La transition liquide-solide des sédiments récents – paramètres texturaux :

Application à la gestion des espaces littoraux de la Charente Maritime

Anne Pantet *— Philippe Monnet— Serge Robert *****

** Hydrasa, ESIP*
CNRS/Université de Poitiers
40 avenue du Recteur Pineau 86022 cedex
anne.pantet@univ-poitiers.fr

*** LEA,*
CNRS/Université de Poitiers
40 avenue du Recteur Pineau 86022 cedex
**** CREMA L'Houmeau*
Place du Séminaire BP 17137 L'Houmeau

RÉSUMÉ. *La connaissance des phénomènes qui régissent la transition liquide-solide des matériaux fins est importante dans l'étude de la préservation et de l'aménagement des espaces littoraux. Elle fait l'objet d'études pluridisciplinaires, où collaborent biologistes, hydrauliciens, pédologues, géologues et mécaniciens des sols.*

*Ce travail « **transition liquide-solide des sédiments récents** » a pour objet de décrire les phénomènes qui régissent la transition entre deux états liquide-solide des géomatériaux fins, puis de présenter essentiellement par le biais d'analyses mécaniques, l'évolution de la texture de ces matériaux (notamment le mode d'assemblage des particules caractérisé par l'indice des vides et la perméabilité) en conditions physico-chimiques établies.*

ABSTRACT. *The liquid-solid transition can be considered as an aggregation of clay particles depending on many factors, characterising the particles (reactivity, size, morphology, concentration) and the liquid (chemical properties, pH, salinity). This study propose to analyse the transition liquid to solid of a mud of kaolinite by using filtration under constant pressure, which provokes the drainage of water and consequently the solidification and the formation of a deposit.*

MOTS-CLÉS : *sédiments, suspension, consolidation, textures, tassements, espace littoral*

KEYWORDS: *sediments, suspension, consolidation, textures, subsidence, littoral space.*

1. Introduction

Dans le cadre d'un projet national d'environnement côtier (PNEC) concernant la gestion de l'espace littoral et de la protection des zones humides, réalisé en baie de Marennes-Oléron (marais et pertuis charentais, marais poitevin débordant sur l'anse de l'Aiguillon et la rive droite de l'estuaire girondin), nous nous sommes intéressés au problème général de la formation et de la consolidation des sédiments récents, en examinant les conditions de deux profils caractéristiques, l'un situé en zone terrestre, l'autre situé en zone marine. En effet les apports de sédiments, les aménagements engendrent des modifications rapides de la morphologie des zones marines et continentales récentes ; par colmatage de baie, par la formation de langue de terre et par la création de polders comme en attestent les cartographies du marais poitevin, façonné par l'homme depuis le Moyen Age (M.Tabare, 2005). A ce stade de l'étude, ce sont uniquement les aspects de modifications des textures et des déformations associées (tassements) sous l'action de sollicitations mécaniques qui ont été abordés. Cette étude n'a pas intégré les effets des apports (engraissement des baies, envasement) liés aux phénomènes d'érosion et de transport des matériaux.

Nous avons examiné l'évolution des paramètres texturaux et des caractéristiques mécanique de matériaux modèles (mélange kaolinite-eau), de l'état liquide à solide, sous l'action de sollicitations mécaniques ; cisaillement en considérant le domaine fermé (rhéologie) et compression en considérant le domaine ouvert, avec le drainage de l'eau (filtration). Pour les sédiments plus solides, leurs caractéristiques et leurs paramètres structuraux ont été suivis par des essais oedométriques classiques. La structure du matériau va par conséquent conditionner la perméabilité (perméabilités matricielle, de macrostructure et de la formation).
En préambule, une définition générale du phénomène de transition liquide-solide sera proposée puis nous décrirons les facteurs influant sur la colonne sédimentaire en zone marine et en zone terrestre.

2 . Les différents facteurs intervenant dans le mécanisme de transition liquide-solide précédant le phénomène de consolidation d'un sédiment récent.

La transition liquide-solide (TLS) peut être décrite à partir de la variation des constituants (ratio solide/liquide) et de leur répartition. Différents termes existent pour décrire ce mécanisme suivant les conditions aux limites définies. On parlera de sédimentation, de séparation de phases, de filtration, de drainage, de gélification, de consolidation...
Toutefois les critères importants qui régissent le phénomène peuvent être identifiés en quatre catégories et schématisés sur la figure 1 :
- la définition du milieu fermé ou ouvert ; suivant que ratio solide/liquide (massique ou volumique) reste constant ou non durant la transformation
- la stabilité des particules dans leur environnement ; les conditions physico-chimiques d'interaction particule - particule et particule – fluide ont une forte influence sur la séparation des phases et la sédimentation

- les actions extérieures (contraintes, températures..) ; dans le cas d'un milieu stable et fermé, la rupture des liaisons par cisaillement peut générer une fluidification du système. Influence du niveau et du type de contraintes (repos, cisaillement, ...).
- le temps ; les cinétiques sont souvent à plusieurs vitesses, rapide à lente et dépendantes de nombreux facteurs, notamment chimiques, bio géochimiques...

On peut distinguer schématiquement ces différentes configurations au repos :
Milieu ouvert, stable ; transition liquide solide par apport de solide
Milieu ouvert, stable ; TLS par départ de la phase liquide
Milieu fermé instable ; TLS par séparation de phases et concentration locale
Milieu ouvert, instable ; TLS par séparation de phases et drainage

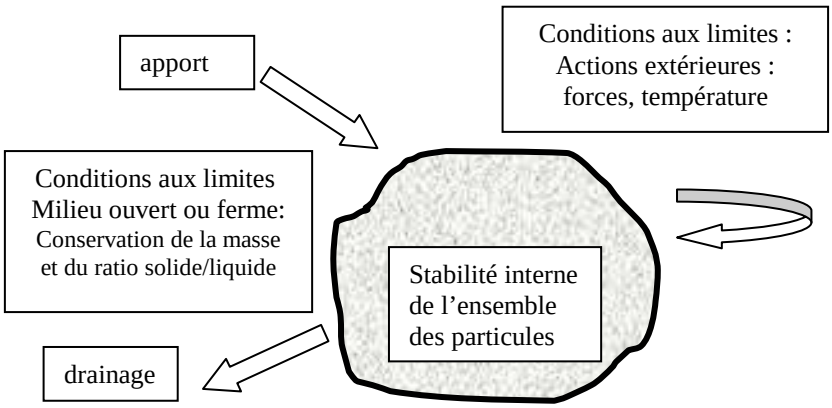

Fig.1 : Schéma des principaux critères régissant la transition liquide –solide

L'observation à grande, moyenne ou petite échelle prend ici toute son importance ; on distingue la structure régionale (échelle métrique, la formation à l'affleurement), la macrostructure (1 à 10 cm, caractérise les conditions de dépôt) et la structure matricielle (inférieure au mm, caractérise la matrice du sol et la fraction argileuse).
Pour étudier les conditions de transformation des sédiments récents sous diverses sollicitations, nous distinguerons des profils caractéristiques l'un en zone marine et l'autre en zone terrestre sous l'effet de la variation du niveau d'eau.
* En zone marine, on observe classiquement au dessus de sédiments mous saturés, qui constitue l'estran observable régulièrement à marée basse, une épaisseur de sédiments mobiles (mollins) évoluant avec les mouvements de l'eau (marée et courants). L'estran présente une morphologie caractéristique avec des banquettes et des seillons (slikke). Dans le cas marin, la variation du niveau d'eau est à une fréquence élevée, l'effet cyclique des marées contribue à l'arrangement des structures particulaires. La désaturation est limitée dans le temps et plus ou moins efficace suivant la perméabilité du milieu et la capacité de rétention capillaire des sédiments déposés. La mobilité des sédiments et leur mode de dépôt peuvent être

également modifiés par les conditions physico-chimiques (notamment la salinité naturelle ou les apports continentaux de sels comme les nitrates et les phosphates pouvant mener à l'eutrophisation) et biochimiques (rôle des microphytoplanctons).
* en zone terrestre (schorre, marécages...), on rencontre classiquement sous une tranche de sols consolidés, un niveau de matériaux fortement compressibles et à teneur en eau élevée (vases entre 30 et 130% – tourbes entre 300 et 1200%) et à fort indice de plasticité. La tranche superficielle est soumise à des phénomènes de retrait-gonflement par les facteurs météorologiques (pluie, température, humidité, ensoleillement...) et par les actions des végétaux. Les cycles réhumidification-dessiccation provoquent une fissuration en tout sens, plus ou moins fine avec l'apparition d'éléments structuraux de taille décroissante dans le temps. La dessiccation estivale des sols argileux fait apparaître une fissuration verticale, leur donnant une structure prismatique (Daniel et al., 1990). Les espèces végétales se développent rapidement et vont contribuer à faire évoluer ces sols, ultérieurement exploités par l'agriculture. Le développement des tassements est à rattacher aux réarrangements particulaires sous l'effet du poids des sols sus-jacents et aux variations du niveau de la nappe phréatique, d'origine naturelle ou artificielle (pompage, drainage…). Nous rappelons que l'évolution des sédiments sous le phénomène de consolidation est liée celle de la contrainte effective, variant en fonction du niveau d'eau dans le sol suivant le principe établi par Terzaghi $\sigma' = \sigma - u$. Cette contrainte effective peut être augmentée éventuellement par l'effet de la surcharge due à la pression de succion qui se développe lors la désaturation des sols superficiels. Cet aspect est plus ou moins important suivant la finesse des sols et des pores associés suivant le processus de la loi de Jurin. Le principe de Terzaghi a été modifié par Bishop $\sigma' = \sigma - u_a + \chi(u_a - u_w)$ pour en rendre compte. A ces déformations liées à la consolidation primaire, viennent s'ajouter les phénomènes de fluage. Par ailleurs, les phénomènes de consolidation sont dépendant de la structure initiale des sédiments (morphologie, nature des particules et organisation) et des conditions physico-chimiques des phases aqueuses.
Pour chaque configuration, l'évolution des matières organiques joue un rôle très important (Soltner, 1983). Par ailleurs, les mouvements de l'eau dans les sols saturés et non saturés provoquent des modifications de leur microstructure et contribue avec d'autres éléments (activation et changement de l'état de l'humus, splash d'érosion, dissolution, activité humaine) à leur l'évolution.

3. Matériels et méthodes ; l'étude de la transition liquide – solide par filtration

Notre étude expérimentale sur un matériau modèle se situe de la macrostructure à la matrice argileuse. Les systèmes colloïdaux sont constitués d'une quantité de 100, 200 et 400 g de poudre de kaolinite à 1000 g d'eau, préparés suivant une procédure commune. Les principales caractéristiques sont ; limite de liquidité 53% – limite de plasticité 37% - surface spécifique 30 m2/g - d50 = 6,5 µm
Les suspensions ont été étudiées à l'aide d'un rhéomètre à contrainte imposée (Reologica-Stresstech HR) en géométrie de cylindres coaxiaux. Un couvercle évite l'assèchement superficiel du mélange très sensible à forte concentration. Les essais

d'écoulement sont réalisés selon la procédure. décrite par Besq et al. (2003). Elle consiste en un pré-cisaillement ($\dot{\gamma}$=500s^{-1} pendant 240s) suivi d'un repos (600s) et d'une phase de cisaillement de 30 min par une rampe de contrainte croissante puis décroissante. Le modèle d'Herschel-Bulkley $\tau = \tau_0 + k\,\dot{\gamma}^n$ avec k (consistance), n (indice de fluidification), τ_o (seuil d'écoulement) est utilisé.
Pour établir la courbe de filtration, un filtre presse API (American Petroleum Institute), représenté sur la figure 2 a été utilisé en apportant quelques modifications. La cellule est un cylindre d'un diamètre de 90 mm et d'une hauteur de 100 mm, liaisonnée sur un filtre composé d'une fine grille recouverte d'un papier filtre Whatman n°5. Une pression d'air de 700 kPa est appliquée sur la suspension. L'écoulement de filtrat est mesuré en continu en fonction du temps. A la fin de l'essai, on obtient un filtrat, un cake et éventuellement un reste de suspension, dont les volumes et les masses sont mesurés, après l'essai et ensuite après séchage à 105°c. La teneur en eau et l'indice des vides sont calculés pour chaque état de matériau, en considérant un poids volumique du kaolin de 26,5 kN/m^3.

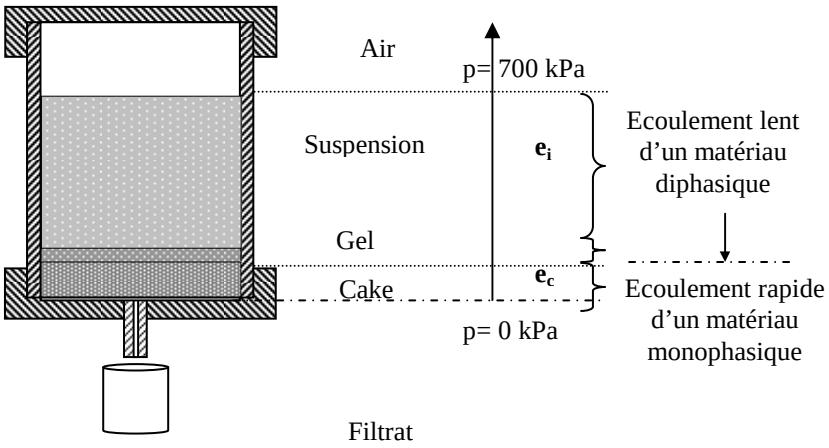

Fig. 2 : Schéma de la cellule de filtration type API (American Petroleum Institute)

Il est possible d'évaluer la perméabilité k en m^2 d'un cake formé par filtration en considérant la loi de Darcy, la courbe de filtration (masse de filtrat en fonction du temps) et la mesure de différents paramètres caractéristiques de la formation du cake en fonction du temps (Li et al., 1997 ; Duroudier, 1997, Pantet et Monnet, 2005). A partir des considérations théoriques et des données expérimentales (G formation spécifique et ec indice des vides du cake), la perméabilité est déduite de la relation linéaire exprimant le rapport temps/masse de filtrat vs. la masse de filtrat (notée k).

Compte tenu de la reproductibilité des mesures de filtration, nous avons pu étudier la compressibilité de ces cakes à un cycle chargement-déchargement en insérant

directement une bague oedométrique dans la cellule de filtration et faisant varier la salinité des eaux . Ces résultats ne seront pas présentés dans cet article.

4. Résultats

Dans le cas du milieu fermé, les paramètres rhéologiques du modèle de Hershel-Bukley traduisent la réponse à un cisaillement d'une structure de particules associées plus ou moins fortement dans la suspension initiale. Les paramètres rhéologiques sont rassemblés dans le tableau 1. Le seuil augmente avec la concentration des suspensions suivant une loi exponentielle fréquemment rencontrée dans les systèmes colloïdaux argileux, la résistance à l'écoulement est fortement dépendante de la concentration en particules.

Tableau 1 : Caractéristiques rhéologiques des 3 suspensions étudiées

Paramètres HB	Courbe de montée			Courbe de descente		
	τ_0 (Pa)	k	n	τ_0 (Pa)	k	n
100 $g.l^{-1}$	0.02	0.06	0.5	0.05	0.03	0.51
200 $g.l^{-1}$	1.3	0.09	0.57	1.3	0.09	0.57
400 $g.l^{-1}$	7.5	0.36	0.57	7.8	0.47	0.52

Dans le cas d'un milieu ouvert, les paramètres de filtration rassemblés dans le tableau 2, indiquent que l'indice des vides des cakes est peu dépendant de la concentration initiale et de la durée d'application de la pression de 700 kPa sous réserve de rester saturé (des essais sous 300 kPa donnent la même observation) . L'indice des vides des suspensions surnageantes (ef) restent assez proches des valeurs initiales, indiquant la relative stabilité de la suspension. La phase intermédiaire gélifiée, très peu développée, présente des valeurs intermédiaires.

Tableau 2 : Paramètres de filtration en fonction du temps et pour les 3 suspensions

Ref.	1kao1	2kao1	3kao1	1kao2	2kao2	3kao2	1kao4	2kao4	3kao4
T (s)	700	1600	2000	650	800	1100	700	900	2250
Ci	0,1	0,1	0,1	0,2	0,2	0,2	0,4	0,4	0,4
Cf	0,091		0,085	0,206	0,193	0,189	0,390	0,402	0,408
Ω (g)	184,2	260,8	300,8	115,3	133,8	158,8	97,4	113	182,5
ei	26,5	26,5	26,5	13,25	13,25	13,25	6,64	6,64	6,64
ef	28,50		30,52	12,60	13,47	13,79	6,67	6,48	6,38
eg	5,42			5,84	5,39	5,88	4,12	4,79	3,82
ec	2,05	1,02	1,98	2,00	2,00	2,00	1,82	1,82	1,70
G (kg/m^3)	0,10	0,10	0,11	0,23	0,22	0,22	0,53	0,53	0,51
k (m^2)	$9.21.10^{-6}$			$9.53.10^{-6}$			$14.7.\ 10^{-6}$		

avec T: temps (s) - Ω : masse de filtrat (g) – Ci et ei concentration et indice des vides de la suspension initiale – Cf et ef concentration et indice des vides de la suspension finale eg :indice des vides du gel – ec :indice des vides du cake - e la suspension initiale - G : formation spécifique du cake ($kg.m^{-3}$) –

Le dépôt se construit du bas vers le haut, l'interface liquide-solide migre progressivement au fur et à mesure du départ de l'eau interstitielle et présente un indice des vides voisin de 2 pour toutes les suspensions. La répartition des valeurs de l'indice des vides qui se développent dans la colonne sédimentaire est représentée sur la figure 3.

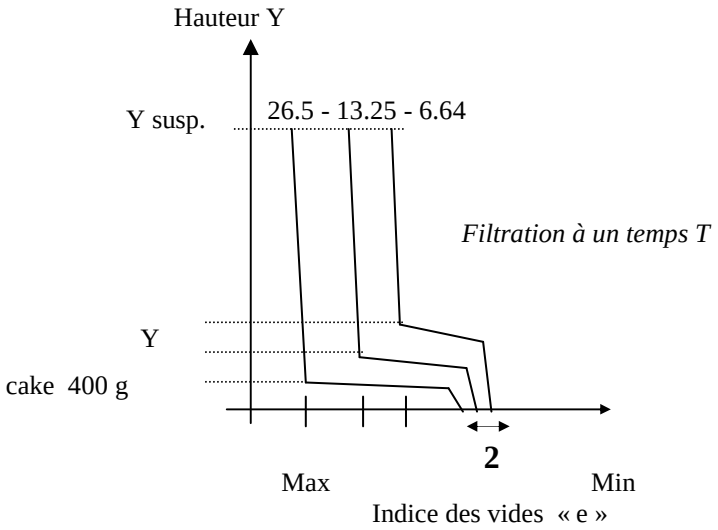

Fig. 3 : Distribution de l'indice des vides - milieu ouvert - 3 concentrations.

La perméabilité calculée conduit à une évolution inverse de celle de l'indice des vides, les cakes les plus poreux sont légèrement plus imperméables. Ce résultat n'est pas conforme à la relation de Kozeny établie pour des sphères, qui indique une relation directe entre indices des vides et perméabilité. Toutefois ce résultat n'est somme toute pas contradictoire, il indiquerait l'existence d'une porosité occluse, qu'il est possible d'envisager pour ces matériaux en plaquettes. Ce point mériterait d'être exploré à partir d'observation directe au microscope (MEB) sur des lames minces, mais nous nous heurtons à des problèmes techniques de réalisation.
Le cake, à teneur en eau élevée et indice des vides défini, est élaboré directement dans la bague oedométrique insérée dans la cellule API, à partir d'une suspension aux caractéristiques physico-chimiques connues. Il est ensuite soumis à un chargement oedométrique classique, compte tenu de sa structure lâche, il est fortement déformable.

4. Conclusion

L'étude des espaces littoraux représente un atout aussi bien écologique qu'économique. Un plan de gestion doit intégrer la configuration de chaque site et ses caractéristiques, conformément aux objectifs de protection de l'écosystème, en

favorisant la création d'une activité économique (élevage en prés salés, ostréiculture, conchylicultures, tourisme) intégrée au milieu naturel. Les aménagements indispensables (du stationnements, pistes cyclables, cheminements pédestres pour l'accueil du public à la construction maritime pour les conchyliculteurs) doivent être conçus en intégrant tous ses aspects environnementaux, généralement identifiés et répertoriés, mais qui ne sont pas suffisamment quantifiés. Les premières étapes consistent à définir le mieux possible l'état actuel de ces zones encore mal reconnues et à les caractériser. Les conditions de sols y sont particulièrement difficiles et sensibles aux apports extérieurs.

Les conditions expérimentales ont été définies à partir d'un matériau modèle à différentes concentrations. Désormais, les sédiments prélevés in situ en intégrant tous les paramètres environnementaux peuvent être donc étudiés par ces techniques pour suivre leur évolution structurale au cours de la transition liquide-solide. Ces méthodes de laboratoire permettent d'étudier l'évolution des structures des sédiments et des sols, toutefois sans pouvoir dissocier le rôle des différents types de porosité au sein du matériau en conditions drainée ou non drainée. Le filtre presse API modifié permet de fabriquer des échantillons de matériaux argileux très lâche à une teneur en eau supérieure à la limite de liquidité, qui peuvent être ensuite tester sous compression oedométrique. Les conditions de fluides particulières peuvent être considérées lors de la fabrication des mélanges et les échanges particules-fluide peuvent être suivis par analyses chimiques des filtrats, ainsi que le rôle important joué par la matière organique en évolution (eutrophisation ...). Ce travail a contribué à montrer l'intérêt du couplage géochimie-physique-mécanique, souhaité par de nombreux chercheurs mais encore insuffisamment exploré (Hueckel, 2005) .

6. Bibliographie

Besq A., Malfoy C., Pantet A., Monnet Ph., Righi D. (2003) Physico-chemical characterisation and flow properties of some bentonite muds. Applied Clay Science, **23**, 275-286.

Duroudier, J.P. (1999). Pratique de la filtration. Edition Hermès., 222 p

Hillier, S. (1995). Erosion, sedimentation and sedimentary origin of clays. Origin and mineralogy of clays, Springer, pp 162-219.

Hueckel, T., (2005). Chemo-mechanics of geomaterials. Revue Européenne de Génie Civil, vol. n° 5-6, 689-711

Li, Y., Argillier, F.F., Rosenberg, E., Durrieu, J., (1997). Static and dynamic filtration properties of aqueous suspensions of clays and electrolytes. Revue de l'Institut français du Pétrole, vol. 52, No 2, pp 207-218.

Pantet, A., Monnet, Ph, (2005). Transition liquid-solid in clay water system. Workshop ALERT.

Tabare, M (2005). La préservation des espaces littoraux – Marais poitevin. Revue de l'actualité Poitou-Charentes, n° 69, pp 60-66.