Mobilisation solide en milieu naturel fluvial Transposition des données laboratoire au contexte naturel

Y. Mélinge*, P. Laguionie, A.Crave***, C. Lanos***

**LGCGM équipe Matériaux et Thermique de l'Habitat-INSA/IUT Rennes*
20 avenue des buttes de Coesmes - CS 14315 - 35 043 RENNES Cedex
*** LSCE (Laboratoire des Sciences du Climat et de l'Environnement / Unité Mixte CEA-CNRS) (UMR 1572) - Domaine du CNRS - Avenue de la Terrasse - 91 198 Gif sur Yvette Cedex*
****Géosciences Rennes – Equipe Transfert - UMR 6118 CNRS/Université de Rennes I - Campus de Beaulieu, 35042 RENNES Cedex, FRANCE*

yannick.melinge@insa-rennes.fr

RÉSUMÉ. *Dans un contexte naturel fluvial, nous recherchons les indicateurs permettant de prévoir les conditions d'érosion de massifs vaseux. Au moyen de campagnes de mesures réalisées sur le site de Guipry Malon (35), nous établissons la contrainte limite de frottement à l'interface massif-fluide. En condition de laboratoire, nous proposons une modélisation expérimentale du comportement de ces matériaux pour mettre en évidence certains des mécanismes responsables de la résistance à l'érosion.*

ABSTRACT. *In a river natural context, we seek the indicators allowing to model the conditions of erosion of muddy solid materials. By means of series of measurements carried out on the site of Guipry Malon(35), we establish the limit shear stress to the interface solid mass-fluid. In condition of laboratory, we propose an experimental modeling of the behavior of these materials to highlight some of the mechanisms responsible for resistance to erosion.*

MOTS-CLÉS : *érosion, contrainte limite de cisaillement, vases, consolidation, la Vilaine.*

KEYWORDS: *erosion, limit shear stress, consolidation, la Vilaine river*

1. Introduction

Dans un contexte de protection des ressources et notamment l'eau dans un milieu naturel tel que les rivières, nous présentons dans cet article un regroupement de résultats consacrés à la capacité de transport. On distingue là une problématique environnementale. Dans le milieu naturel, étant donné les échelles, la variabilité des phénomènes, les actions couplées, il est souvent délicat d'obtenir des données fiables et représentatives. Par ailleurs, les données obtenues en laboratoire jouissent de protocoles expérimentaux rigoureux certes mais restent bien souvent limités dès lors qu'une transposition au cas réel est envisagée. Le phénomène qui nous occupe concerne un tronçon de la Vilaine situé entre Guipry et Malon (35) long de 3,6 km. La largeur moyenne de ce cours d'eau est de l'ordre de 70 m. La déstabilisation de ce site peut être engendrée lors des périodes de crues propices à l'érosion du lit. On distingue ici du charriage et du transport par suspension. Nous nous focalisons, dans le cadre de ce travail, uniquement sur cette dernière possibilité qui concerne la mobilisation de différents bancs vaseux facilement identifiables le long du tronçon en période de chômage de l'ouvrage.

L'objectif à terme est d'établir quel événement naturel peut déstabiliser l'équilibre des matériaux constituant le lit.

L'étude est ramenée à un problème bidimensionnel de développement de couche limite turbulente en interaction avec un sol « fin » mobilisable. L'originalité des travaux vient du fait que nous étudions les propriétés rhéologiques des matériaux en vue d'établir la contrainte de cisaillement limite de mise en mouvement.

On distingue deux étapes dans ces travaux :

- Travaux réalisés in situ en période de chômage permettant de mesurer les contraintes critiques de cisaillement,
- Travaux de type laboratoire réalisés à partir de prélèvement de matière sur le site. Dans cette seconde partie, il convient de confirmer les contraintes mises en jeu in situ et établir les protocoles destinés à fournir les explications sur la structuration des mélanges.

Les données obtenues in situ sont mesurées à partir d'une méthode de type Vane test modifié. La période de chômage se prête bien à ce type d'analyse par le découvrement du massif et par conséquent l'éloignement de la nappe. La comparaison des données en milieu noyé et dénoyé est discuté.

Dans les conditions de type laboratoire, nous nous attachons, tout d'abord, à caractériser la matière solide et d'établir les propriétés mécaniques de mélanges tant au jeune age qu'après différentes périodes permettant de simuler le « viellissement » des matériaux.

La comparaison des deux approches apportent des réponses sur le comportement de tels milieux essentiellement polydisperses visco-plastique, l'aptitude au transport et au rôle du biogène sur la structuration des mélanges.

2. Présentation du site

Le site, objet de l'étude, est un tronçon de la Vilaine compris entre Guipry et Malon. Dans cette zone, le lit majeur s'apparente à une plaine d'inondation au relief peu marqué et des travaux antérieurs aux notre ont permis de dresser les profils du lit majeur. Le long de ce tronçon, différents bancs de vases sont identifiés notamment lors de la période de chômage de l'ouvrage. Ces périodes d'émergence des massifs vaseux constituent une réelle possibilité d'identifier les propriétés mécaniques des matériaux en « place » qui subissent une histoire mécanique liée à la structuration. En présence d'un massif dé-structuré suite à un événement préjudiciable, ce processus peut conduire à une augmentation du « travail » à fournir, au cours du temps, pour à nouveau déstabiliser le milieu. Dans le cadre de nos travaux, nous nous sommes focalisés sur un banc de vase dont l'étude est réalisée selon le schéma de la figure 1.

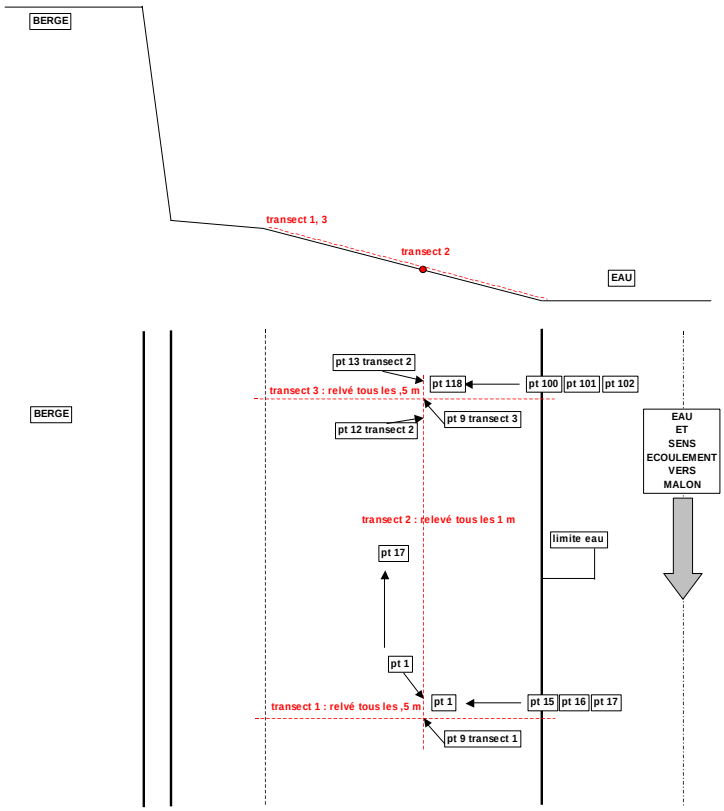


Figure 1. *Représentation schématique du banc de vase étudié en vue de dessus et vue transversale. Identification des transects.*

L'objectif étant ici d'obtenir des données montrant l'influence des propriétés de la matière sur la contrainte de cisaillement à la surface du massif et d'être en mesure de reproduire cette structure dans un contexte laboratoire pour en expliquer certains des mécanismes de structuration.

3. Nature des matériaux sur le site

Pour toutes les manipulations effectuées en laboratoire, le matériau est celui prélevé sur site. L'analyse qualitative permet de déceler au sein de la vase des éléments hétérogènes de taille centimétrique tels des petits branchages, des coquillages, des morceaux de feuilles, des graines et des graviers. Ces éléments sont systématiquement retirés et l'on caractérise le matériau homogène vaseux dont l'étendue granulométrique est comprise entre 10^{-4} et 0,315 mm. Par ailleurs, La courbe granulométrique des valeurs non cumulées laisse apparaître deux pics distincts correspondant à 5 µm et 30 µm, figure 2.

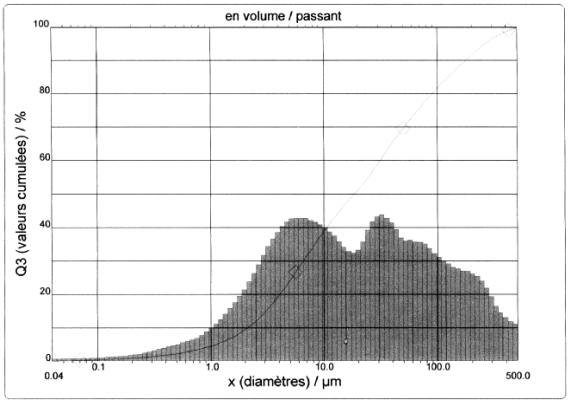
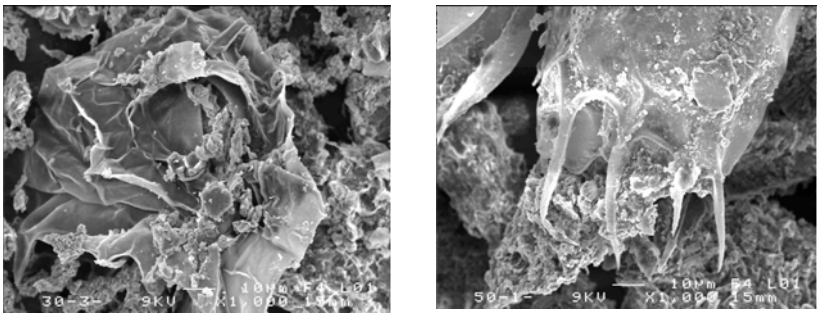


Figure 2. *Analyse granulométrique du matériau étudié.*

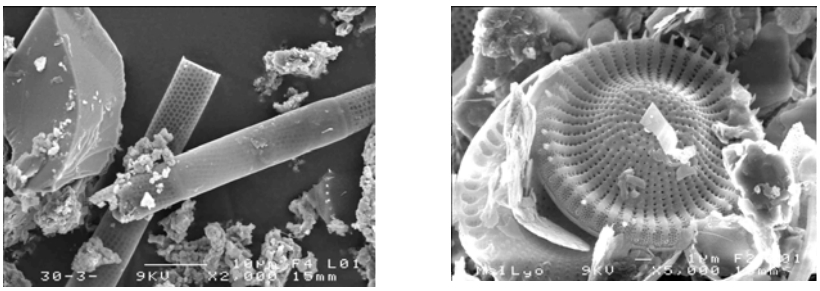
Cette identification montre une faible présence d'argile (< 10%) et une répartition équitable entre les limons et les sables fins. En complément, nous avons effectué une identification de la teneur en matière organique dont la valeur moyenne est de 6,44%, ce qui constitue une valeur courante pour ce genre de matériau. Une analyse par microscopie électronique à balayage permet de distinguer de façon plus précise les principaux constituants de cette fraction granulométrique. Les clichés pris au grossissement de 1000 montrent l'aspect général des agrégats constituant la vase : on note la présence de quelques éléments biogènes (dont la présence est confirmée par micro analyse) au sein d'une quantité importante d'éléments de petites tailles, figure 3a et 3b. Des grossissements plus importants montrent que parmi ces éléments on distingue la présence de diatomées centriques et tubulaires, figure 4a et 4b. Des grossissements plus importants permettent de distinguer des fragments de diatomées, des feuillets argileux ainsi que des cristaux cubiques et allongés. Un complément par micro analyse permet de suggérer la présence de sels

de NaCl qui cristallisent de cette façon. Enfin, la masse volumique réelle de cette fraction granulométrique présente une valeur moyenne de 2490 kg.m^{-3}.



(a) (b)

Figure 3. *Vue générale des agrégats et détection d'un élément biogène (a). Présence probable d'un zooplancton au sein des agrégats (b).*



(a) (b)

Figure 4. *Détection d'un cristal de quartz et de diatomées tubulaires (a). Détection d'une diatomée centrique (b).*

4. Moyens expérimentaux

Pour les essais réalisés in situ, nous utilisons des carrotiers, des macro-prélèvements en vue de l'identification locale de la teneur en eau et un scissomètre de terrain manuel. Cet appareil est caractérisé par une zone cisaillante de forme annulaire de diamètre extérieur de 180mm, un diamètre intérieur de 120mm et une hauteur de 10mm. Cette zone de cisaillement est équipée de 12 ailettes équi-réparties. Cette géométrie est reliée à un couplemètre. L'ensemble est étalonné au laboratoire. Pour une bonne utilisation il convient d'effectuer le cisaillement en imposant une vitesse lente pour que la contrainte s'apparente à un seuil statique de cisaillement. Par ailleurs la hauteur des ailettes permet de cisailler globalement une géométrie annulaire pour identifier la contrainte de cisaillement par une approche de

type vane test, mais elle doit rester suffisamment faible pour que la contrainte mesurée soit représentative d'une contrainte d'érosion à la surface. Enfin, cet essai doit pouvoir être réalisé sans imposer un chargement sur le massif vaseux.

Pour les essais de laboratoire, l'identification des propriétés rhéologiques est réalisée au moyen d'un rhéomètre Brookfield RS 220 configuré en vane test. Celui ci est piloté en vitesse à raison de 0,05 tr.min^{-1}. Ce choix permet d'identifier la contrainte limite de cisaillement du matériau à caractériser. Pour le séchage des matériaux et l'identification des teneurs en eau, nous utilisons une étuve ventilée calibrée à 40°C.

5. Caractérisation rhéologique des matériaux en place in-situ

Comme le montre la figure 1, l'identification de la structuration des matériaux a été réalisée selon trois transects : un parallèle à la direction principale de l'écoulement (transect 2) et deux orientés perpendiculairement à la direction principale de l'écoulement (transects 1 et 3). Les résultats les plus caractéristiques apparaissent avec l'analyse des transects 1 et 3. En effet, sur la figure 5 on remarque que l'éloignement du plan d'eau est accompagné d'une augmentation du seuil statique de cisaillement. Des mesures réalisées en milieu immergé montre une relative stabilité de la contrainte. Ces mesures sont délicates à réalisées de part la fragilité du milieu. La comparaison avec les résultats obtenus avec le transect 2 permet de conclure que le banc prospecté est assez homogène et que la valeur de la contrainte de cisaillement est en connexion avec le retrait de la nappe durant cette période de chômage. Par ailleurs, sur la figure 6 on peut observer un lien fonctionnel de la contrainte de cisaillement critique avec la teneur en eau locale, ce qui constitue un plan traditionnel pour représenter la structuration rhéologique (Toutou, 2002).

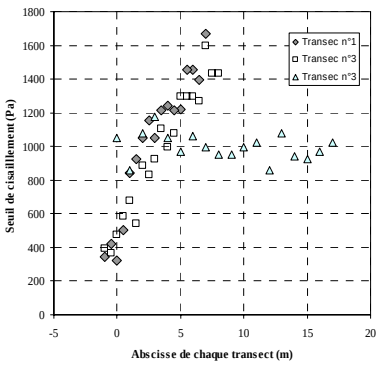


Figure 5. *Evolution de la contrainte seuil de cisaillement selon les trois transects.*

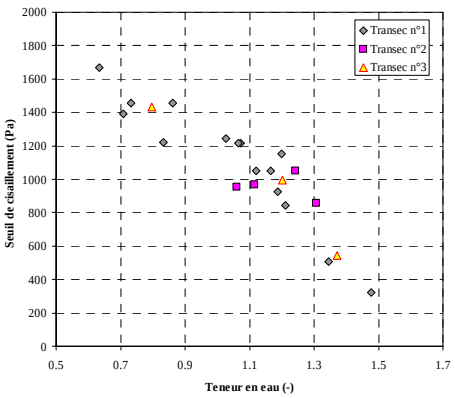


Figure 6. *Influence de la teneuren eau locale sur la contrainte seuil de cisaillement.*

Finalement, ces résultats montrent un état de structuration de la matière et celle ci conditionne le comportement rhéologique des matériaux qui renseigne sur l'érosion potentielle de ce milieu. Il convient de les compléter dans le but d'identifier quelques-uns uns des mécanismes qui participent à la structuration.

6. Modélisation expérimentale des mécanismes de structuration

En contexte laboratoire, à partir des matériaux séchés, nous avons tout d'abord cherché à établir une équivalence contrainte de cisaillement-teneur en eau pour des mélanges qui présentent des valeurs de teneur en eau identifiées in-situ. Pour leur réalisation, nous avons utilisé le protocole suivant. Le matériau est mouillé, mélangé et mis au repos durant 24h pour s'assurer de l'homogénéité du mélange. L'identification du seuil statique de cisaillement en fonction de la teneur en eau est reportée sur la figure 6 (symbole triangle – matériau remanié). On note que la contrainte est liée de façon fonctionnelle à la teneur en eau mais la méthode de préparation montre, logiquement, que ce paramètre (la teneur en eau) seul ne peut nullement permettre la reproduction du comportement de rupture du contexte naturel. En effet, à ce protocole de préparation il conviendrait d'appliquer avant la réalisation des essais de cisaillement une phase de compaction dans le but d'apporter un état de structuration au mélange. En outre, « l'age » des mélanges ne permet pas de distinguer la contribution de la structuration par action biologique qui caractérise ce genre de matériau.

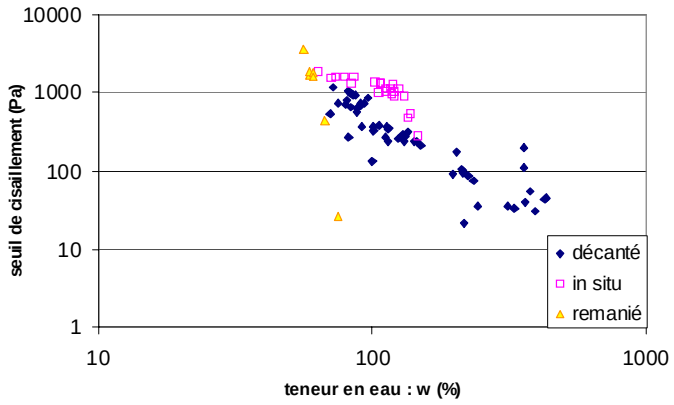


Figure 6. *Influence de la teneur en eau et de l'état de structuration de mélange vaseux sur la contrainte limite de cisaillement.*

En second lieu, pour palier au manque de représentativité, à priori, de cette « structure » par rapport au processus naturel, nous avons entrepris de simuler un mécanisme de structuration susceptible d'être rencontrer en milieu naturel. Additionnée d'eau, le matériau sec est placé pour homogénéisation dans une colonne de sédimentation. Dès lors que l'on est assuré d'un brassage suffisant qui

confère au mélange un caractère homogène, le fluide est mis au repos. On observe alors la formation d'un « massif » par dépôt progressif de la matière solide suivi d'un mécanisme de consolidation. Par pas hebdomadaire, les mélanges formés sont soumis à un test de cisaillement. Les résultats obtenus qui incluent les mécanismes de consolidation et biologiques sont reportés sur la figure 6 (symbole losange – matériau décanté). Dans ces conditions expérimentales, un lien fonctionnel entre la contrainte limite de cisaillement est mis en évidence et le cumul des données pour des mélanges laissés au repos au maximum durant huit semaines permet de se rapprocher de façon significative des résultats de terrain.

7. Conclusion

Dans cet article, nous avons abordé la problématique d'érosion de banc de vases dans un contexte fluvial à partir d'une approche rhéologique. Un tronçon de la Vilaine, situé entre Guipry et Malon (35), a été retenu pour la réalisation des travaux sur site réel. Nous nous sommes attachés à mettre en évidence la contrainte limite de cisaillement à l'interface fluide-massif comme indicateur de la contrainte minimum à « fournir » pour déstabiliser le milieu naturel. La modélisation de ce processus d'érosion en laboratoire conduit à un scénario permettant de montrer le rôle de la consolidation et de l'activité biologique en plus du simple critère de la fraction volumique solide ou la teneur en eau, sur la contrainte limite de cisaillement. Il convient à présent de coupler à ces deux contributions le caractère polydisperse des mélanges étudiés qui conditionne également le comportement rhéologique.

8. Bibliographie

Toutou Z., « Rhéologie et formulation des géosuspensions concentrées : évaluation des conditions d'extrudabilité », *Thèse de doctorat INSA Rennes*, 2002.

Gallois S., Alexis A., Thomas P., « Modélisation du processus de sédimentation-consolidation des vases estuariennes : approche continue unidimensionnelle », *Bull. Eng. Env.*, vol 57, 1999, p. 311- 318.

Chassaing P., « Turbulence en mécanique des fluides. Analyse du phénomène en vue de sa modélisation à l'usage de l'ingénieur », *Cépadues éditions*, 2000.

Couvert B., Lefort P., Peiry J.L., Belleudy P., « La gestion des rivières, transport solide et attérissements – guide méthodologique », *édité par les agences de l'eau*, 1999.