tau_t = 0 \end{cases} \text{ sur } \partial\Omega \\ & \text{conditions initiales :} \quad \begin{cases} \bar{u}(x, t = 0) = \vec{0} \\ C(x, t = 0) = C_0(x) \end{cases} \end{aligned}$$

Domaine de simulation : La symétrie de la chute par rapport à l'axe principal du rejet observé notamment par BOUTIN dans le cas de rejet sans courant ambiant est bien reproduite par le modèle Figure 7 et Figure 8.

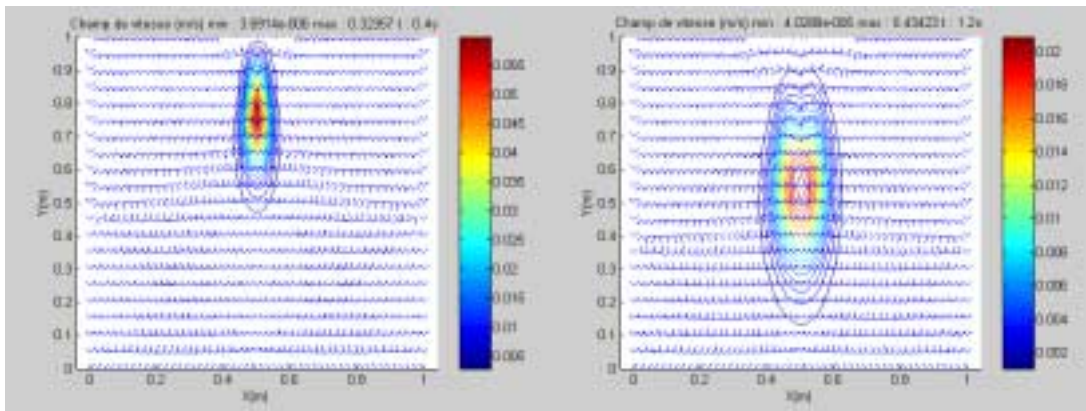


Figure 7 : Simulation qualitative d'une rejet 100% sable sans courant ambiant : phase de chute

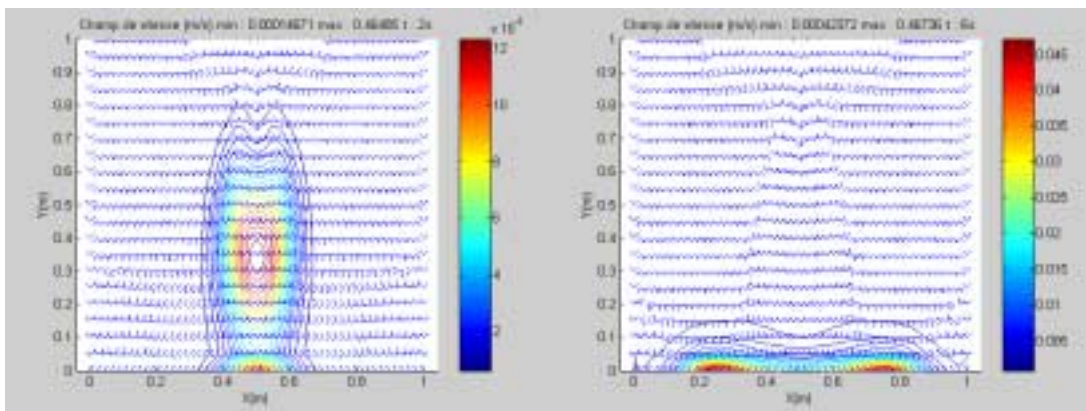


Figure 8 : Simulation qualitative d'une rejet 100% sable sans courant ambiant : impact au sol et phase de transport

C'est pourquoi, les simulations sont effectuées sur un demi domaine comportant un demi rejet pour les clapages sans courant ambiant Figure 9.

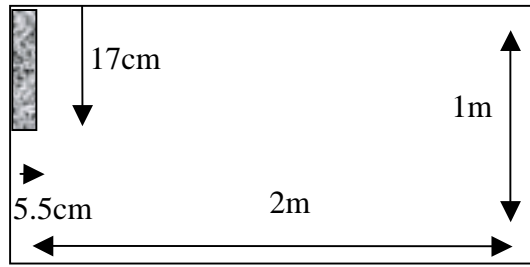


Figure 9: Domaine de simulation des essais sans courant ambiant $U_a = 0m/s$ (Rejet symétrique)

D'autre part, ce phénomène de symétrie n'étant plus du tout de rigueur pour les rejets dont le milieu récepteur subit les influences d'un courant ambiant, nous simulerons un demi domaine comportant l'intégralité du rejet pour les clapages avec courant Figure 10.

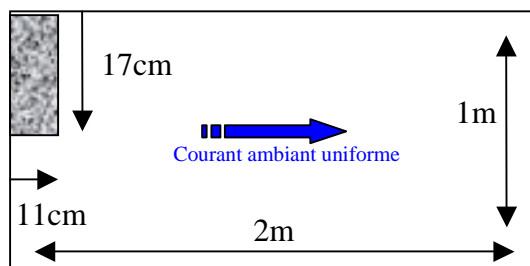


Figure 10 : Domaine de simulation des essais avec courant ambiant $U_a > 0m/s$ (Rejet non symétrique)

Pas de temps : Les résultats concernant la phase de chute des essais expérimentaux sont donnés pour un laps de temps minimum toutes les 0.13s. Ainsi, pour permettre une comparaison effective de nos résultats numériques avec ceux des essais, nous avons choisi un pas de temps garantissant un maximum de données comparables, et toutes nos simulations utilisent le pas de temps suivant : $\Delta t = 0,1s$

Maillage : Le pas d'espace vertical $\Delta z = 0.0333m$, soit 31 nœuds sur 1m de hauteur, est une valeur moyenne des différents écarts expérimentaux observés pour la position. Le pas d'espace horizontal, quant à lui $\Delta x = 0.0392m$, 51 nœuds sur 2m de longueur, permet un temps de calcul relativement raisonnable pour un modèle écrit en MATLAB (1mn45 par pas de temps soit moins de 3 heures de temps de calcul pour 10 secondes de simulation).

Résultats

Les Figures ci dessous montrent l'adéquation des résultats numériques par rapport à l'expérimentation en ce qui concerne les positions et diamètres de 45 litres de rejet sablo vaseux 20% sable puis 60% sable dans un courant ambiant de 10cm/s puis sans courant ambiant.

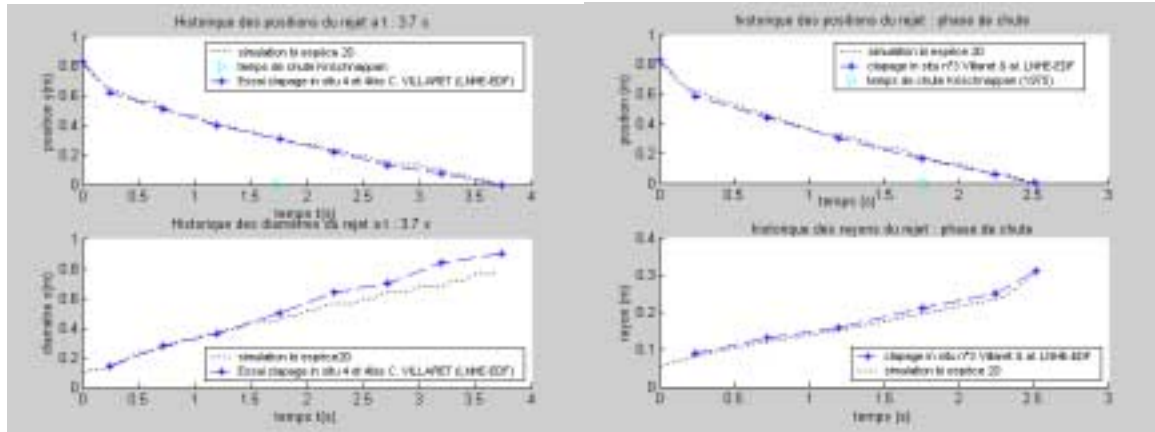


Figure 11 (gauche) Positions et diamètres au cours de la chute d'un rejet sablo vaseux à 20% de sable dans un courant ambiant de 10cm/s Figure 12 (droite) rejet sablo vaseux à 60% de sable sans courant ambiant

Tableau 1 : Comparaison des temps de chute de rejets 100% sable ou sablo vaseux avec ou sans courant ambiant

Type du rejet expérimental	Temps de chute expérimental (s)	Temps de chute bi espèce 2D (s)	Erreur relative Δt (s)	Erreur %
45l. 20% sable 90μm/80% vase 15μm Ua=0m/s	2.80	2.70	0.1	3.57%
45l. 20% sable 90μm/80% vase 15μm Ua=0.1m/s	2.52	2.50	0.02	0.79%
45l. 60% sable 90μm/40% vase 15μm Ua=0m/s	3.74	3.70	0.04	1.07%
45l. 60% sable 90μm/40% vase 15μm Ua=0.1m/s	3.53	3.50	0.03	0.85%
45l. 100% sable 90μm Ua=0m/s	1.76	1.80	0.04	2.27%
45l. 100% sable 90μm Ua=0.1m/s	2.02	2.00	0.02	0.99%
60l. 100% sable 90μm Ua=0m/s	0.95	1.00	0.05	5.26%
60l. 100% sable 160μm Ua=0m/s	0.72	0.70	0.02	2.77%
60l. 100% sable 90μm Ua=0.8m/s	1.54	1.60	0.06	3.89%
60l. 100% sable 160μm Ua=0.1m/s	1.95	2.00	0.05	2.56%
60l. 100% sable 90μm Ua=0.2m/s	1.60	1.60	0.00	0.00%
60l. 100% sable 160μm Ua=0.2m/s	2.10	2.10	0.00	0.00%
60l. 100% sable 160μm Ua=0.25m/s	2.30	2.20	0.10	4.34%
60l. 100% sable 90μm Ua=0.25m/s	2.20	2.00	0.20	9.09%

Le Tableau 1 montre l'adéquation entre les temps de chute numériques du modèle bi espèce 2D et expérimentaux. Nous observons une erreur relative comprise entre 0 et 3 dixième de seconde ; sachant que l'incertitude sur le temps de chute expérimental correspond à l'intervalle de temps entre 2 photos successives soit 0.5s, nous estimons nos résultats vraiment satisfaisants avec un pourcentage d'erreur inférieur à 9.10%.

Sachant qu'il y a lors des essais expérimentaux une part d'interprétation subjective pour la délimitation du nuage estimée à 0.05m, nous considérons que l'estimation du rayon faite par le modèle bi espèce 2D est satisfaisante puisque nous observons une erreur relative du rayon maximum à l'impact entre 0 et 0.07m.

La conservation de la masse pour les simulations bi espèce 2D est vérifiée à 0.2% quel que soit le type de rejet envisagé (sableux, vaseux ou sablo vaseux).

VII-CONCLUSION ET PERSPECTIVE

Les résultats sur la phase de chute montre que les différentes positions du nuage obtenues par le modèle bi espèce 2D sont en quasi adéquation avec les données expérimentales et que le temps de chute numérique est en accord avec le temps de chute expérimental dans la quasi totalité des simulations effectuées.

Le modèle modélise bien l'influence de la concentration initiale, du pourcentage de sable et de la granulométrie par rapport au temps de chute du rejet et par rapport au rayon à l'impact (Farout-Fréson 2004). Quant aux essais en courant, si le temps de chute est bien déterminé, l'approximation de la taille du nuage au moment de l'impact reste encore à améliorer (30% d'erreur pour un courant ambiant de 25cm/s). Dans son ensemble le modèle bi espèce 2D reste cependant très cohérent pour toute la phase de chute d'un clapage de rejets de dragage

Il permet aussi d'approcher les deux autres phases du clapage avec l'impact au sol et le transport des sédiments par courant de densité Figure 8 mais les résultats obtenus aboutissent encore à des erreurs atteignant parfois 20% ; un travail supplémentaire est donc nécessaire pour une meilleure adéquation avec les essais expérimentaux (intensité du courant de densité et concentration de sédiment transportée sur le fond).

Remerciements : Ce travail a été financé par la Région Picardie de novembre 2000 à juin 2003.

Références

- BOKUNIEWICZ H.J et al. 1978 New Haven, Connecticut (USA): Yale University for USAEWES « Field study of the mechanics of the placement of dredged material at open water disposal site » TR D-78-7
- BOKUNIEWICZ H.J., GORDON R.B., 1980, « Deposition of dredged sediment at open water sites » Estuarine and costal marine science 10 pp289-303
- BOUTIN R., 1999 Thèse de doctorat de l'Institut National des Sciences Appliquées de Lyon « amélioration des connaissances sur le comportement des rejets en mer de produits de dragage de type vase, phénomènes à court terme et dans le champ proche »
- DRAPEAU G. et al. 1992 Venice Italie 4-9 October Coastal engineering pages 3054 à 3067 « Dispersion model of dredge spoil dumped in coastal water »
- FAROUT-FRÉSON I., LEFRANÇOIS E., DHATT G., SERGENT P., 2003 « finite element model of dredged material dumped into sea : comparison with flume experiments » 3rd IAHR Symposium on River, Coastal and Estuarine Morphodynamics Barcelona 2003 pages 1187 à 1195
- FAROUT-FRESON I., novembre 2004 « Modélisation du clapage en mer ; étude du champ proche ; chute et transport sur le fond » Thèse de doctorat de l'Université Technologique de Compiègne spécialité mécanique : hydraulique numérique
- JONHSON B., FONG M., February 1995 final report prepared for US army corps of engineers 20314-1000 "Development and verification of numerical models for predicting the initial fate of dredged material disposed in open water. Report 2. Theoretical developments and verification results"
- KRISCHNAPPAN B.G.1976 Burlington, Ontario: environment Canada 113 pages scientific series n°55 "Dispersion of granular material dumped in deep water"

RICHARDSON Y.F. ZAKI W.N. « Sedimentation and fluidization: part I » Trans. Inst. Chem. Eng. Vol 32 1954 p 35 à 53,

ROUAS G. 1996 Thèse de doctorat en sciences mécaniques pour l'ingénieur à l'UTC : Etude et modélisation par éléments finis des processus hydro sédimentaires estuariens

TRUITT C.L. 1988 Journal Coastal Result 4 (3) pp389-397: "Dredge material behaviour during open water disposal"

VAN LEUSSEN 1993, MAST G8M, Workshop Leuven, 5-6 April « Field measurements of flocs sizes and settling velocities »

VILLARET C. et al. 1997, rapport EDF HE-42/97/072/A « Etude expérimentale de la dispersion des rejets par clapage d'un mélange de sable et de vase (influence du courant et de la concentration) »