



Mesure de la vitesse de chute des sédiments fins en laboratoire et in situ.

Martin Sanchez

*Maître de conférences, Faculté des Sciences, Université de Nantes,
2 rue de la Houssinière, BP 92208, 44322 Nantes – Tél : 02 51 12 55 51.
E.Mail : martin.sanchez@physique.univ-nantes.fr*

Yann Delanoë

*Maître de conférences, Faculté des Sciences, Université de Nantes,
2 rue de la Houssinière, BP 92208, 44322 Nantes – Tel : 02 51 12 54 61.
E.Mail : yann.delanoë@chimie.univ-nantes.fr*

Résumé

Le rôle de la vitesse de chute des matériaux cohésifs en suspension dans l'eau sur la dynamique sédimentaire des estuaires est examiné. Les différents paramètres physiques régissant le dépôt des vases sont présentés. En prenant comme référence les sédiments de l'estuaire de la Loire, trois méthodes d'évaluation de la vitesse de chute de sédiments fins sont mises en oeuvre : mesure en eau calme en laboratoire, mesure en eau calme à la bouteille d'Owen sur échantillons prélevés in situ, et évaluation de la vitesse de dépôt moyenne grâce à l'étude de l'évolution des matières en suspension dans une tranche d'eau se déplaçant avec le courant dans l'estuaire au cours d'un cycle de marée. Enfin, les résultats de ces trois mesures sont comparés.

Abstract

The role of settling velocity of suspended cohesive materials on the sedimentary dynamics of estuaries is examined. The different physical parameters governing the deposit of mud are presented. Taking the estuary of river Loire as reference, three methods for the evaluation of the settling velocity of fine particles are compared: laboratory measures in still water, measures in still water using Owen tube on in situ collected samples and evaluation of the mean settling velocity through the study of the evolution of vertical profiles of suspended matter moving with the current during a tidal cycle. The results of these three methods are discussed.

1. Introduction

Les estuaires sont un site privilégié pour l'accumulation des vases d'origine fluviale. Ces sédiments fins sont constitués d'argiles issues du lessivage des sols, de débris d'organismes calcaires ou siliceux, de sels et oxydes divers, de matière organique plus ou moins dégradée (à environ 10%, mais variable d'un estuaire à un autre) et de l'eau d'imbibition.

Les sédiments fins sont transportés en suspension par les fleuves sur plusieurs dizaines ou centaines de kilomètres sans dépôt important en amont des estuaires,

sauf dans les zones latérales inondables lors des crues. L'écoulement fortement turbulent régnant en quasi permanence dans les fleuves explique cette absence de dépôt.

L'accumulation des matériaux fins dans les estuaires est due aux dépôts se produisant pendant la période d'eaux calmes qui se présente lors des renverses des courants de marée. Le dépôt d'une partie de ces sédiments se trouvant en permanence sous forme d'agrégats se produit très rapidement et ce d'autant plus vite que la vitesse de chute des agrégats est grande. Les matières dissoutes ne tombent à leur tour que lorsqu'elles forment des agrégats par le phénomène de floculation favorisé par la salinité des eaux marines.

La vitesse de chute des sédiments est un paramètre de première importance régissant la répartition verticale des matières en suspension et la rapidité de la sédimentation observée pendant les périodes où les courants sont faibles.

2. Relations théoriques de la vitesse de chute de particules en suspension

Dans une eau calme de masse volumique ρ_o , la vitesse de chute terminale w_d d'une particule sphérique de diamètre D et de masse volumique ρ_s , est donnée par l'expression suivante :

$$w_d = \sqrt{\frac{4}{3} \frac{\rho_s - \rho_o}{C_D} g D} \quad (1)$$

où g est l'accélération de la pesanteur et C_D le coefficient d'entraînement qui dépend d'un nombre de Reynolds $\mathcal{R} = w_d D / \nu$ (avec ν désignant la viscosité cinématique de l'eau). Si $\mathcal{R} \leq 1$, l'écoulement autour de la sphère est laminaire et C_D obéit à la loi de Stokes suivante : $C_D = 24 / \mathcal{R}$. Dans ce cas w_d est donnée par :

$$w_d = \frac{1}{18} \frac{\rho_s - \rho_o}{\rho_o} \frac{g D^2}{\nu} \quad (2)$$

L'évaluation du diamètre de chute équivalent des grains d'argile passant à travers un tamis de 50 μm s'appuie sur cette dernière relation. Le procédé porte sur la variation de la masse volumique d'une suspension contenue dans une éprouvette cylindrique haute.

Pour mesurer la masse volumique on utilise un densimètre de type torpille. La forme du densimètre joue un double rôle : les deux cônes supérieur et inférieur limitent la perturbation pendant l'introduction du densimètre et cette forme géométrique simple permet de calculer, sans difficulté, la position du centre de gravité de la partie immergée du densimètre.

Pour préparer la suspension, un échantillon étuvé de 30 grammes est attaqué à l'eau oxygénée à chaud afin d'éliminer la matière organique. Après lavage à l'eau, le sédiment est dispersé dans un litre d'eau. Pour supprimer la floculation on fait bouillir la suspension, laquelle est soumise à une agitation rotatoire pendant une heure environ afin de dissocier les agrégats. Si la floculation persiste, on fait alors appel à un défloculant. La suspension homogène est ensuite versée dans l'éprouvette ($t=0$) où les mesures de la masse volumique sont effectuées.

La mesure de la masse volumique à l'instant t est représentative de la masse volumique de la suspension à la profondeur H du centre de gravité de la partie immergée du densimètre. A cet instant, les grains ayant une vitesse de chute supérieure à H/t se trouvent en dessous de ce centre de gravité.

Le pourcentage en poids ($W\%$) des grains ayant une vitesse de chute inférieure à H/t est calculé à partir de la masse volumique mesurée, par interpolation entre la valeur initiale de la masse volumique de la suspension ($W\%=100$) et la valeur de la masse volumique de l'eau ($W\%=0$). Le diamètre de chute équivalent D associé à la vitesse de chute $w_d=H/t$ est calculé à travers l'équation (2).

Le diamètre de chute équivalent d'un grain correspond donc au diamètre d'une sphère de même masse volumique que ce grain tombant à la même vitesse dans l'eau calme. Le diamètre de chute équivalent médian est celui associé à $W\%=50$.

3. Ordres de grandeur de la vitesse de chute des sédiments fins de Loire

Les particules élémentaires de la vase de Loire ont un diamètre de chute équivalent médian d'environ $1,5 \mu\text{m}$ (Migniot, 1989) et une masse volumique de 2600 kg m^{-3} ; leur vitesse de chute théorique est alors de l'ordre de $2 \cdot 10^{-6} \text{ m s}^{-1}$ (régime de Stokes). En revanche, les agrégats de vase que l'on rencontre sont pratiquement sphériques avec un diamètre maximal de l'ordre de 1 mm et une masse volumique d'environ 1250 kg m^{-3} . Leur vitesse de chute théorique en eau calme (lors des étales) atteint $0,045 \text{ m s}^{-1}$, impliquant un régime turbulent pour l'écoulement autour de l'agrégat. La vitesse de chute dépend donc principalement de l'état dissocié ou aggloméré des matières en suspension.

Dans l'eau calme sans défloculant, la vitesse de chute varie principalement avec la concentration en matières en suspension C_{MES} . Des mesures en laboratoire (Migniot, 1989 ; Thorn, 1981) ont montré que pour des concentrations faibles la vitesse de chute augmente régulièrement avec la concentration. En revanche, à partir d'une concentration variant de 5 à 10 kg m^{-3} selon le sédiment étudié, cette vitesse diminue quand la concentration augmente car les sédiments s'entravent dans leur chute.

4. Mesure de la vitesse de chute en eau calme en laboratoire

La préparation d'une suspension à une concentration donnée est obtenue en mélangeant dans un récipient un échantillon humide de vase avec un volume convenable d'eau. La suspension est homogénéisée par malaxage à l'aide d'une tige afin de préserver la structure interne de la vase. Après cette opération des agrégats de particules élémentaires persistent (Krone, 1984).

Deux séries de mesure de la vitesse de chute de la vase de Loire en eau calme ont été effectuées en laboratoire pour différentes concentrations initiales (figure 1). La première concerne des concentrations variant de $2,5 \text{ kg m}^{-3}$ à 87 kg m^{-3} avec une salinité du milieu aqueux de 10 ‰ (Sanchez, 1992). La deuxième, réalisée dans le cadre de cette étude, couvre des concentrations comprises entre $0,05 \text{ kg m}^{-3}$ et

80 kg m⁻³. Une vitesse maximale de 1,45·10⁻³ m s⁻¹ a été observée pour une concentration de 8 kg m⁻³ lors de cette dernière série de mesures.

Pour les concentrations inférieures à 35 kg m⁻³, une dispersion se produit lors de la chute des particules du fait d'une vitesse différentielle selon la taille des agrégats. En revanche, pour les concentrations supérieures, la quasi totalité des matières en suspension descend à une vitesse unique faisant apparaître une interface suspension-eau claire ; il s'agit alors d'un tassement de la vase. Dans le premier cas, la vitesse de chute est mesurée au densimètre (si possible) et sa valeur correspond à W%=50 (médiane de la vitesse). Dans le deuxième cas, la vitesse de chute est celle de l'interface suspension-eau claire mesurée en début du tassement.

Pour les concentrations inférieures à 2,5 kg m⁻³, le densimètre n'est plus suffisamment sensible pour effectuer la mesure de la vitesse médiane de chute. Dans ce cas, cette vitesse est estimée à partir de la mesure du temps nécessaire pour que la transparence de la suspension étudiée soit égale à celle d'une deuxième suspension homogène préparée ad hoc à une demi fois la concentration étudiée.

5. Mesure en eau calme à la bouteille d'Owen sur échantillons prélevés in situ

Une série de tests de la mesure de la vitesse de chute au tube d'Owen a été réalisée du 8 au 10 décembre 2000 dans le cadre de la campagne automne 2000 organisée par la Cellule des Mesures et des Bilans de la Loire estuarienne.

Le tube employé a un mètre de longueur et une capacité de deux litres. Ce tube ouvert à ces deux extrémités est immergé en position horizontale et orienté suivant le courant. A une profondeur choisie pour l'échantillonnage des matières en suspension, les deux extrémités du tube sont fermées à l'aide d'un messenger. Le tube est ensuite remontée à la surface, toujours en position horizontale.

Les mesures proprement dites sont réalisées dans une station à terre située à proximité des sites de prélèvement d'échantillons. Dans ces stations, le tube est installé en position verticale sur un trépied à l'abri du soleil pour éviter les échauffements susceptibles de créer des mouvements d'eau convectifs.

Des prélèvements de 200 ml sont ensuite effectués par le bas du tube à différents instants. Les prélèvements sont répartis dans le temps de manière à différencier des groupes de vitesse et estimer la quantité de particules sédimentant dans chaque intervalle (1 mn, 2 mn, 4 mn, 8 mn, 16 mn, 24 mn, 32 mn, 48 mn, 64 mn). Enfin, un dernier prélèvement permet de récupérer le reste du liquide présent dans le tube afin d'estimer la masse solide globale de l'échantillon.

Les matières en suspension des échantillons sont mesurées en laboratoire par filtration.

Grâce aux mesures au tube d'Owen, une courbe de répartition représentant le pourcentage en poids (W%) des grains ayant une vitesse de chute inférieure à $w_d=H/t$, où H est la hauteur de chute des sédiments et t le temps de sédimentation mesurée à partir du début du test.

La médiane de la vitesse de chute $w_d^{(50\%)}$ (valeur de w_d associée à W%=50) est représentée à la figure 1 en fonction de la concentration initiale des matières en suspension pour 12 échantillons prélevés dans l'estuaire de la Loire.

6. Evaluation de la vitesse de chute moyenne à partir de la modélisation de la dynamique sédimentaire observée in situ

Des campagnes de mesures in situ consistant à suivre l'évolution des matières en suspension dans une tranche d'eau dérivant sur l'axe de navigation d'un estuaire, permettent une évaluation indirecte de la vitesse de chute des sédiments. Une étude préalable faisant appel à ce type de campagne a été réalisée par Brun-Cottan et coll. (2000) dans l'estuaire de la Seine.

Une autre campagne a été mis en œuvre dans l'estuaire de la Loire le 23 mai 2000 (Maury, 2000) à bord de la vedette océanographique de l'université de Nantes. Le coefficient de marée était de 65 pour un débit de la Loire mesuré la veille à Montjeant (en amont de l'estuaire) de $860 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$. La campagne s'est déroulée de la manière décrite ci-dessous.

Un flotteur a été lâché à 9h00, en début du jusant, entre Basse-Indre et Couëron. Ce flotteur, dérivant sur le chenal de navigation de l'estuaire définit les positions des stations de mesure toutes les trente minutes. Dans une station de mesure sur deux on effectue soit un profil vertical de la concentration en matières en suspension C_{MES} , soit un profil vertical des vitesses du courant.

Pour permettre la modélisation mathématique des observations, la tranche d'eau est divisée en cinq couches d'égale épaisseur. Les mesures de C_{MES} et des vitesses, sont effectuées au milieu de chaque couche.

Les matières en suspension sont mesurées par filtration en laboratoire des échantillons d'eau prélevés à la bouteille à partir de la vedette dérivant à proximité du flotteur. Les mesures des vitesses sont effectuées dans des stations fixes à l'aide d'un courantomètre mécanique effectuant une moyenne sur 15 s.

L'interprétation des mesures est effectuée en utilisant un repère mobile suivant le déplacement de la tranche d'eau étudiée. L'accélération du repère, dont la valeur maximale est de l'ordre de $2 \cdot 10^{-4} \text{ m s}^{-2}$, est négligée. De plus les vitesses différentielles observées à différentes profondeurs par rapport à la vitesse de surface sont négligées, ce qui rend les résultats peu précis au voisinage du fond. Enfin on néglige les transferts nets de masse dans la direction transversale par rapport à l'écoulement.

Dans la colonne d'eau, le débit solide vertical Q_s à travers une surface horizontale unitaire située à la cote z mesurée à partir du fond, est donné par :

$$Q_s = -\overline{w_d} C_{MES} - D_t \frac{\partial C_{MES}}{\partial z} \quad (3)$$

où $\overline{w_d}$ est la vitesse moyenne de dépôt des matières en suspension situées en z à l'instant considéré et D_t le coefficient de diffusion verticale turbulente de masse de la loi de Fick-Boussinesq. On admet que D_t est du même ordre de grandeur que le coefficient de viscosité cinématique turbulente ν_t ($D_t \approx \nu_t$), modélisé par la relation suivante :

$$\nu_t = \kappa u_* z (1 - z/\delta) \quad (4)$$

où $\kappa=0,41$ est la constante universelle de Karman, δ la profondeur considérée comme étant l'épaisseur d'une couche limite et u_* représente la vitesse de

cisaillement qui peut être évaluée par la mesure de la vitesse u_a à une distance $z_a \approx 0,1\delta$ du fond, à travers l'expression suivante :

$$\frac{u_a}{u_*} = \frac{1}{\kappa} \ln\left(\frac{z_a}{\epsilon}\right) + c \quad (5)$$

où c est une constante qui vaut 8,2 selon Nikuradse (*in* Daily et Harleman, 1966) pour les rugosités de grain de sable uniformes et ϵ la rugosité hydraulique équivalente de grain de sable, qui pour des vases de Loire et de Seine étudiées en laboratoire par Hosseini (1999) vaut 87 mm.

L'évaluation de la vitesse moyenne de dépôt \bar{w}_d est effectuée par calcul numérique de façon à reproduire les observations in situ par l'utilisation de l'équation de conservation de masse ci-dessous :

$$\frac{\partial C_{MES}}{\partial t} + \frac{\partial Q_s}{\partial z} = 0 \quad (6)$$

7. Résultats des mesures des vitesses de chute et conclusions

Les vitesses de chute des sédiments fins de l'estuaire de la Loire mesurées par trois méthodes différentes sont montrées à la figure 1 en fonction de la concentration en matières en suspension C_{MES} .

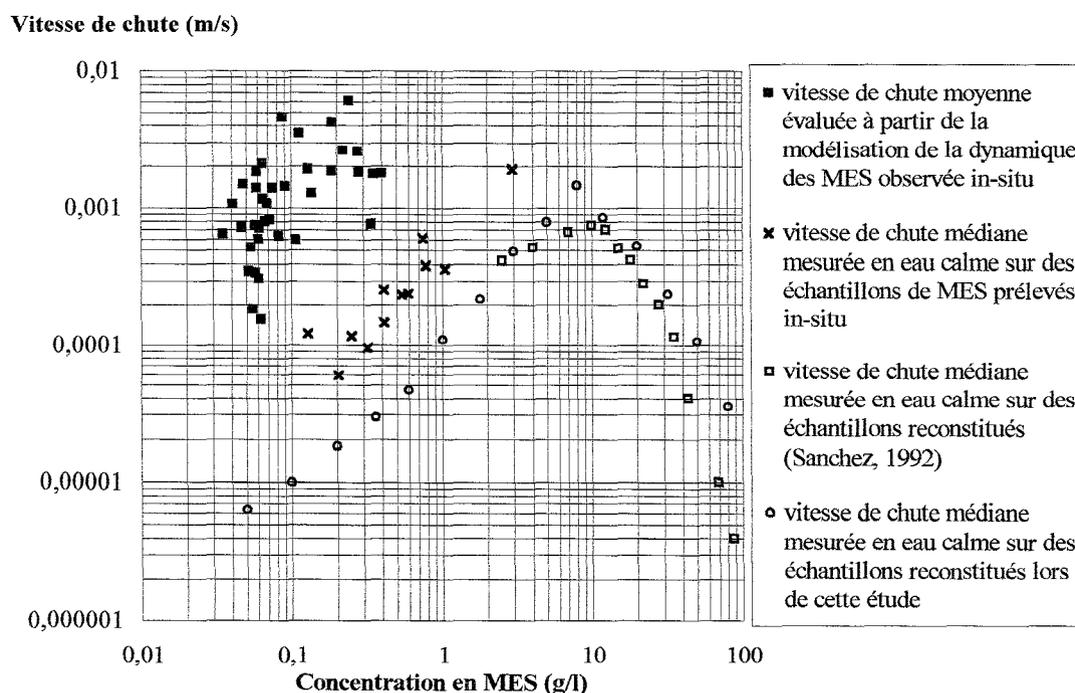


Figure 1 - Variation de la vitesse de chute de la vase de Loire en fonction de la concentration en matières en suspension.

Figure 1 - Vertical velocity as a function of concentration for cohesive sediment of the Loire estuary.

Un classement des trois méthodes analysées dans cette étude pour la mesure de la vitesse de chute par ordre croissant des résultats obtenus pour cette vitesse (à concentration de matières en suspension fixe) est le suivant :

- a) la mesure de la vitesse de chute médiane $w_d^{(50\%)}$ en eau calme en laboratoire sur un échantillon reconstitué,
- b) la mesure de la vitesse de chute médiane $w_d^{(50\%)}$ en eau calme sur un échantillon de matières en suspension prélevé in situ (méthode de la bouteille d'Owen),
- c) l'évaluation de la vitesse de chute moyenne w_d à partir de la modélisation de la dynamique sédimentaire observée in situ.

La mesure de la vitesse de chute en eau calme sur un échantillon reconstitué, confirme les résultats de Thorn (1981) et de Migniot (1989) concernant l'augmentation de cette vitesse de chute avec la concentration dans un domaine de concentrations inférieures à 10 kg m^{-3} , ce qui s'explique par le phénomène de floculation. Un échantillon reconstitué n'étant pas représentatif des matières en suspension d'un estuaire, ce type de mesure ne produit pas des résultats pouvant s'appliquer à l'étude de la dynamique verticale des vases in situ.

La mesure de la vitesse de chute en eau calme à la bouteille d'Owen des matières en suspension prélevées des eaux estuariennes, permet de conserver dans son état initial in situ l'échantillon examiné. Cette technique d'évaluation d'une vitesse de chute qui est représentative de la dynamique verticale des vases in situ dans des conditions d'eau calme, a permis d'évaluer sur la vase de Loire des valeurs de cette vitesse à peu près 5 fois supérieures à celles mesurées sur un échantillon reconstitué.

La différence entre les résultats obtenus pour la médiane de la vitesse de chute des matières en suspension pour un échantillon reconstitué et pour un échantillon prélevé in situ, s'explique principalement par la présence dans les eaux des estuaires d'agrégats rigides issus de l'érosion des vases consolidées (Hosseini, 1999) dont le diamètre maximal est de l'ordre de 1 mm pour la vase de Loire.

Le rôle important joué par les agrégats rigides sur la dynamique sédimentaire des vases n'implique pas que la floculation soit un phénomène secondaire, même s'il est peu probable que des agrégats stables puissent être formés par floculation dans un écoulement turbulent. En effet, les mesures montrent que lors des périodes d'eaux calmes, la floculation, qui augmente avec l'augmentation de la concentration, facilite en grande partie la chute des sédiments.

Par ailleurs, dans les estuaires on peut également justifier l'augmentation de w_d avec l'augmentation de C_{MES} par le fait qu'une concentration élevée est caractérisée par la présence d'agrégats relativement lourds en suspension, alors qu'une concentration faible implique la présence de sédiments très dissociés.

La modélisation de la dynamique sédimentaire observée dans l'estuaire de la Loire, permet une évaluation de vitesses de chute moyennes w_d très largement supérieures aux vitesses de chute médianes $w_d^{(50\%)}$ mesurées dans des conditions d'eau calme. Ceci pouvant s'expliquer partiellement par deux facteurs :

- a) la différence existante entre les vitesses de chute médiane et moyenne,
- b) la forme d'agrégats non parfaitement sphériques. En effet, la pénétration verticale d'un agrégat aplati dans l'eau doit être plus importante dans un écoulement turbulent que dans des conditions d'eau calme, car dans ce dernier

cas l'agrégat tombe en « feuille morte » de façon qu'il présente son plus grand couple à l'encontre du mouvement (vertical).

Il semble que la détermination de la vitesse de chute $\overline{w_d}$ à partir de la modélisation de l'évolution des matières en suspension observée in situ est la méthode d'évaluation de cette vitesse permettant de mieux expliquer la dynamique de ces matières en suspension dans les estuaires.

En ce qui concerne la vase de l'estuaire de la Loire, à l'état actuel de cette recherche, on peut considérer que pour les concentrations inférieures à $0,1 \text{ kg m}^{-3}$ $\overline{w_d}$ augmente avec la concentration, alors que pour des concentrations supérieures à cette dernière, la vitesse de chute moyenne semble avoir une valeur à peu près constante d'environ $2 \text{ ou } 3 \text{ mm s}^{-1}$ (valeur qui est très supérieure de celles considérées par la plupart des auteurs). Cependant, il faut signaler que des mesures sont encore nécessaires pour couvrir la gamme de concentrations comprises entre $0,5 \text{ kg m}^{-3}$ et 10 kg m^{-3} .

Enfin, il faut également signaler que la vitesse de chute $\overline{w_d}$ est un paramètre de modèle plus qu'un paramètre physique. En effet, $\overline{w_d}$ dépend de l'état plus ou moins aggloméré des matières en suspension à l'élévation z , à l'instant considéré.

8. Remerciements

Les auteurs remercient sincèrement la *Cellule de Mesures et des Bilans de la Loire estuarienne* pour avoir mis à la disposition de cette étude comparative les mesures de la vitesse de chute effectuées par la technique d'Owen dans le cadre de la campagne Automne 2000.

9. Références bibliographiques

- Brun-Cottan J.C., Lesourd S., Lesueur P., Guillou S., 2000. Evaluation directe des flux d'érosion et de dépôt de sédiments à partir de mesures en suivi de bouée dérivante dans un estuaire macrotidal ; application à la Seine , Comptes Rendus de l'Académie des Sciences, série IIA, volume 331, n°4, Paris, pp. 265-270.
- Daily J.W., Harleman D.R.F., 1966. Fluid dynamics, Addison-Wesley Publishing Co. Reading, Mass., USA.
- Hosseini K., 1999. Liaison entre la rigidité initiale et la cohésion dans les vases molles - Relation avec la dynamique sédimentaire. Thèse de l'Université de Nantes, 163 p.
- Krone R.B., 1984. The significance of aggregate properties to transport processes, Estuarine Cohesive Sediment Dynamics ed. by Mehta, Springer-Verlag, pp. 66-84.
- Migniot C., 1989. Tassement et rhéologie des vases. La Houille Blanche, n° 1 et 2, pp. 11-29 et 95-111.
- Sanchez M., 1992. Modélisation dans un estuaire à marée - Rôle du bouchon vaseux dans la tenue des sols sous-marins. Thèse de l'Université de Nantes, 210 p.
- Mauray T., 2000. Etude de l'évolution des matières en suspension en coordonnées lagrangiennes par des mesures in situ. DEA de l'Université de Nantes, 69 p.
- Thorn M.F.C., 1981. Physical processes of siltation in tidal channels. Proc. Hydraulic Modelling Applied to Maritime Eng. Problems, ICE, London, pp. 47-75.