

Intégration d'une méthode de consolidation dans Telemac3D

Jérôme Thiébot¹ et Sylvain Guillou²

Laboratoire Universitaire des Sciences Appliquées de Cherbourg
(EA 2607) Site universitaire, BP 78, 50130 Octeville, France.

¹Doctorant, ² Maître de Conférences.

Résumé

Les modèles numériques de transport sédimentaire constituent des outils précieux pour comprendre les phénomènes d'envasement dans les estuaires. L'évolution des vasières est régie entre autres par la consolidation, processus complexe au cours duquel les dépôts de sédiment, initialement sous forme de suspensions concentrées, acquièrent une structure solide. Une description fine de ce phénomène permet de mieux prévoir les évolutions topographiques du fond et aussi d'affiner les lois d'érosion. Un modèle de consolidation basé sur une résolution explicite de l'équation de Gibson a été intégré dans Telemac3d. Celui-ci a été testé et comparé à un modèle empirique. Entre autres résultats, l'influence de la consolidation sur la structure du lit cohésif et sur la quantité de matières en suspension (MES) a été mise en évidence.

Abstract

Sediment transport numerical models constitute a useful tool for the management of estuaries. Mudflat's evolutions are closely linked to the consolidation of the deposits formed by the settlement of suspended sediment. A correct description of the consolidation enables both an accurate prediction of the cohesive bed's evolutions and a precise calculation of the quantity of eroded sediment. We have developed a consolidation model based on an explicit resolution of the Gibson's equation. It has been integrated in Telemac3d and compared with an empirical model. The influence of the consolidation model on the bed structure and on the quantity of suspended sediment is shown.

Mots clés

Sédiment cohésif, estuaire, consolidation, modélisation numérique

1. Introduction

Les estuaires, écosystèmes complexes et fragiles, sont le siège d'un envasement important causé par les sédiments fins ($\phi < 63 \mu\text{m}$) cohésifs. Selon leur concentration, les conditions physico-chimiques et l'intensité de la turbulence, ils peuvent s'agréger pour donner des floes de grandes dimensions, ce

qui accélère leur chute notamment lors des étales. Pendant les périodes de flot et de jusant, ils entrent et sortent des estuaires sous forme de suspension. Sous l'effet de la gravité, une partie de ces sédiments s'accumule sur le fond en formant une couche extrêmement turbide appelée "crème de vase". Lorsque ces floes sont déposés, ils s'écrasent sous l'effet de leur poids propre et l'eau qu'ils contiennent est alors chassée, ce qui induit un phénomène de tassement. Parallèlement, une structure solide se développe au sein du dépôt de telle sorte que ce dernier, initialement à l'état de suspension, devient une vase ayant des propriétés proches de celles d'un sol saturé. On considère alors que le dépôt fait partie du lit cohésif. Les sédiments sont d'autant plus difficilement remobilisables qu'ils sont consolidés, plus ils sont anciens et profonds, plus leur teneur en eau interstitielle est faible et plus leur concentration est élevée.

Une modélisation complète des phénomènes d'envasement suivant l'approche classique, à une phase, nécessite de considérer le phénomène de consolidation. Ceci induit la prise en compte du stock sédimentaire, d'un fond fictif, et d'une érosion dépendante du moment où le sédiment a été déposé. Les phénomènes de transport en suspension et d'échanges avec le stock sédimentaire sont assurés par l'équation de transport suivante :

$$\frac{\partial C_s}{\partial t} + (\bar{u} - \bar{w}_s) \cdot \bar{\nabla} C_s = \bar{\nabla} \cdot (K \cdot \bar{\nabla} C_s) + \frac{Q_e - Q_d}{h} + S \quad (1)$$

où C_s représente la concentration des MES, \bar{u} , le champ de vitesse horizontal, \bar{w}_s , le champ de vitesse de chute des particules, Q_d et Q_e sont respectivement les flux de dépôt et d'érosion, h , la hauteur d'eau, $\bar{\nabla}$, l'opérateur gradient, K est le coefficient de diffusivité et S un terme source.

Différentes solutions ont été proposées pour prendre en compte la consolidation des sédiments cohésifs avec un degré de complexité plus ou moins élevé^{4,7,8,10}. Deux classes de modèle se dégagent : l'une basée sur une approche empirique⁸, l'autre basée sur la théorie de Gibson^{2,4,10}.

Dans l'approche empirique, le lit cohésif est discrétisé par un certain nombre de couches qui possèdent des concentrations fixées. Les variables à calculer sont les épaisseurs de chacune des couches. Le tassement du fond érodable est modélisé par le passage du sédiment de la couche m (en considérant que l'indice commence au fond non érodable) à la couche $m-1$ lorsque le temps de séjour du sédiment dans la couche m dépasse le temps de résidence caractéristique de cette dernière. Les épaisseurs E sont alors mises à jour par :

$$E(m-1) = E(m-1) + E(m) \cdot C(m) / C(m-1) \quad \text{et} \quad E(m) = 0 \quad (2)$$

Les concentrations C et les temps de résidence caractéristiques sont obtenus à partir du suivi temporel des concentrations moyennes en culot de tassement. La discrétisation de l'échelle des temps fournissant, pour une concentration donnée, un temps de résidence caractéristique.

L'équation de Gibson² permet de caractériser les déformations sur la verticale d'un dépôt de sédiment pendant la phase de consolidation en considérant d'une part l'écoulement de l'eau interstitielle à l'intérieur de la vase (par l'intermédiaire de la perméabilité, $k(C)$) et d'autre part les variations de contraintes effectives (charge supportée par le squelette solide de la vase, $\sigma'(C)$) :

$$\frac{\partial C}{\partial t} - \frac{\rho_s - \rho_w}{\rho_w \cdot \rho_s} \cdot \frac{\partial}{\partial z} (C^2 \cdot k(C)) - \frac{1}{\rho_w \cdot g} \cdot \frac{\partial}{\partial z} \left(C \cdot k(C) \cdot \frac{d\sigma'(C)}{dz} \right) = 0 \quad (3)$$

Où C représente la concentration en sédiment du dépôt, ρ_w et ρ_s les masses volumiques de l'eau et du sédiment, g la gravité, t le temps et z l'axe vertical.

La plupart des modèles de consolidation basés sur la théorie de Gibson^{4,10} utilisent des méthodes itératives pour résoudre l'équation (3). Les résultats obtenus sont précis mais les temps de calcul rendent impossible l'utilisation de ces modèles dans le cadre d'une simulation du transport sédimentaire à long terme car l'équation (3) doit alors être résolue en chaque point du fond.

Pour palier à ceci, nous avons présenté, dans une précédente étude⁹, un modèle de sédimentation – consolidation basé sur une technique originale de résolution de l'équation (3) et sur une discrétisation du fond en couches. L'objectif de ce modèle est de décrire avec précision l'évolution des dépôts vaseux (utilisation de la théorie de Gibson) avec des temps de calcul raisonnables. Une application en conjonction avec l'expérimentation en culot de tassement a montré une bonne adéquation entre résultats numériques et résultats expérimentaux⁹. La Figure 1 représente des profils de concentrations obtenus en simulant le tassement de 50 cm de vase de concentration initiale 50 g/l.

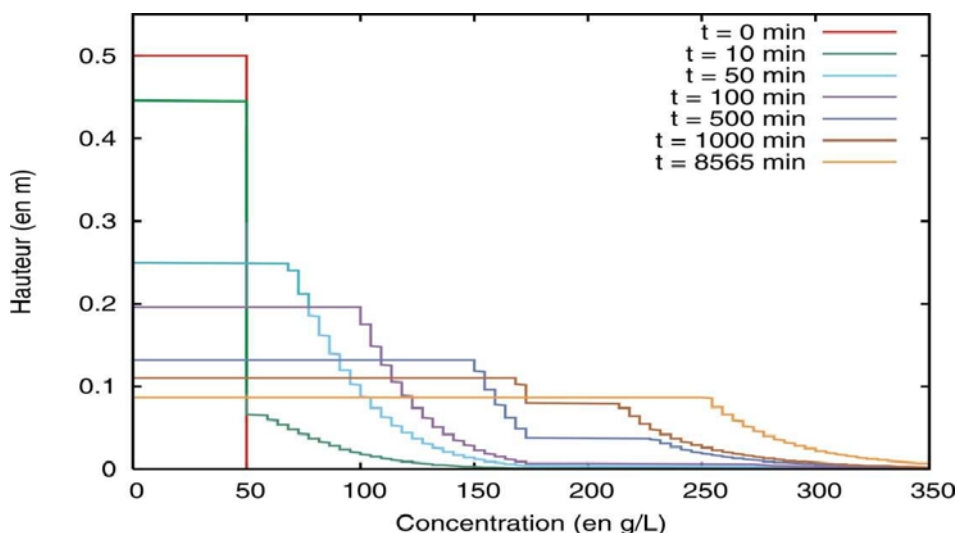


Figure 1 : Simulation du tassement en colonne de 50 cm de vase de la Rance à 50 g/l (Thiébot et Guillou6)

Been et Sills¹ et Pane et Schiffman⁵ ont montré que le champ d'application de la théorie de Gibson s'étendait à la sédimentation. Bien que notre modèle simule la consolidation et la sédimentation, dans la présente étude, seule la partie consolidation est considérée. Notre modèle de consolidation, que nous noterons par la suite MCG (Modèle de Consolidation basé sur la théorie de Gibson), a été intégré dans Telemac3D qui est un ensemble de codes de calcul, basés sur les éléments finis, permettant de simuler les écoulements en milieux environnementaux et le transport des sédiments.

Les résultats obtenus avec le MCG sont comparés à ceux obtenus avec le Modèle de Consolidation Empirique (MCE) déjà implanté dans Telemac3D.

2. Paramétrisation

Une méthode simple permettant de déterminer les relations constitutives à partir d'une courbe de tassement a été proposée par Thiébot et Guillou⁹. Les relations suivantes ont été obtenues avec des vases de la Rance :

$$k(C) = 0,075 \cdot \left(\frac{\rho_s - C}{\rho_s} \right)^{121,7} \quad \sigma'(C) = F \quad \text{Si } C < 180 \text{ g/L}$$

$$\sigma'(C) = 0,079 \cdot C^{1,6} + G \quad \text{Sinon} \quad (5)$$

où F et G sont des constantes quelconques.

Dix couches sont utilisées pour représenter le lit cohésif avec les deux modèles. Les concentrations sont comprises entre 180 et 500g/l pour le MCG (Tab. 1), ce qui correspond respectivement à la concentration à partir de laquelle le squelette solide apparaît et à la valeur maximale mesurée lors de nos essais en colonnes. Pour le MCE, les concentrations et les temps de résidence ont été calculés avec la même courbe de tassement obtenue avec 50 cm de vase à 180 g/l initialement (Tab. 1).

N° de couche	MCE		MCG
	C (en g/l)	Temps de résidence (en min)	C (en g/l)
10	180	74,5	180
9	180,7	220,5	180,9
8	181,8	444,5	182,6
7	183,6	825,5	185,8
6	186,6	1519	192
5	191,6	2689,5	203,7
4	200	4485	225,9
3	213,8	6920,5	268
2	236,8	15646	348
1	275	∞	500

Tableau 1 : Paramètres du MCE et du MCG

3. Consolidation en eau calme

Dans un premier temps, on s'intéresse à la consolidation d'un dépôt de vase de 50 cm de haut et de concentration initiale 180 g/l qui n'est soumis ni au dépôt ni à l'érosion (initialement, tout le sédiment est placé dans la couche 10).

Avec le MCE, le sédiment passe successivement dans les différentes couches. Dans cette configuration, l'évolution de l'interface entre la colonne d'eau et le lit cohésif est réaliste, en revanche, les profils de concentration sont très différents de ce qui s'observe dans des colonnes de tassement. En moyenne, l'évolution de la concentration du lit est bien reproduite mais la répartition spatiale des concentrations sur la verticale est très approximative car avec ce modèle, la concentration du lit reste homogène sur la verticale, en effet, la totalité du sédiment est contenue dans une seule couche (Fig. 2).

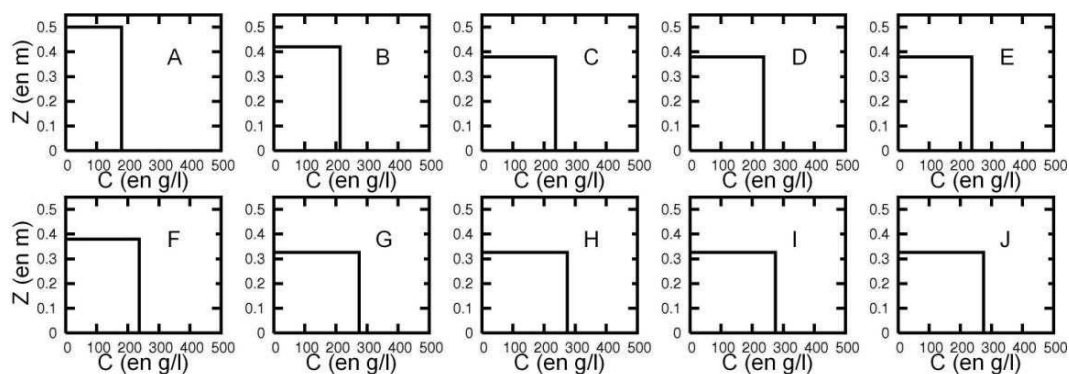


Figure 2 : Profils de concentration avec le MCE (A: 0min; B: 5 000min; C: 10 000min; D: 15 000min; E: 20 000min; F: 25 000min; G: 30 000min; H: 35 000min; I: 40 000min; J: 45 000min)

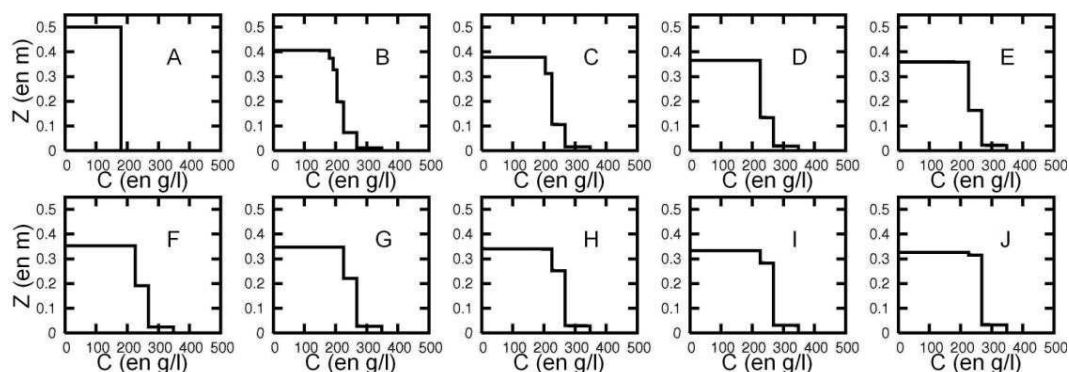


Figure 3 : Profils de concentration avec le MCG (A: 0min; B: 5 000min; C: 10 000min; D: 15 000min; E: 20 000min; F: 25 000min; G: 30 000min; H: 35 000min; I: 40 000min; J: 45 000min)

Avec le MCG, un gradient de concentration apparaît sur la verticale (Fig. 3). Contrairement au MCE, le sédiment peut traverser plusieurs couches en une itération, ce qui permet d'avoir une consolidation rapide à la base du lit cohésif, là où la charge due au poids des sédiments est la plus importante.

Lorsque l'on souhaite simuler le transport de sédiment dans un cas réel avec le MCE, pour éviter que la totalité du sédiment ne soit contenue dans une seule couche, une procédure de remplissage des couches est souhaitable. Une simulation pendant laquelle un dépôt régulier est imposé est lancée afin de remplir successivement plusieurs d'entre elles. Une fois cette simulation préalable terminée, les couches supérieures sont conservées et la simulation est lancée avec le profil de lit cohésif ainsi obtenu. Avec le MCG, cette procédure n'est pas nécessaire puisque l'on obtient rapidement un profil qui présente un gradient vertical de concentration en mettant initialement le sédiment dans la couche supérieure.

Le MCE ne tient pas compte de l'influence de l'épaisseur des dépôts sur la consolidation et par conséquent, le choix de la courbe de tassement utilisée pour déterminer les temps de résidence et les concentrations des couches conditionne fortement les résultats. La Figure 4 qui représente l'évolution temporelle de la concentration moyenne des dépôts calculée avec le MCG illustre l'influence de l'épaisseur initiale H_i de vase sur la consolidation. Plus la hauteur initiale est faible, plus la consolidation est rapide et vice versa.

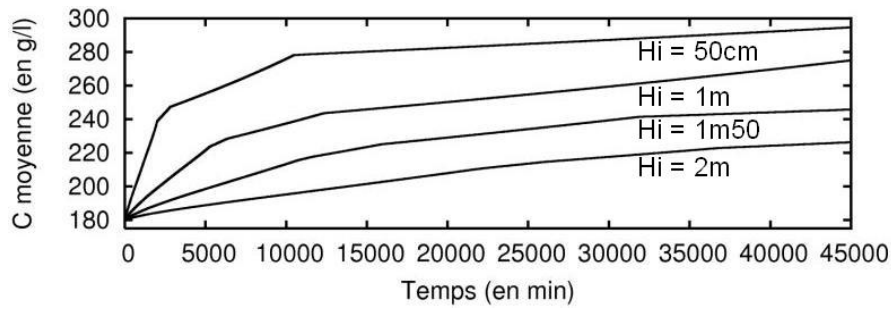


Figure 4 : Evolution de la concentration moyenne des dépôts en fonction de la hauteur initiale Hi

4. Consolidation dans un estuaire simplifié

Le cas proposé ici est une simplification de l'estuaire de la Rance. Il a pour objet de tester l'influence du modèle de consolidation sur la topographie du fond d'une part et sur le sédiment en suspension d'autre part.

La géométrie considérée est de forme trapézoïdale. La largeur à l'embouchure est de 400m et la cote du fond fixe est de -12,5m. A l'amont, la largeur est de 100m et la cote du fond fixe est de -6,5m. A la limite avale, une onde de marée semi diurne sinusoïdale (de période 12,4 h) de quatre mètres d'amplitude est imposée, tandis qu'un débit de 20 m³/s est imposé à l'amont sur toute la largeur. Un modèle de longueur de mélange est utilisé pour modéliser la turbulence. Finalement, le domaine est couvert par un maillage non-structuré de 5610 nœuds composé de 10 niveaux sur la verticale.

Initialement, on place sur le fond non érodable, 50 cm de vase à 180 g/l. La vitesse de chute des sédiments est constante et vaut 0,2 mm/s. Les flux de dépôt et d'érosion sont gérés par les lois de Krone³ et de Partheniades⁶. La contrainte critique de dépôt est fixée à 0,1 Pa et la contrainte critique d'érosion τ_{ce} est dépendante de la concentration de la couche à éroder :

$$\begin{aligned} \tau_{ce}(C) &= 6,070 \cdot 10^{-6} \cdot C^{1,953} && \text{Si } C(\text{couche à éroder}) < 220 \text{ g/l} \\ \tau_{ce}(C) &= 2,346 \cdot 10^{-9} \cdot C^{3,41} && \text{Sinon} \end{aligned} \quad (6)$$

Les simulations sont réalisées sur une période d'un mois.

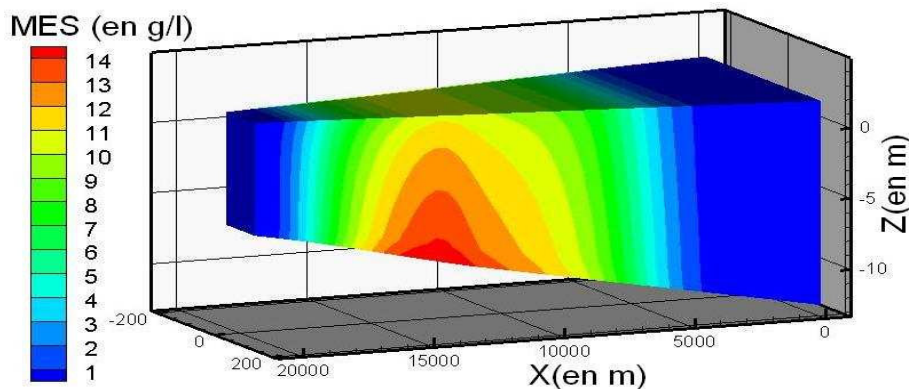


Figure 5 : MES après 7,2 h dans l'estuaire simplifié

Dès le début des simulations, la majeure partie du sédiment contenue dans le lit cohésif est mise en suspension, l'érosion agit surtout dans la partie avale de l'estuaire. On obtient alors une eau très chargée en sédiment (Fig. 5). Ce sédiment en suspension se dépose ensuite de façon régulière ou sort par la limite avale. Après quelques jours de simulation, un dépôt important se forme dans la partie amont de l'estuaire. Les topographies finales (Fig. 6) obtenues avec les deux modèles sont, dans l'ensemble, assez proches ; cependant, avec le MCE, quasiment tout le sédiment est contenu dans la couche de concentration 275 g/l alors qu'avec le MCG, le sédiment se répartit dans trois couches de concentrations 268, 348 et 500 g/l. A la fin des simulations, il y a respectivement 91 356 et 152 389 tonnes de sédiment dans le lit cohésif avec le MCE et le MCG ; pour les quantités de MES, on obtient 3,18 tonnes avec le MCE contre 17,61 tonnes avec le MCG. Bien que la position du bouchon vaseux soit comparable d'une simulation à l'autre, le facteur 6 entre les quantités de MES calculées illustre bien l'importance du modèle de consolidation sur les échanges entre le fond et la suspension.

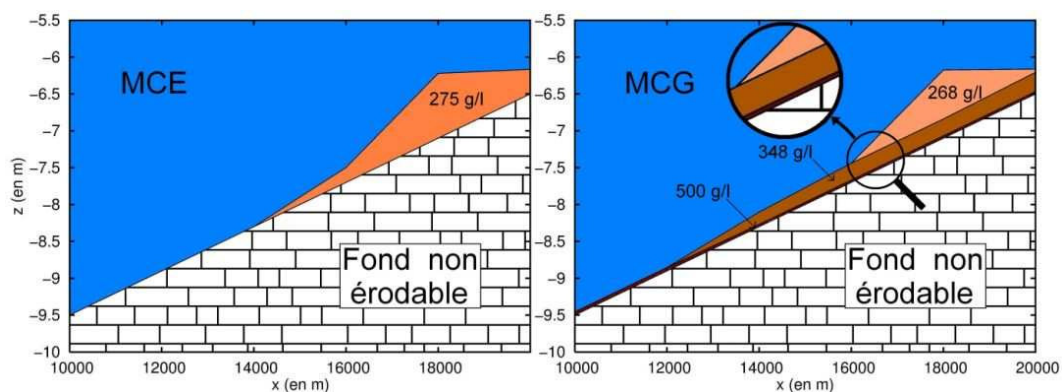


Figure 6 : Topographie et composition du lit cohésif après 1 mois de simulation

Avec le MCG, la consolidation agit plus rapidement à la base du lit cohésif, par conséquent, une fine couche de sédiment atteint une concentration telle qu'il devient difficile de l'éroder. Sur la Figure 6, on peut voir cette fine couche de sédiment qui est présente sur toute la longueur de l'estuaire (couche de concentration $C = 500$ g/l). Avec le MCE, le sédiment présent dans le lit cohésif n'a pas le temps d'atteindre une concentration telle que la contrainte critique d'érosion associée devienne supérieure à la contrainte de frottement sur le fond, par conséquent, l'érosion agit sur toute la hauteur du dépôt.

Enfin, les temps CPU nécessaires aux deux simulations sont comparables.

5. Conclusions

Cette étude met en évidence l'importance du choix du modèle de consolidation dans la simulation du transport sédimentaire en milieu estuarien. Notre modèle de consolidation basé sur l'équation de Gibson (MCG) bénéficie d'une plus grande précision que le modèle empirique (MCE) pour des temps de calcul similaires. Les phénomènes observés dans les colonnes de tassement sont mieux reproduits : apparition d'un gradient de concentration sur la verticale, influence de la hauteur du dépôt. Les différences entre les profils de concentrations obtenus par le MCG et par le MCE ont une influence forte sur l'érosion des sédiments. Des simulations sur un cas simple ont permis de mettre en évidence l'importance du choix du modèle de consolidation dans l'estimation de la quantité de sédiment présent dans le lit cohésif et en suspension.

Les études avenir concernent l'application du MCG à l'estuaire de la Rance.

6. Remerciements

Nous tenons à remercier pour leur soutien financier EDF GEH Ouest, l'IIBSN, l'ENGREF et le Comité Opérationnel des Elus et Usagers de la Rance (COEUR).

7. Références

- 1 Been K., Sills G.C., (1981), Self-weight consolidation of soft soils: an experimental and theoretical study. *Géotechnique*, **31** (4), 519-535.
- 2 Gibson R.E., (1967), The theory of one-dimensional consolidation of saturated clays. *Géotechnique*, **17**, 261-273.
- 3 Krone R.B., (1962), Flume studies of the transport of sediment in estuarine shoaling processes. *Hydr. Eng. Lab., University of California: Berkeley*, 110p.
- 4 Le Normant C., (2000), Three-dimensional modeling of cohesive sediment transport in the Loire estuary. *Hydrological processes*, **14**, 2231-2243.
- 5 Pane V., Schiffman R.L., (1985), A note on sedimentation and consolidation. *Géotechnique*, **35** (1), 69-72.
- 6 Partheniades E., (1965), Erosion and deposition of cohesive soils. *Proceedings of the American Society of Civil Engineers, J. Hyd. Div.*, **91**, 105-139.
- 7 Sanchez M., Grovel A., Hosseini K., (2000). Impact sédimentaire des travaux d'aménagement de l'estuaire de la Loire. *Bul. Eng. Geol. Env.*, **59** (3), 239-246.
- 8 Teisson C., (1994), A review of cohesive sediment transport models. *Cohesive sediments, Ed. Burt, Parker, Watts, Wiley*, **26**, 367-381.
- 9 Thiébot J., Guillou S., (2006), Simulation of processes acting on water-sediment mixtures in estuaries. *Annual conf. on hydraulic Eng., Dresden*, 141-148.
- 10 Toorman E.A., (1999), Sedimentation and self-weight consolidation: constitutive equations and numerical modeling. *Géotechnique*, **49** (6), 709-726.