



LE TASSEMENT DES VASES COMME PROCESSUS SÉDIMENTAIRE

M. SANCHEZ, A. GROVEL

Laboratoire de Mécanique et Géomécanique de Nantes
Faculté des Sciences et des Techniques, Université de Nantes
2, rue de la Houssinière, 44072 Nantes, Cedex

Abstract

The self-weight settlement of mud is a sedimentary process acting on bed solid concentration and consequently on bed erosion rates. The paper concerns a simple modelling of mud settlement in order to consider this process in mathematical hydro-sedimentary simulations. A proposed model takes into account the mechanical phenomena with the typical properties. This approach simplifies a multi-parameter hydro-sedimentary modelling. The variability of permeability coefficient with solid concentration is the main factor considered. The validity of the presented model has been proved by a great number of applications on varied materials (Sanchez, 1992). Finally, this model offers two possibilities : firstly to appreciate the solid concentration above which the sediment is gathering near the bed to possibly give a lens-shaped body of pseudo-plastic mud, and secondly to detect the limit cases where the settlement is occurring quickly.

Résumé

Le tassement des vases sous poids propre est un processus jouant directement sur la concentration des fonds cohésifs et, par suite, sur le taux d'érosion d'un matériau par un écoulement. L'objectif premier de cette étude est de mettre au point un modèle simple de tassement de la crème de vase qui puisse être incorporé dans les simulations hydrosédimentaires. Les impératifs d'une modélisation à multiplicité de paramètres exigent de ce modèle un nombre réduit de paramètres qui tiennent compte des facteurs dont dépend le phénomène. La variation du coefficient de perméabilité avec la concentration est ici un facteur primordial et, pour en tenir compte, on utilise une loi de variation exponentielle décroissante comportant seulement deux

paramètres. La validité du modèle présenté est justifiée par de nombreuses applications sur des matériaux d'origine variée (Sanchez, 1992). Enfin, les conditions nécessaires à la formation de la crème de vase, ainsi que les cas extrêmes où les processus de tassement peuvent être décrits simplement en nature, sont mis en évidence par l'application de ce modèle.

DESCRIPTION DU PHÉNOMÈNE

Les caractéristiques du tassement sont très différentes d'un matériau à un autre (Migniot, 1989). L'étude de ce phénomène pour un matériau spécifique, nécessite l'entreprise de mesures en laboratoire. L'un des essais le plus couramment utilisé est celui de la colonne de tassement, lequel consiste en la mise en œuvre d'un mélange homogène dans un tube transparent de diamètre de l'ordre de 0,10 m et d'une hauteur minimale d'environ 1 m.

Le suivi du niveau de la surface libre du dépôt en fonction du temps permet de construire les courbes de tassement (fig. 1). Cette courbe comprend généralement cinq étapes successives :

- de O à A, pendant cette étape, dite de floculation, la vitesse de tassement en surface augmente graduellement vers une vitesse limite associée à la concentration initiale du matériau,
- de A à B, la concentration en surface est sensiblement constante et la courbe de tassement est une droite ; ceci conduit à une vitesse de tassement constante en surface,
- de B à C, la pente de la courbe de tassement diminue progressivement du fait de l'augmentation continue de la concentration en surface,

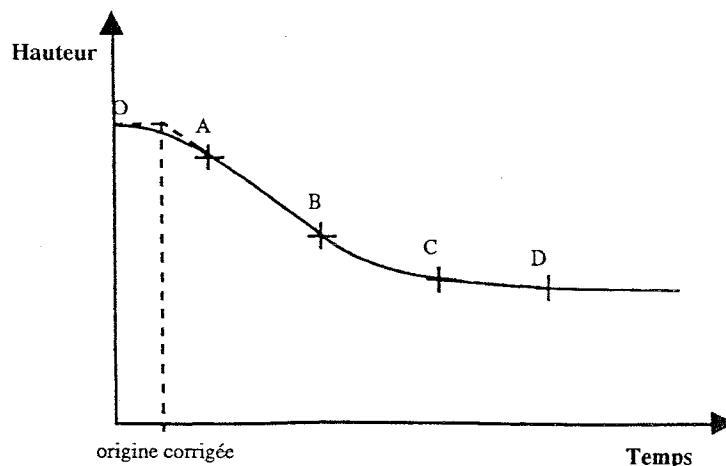


Fig. 1 : Courbe de tassement

- de C à D, on note, bien que difficilement, un deuxième tronçon de droite correspondant à la présence de contraintes effectives sur l'ensemble de la colonne ; la consolidation primaire commence ici,

- au-delà de D, les contraintes effectives jouent un rôle prépondérant dans le phénomène et on peut parler alors de consolidation.

Selon la théorie de sédimentation de Kynch (1952), les trois premières étapes décrites ci-dessus se déroulent en l'absence de contraintes effectives en surface ; le tassement est alors identifié avec le phénomène de sédimentation, et la vitesse de décantation dépend essentiellement de la perméabilité du matériau. A partir de C, les contraintes effectives transmises grain à grain, affectent l'ensemble de la colonne de vase et l'on parle donc de consolidation.

L'augmentation de la concentration due à la sédimentation a , dans les problèmes sédimentaires, une importance prédominante sur celle résultant de la consolidation. En effet, la formation du bouchon vaseux est liée à l'érosion par une action hydrodynamique des couches de crème de vase faiblement concentrées.

COMPORTEMENT DU MATÉRIAU.

Si la contrainte appliquée sur une couche de crème de vase est faible (p. e. inférieure à 1000 kPa), le tassement est irréversible et le gonflement n'est pas possible. Etant donné les faibles contraintes auxquelles sont soumises les couches de crème de vase et l'application très lente des charges liées à la sédimentation des matériaux, on considère que les contraintes effectives et la concentration sont reliées par une loi de comportement propre à chaque matériau. Deux alternatives issues des essais en laboratoire permettent de déterminer cette loi :

- la première nécessite plusieurs colonnes de tassement afin de minimiser l'écart existant entre la hauteur finale mesurée et celle résultant de la propre loi (Sanchez et Grovel, 1993) ;
- la deuxième, à partir d'une seule colonne de tassement de faible concentration initiale, est possible grâce à la mesure du profil final de concentrations (Tan *et al.*, 1990) en utilisant l'expression qui suit :

$$\frac{\partial \sigma'}{\partial z} = -g C_F \frac{\rho_s - \rho_f}{\rho_s} \quad (1)$$

où σ' est la contrainte effective (Pa), g l'accélération de la pesanteur ($m s^{-2}$), C_F la concentration finale du matériau ($kg m^{-3}$), ρ_s la masse volumique de la phase solide ($kg m^{-3}$), ρ_f la masse volumique de la phase fluide ($kg m^{-3}$) et z la coordonnée verticale (m). Cette équation s'intègre avec la condition aux limites correspondant au tassement sous poids propre, laquelle implique qu'en surface $\sigma' = 0$.

VITESSE DE LA PHASE SOLIDE.

Lorsque les contraintes effectives sont négligées, la vitesse de la phase solide sur un fond imperméable v_s , est donnée par l'équation suivante (Been, 1980) :

$$v_s = -\frac{k}{\rho_f} \left(1 - \frac{\rho_f}{\rho_s}\right) C \quad (2)$$

où k est le coefficient de perméabilité du matériau en $m s^{-1}$ et C la concentration en $kg m^{-3}$.

COEFFICIENT DE PERMÉABILITÉ.

Si l'on accepte que le coefficient de perméabilité est fonction seule de la concentration pour un matériau donné, la vitesse de la phase solide dépend elle aussi, uniquement de la concentration. La détermination de la vitesse de la phase solide et du coefficient de perméabilité est alors possible à partir d'une courbe de tassement par une méthode de Kynch modifiée (Kynch, 1952 ; Tan *et al.*, 1990).

Afin de corriger l'effet lié à la phase de floculation sur la courbe expérimentale de tassement, l'origine des temps de celle-ci est déplacée au lieu d'interception du prolongement de la droite AB de la figure 1 avec la droite horizontale passant par H_i (fig. 2).

Selon cette méthode graphique, une tangente tracée sur la courbe de tassement sur n'importe quel point a (fig. 2) intercepte l'axe corrigé des ordonnées à un niveau H_a ; la concentration juste sur la surface (en a) est donnée alors par :

$$C = \frac{C_i H_i}{H_a} \quad (3)$$

où H_i est l'épaisseur initiale (m) et C_i la concentration initiale constante sur la verticale ($kg m^{-3}$).

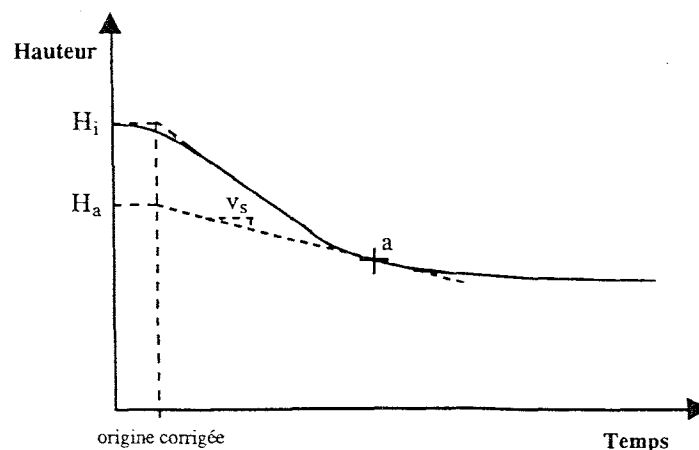


Fig. 2 : Diagramme illustrant la méthode graphique de Kynch.

La vitesse des particules en α , est la pente de la courbe de tassement en ce point. Enfin, le coefficient de perméabilité en fonction de la concentration est déterminé à l'aide de l'équation (2). A partir d'une ou plusieurs colonnes de tassement, on peut donc obtenir un ensemble de points (k, C). Si on trace C en abscisses en échelle arithmétique, et k en ordonnées en échelle logarithmique, l'ensemble de points se concentre au voisinage d'une droite (Sanchez, 1992).

Ainsi, la loi de variation du coefficient de perméabilité qui suit peut être ajustée par moindres carrés :

$$k = A_1 \exp\left(-A_2 \frac{C}{\rho_s}\right) \quad (4)$$

où A_1 et A_2 sont des paramètres propres à chaque matériau. La validité de cette loi a été vérifiée pour de nombreux sédiments d'origines variées (Sanchez, 1992), lesquels ont été étudiés par la plupart, au Laboratoire Central d'Hydraulique de France par Migniot (1989).

La figure 3 montre la variation du coefficient de perméabilité en fonction de la concentration pour la vase de l'estuaire de la Loire. Cette courbe a été construite à partir de plusieurs essais de tassement concernant trois échantillons différents de vase de Loire. La dispersion du nuage de points observée dans la figure 3 est liée à la diversité que présentent les sédiments rencontrés dans l'estuaire de la Loire.

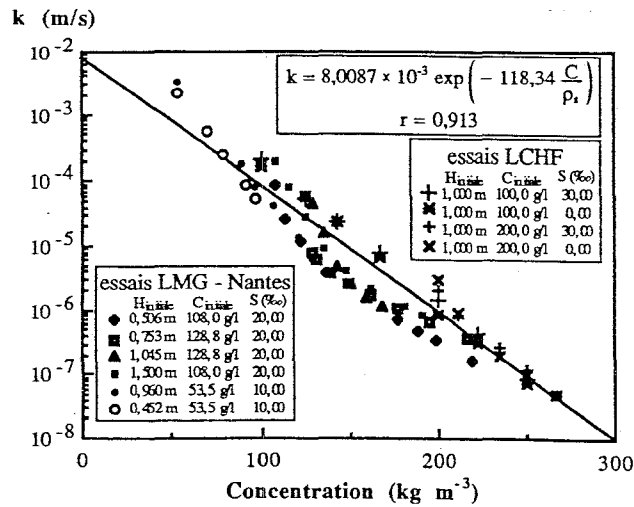


Fig. 3 : Variation du coefficient de perméabilité en fonction de la concentration pour la vase de l'estuaire de la Loire.

MODÈLE "ISO-CONCENTRATION" DE TASSEMENT DE LA CRÈME DE VASE.

Afin de formuler un modèle de tassement de la crème de vase adapté aux simulations hydro-sédimentaires, la vitesse de tassement est évaluée, par la suite, en négligeant les contraintes effectives. Cependant, afin de tenir compte de la contrainte de consolidation due au poids déjaugé du matériau, on considère que le matériau ne se tasse que lorsque celle-ci est supérieure à la contrainte effective.

Une discrétisation multicouche (fig. 4) permet la formulation d'un modèle de tassement valable pour $v_s = f(C)$. Dans ce modèle, le tassement du matériau est régi par :

$$\text{pour } \sigma > \sigma' : \quad Q_{s/C_i} = -w_s(C_i) \times C_i + C_i \times \left. \frac{d[v_s(C) \times C]}{dC} \right|_{C=C_i} \quad (6)$$

$$\text{pour } \sigma \leq \sigma' : \quad Q_{s/C_i} = 0 \quad (6')$$

Si le coefficient de perméabilité est donné par l'équation (4), l'équation (6) devient :

$$\text{pour } \sigma > \sigma' : \quad Q_{s/C_i} = A_1 \exp\left(-A_2 \frac{C_i}{\rho_s}\right) \frac{C_i^2}{\rho_f} \left(1 - \frac{\rho_f}{\rho_s}\right) \left(A_2 \frac{C_i}{\rho_s} - 1\right) \quad (7)$$

L'intégration directe de l'équation (5) conduit alors à une variation linéaire par rapport au temps de la masse comprise entre deux concentrations fixes. Ceci est valable pour toutes les sous-couches de la suspension,

sauf pour la sous-couche en surface, laquelle peut être affectée par un débit solide d'échange de masse (dépôt ou érosion), Q_D , avec la phase fluide superficielle :

$$Q_D = Q_s / C_{n+1} \quad (8)$$

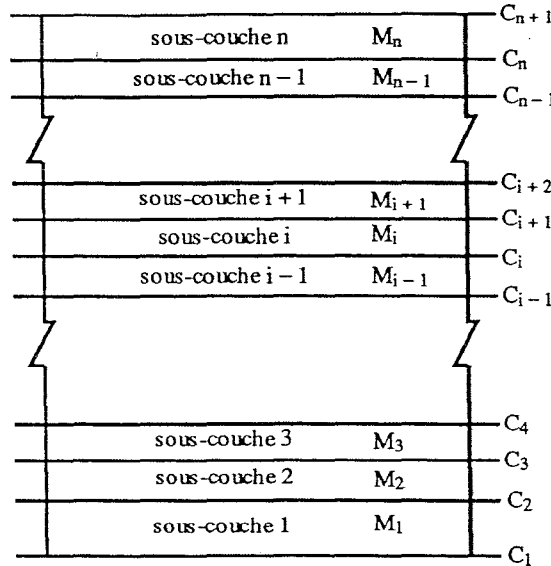


Fig 4 : Discrétisation utilisée dans le modèle "iso-concentration" multicouche de tassement de la crème de vase.

Enfin, l'équation (6) implique que l'influence du gradient des contraintes effectives sur la vitesse de la phase solide à l'intérieur d'un dépôt est négligée, mais que le tassement s'arrête pour $\sigma = \sigma'$.

APPLICATIONS DU MODÈLE DE TASSEMENT.

a) Formation de la crème de vase.

Selon le modèle de tassement iso-concentration, la concentration C_d au-dessus de laquelle la matière s'accumule dans le fond pour former éventuellement une crème de vase, est liée au débit de dépôt Q_D par l'équation implicite qui suit :

$$Q_D = Q_s / C (C_d) \quad (9)$$

La solution de cette équation pour chaque débit de dépôt, montre que plus grand est Q_D , plus faible est la concentration à partir de laquelle la crème de vase se forme.

b) Matériaux granulaires.

Le tassement concerne d'une manière générale tous les matériaux ; cependant, ce processus est habituellement négligé lors des simulations de la dynamique sédimentaire des matériaux granulaires. Ceci est justifié car le coefficient de perméabilité de ces matériaux est très élevé de sorte que la compression est quasi instantanée.

Par ailleurs, du fait de leur comportement, l'indice des vides (ou la concentration équivalente) de ces matériaux varie très peu en fonction de la contrainte appliquée lorsqu'elle est faible. Alors, les couches mobiles

superficielles des matériaux granulaires ont une concentration sensiblement constante.

c) Débit de dépôt très faible.

Lorsque le processus de transfert de masse de l'écoulement vers le dépôt est lent par rapport au processus de tassement, on peut également négliger ce dernier. Dans ce cas, la concentration en tout point est toujours liée à la contrainte maximale qui lui a été appliquée. Le critère permettant de déceler ce cas peut être formulé si l'on connaît la limite inférieure de la concentration C_{FF} correspondant à une vase qui n'est pas érodée par l'écoulement. Cette condition est :

$$Q_D = Q_s / C (C_{FF}) \quad (10)$$

Ce cas se présente lorsque les eaux sont peu turbides (p.e. milieu marin océanique). Le passage de matières en suspension à un fond à concentration élevée se fait rapidement et la loi de comportement du matériau suffit pour déterminer, à tout moment, la concentration dans la couche du fond. Ainsi, par exemple, en Loire, on observe que la concentration superficielle des fonds, en dehors de la zone affectée par la crème de vase, est sensiblement constante et d'environ 440 kg m^{-3} (Roger, 1988).

CONCLUSIONS.

Le modèle "iso-concentration" de tassement des couches de crème de vase constitue un modèle simple qui s'accorde avec l'expérience, dans le cas des suspensions, (absence des contraintes effectives) et qui rapproche les principes de la théorie unidirectionnelle de consolidation

des dépôts, sous l'hypothèse que l'effet qu'a le gradient des contraintes effectives sur la vitesse de la phase solide est négligeable. Dans la pratique, cette hypothèse est partiellement satisfaite dans un domaine de faibles contraintes effectives.

Ce modèle de tassement s'adapte convenablement aux simulations hydrosédimentaires et présente les atouts suivants :

a) la condition de frontière en surface de la couche de vase est le débit solide d'échange de masse (dépôt ou érosion), terme puits de l'équation de transport diffusif,

b) les discontinuités éventuelles de la concentration à la frontière supérieure de la couche de vase du fond, résultent directement de l'application du modèle,

c) l'équation 5 peut être intégrée analytiquement, ce qui permet de déterminer à tout moment, la masse à l'intérieur de chaque sous-couche ; cette masse est comprise entre deux concentrations proches, propres à chaque discrétisation,

d) les propriétés de la vase qui sont rattachées à la concentration, telles que la rigidité initiale et la contrainte de cisaillement critique d'érosion peuvent être considérées constantes pour chaque sous-couche.

Enfin, ce modèle de tassement, permet de déceler les conditions nécessaires à la formation de la crème de vase ainsi que de mettre en évidence le cas où le processus de tassement est rapide.

Références bibliographiques.

[1] Been, K. 1980. Stress strain behaviour of a cohesive soil deposited under water. Thesis presented to the University of Oxford, at Oxford, England, in partial fulfillment of the degree of Doctor of Philosophy.

[2] Kynch, G.F. 1952. A theory of sedimentation. Faraday Society Transactions, 48, 166-176.

[3] Migniot, C. 1989. Tassement et rhéologie des vases. La Houille Blanche, 1 et 2, 11-29 et 95-111.

[4] Roger, B. 1988. Répartition et localisation des métaux traces dans les sédiments : Application à l'estuaire de la Loire. Rapports des laboratoires des Ponts et Chaussées n° EG-4, Ministère de l'Urbanisme et du Logement, Ministère des Transports.

[5] Sanchez, M. 1992. Application du modèle iso-concentration de tassement dans la simulation du tassement des vases molles étudiées au Laboratoire Central d'Hydraulique de France". Rapport de recherche n° CFL-92-006, LMG-Université de Nantes.

[6] Sanchez, M. et Grovel A. 1993. Modélisation du tassement sous poids propre des couches de vase molle et saturée, sur un fond imperméable. La Houille Blanche, 1, 29-34.

[7] Tan, T.S., Yong K.Y. , Leong E.C. and Lee S.L. 1990. "Sedimentation of clayey slurry", Journal of Geotechnical Engineering, 116, 6, 885-898.