

Caractérisation du potentiel structurant de vases naturelles via une approche rhéométrique de cisaillement simple

Application au cas de vases de l'estuaire de la Rance

S. Serhal^{1,3}, D. Rangeard¹, A. Castex¹, A. Pierre², Y. Mélinge², F. Chehade³

¹ LGCGM – EA 3913, Laboratoire de Génie Civil et Génie Mécanique, INSA de Rennes, 20 Av. des buttes de Coësmes – 35043 Rennes cedex, France

(saly.serhal@insa-rennes.fr, damien.rangeard@insa-rennes.fr, alexandra.castex@insa-rennes.fr)

² L2MGC, Laboratoire de Mécanique et Matériaux du Génie Civil – EA 4114, Université de Cergy-Pontoise – 5 Mail Gay Lussac, Neuville sur Oise – 95031 Cergy-Pontoise Cedex (yannick.melinge@u-cergy.fr, alexandre.pierre@u-cergy.fr)

³ Université Libanaise, Centre de Modélisation, Ecole Doctorale des Sciences et Technologie, LIBAN (fchehade@ul.edu.lb)

RÉSUMÉ. Dans cet article, une partie d'une étude dédiée au comportement rhéologique de mélanges liquide/solides est proposée. La phase solide est composée de sédiments prélevés dans l'estuaire de la Rance (35). La phase liquide est de l'eau du robinet. Un protocole de caractérisation est mis en œuvre pour éviter le vieillissement au cours de la caractérisation. Les effets de l'âge des suspensions, la composition granulométrique et le taux de cisaillement sont recherchés à fraction volumique solide fixée via une caractérisation du comportement visco-plastique. Enfin, l'influence de la matière organique et de sels est démontrée.

ABSTRACT. Rheological study of natural suspensions is presented in this article. Solid phases are extracted from the Rance river estuary. Specific protocol is carried out to dry and to separate the main sizes of the natural compound. Liquid phase is represented by tap water. Average visco-plastic behavior of the suspensions is highlighted through four decades of the shear velocity. The presented results show the effect of the age of the suspensions, the effect of the particle size at fixed solid volumes fraction. Finally, the effect of salts and organic matter is presented.

MOTS-CLÉS: rhéologie, rhéométrie, suspensions liquide/solides, sédiments, matière organique, sels, visco-plasticité.

KEYWORDS: Rheology, rheometry, liquid/solid suspensions, sediments, organic matter, salts, visco-plasticity.

1. Introduction

Et au milieu coule une rivière ! Ou un fleuve selon la définition francophone si des confluences existent de la source à l'embouchure. Dans ce projet de recherche, nous nous intéressons à la Rance qui prend sa source dans les monts du Méné à Collinée (à 260 m d'altitude dans les côtes d'Armor) et se jette dans la Manche entre Dinard et Saint Malo (à 0 m d'altitude en Ille et Vilaine). Son bassin versant est de l'ordre de 1195 km² et la longueur de ce fleuve côtier breton est de l'ordre d'une centaine de kilomètres. En particulier, nos travaux portent sur son estuaire, son caractère globalement en dépôt, qui modèle en fonction de différents facteurs les fonds sédimentaires depuis le Lyvet (limite des eaux saumâtres). Ce caractère dépositaire est conditionné par les flux fluviaux amont (12 m³/s de moyenne annuelle) contrariés par le régime des marées de la Manche, la morphologie de l'estuaire, les propriétés des écoulements, la présence de l'usine marée motrice. Les apports sédimentaires sont d'ordre amont et potentiellement aval. Les épisodes pluvieux contribuent au lessivage des versants.

Au sein de l'estuaire, on distingue une activité économique liée à la promenade fluviale, à la pêche, à la pêche à pieds, ... Ce patrimoine naturel est le siège d'une flore et d'une faune riche ; il est source d'une activité touristique, contribue au maintien voire à l'essor d'activités professionnelles, ...

L'accumulation sédimentaire, seuls éléments véritablement aptes à être transportés jusqu'à l'estuaire compte tenu de l'énergie disponible pour le transport ($Fr < 1$) est responsable de la disparition de certaines espèces végétales et animales, complique la navigation dans l'estuaire et peut impacter les activités de pêche. En effet, compte tenu des composés présents, les mélanges liquide/solides résultants sont structurant, compactant, drainants et réactifs et ont une capacité d'ancrage importante. Pour circonvier l'envasement, on a recours à des opérations de curage couteuses et traumatisantes ; on peut recourir à des opérations de chasse mais qui restent limitées aux abords d'ouvrages de régulation ; on peut également recourir à des opérations alternatives en privilégiant le remplissage de pièges à sédiments dont l'emplacement et les dimensions dans l'estuaire sont à optimiser ; ... Ces quelques solutions de lutte contre l'envasement nécessitent des interventions périodiques. Les opérations de curage sont généralement déclenchées avant que ne surviennent des désordres trop importants de circulation dans l'estuaire et en limitant la remontée des eaux. Vis-à-vis des chasses dynamiques, il convient de limiter le blocage des ouvrages de régulation et la vidange des pièges a lieu dès lors qu'ils sont pleins. Néanmoins pour ces derniers, les informations disponibles restent limitées pour optimiser le remplissage et par conséquent l'efficacité des solutions.

Dans cette logique, nous avons entrepris un ensemble de travaux destinés à mieux comprendre quelques-uns des mécanismes de structuration/déstructuration des mélanges liquide/solides. Ces travaux doivent nous aider à mieux comprendre les cinétiques d'envasement de l'estuaire et optimiser les opérations de préventions. Dans l'article, nous présentons quelques-uns de ces aspects en montrant notamment l'influence des constituants minéraux, le rapport volumique solide/liquide, la présence de sels et de matière organique pour des mélanges au jeune âge, c'est-à-dire pour des mélanges ayant vieillis au maximum une heure trente après le début de la phase de malaxage des constituants. Ces résultats sont destinés à être ensuite comparés (dans des travaux ultérieurs) à des résultats de structuration aux temps longs (compris entre une semaine et une année).

2. Matériaux et protocoles expérimentaux

Les sédiments testés ont été prélevés dans un piège à sédiments mis en œuvre au voisinage de l'écluse du Lyvet à différents instants au cours de son remplissage [FAL 12]. Les volumes prélevés ont été séchés à la température ambiante sous flux d'air léger. Au-delà du séchage, les mottes ont été brisées voire broyées pour obtenir une poudre. A ce stade, une caractérisation granulométrique et DRX révèlent une distribution homogène monodisperse composée principalement de kaolin, d'illite, de quartz et de calcite. Le diamètre maximum ne dépasse pas 125 µm et le D50 est de 10 µm. Ces analyses ont été complétées par des analyses thermiques TG et TD. La poudre est ensuite séparée en différentes bandes granulométriques avec l'objectif de distinguer d'éventuelles interactions granulaires au sein des suspensions liquide/solides. La décomposition suivante est retenue : 0-40, 0-63, 0-80 et 0-125 µm. Enfin, une partie du volume est débarrassée des sels et une autre de la matière organique.

Pour former les suspensions, la poudre est additionnée d'eau (du site, déminéralisée ou du robinet (résultats seulement présentés ici avec l'eau du robinet)) à fraction volumique solide fixée (ϕ calculé à partir de la teneur en eau imposée. Ici, $w = 150\%$). Compte tenu du caractère potentiellement réactif des mélanges, l'âge des suspensions est initialisé au moment de l'addition de l'eau. L'ensemble est mélangé énergiquement et manuellement pendant une durée contrôlée. La suspension est ensuite maintenue au repos jusqu'au moment de sa

caractérisation rhéologique. Cellule PIHT 5 (Celle PIHT 5) équipée d'un rotor K50x (80 mm) équipée d'une cellule plan-plan de 40 mm de diamètre et 2 mm d'entrefer. La surface des plans est rendue rugueuse au moyen de papiers de verre adhésifs calibrés. Les essais sont conduits à 20°C. Chaque suspension est testée en cisaillement simple en imposant une vitesse de cisaillement ($\dot{\gamma}$) constante pendant 10 min. La durée est suffisamment longue pour faire converger la valeur moyenne de la contrainte de cisaillement (τ) et de la contrainte normale (σ) et suffisamment courte pour limiter les effets du vieillissement au cours de la caractérisation. Les courbes d'écoulements sont reconstituées à partir des tests effectués pour $\dot{\gamma}$ compris entre 0,01 et 100 s⁻¹. Le temps de préparation et d'homogénéisation des suspensions est de 4 min. Le temps de vieillissement des suspensions est compris entre 1 et 80 min. Dans la suite de l'article, nous retiendrons les dénominations suivantes : sédiments naturels (calibration granulométrique bornée à 40 μ m, 63 μ m, 80 μ m et 125 μ m), sédiments sans matières organiques (SMO) (calibration granulométrique bornée à 125 μ m) et sédiments sans sel (SS) (calibration granulométrique bornée à 125 μ m).

3. Résultats

3.1 Effet de l'âge

L'effet de l'âge est illustré par la caractérisation en cisaillement simple d'une suspension composée de la phase solide naturelle bornée à 40 μ m et additionnée d'eau du robinet à $w = 150\%$. Les courbes d'écoulement moyennes obtenues pour différents temps de vieillissement sont présentées sur la (Figure 1). Les barres d'erreurs mentionnées pour chaque valeur moyenne représentent deux fois l'écart type pour chaque mesure. Au travers des quatre décades d'analyse, on montre que le comportement rhéologique global est bien représenté par un modèle de type Herschel-Bulkley. Toutefois, une forte structuration est notée à bas gradient de vitesse de cisaillement qui s'accroît avec l'âge de la suspension que l'on peut comparer à un mécanisme de floculation. L'effet de la vitesse de cisaillement agit comme un destructurant et un taux critique est mis en évidence au voisinage de 10 s⁻¹. Au-delà, l'effet du vieillissement est peu marqué et la suspension exhibe un comportement de type Bingham.

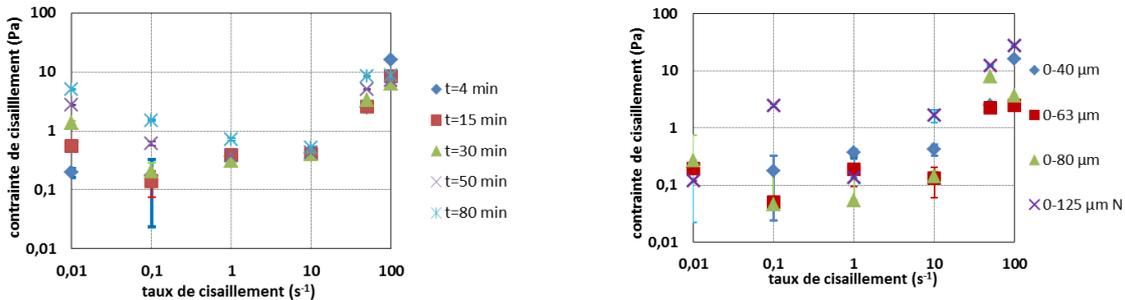


Figure 1. Courbes d'écoulements moyennes pour la frange granulométrique 0-40 μ m à différents âges.

Figure 2. Courbes d'écoulements moyennes pour les différentes franges granulométriques au jeune âge.

3.2 Combinaisons granulaires

Le principe de décomposition de la phase solide a pour but de distinguer un éventuel effet de liant (caractère fortement cohésif de certains constituants tels que les argiles et les limons) combiné à un effet granulaire enrobé. Les résultats sont présentés sur la (

Figure 3. Courbes d'écoulement moyennes pour la frange 0-125 μ m naturel, sans sel et sans matières organiques.

Figure 3. Courbes d'écoulement moyennes pour la frange 0-125 μm naturel, sans sel et sans matières organiques.

) pour des suspensions dosées à $w = 150\%$. Les courbes d'écoulements obtenues juste après la fin de la préparation sont similaires à celle décrites précédemment. Compte tenu de la décomposition retenue, la frange 0-40 μm apparait comme la partie liante et dans cette logique l'extension granulométrique à 63 puis à 80 μm tend à diminuer la contrainte de cisaillement à taux de cisaillement fixé ; ce qui est caractéristique d'un apport granulaire au sein d'une matrice liante [TOU 02]. En revanche, l'extension granulométrique jusqu'à 125 μm révèle une courbe d'écoulement dont la contrainte de cisaillement est supérieure à celle de la frange 0-40 μm . Cette augmentation de la contrainte de cisaillement à taux de cisaillement fixé ne peut pas être imputée à un ajout granulaire passif et nous suspectons la présence d'un composé réactif fixé de façon privilégiée sur cette dernière frange.

3.3 Effet de composés réactifs

Avec l'objectif de compléter l'analyse précédente, nous présentons sur la (**Figure 3**) les courbes d'écoulements obtenues pour des suspensions composées :

- de la phase solide naturelle (0-125 μm N) et d'eau du robinet ($w = 150\%$),
- de la phase solide sans sels (0-125 μm SS) et d'eau du robinet ($w = 150\%$),
- de la phase solide sans matière organique (0-125 μm SMO) et d'eau du robinet ($w = 150\%$).

Les tests sont réalisés juste après la période de préparation des suspensions. Sans expliquer complètement la reprise de contrainte de cisaillement évoquée au paragraphe précédent, on note que l'élimination soit des sels ou de la matière organique de la phase solide décale d'une valeur constante la courbe d'écoulement selon l'axe de la contrainte de cisaillement. Ces deux composés ne modifient pas l'effet de la vitesse de cisaillement sur les mélanges.

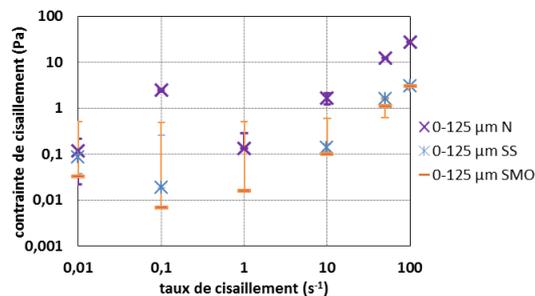


Figure 3. Courbes d'écoulement moyennes pour la frange 0-125 μm naturel, sans sel et sans matières organiques.

4. Conclusion

L'étude rhéologique menée avec des sédiments prélevés au voisinage du Lyvet a permis de caractériser des suspensions en séparant un effet d'une matrice liante (franges 0-40 μm) et d'inclusions granulaires (dont l'effet est destructurant). L'étude a permis de détecter l'influence de la présence de la matière organique et de sels, qui pour un âge donné favorise la structuration rhéologique. Des travaux complémentaires sont en cours de réalisation pour améliorer les interprétations et proposer un modèle du comportement viscoplastique avec l'objectif d'une comparaison avec les résultats déjà obtenus pour des sédiments prélevés dans la Baie de Quiberon (56), [MEL 15].

4. Bibliographie

[FALL 12] FALL N. M., Traitements des sédiments en vue d'une utilisation dans le génie civil ». Thèse de doctorat, INSA de Rennes, 2012.

[TOU 02] TOUTOU J. et al., « Rôle de la formulation des suspensions concentrées en évaluation des conditions d'extrudabilité ». Thèse de l'INSA Rennes, 2002.

[AVO 81] AVOINE J. L'estuaire de la Seine: sédiments et dynamique sédimentaire, Thèse de doctorat, Université Caen, 1981.

[BON 02] BONNOT-COURTOIS C., CALINE B., L'HOMER A, LE VOT M., La baie de Mont Saint Michel et l'estuaire de la Rance, Pau, Edition TotalFinaElf, 2002.

[MEL 15] MELINGE Y. et al, «Etude du comportement visqueux-visco-plastique de suspensions sédimentaires multi-échelle», *33èmes rencontres universitaires de génie civil*, Bayonne, 27-29 mai 2015.