



# ETUDE DES PHENOMENES DE DEPOT, DE CONSOLIDATION ET D'EROSION DE LA CREME DE VASE DANS LES ESTUAIRES.

Martin Sanchez ; Alain Grovel

Département de Physique. Laboratoire de Mécanique et Géomécanique de Nantes.  
Faculté des Sciences et des Techniques.  
2, rue de la Houssinière. 44072 NANTES CEDEX 03.

## ABSTRACT :

*The current models of deposition, consolidation and erosion of cohesive sediments are essentially empirical in nature. This has not permitted us to determine general laws governing the sedimentary dynamics of muds in estuaries. These models are only valid for specific estuaries.*

*In this paper, some rheological models permitting the study of mud as a non-Newtonian fluid are presented, as well as, a bibliographical research concerning cohesive sediments. A model has been developed for all of the following sedimentary processes :*

- deposition, introduces initial concentration inside the mud's layers ;*
- consolidation, governs the modifications of concentration inside the mud's layers, it is analysed from a viewpoint of the mechanic of soils applied to small compression loads ;*
- erosion, is studied as a turbulent diffusion process on the boundary between a Newtonian fluid and a non-Newtonian fluid.*

## RESUME :

Les modèles actuels servant à l'étude des phénomènes de dépôt, de consolidation et d'érosion des matériaux cohérents sont fondés sur des bases empiriques, ce qui n'a pas permis de trouver des lois générales gouvernant la dynamique sédimentaire des vases dans les estuaires. Ces modèles restent valables seulement pour les cas spécifiques considérés, les extrapolations à d'autres estuaires n'étant pas possibles.

Une étude des différents modèles rhéologiques, permettant la modélisation de la vase comme un fluide non-newtonien, de même qu'une brève révision bibliographique sur la dynamique sédimentaire des matériaux cohérents sont présentés.

Dans cette étude, est réalisé un modèle pour chacun des phénomènes sédimentologiques suivants :

- le dépôt**, impose la condition initiale de la concentration dans la crème de vase ;
- la consolidation**, gouverne l'évolution de la concentration à l'intérieur de la couche-crème, elle est analysée du point de vue de la mécanique des sols dans le domaine des faibles contraintes de consolidation ;
- l'érosion** de la crème de vase, est étudiée comme un phénomène de diffusion turbulente à l'interface entre un fluide newtonien et un fluide non-newtonien stratifié.

## INTRODUCTION.

Le dépôt de matériaux péltiques du type vase, contribue fréquemment à réduire la rentabilité d'une installation, en imposant des travaux d'entretien, aussi bien dans une retenue de barrage que dans un estuaire ou chenal d'accès; de plus la qualité des eaux est étroitement liée à la sédimentologie, d'où l'importance de modéliser les phénomènes de dépôt, de consolidation et d'érosion de la crème de vase.

Dans les estuaires, la vase est le sédiment que l'on trouve le plus souvent. elle est formée de deux ensembles [11]: l'un dit "actif", variable dans le temps et dans l'espace; et l'autre dit "inerte", invariable.

La phase inerte est formée d'éléments minéraux et des débris d'organismes calcaires et siliceux; la vase contient une proportion variable de sables fins, de silts et d'argiles. Les minéraux argileux, de dimension inférieure à  $2\mu$ , sont les responsables de certaines propriétés de la vase.

La phase active est formée de l'eau d'imbibition qui est normalement salée et contient de nombreux sels nutritifs utilisables par les organismes et les micro-organismes, des sels et oxydes divers contenus dans l'eau ou fixés sur les particules d'argile, et de la matière organique qui se trouve à des états de dégradation très divers.

Ainsi, la vase est un complexe sol-eau essentiellement variable dans le temps. Cette variabilité est due aux actions chimiques, biologiques et mécaniques.

## RHEOLOGIE DES VASES.

Dans ce travail, on considère que tous les paramètres non-mécaniques restent constants dans le temps, ainsi, à une contrainte appliquée sur la vase, correspond une déformation ne dépendant que des facteurs mécaniques.

On considère aussi, que pour une vase donnée, ses propriétés dépendent exclusivement de la température et de la concentration en matières sèches. On appelle propriétés d'un corps [1], l'ensemble des déformations correspondantes aux différentes contraintes. On dit que deux corps ont les mêmes propriétés, si toute contrainte s'accompagne de déformations identiques sur l'un et l'autre corps.

Enfin, on considère la vase comme un fluide non-newtonien et son comportement est assimilé à celle d'un fluide newtonien [2].

Fluide newtonien :  $\tau = \mu \frac{du}{dy}$   $\mu$ , viscosité, constante pour une température donnée.

Fluide non-newtonien :  $\tau = \eta \frac{du}{dy}$   $\eta$ , viscosité, fonction de  $\frac{du}{dy}$  et de la température.

Les modèles rhéologiques utilisés sont :

Loi de puissance :  $\eta = m \left( \frac{du}{dy} \right)^{n-1}$   $m$ , est un indice de la viscosité et  $n$  caractérise le comportement non-newtonien du fluide

Modèle de Bingham :  $\eta = \infty$  pour :  $\tau < \tau_B$   $\tau_B$ , seuil de plasticité.

$\eta = \mu_B + \frac{\tau_B}{du/dy}$   $\mu_B$ , viscosité de Bingham.

$\tau$  est la force tangentielle et  $du/dy$  la vitesse de déformation.

La vase est thixotropique, c'est à dire, qu'elle se liquéfie lorsqu'on l'agite (destruction de la structure initiale), mais elle a la possibilité de retrouver sa rigidité au repos.

Des essais rhéométriques réalisés à l'aide d'un appareil "Rheomat 108", avec de la vase reconstituée de la Loire, nous ont permis de construire les courbes force tangentielle-vitesse de déformation pour des températures et des concentrations variables (Fig. 1 et 2).

La variation de la viscosité avec la température est semblable à celle de l'eau, et nous l'avons approchée par:

$$\eta_T = \eta_{21^\circ\text{C}} \frac{\mu_{\text{eau } T}}{\mu_{\text{eau } 21^\circ\text{C}}}$$

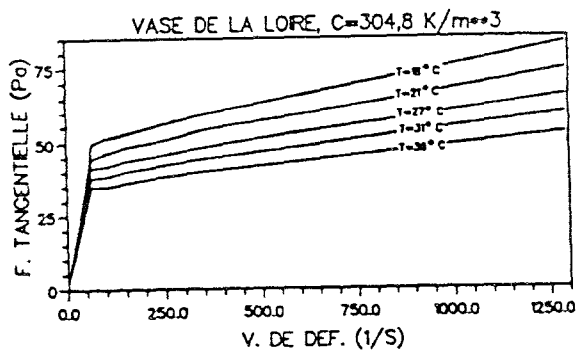


Fig. 1.- Rhéogramme de la vase de la Loire pour différentes températures.

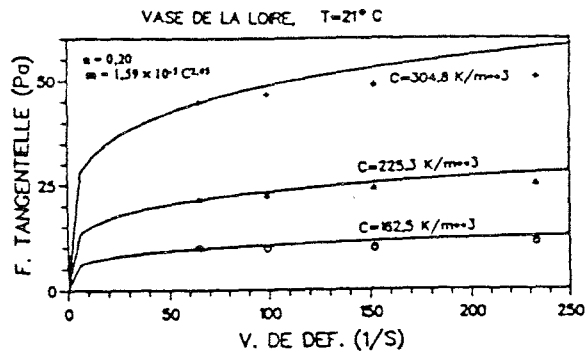


Fig. 2.-Rhéogramme de la vase de la Loire pour de différentes concentrations.

Le modèle rhéologique retenu pour la modélisation de la vase est la loi de puissance; pour les interpolations, on a :

$$n = 0,20 \quad \text{pour : } 127 \text{ Kg/m}^3 < C < 300 \text{ Kg/m}^3.$$

$$m = 1,59 \times 10^{-5} C^{2.45}$$

Où C est la concentration en matières sèches, en Kg/m<sup>3</sup>.

## RAPPEL DES MODELES EXISTANTS

### Dépôt de la vase.

Dans les estuaires, la pénétration d'eau salée produit une forte diminution du courant fluvial et même l'annule lors des étales. Cette période de calme permet une décantation naturelle des matières en suspension, une partie de ces matières se dépose et l'autre se concentre dans la couche d'eau inférieure.

De plus, l'action électrolytique de l'eau de mer et de la matière organique présente dans les sédiments provoque l'agglomération des particules sous forme de flocons ayant une vitesse de chute beaucoup plus importante que celle des particules élémentaires, provoquant ainsi l'augmentation de la décantation des matériaux.

Des études réalisées sur les boues résiduelles ont permis de connaître leur structure en fonction de leur concentration en matières sèches.

En 1958, Tsung-Lien [16], a essayé de définir une concentration limite, en dessus de laquelle l'écoulement est plastique et en dessous de laquelle le matériau se rapproche d'un liquide newtonien. Il soutenait ce principe en disant que dans les boues à concentration très basse les particules solides n'ont pas d'interaction entre elles, mais que la boue se comporte comme une suspension.

En 1970, Colin [3], met en évidence, grâce à des observations microscopiques, que la boue est constituée d'agrégats de particules formant un réseau continu tridimensionnel.

Par convenance, nous allons définir les limites de concentration de la crème de vase.

$C_0$  correspond à la concentration la plus faible, permettant la formation d'une structure à réseau continu tridimensionnel, en l'absence de contraintes externes.

$C_s$  correspond à la limite de liquidité.

$C_0$  est la frontière entre suspension et crème de vase, et  $C_s$  la frontière entre crème de vase et sol plastique.

### Consolidation.

Décantés par gravité sur le fond, les flocons forment un sédiment à structure floconneuse. Ensuite, sous l'action de son propre poids, la structure se transforme d'abord en nid d'abeille et finalement en structure élémentaire.

Bien que la théorie de Terzaghi [15] ne puisse pas être appliquée à l'étude de la consolidation de la crème de vase, par suite des hypothèses prises en compte, nous présentons dans les Fig. 3 et 4, les résultats correspondant à la consolidation d'un matériau sur son propre poids avec un fond imperméable.

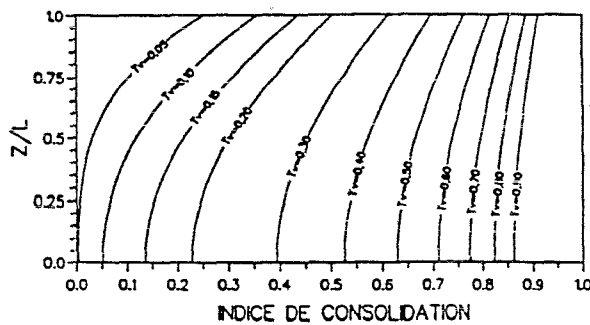


fig. 3.- Evolution de l'indice de consolidation en fonction de la profondeur et de  $T_v$  (Terzaghi [15]).

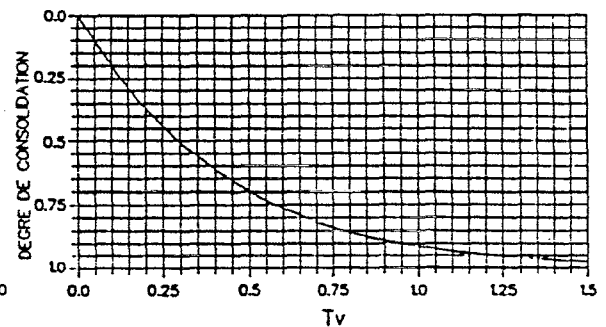


fig. 4.- Evolution du degré de consolidation en fonction de  $T_v$  (d'après Terzaghi [15]).

Dans les fig. 3 et 4 on a :

$$\text{Indice de consolidation } (z,t) = \frac{\text{variation du volume à la profondeur } z, \text{ au temps } t}{\text{variation du volume total à la profondeur } z}$$

$$\text{Degré de consolidation (t)} = \frac{\text{variation du volume total au temps t}}{\text{variation finale du volume total}}$$

$$T_v = C_v \frac{t}{H^2} \quad \text{avec : } C_v = \frac{k}{g \rho_o m_v}$$

Où :  $T_v$  est le coefficient de durée ;  $C_v$ , le coefficient de consolidation ;  $k$ , le coefficient de perméabilité ;  $g$ , l'accélération de la pesanteur ;  $\rho_o$ , la densité de l'eau ;  $m_v$ , le coefficient de compressibilité volumétrique ;  $t$ , le temps ; et  $H$ , l'épaisseur du dépôt.

Des lois empiriques ont été proposées pour l'étude de l'évolution de la concentration de sédiments cohérents en fonction du temps.

Migniot [9], propose une loi logarithmique (voir fig. 5).

$$C = \alpha_1 \log t_1 + \beta$$

où :  $t_1$  est le temps (exprimé en général en heures) ;  $\alpha_1$ , un facteur qui dépend du complexe sol-eau; et  $\beta$ , un facteur lié au milieu aqueux.

Le Hir [7], d'après la revue des mesures de consolidation effectuée par dixit et Hayer, propose un modèle empirique (fig. 6).

$$\frac{\delta C}{\delta t} = \alpha_2 (C_\infty - C)$$

$C_\infty$ , est la concentration finale correspondant à la pression de consolidation appliquée et  $\alpha_2$ , un coefficient dépendant du complexe sol-eau.

Pour le cas limite de petites déformations vis-à-vis de la hauteur initiale, ce modèle se rapproche de la solution de Terzaghi si  $\alpha_2 = 2,55 C_v/H^2$ .

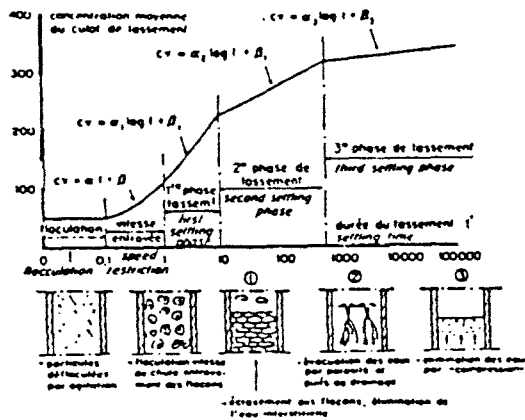


fig. 5.- Graphique montrant les différentes phases du tassement (d'après Migniot [9]).

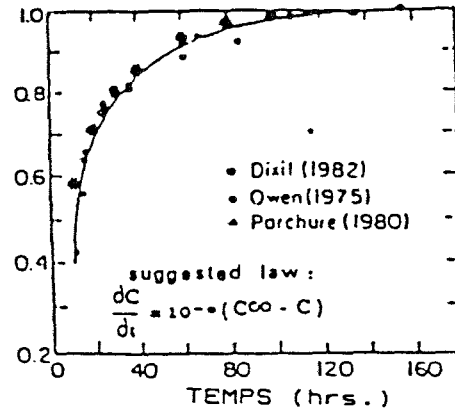


fig. 6.- Variation de la concentration avec le temps (d'après Le Hir et coll. [7]).

### Erosion.

Pour les sédiments peu concentrés de type vase, l'érosion se produit par bouffées ; on voit d'abord apparaître une ondulation à l'interface, puis celle-ci s'amplifie, déformant de plus en plus la couche de sédiments ; ceux-ci sont finalement entraînés sous forme de filets de vase, puis dilués dans l'eau du courant superficiel [12].

Pour les sédiments très concentrés, le matériau reste statique avant l'érosion et pendant l'érosion, des petits copeaux de matériau sont arrachés [12].

Des expériences réalisées par le L.C.H.F. pendant plusieurs années sur des matériaux d'origines très diverses (fluviale, marine, estuarienne et artificielle), leur ont permis d'aboutir à la loi d'érosion suivante pour les matériaux cohérents (Migniot [9]).

$$u * c = 0,01778 \tau_y^{0,25} \quad \text{pour : } \tau_y < 1,50 \text{ Pa.}$$

$$u * c = 0,016 \tau_y^{0,50} \quad \text{pour : } \tau_y > 1,50 \text{ Pa.}$$

$$u * c = (\tau_{0c} / \rho_0)^{0,50} \quad (1)$$

avec :  $u * c$ , vitesse de frottement critique d'érosion ;  $\tau_y$ , rigidité initiale ;  $\tau_{0c}$ , la force tangentielle critique d'érosion à l'interface sol-eau.

La rigidité initiale est l'équivalent du seuil de plasticité de Bingham ; elle a été trouvée par le L.C.H.F. à l'aide d'un viscosimètre Brookfield L.V.T..

**MODELES PROPOSES.**

**Dépôt de la vase.**

La concentration de la vase  $C_0$  -la plus faible concentration permettant la formation d'une structure à réseau continu tridimensionnel en l'absence de contraintes externes- dépend essentiellement du diamètre de particules et de l'action électrolytique de l'eau de la suspension, c'est-à-dire de la structure plus au moins lâche des flocons. Les valeurs de  $C_0$  sont très différentes selon le cas considéré.

Nous avons dressé un essai standardisé pour la détermination de  $C_0$ .

Un échantillon d'une suspension avec une concentration en matières en suspension autour de  $20 \text{ Kg/m}^3$  est prélevé directement de l'estuaire.

Après avoir été homogénéisée, la suspension est placée dans un sédimentomètre contrôlé à température constante et sa densité est mesurée.

Ensuite, une fois que les matières en suspension se sont décantées complètement, on mesure la densité de l'eau superficielle et l'épaisseur du dépôt.

Enfin, à l'aide de ces éléments, on calcule la densité et la concentration  $C_0$  du dépôt.

Les résultats pour une suspension de la Loire sont montrés dans la fig.8.

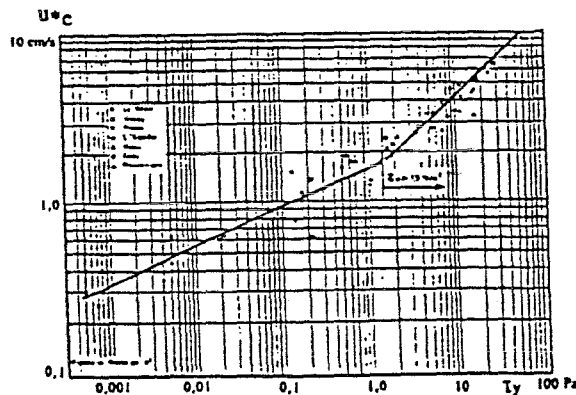


Fig. 7.- Vitesse de frottement critique d'érosion en fonction de la rigidité initiale (d'après Migniot [9]).

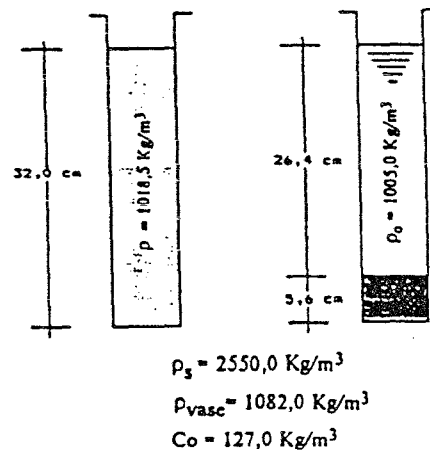


Fig. 8.- Détermination en laboratoire de  $C_0$ .



Consolidation de la vase.

Le modèle retenu pour l'étude de la consolidation de la vase est le modèle de Le Hir, lequel a été modifié pour que soit pris en compte le parcours de drainage.

$$\frac{\delta C}{\delta t} = \frac{K}{H^2} (4,0 + z/H) (C_{\infty} - C)$$

où K est un coefficient ayant les dimensions du coefficient de consolidation, très variable avec la concentration en matières sèches.

Dans le laboratoire de mécanique des sols de l'ENSM de Nantes, nous avons suivi l'évolution de 2 culots de tassement installés dans une enceinte climatisée à température constante de 21°C. La concentration initiale était de 127 Kg/m<sup>3</sup> et les hauteurs initiales de 1,50 m et 0,75 m.

Ceci nous a permis de calculer la concentration en fonction de la pression de consolidation à l'intérieur du dépôt après 3 mois de tassement.

$$C_{\infty} = C_0 + 33,89 \sigma^{0,268}$$

où  $\sigma$  est la pression de consolidation en Pa.

Les résultats de nos expériences et de notre modèle sont montrés dans les figs. 9 et 10.

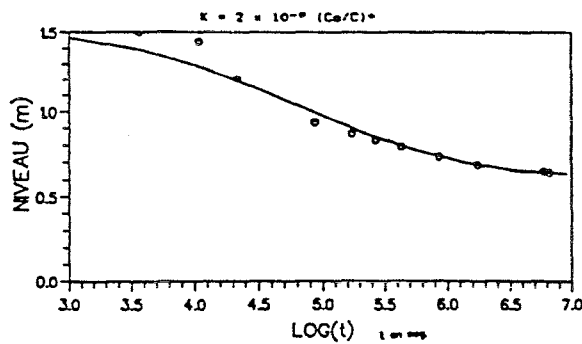


fig. 9.- Evolution du niveau du culot de tassement avec le temps.

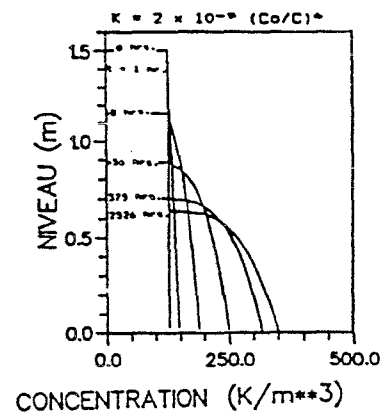


fig. 10.- Evolution de la concentration avec le temps (à partir de notre modèle).

**Erosion.****a) Matériaux très concentrés .**

L'érosion des matériaux très concentrés peut être considérée du point de vue rhéologique comme une rupture ou une perte de l'homogénéité du matériau.

Si l'on utilise le critère de Coulomb, la force tangentielle à l'interface sol-eau nécessaire à l'érosion du sol est :

$$\tau_{0c} = CS \quad (2)$$

où : CS est la cohésion superficielle.

La rigidité initiale ou contrainte nécessaire pour mettre en mouvement la vase, est proportionnelle à la cohésion.

$$CS = K_1 \tau_y \quad (3)$$

en combinant les équations (1), (2) et (3) on obtient:

$$u_{*c} = \frac{K_1^{0,5}}{\rho_o^{0,5}} \tau_y^{0,5}$$

L'équation proposée par le L.C.H.F. est:

$$u_{*c} = 0,016 \tau_y^{0,5}$$

Le facteur 0,016 introduit les paramètres supplémentaires intervenant dans l'érosion, notamment la turbulence.

**b) Matériaux peu concentrés .**

La loi de début d'érosion présentée par le L.N.H.F., montre un écart considérable avec les mesures faites en laboratoire pour les matériaux peu concentrés, de rigidité initiale inférieure à 1,50 Pa (voir fig. 7). Le fait que la rigidité initiale soit insuffisante pour caractériser ce type de matériaux et que la viscosité apparente ait été négligée, semble être la cause de cet écart.

Dans ce travail, nous avons développé un modèle pour l'étude la remise en suspension des vases peu concentrés. Ce modèle est basé sur les théories de parcours de mélange de Prandtl et de la stabilité des petites perturbations de Tollmien-Schlichting ; pour cela nous introduisons les hypothèses suivantes:

a) La crème de vase est mise en mouvement avant érosion.

- b) La force tangentielle à l'intérieur de la crème de vase est constante (épaisseur de la crème de vase négligeable devant celle du fluide superficiel).
- c) L'érosion est un phénomène de propagation d'une onde turbulente.
- d) Le déplacement de la crème de vase est en régime laminaire, si bien que pendant l'érosion la variation de l'épaisseur de la couche crème, coïncide avec celle de l'épaisseur de la sous-couche laminaire.
- e) La diffusion de matériau dans l'écoulement superficiel, pour la partie de la crème de vase affectée par la turbulence, est plus rapide que la variation de l'épaisseur de la sous-couche laminaire.

L'étude de la couche limite pour les fluides newtoniens, montre que près de la paroi, existent trois zones différentes du point de vue de la turbulence (voir fig. 11).

**Sous-couche laminaire.-** L'écoulement est en régime laminaire et l'on peut en déduire l'égalité suivante:

$$\frac{u}{u_*} = \frac{u_* y \rho}{\mu} \quad \text{pour : } y < \delta' \quad \text{et} \quad \frac{u_* \delta' \rho}{\mu} = 4,00 \quad (4)$$

où :  $\delta'$  est l'épaisseur de la sous-couche laminaire ;  $u$ , la vitesse d'écoulement ;  $u_*$ , la vitesse de frottement ;  $y$ , la distance à la paroi ; et  $\rho$ , la densité du fluide.

**Zone de séparation.-** La turbulence et la viscosité jouent chacune, des rôles aussi importants l'un que l'autre. Dans cette zone, les perturbations dans un certain domaine de fréquences transportées par le propre fluide forment des ondulations (Schlichting [14]). Et ces ondulations ont tendance à être instables et à croître en amplitude de la façon décrite quantitativement par une théorie de Prandtl [13].

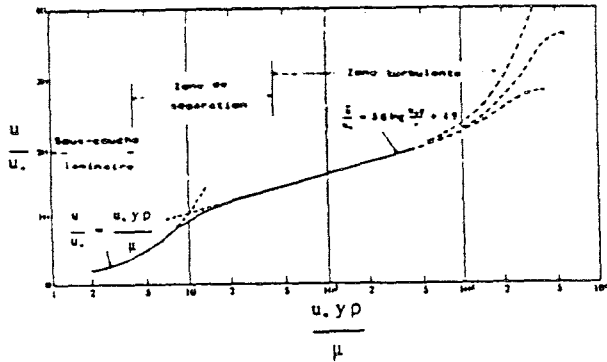


fig. 11.- Profils des courbes des vitesses illustrant la loi de la paroi.

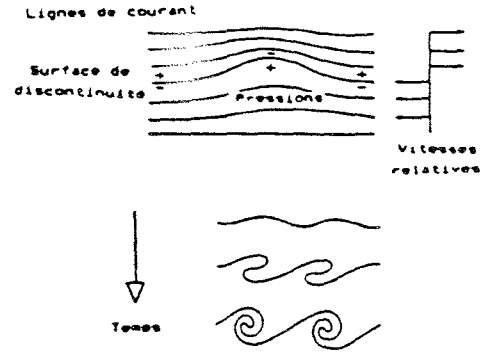


fig. 12.-Formation de tourbillons à partir de perturbations dans la zone de séparation.

**Zone turbulente.**- La turbulence est complètement développée et l'on peut utiliser le modèle de parcours de mélange de Prandtl pour obtenir la force tangentielle en fonction du gradient de vitesses.

$$\tau = \rho K^2 y^2 \left| \frac{du}{dy} \right| \frac{du}{dy}$$

K, est une constante universelle qui prend une valeur de 0,36 pour un écoulement en canal, en régime permanent et uniforme.

L'équation (4), correspondant à un fluide non-newtonien stratifié, est :

$$\frac{u}{u_*} = u_* \rho_o \int_0^y \frac{d\beta}{\eta(\beta)} \quad \text{pour : } y < \delta' \quad \text{et} \quad u_* \rho_o \int_0^{\delta'} \frac{d\beta}{\eta(\beta)} = A$$

De l'hypothèse (d), la condition d'érosion est :

$$u_{*C} = A / \rho_o \int_0^{ECC} \frac{d\beta}{\eta(\beta)}$$

où ECC est l'épaisseur de la couche de crème de vase et \$\rho\_o\$, la densité du fluide superficiel.

A vaut 4,0 pour les fluides newtoniens ; il est fonction inverse de la valeur de n du modèle rhéologique de la loi de puissance. Des valeurs théoriques de A, calculées à partir des équations du profil de vitesses pour des fluides non-newtoniens, proposées par Dodge et Metzner [6], sont montrées dans le Tableau 1.

n	A
2,00	2,96
1,50	3,32
1,00	4,00
0,80	4,49
0,60	5,26
0,40	6,66
0,20	10,21

Tableau 1.

Le débit d'érosion est obtenu directement des conditions hydrodynamiques, et correspond à la diminution de l'épaisseur de la sous-couche laminaire à l'intérieur de la crème de vase.

$$J = - C \frac{\delta \delta'}{\delta t} \quad \text{pour : } u_* > u_{*C} \quad \text{et } u_* \text{ augmentant.}$$

J est le débit solide en Kg/m<sup>2</sup>/s.

#### COMMENTAIRES.

1.- Les hypothèses introduites dans notre modèle d'érosion de matériaux peu concentrés, ont été validées théoriquement pour l'estuaire de la Loire.

2.- Dans le cadre de ce travail nous envisageons:

- a) La réalisation des culots de tassement à des températures différentes, pour observer leur influence sur la consolidation.
- b) La réalisation d'essais dans un canal en laboratoire pour l'évaluation du coefficient A de l'équation .
- c) La réalisation pendant l'année 1991 des campagnes de mesures directes dans l'estuaire de la Loire afin de connaître les vitesses d'écoulement, les concentrations des matières en suspension, les épaisseurs de la couche crème, et les viscosités de la crème de vase

in-situ. Ainsi nous pourrions caler un modèle mathématique pour l'étude de la dynamique sédimentaire de l'ensemble estuarien.

## CONCLUSIONS

- 1.- Les lois de dépôt, de consolidation et d'érosion, ici présentées, avec les équations hydrodynamiques et de diffusion, nous permettent l'étude de la dynamique sédimentaire d'un estuaire.
- 2) Le caractère thixotropique de la crème de vase, induit que les valeurs des viscosités mesurées sont plus faibles que celles mesurées in-situ.
- 3) Dans la courbe de tassement de la Fig. 9, on peut observer qu'au début de l'essai, la vitesse de consolidation est très lente ; une cause probable est la faible perméabilité du matériau avant l'établissement des puits de drainage mentionnés par Migniot [9](Fig. 5).
- 4) Les phénomènes chimiques, la variation de la température, les dépôts et remises en suspension successifs, et le déplacement de la vase, sont des phénomènes intervenant dans la consolidation naturelle de sédiments n'ayant pas été reproduits en laboratoire.
- 5) Il est possible que la vitesse de frottement critique d'érosion ne corresponde pas exactement à la vitesse critique de transition entre sous-couche laminaire et zone de séparation par l'effet des bouffées turbulentes, mais leurs valeurs doivent rester proportionnelles entre elles. En tout cas, des mesures en laboratoire de la valeur de A correspondant au début d'érosion, sont en cours d'exécution.

## REFERENCES

- [1] Anglès d'Auriac, P. "Définitions et Principes de Rhéologie Tensorielle", *Rhéologie et Mécanique des Sols. IUTAM Symposium*, Grenoble 1964, pp 8-22.
- [2] Byron Bird, R. et al. Dynamics of Polymeric Liquids. Vol. 1, *Fluid Mechanics*. John Wiley and Sons, 1977.
- [3] Colin, F.. "Application de Techniques Rhéologiques à l'Étude des Boues Résiduelles", *La Tribune du Centre Belge d'Étude et de Documentation des Eaux*. Vol. 23, No. 317, Avril 1970, pp 178-187.
- [4] Costet, J. et G. Sanglerat. *Cours Pratique de Mécanique des Sols*. Ed. Dunod, Paris, 1961.

- [5] Daily, J.W. and D.R.F. Harleman. *Fluid Dynamics*. Addison-Wesley Publishing Co. Reading, Mass., 1966.
- [6] Dodge, D.W. and A.B. Metzner. "Turbulent Flow of Non-Newtonian Systems", *A.I.Ch.E. Journal*, Vol. 5, No. 2, June 1959, pp 189-204.
- [7] Le Hir, P., P. Bassoullet et J. L'Yavanc. "New Developments About Mud Transport Models", *Application to a Macrotidal Estuary, Proceedings of the International Symposium New Orleans*, August 14-18, 1989, edited by S.S.Y. Wang.
- [8] Mehta, A.J.. "*Estuarine Cohesive Sediment Dynamics*", Springer-Verlag 14, 1984.
- [9] Migniot, C.. "Etude des Propriétés Physiques des Différents Sédiments Très Fins et Leur Comportement Sous des Actions Hydrodynamiques", *La Houille Blanche*, No. 7, 1968.
- [10] Migniot, C.. "Tassement et Rhéologie des Vases", *La Houille Blanche*, No. 1 et 2, 1989.
- [11] Ottmann, F.. *Introduction à la Géologie Marine et Littorale*. Masson et Cie. Editeurs, 1965.
- [12] Périgaud, C.. "Mécanique de l'Erosion des Vases", *La Houille Blanche*, No. 7/8, 1983.
- [13] Prandtl, L.. *Guide à Travers la Mécanique des Fluides*. Ed. Dunod, Paris, 1956.
- [14] Schlichting, H..*Boundary Layer Theory*. Mc Graw-Hill Book Co., New York, 1960.
- [15] Terzaghi, K. and R.B. Peck. *Mécanique des Sols Appliquée*. Ed. Dunod, Paris, 1961.
- [16] Tsung-Lien, Ch.. "Resistance of Sewage Sludge to Flow in Pipes", *Journal of the Sanitary Engineering Division, Proceedings of the ASCE*, Proc. Paper 1780, September 1958, pp 1-19.