



HAL
open science

Caractérisation rhéométrique des conditions de transition solide/liquide de sédiments cohésifs : vers un lien avec le comportement en érosion ?

Keang Sè Pouv, Anthony Besq, Sylvain Guillou

► To cite this version:

Keang Sè Pouv, Anthony Besq, Sylvain Guillou. Caractérisation rhéométrique des conditions de transition solide/liquide de sédiments cohésifs : vers un lien avec le comportement en érosion ?. Journées Nationales Génie Côtier - Génie Civil, Jun 2010, Les Sables d'Olonne, France. pp.529-538, 10.5150/jngcgc.2010.062-P . hal-02153711

HAL Id: hal-02153711

<https://hal.science/hal-02153711v1>

Submitted on 12 Jun 2019

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



Caractérisation rhéométrique des conditions de transition solide/liquide de sédiments cohésifs : vers un lien avec le comportement en érosion ?

Keang Sé POUV¹, Anthony BESQ¹, Sylvain GUILLOU¹

1. Laboratoire Universitaire des Sciences Appliquées de Cherbourg,
EA4253, Groupe "Mécanique des Fluides et Rhéologie", Site Universitaire,
50130 Cherbourg Octeville, France.
anthony.besq@unicaen.fr

Résumé :

Dans cette contribution, on a recourt à des essais rhéométriques pour caractériser le comportement d'un sédiment cohésif naturel dont une partie est traitée par rayonnement ionisant gamma. On montre que ce traitement conduit à une réduction importante du niveau de résistance du sédiment. Le suivi spécifique des dynamiques d'évolution, de la structure du sédiment au cours du vieillissement, et de la transition solide/liquide (processus similaire à l'érosion du fond sédimentaire) met respectivement en évidence une loi d'évolution en puissance du temps et exponentielle en inverse de la contrainte appliquée. Le fait le plus remarquable est que les dynamiques ne semblent pas affectées par le traitement par irradiation gamma. Pour mieux comprendre les phénomènes mis en jeu dans le processus d'érosion, il est proposé de suivre localement ces dynamiques à l'aide des techniques PTV et LIF. Dans cette optique, il faut disposer de fluides modèles simulant les propriétés rhéologiques des sédiments naturels et notamment les dynamiques particulières présentées dans cette étude.

Mots-clés :

Transition solide/liquide – Thixotropie – Seuil d'écoulement – Sédiments cohésifs – Fluides modèles

1. Introduction et positionnement de la problématique

Dans les ports et les estuaires, les sédiments s'accumulent dans certaines zones et sont érodés dans d'autres. La gestion à long terme de ces espaces nécessite d'être capable de modéliser le comportement en érosion et en transport des sédiments, qui sont par ailleurs le plus souvent cohésifs. Décrire ces propriétés d'érosion requiert une phase expérimentale (*in situ* ou en laboratoire) pour évaluer la contrainte hydrodynamique déclenchant l'érosion. Les différentes techniques et essais mis en œuvre en soumettant le matériau à des contraintes induites par un écoulement d'eau montrent que cette tâche est complexe. Ainsi, TOLHURST *et al.* (2000) rapportent que le processus d'érosion ne semble pas universel puisque deux modes d'érosion, l'un en surface et l'autre en masse, pouvant s'enchaîner, ont été observés. Une caractéristique essentielle, que l'on peut

retenir de ces modes, est la manifestation du processus de rupture. Les auteurs soulignent également l'importance de l'amplitude et de la durée des incréments des sollicitations mécaniques appliquées sur le fond sédimentaire. Par ailleurs, l'identification du déclenchement du processus d'érosion suite à ces sollicitations est très délicate, et donne lieu à considérer différentes valeurs seuil, selon le degré de manifestation de l'enlèvement de matière solide (i.e. détectabilité de la quantité de matière accumulée en suspension).

Du point de vue physique, l'érosion du sédiment correspond à une transition entre un état solide et un état fluide qui nécessite d'être capable de caractériser finement la dynamique du comportement mécanique sur un domaine important de déformations. La rhéométrie peut répondre à ces exigences dans le cadre de sollicitations mécaniques en cisaillement simple obtenues en confinant le matériau entre des outils. La relative facilité de mise en œuvre permet de caractériser l'impact de différents facteurs tels que la concentration, la nature et la granulométrie des constituants minéralogiques ; les composants organiques et polymériques, ... ; sur le comportement mécanique.

Les différentes études expérimentales en rhéologie des sédiments ont montré le caractère complexe et évolutif dans le temps de ces matériaux qui dépend de nombreux facteurs (concentration des particules colloïdales et grossières, contenu en matière organique, activité biologique...). Les propriétés de thixotropie et d'existence d'une contrainte seuil ont été rapportées, et une meilleure compréhension de ces propriétés a été possible, ces dernières années, grâce à une approche locale pour différents systèmes présentant les mêmes propriétés. Les travaux, ainsi conduits, mettent en évidence la coexistence de zones fluides et de zones solides au sein du même échantillon qui évoluent spatialement et temporellement selon l'état de la matière (RAYNAUD *et al.*, 2002 ; OVARLEZ *et al.*, 2009). Dès lors, les observations relatives à la transition solide/liquide et liquide/solide associée au concept de contrainte seuil, ainsi qu'au comportement en écoulement, sont directement dépendantes des conditions d'application des sollicitations mécaniques (distribution, temps et taux d'accroissement) (COUSSOT *et al.*, 2002 ; UHLHERR *et al.*, 2005).

Cette vision de la problématique de l'érosion en tant que transition de comportement mécanique pose légitimement plusieurs questions. Compte tenu de la différence de la nature de la sollicitation mécanique en érosion et en rhéométrie, est-il possible de trouver un lien permettant de prévoir le comportement en érosion à partir de « simples » essais rhéométriques ? Une étude spécifique peut être menée dans ce sens, mais elle impose d'une part, d'éliminer l'évolutivité du sédiment inhérente à la composante biologique, et d'autre part, d'obtenir simultanément des informations macroscopiques caractérisant les dynamiques et des informations locales du matériau qui adoptera vraisemblablement une organisation hétérogène. Quelles techniques peut-on alors mettre en œuvre ?

Les techniques "classiques" de RMN, d'imagerie de particules (PIV ou PTV), de vélocimétrie Doppler (ondes sonores ou laser) peuvent répondre à ces objectifs. Elles se différencient par leur caractère potentiellement intrusif (ajout ou non de traceurs), leur résolution spatiale et temporelle ainsi que leur exigence de certaines propriétés du fluide (transparence optique, homogénéité). La technique exploitant la fluorescence induite par laser (LIF) peut également apporter des informations qualitatives sur les phénomènes de diffusion et de déformation au sein du matériau. La conséquence immédiate du choix de techniques basées sur l'imagerie optique est la nécessité d'utiliser un matériau modèle transparent. Cette contrainte offre la possibilité de développer un matériau avec des propriétés ajustables, maîtrisées et stables dans le temps. Il reste alors à définir la nature des propriétés que l'on souhaite contrôler.

Dans cet article, on aborde la problématique de l'érosion de sédiments cohésifs en étudiant les propriétés rhéologiques fondamentales de contrainte seuil et de thixotropie d'un sédiment naturel, en exploitant plutôt des essais de fluage pour caractériser les aspects dynamiques qui ne peuvent être identifiés précisément avec les essais classiques d'écoulement. Ce sédiment sera par ailleurs traité de manière à le perturber et souligner l'importance de la composante biologique. Les résultats constitueront ainsi une référence pour la mise au point de matériaux modèles.

2. Méthodologie

2.1 Echantillons et caractéristiques

L'échantillon de sédiments marins a été collecté en février 2008, à la benne dans la grande rade de Cherbourg (Lat.49°40'5.00"N, Long. 1°36'11.00"O) à proximité de la voie maritime de la Passe de l'Est. L'échantillon a été réparti équitablement dans 4 tonnelets hermétiques de 6 l qui ont été transférés le jour même vers le site de Sablé sur Sarthe (72), de la société Ionisos. Un traitement par irradiation gamma (dose de 35 KGy en périphérie) a alors été pratiqué sur seulement 2 colis sans ouverture de ces derniers. Le temps total entre l'envoi et le retour des tonnelets au laboratoire a été de 3 jours. Ce traitement initial permet ainsi d'obtenir, pour des mêmes conditions de stockage, un échantillon caractérisé par une activité biologique normale (croissance/décroissance de bactéries, production de substances extracellulaires...) et un autre où à la fois la population bactérienne et les substances polymériques ont été endommagées voir détruites. Ces échantillons seront qualifiés par la suite de naturels et d'irradiés.

La dernière étape de préparation consiste en un tamisage étagé, effectué en trois passes à l'aide de tamis normalisés, avec une taille ultime de coupure de 125 µm.

On note une valeur du pH des sédiments, qu'ils soient irradiés ou non, voisine de 7,5.

La concentration massique en matière solide des échantillons a été déterminée à partir de trois prélèvements pour chaque type de traitement (naturel, irradié), en considérant les valeurs de pesée avant et après séchage à l'étuve (24h à 70°C). On obtient

Thème 3 – Instrumentation, mesures, imagerie et télédétection

respectivement pour les systèmes naturels et irradiés, une valeur de $36,1 \pm 1,7\%$ et de $36,0 \pm 0,1\%$. En moyenne, les systèmes sont de même concentration. On note, cependant, une plus grande variabilité des valeurs pour le système naturel.

La densité du sédiment sec des mêmes échantillons a été mesurée par pycnométrie à hélium (Accupyc1330, Micromeritics). Une faible variabilité (0,3%) est constatée pour l'ensemble des échantillons qui présentent une densité moyenne de $2,58 \text{ g/cm}^3$.

Ces analyses permettent de juger de la bonne homogénéité du matériau quelque soit l'échantillon examiné. Aucune autres analyses n'ont été faites car l'objectif des essais rhéométriques n'est pas d'établir de corrélation entre le comportement mécanique et la composition du matériau.

2.2 Techniques rhéométriques

Les essais rhéométriques ont été effectués avec un rhéomètre à contrainte imposée AR1000N (TA Instruments), avec une géométrie plan-plan de 40 mm de diamètre en PMMA. La surface des deux plans est couverte de dents pyramidales (base $1 \times 1 \text{ mm}^2$, hauteur $867 \text{ }\mu\text{m}$) directement usinées dans la matière. Cette géométrie cloutée s'apparente à celle développée par NICKERSON & KORNFIELD (2005) afin de s'affranchir des problèmes de glissement. Des études complémentaires ont montré que ce type de géométrie permettait également de maîtriser l'homogénéité du champ de cisaillement sur un domaine beaucoup plus grand de valeurs de contrainte (POUV *et al.*, 2009).

Un entrefer de 2 mm est utilisé pour tous les essais ce qui est suffisant en regard de la taille des particules présentes dans les échantillons. Compte tenu de la taille des dents, l'épaisseur de cisaillement effective est plus grande que l'entrefer. La quantité supplémentaire à considérer pour pouvoir calculer les grandeurs rhéométriques s'obtient en suivant la méthode d'étalonnage proposée par NICKERSON & KORNFIELD (2005). Dans notre cas, il faut considérer une valeur de $165 \text{ }\mu\text{m}$ pour chaque plan.

3. Résultats de l'étude rhéométrique

3.1 Comportement en écoulement

Les essais d'écoulement examinés dans ce point consistent à mettre le matériau, dans un premier temps, dans un état relatif dépendant du protocole retenu (précisaillement à 100 s^{-1} pendant 300 s puis repos de 300 s) compte tenu du caractère thixotrope, puis à imposer une série de sollicitation par valeurs croissantes puis décroissantes (durée totale 40 min). On impose soit la contrainte (CI) ou la vitesse de cisaillement (VI) via un asservissement de la contrainte. Les courbes d'écoulement (figure 1) obtenues pour ces deux modes et les deux types de sédiment mettent clairement en évidence que le système irradié est mécaniquement moins résistant, puisque les niveaux de contrainte mis en jeu pour obtenir un écoulement sur la même gamme de vitesse de cisaillement

sont systématiquement plus petits. Ce constat de biostabilisation mécanique du sédiment est cohérent avec la description des effets biologiques présentés dans l'ouvrage de WINTERWERP & VAN KESTEREN (2004).

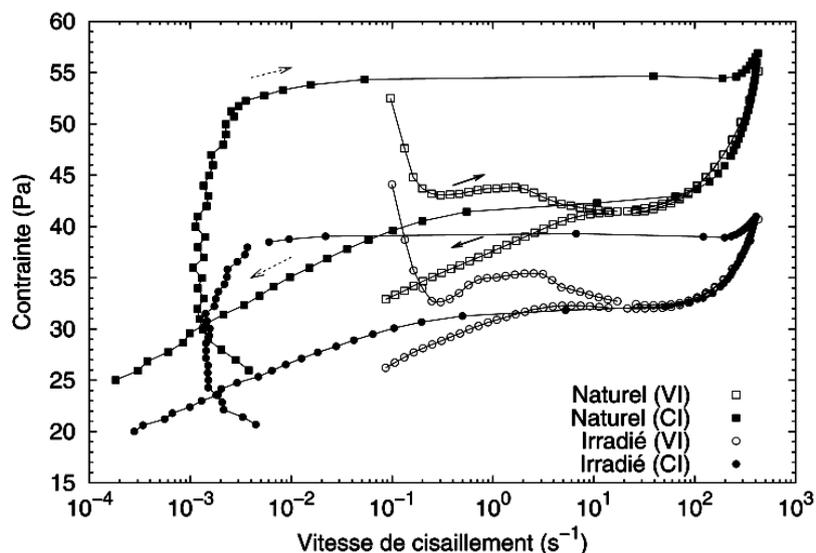


Figure 1. Courbes d'écoulement pour le sédiment naturel (carré) et irradié (cercle) en fonction du mode d'imposition des sollicitations mécaniques. Les flèches indiquent la charge et décharge du système.

En mode contrainte imposée, les courbes présentent une première phase où la vitesse de cisaillement évolue peu. Ce régime traduit le caractère solide du sédiment qui se déforme élastiquement sous l'effet de l'accroissement de la contrainte. Au-delà de la valeur de contrainte critique (52 Pa pour le sédiment naturel et 38 Pa pour le sédiment irradié), une transition brutale s'opère et se matérialise par un quasi-plateau en contrainte, qui correspond en fait à une zone d'écoulement instable. Il a été montré que la stabilité n'était possible qu'au-delà d'une vitesse de cisaillement critique pour laquelle l'état du fluide est homogène au sein de l'entrefer. Il est important de noter que la transition solide/liquide est associée à une dynamique propre ce qui fait que la contrainte critique correspond à un changement observable sur l'échelle de temps défini par l'essai. Cette valeur est donc plus grande que la valeur de contrainte seuil qui permet d'initier la transition. A la fin du plateau, on est en présence d'un écoulement homogène associé à une vitesse de cisaillement compatible avec le niveau de contrainte imposé. On assiste ensuite à une augmentation conjointe de la vitesse de cisaillement avec la contrainte qui traduit une déstructuration progressive du sédiment. Cet état déstructuré perdure lorsque les valeurs de contrainte diminuent, si bien que la courbe de descente se trouve en dessous de la courbe de montée. Lorsque le système atteint la valeur de vitesse de cisaillement critique (10 s^{-1} pour le sédiment naturel et 30 s^{-1} pour le sédiment

Thème 3 – Instrumentation, mesures, imagerie et télédétection

irradié), une bifurcation vers l'état solide a lieu, les vitesses de cisaillement diminuent alors rapidement.

Les courbes obtenues pour les essais réalisés en imposant la vitesse de cisaillement, bien que différentes des précédentes, sont parfaitement cohérentes. Lors de la montée, on assiste à une évolution non monotone tant que l'écoulement est instable (coexistence de zones solides et cisillées), c'est-à-dire pour des vitesses de cisaillement inférieures à la vitesse de cisaillement critique. Lorsque l'on est en présence d'un écoulement stable où le matériau est homogène et déstructuré dans tout l'entrefer, la courbe de descente se superpose sur celle enregistrée lors des essais en mode contrainte imposée. Dans cette zone, on constate peu de différences entre la courbe de montée et de descente ce qui suggère que, à partir du moment où tout l'entrefer est cisillé de manière homogène, la cinétique de déstructuration mise en jeu est plutôt lente. Enfin, pour les courbes de descente, on retrouve le phénomène de bifurcation dès lors que la vitesse de cisaillement est inférieure à la valeur critique. Les courbes se distinguent de celles obtenues dans le cas des essais en mode contrainte imposée car les conditions d'application de la sollicitation donnent lieu à une distribution différente des contraintes au sein de l'échantillon.

3.2 Dynamique de vieillissement

Pour évaluer le niveau de résistance du sédiment atteint après une période de repos t_w faisant suite à remaniement contrôlé (300 s de précisaillement à 100 s^{-1} qui est une valeur plus grande que la vitesse de cisaillement critique), on réalise des essais de fluage avec une même valeur de contrainte de 40,8 Pa pour le sédiment naturel et 28,8 Pa pour le sédiment irradié. Ces valeurs sont volontairement inférieures aux valeurs de contrainte critique de manière à s'approcher au mieux de la valeur de contrainte seuil que l'on ne cherche pas à déterminer précisément. Quatre valeurs du temps de repos t_w ont été retenues (300, 900, 1800 et 3600 s). Ce temps de repos est classiquement vu comme un temps de vieillissement du matériau au cours duquel une réorganisation structurelle se déroule. C'est pourquoi, on choisit de prendre comme origine des temps l'instant faisant suite au précisaillement. PHAM VAN BANG *et al.* (2007) ont observé que cette réorganisation conduisait à une augmentation de la contrainte seuil avec le temps de repos ; dès lors les résultats d'une étude d'érosion deviennent directement dépendants de l'histoire mécanique du sédiment (sollicitations et repos). Il est important de souligner que ce vieillissement, traduisant une reprise de structure du matériau, ne doit pas être confondu avec une évolution des propriétés au cours du stockage due à la composante biologique et organique. Les deux phénomènes existent mais avec des échelles de temps différentes.

La figure 2 présente l'évolution de la déviation angulaire (i.e. la déformation) de la géométrie au cours du temps pour le sédiment naturel. Une même réponse linéaire est enregistrée dans les tous premiers instants. Elle traduit un comportement de type solide

élastique. On observe ensuite un régime oscillatoire qui correspond au couplage entre la réponse viscoélastique du matériau et l'inertie du rhéomètre. L'évolution devient par la suite continue et on assiste à une hiérarchisation des niveaux de déformation selon le temps de repos initial. Pour finir, on constate pour les temps longs une transition complexe vers un régime d'écoulement mise en évidence par l'incurvation des courbes. La transition solide/liquide s'amorce d'autant plus tardivement que le temps de repos est grand.

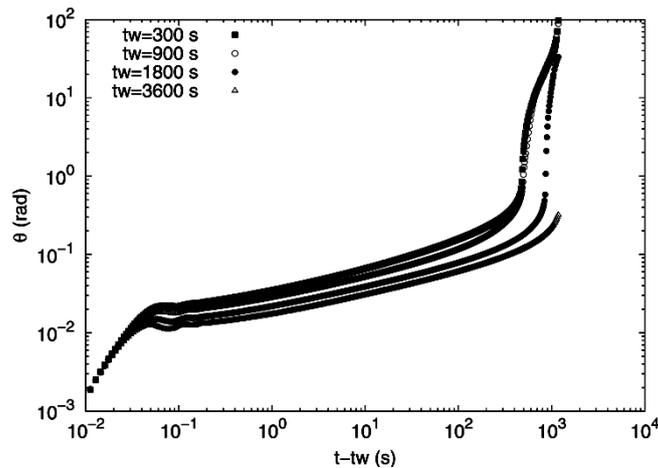


Figure 2. Courbes de fluage à 40,8 Pa pour le sédiment naturel en fonction du temps et pour différents temps de repos t_w .

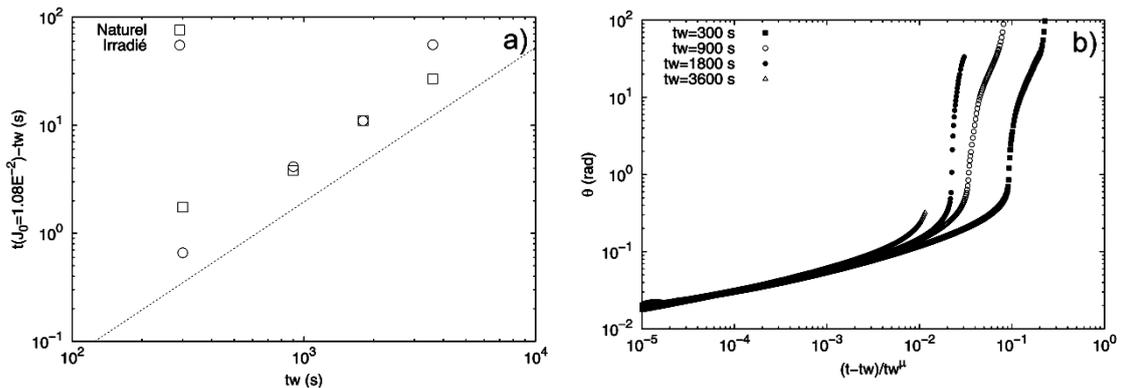


Figure 3. a. Evolution du temps d'atteinte d'une même valeur de complaisance pour les sédiments naturel et irradié (la droite matérialise une pente de 1,43). b. Utilisation de la loi de vieillissement pour adimensionner les courbes de fluage.

Pour caractériser la dynamique de vieillissement, on utilise ces essais pour relever le temps nécessaire afin d'atteindre un même niveau de complaisance J_0 (i.e. même rapport déformation sur contrainte). Le tracé en double échelle logarithmique des valeurs de temps pour $J_0=1,08 \cdot 10^{-2} \text{ Pa}^{-1}$ en fonction du temps de repos, pour les

sédiments naturels et irradiés, suggère un même comportement en loi de puissance d'exposant μ valant 1,43 (figure 3.a). La valeur de μ ne dépend pas de la valeur J_0 fixée. Pour les deux systèmes, on est donc en présence de substances polymériques qui doivent vraisemblablement avoir un poids moléculaire moyen plus faible pour le sédiment irradié, et qui ne semblent pas affecter le processus de vieillissement. Son origine physique reste à déterminer.

L'utilisation de cette loi de puissance permet alors d'adimensionner la variable temps et d'obtenir des courbes de fluage selon une même courbe maîtresse (figure 3.b). Les courbes restent toutefois différentes pour la partie caractérisée par la dynamique de transition solide/liquide qui dépend du réseau structurel développé au sein de l'échantillon.

3.3 Dynamique de la transition solide-liquide

Partant d'un même état structurel initial obtenu en conditionnant l'échantillon de sédiment au moyen d'une phase de précisaillement (5 min à 100 s^{-1}) suivi d'un repos de 5 min , on examine de nouveau le comportement lors d'essais de fluage pour différentes valeurs de contrainte situées au voisinage de la contrainte seuil. On analyse ces essais en examinant l'évolution temporelle du taux de déformation. Pour le sédiment naturel, la figure 4.a présente les réponses enregistrées une fois la phase oscillatoire vue précédemment achevée. On assiste à une première étape de diminution en loi de puissance du temps qui est suivie, pour peu que la contrainte soit suffisante et que le temps d'observation soit assez grand, par un minimum temporel correspondant à un changement qualitatif du comportement du matériau. L'abscisse temporelle de ce minimum augmente lorsque la contrainte diminue. La dernière étape qui fait suite à ce minimum peut amener le matériau à l'écoulement.

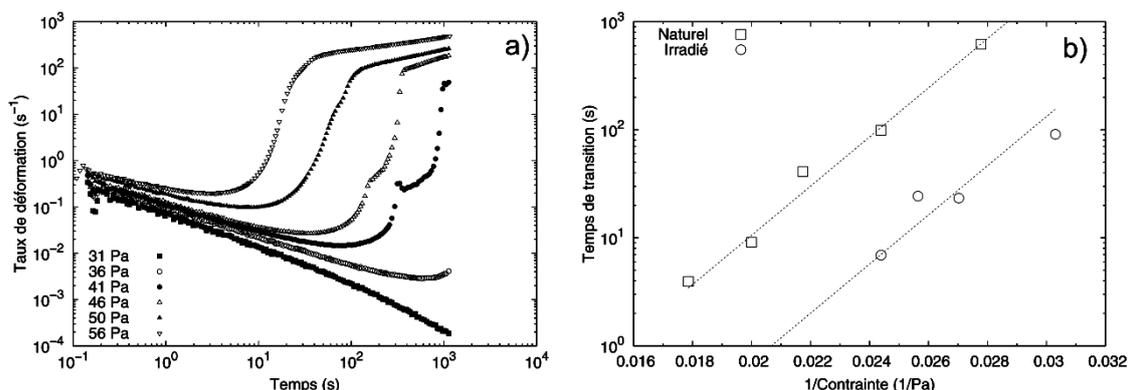


Figure 4. a. Evolution du taux de déformation calculé à partir des essais de fluage (cas du sédiment naturel). b. Evolution de la position temporelle du minimum du taux de déformation pour les sédiments naturel et irradié.

Ce minimum est la seule quantité objective mesurable déjà rapportée par CATON & BARAVIAN (2007) pour d'autres fluides et qui a été appelée temps de transition. Cela dit, il reste à connaître l'organisation locale qu'adopte le matériau au sein de l'entrefer jusqu'à ce que ce temps soit atteint. Le graphique en échelle semi-logarithmique donnant l'évolution du temps de transition en fonction de l'inverse de la contrainte τ appliquée (figure 4.b) présente une même évolution selon une loi exponentielle de la forme $a \cdot \exp(b/\tau)$ pour les sédiments naturel et irradié. Ce qui est étonnant c'est que les deux matériaux semblent être caractérisés par une même valeur de b . La valeur de a diffère car, les matériaux ne présentant pas le même niveau de résistance mécanique, il est logique d'obtenir des temps de transition d'autant plus courts que le niveau de résistance est faible.

Ces résultats soulignent donc l'importance de l'échelle de temps d'observation dans le processus de transition solide/liquide à conditions structurelles initiales données (degré de seuil et de thixotropie), et confirme l'intérêt d'être en mesure de caractériser la dynamique de déformation/rupture lors d'essais d'érosion plutôt que d'observer un enlèvement de matière.

4. Conclusion

Les essais d'écoulement sont des essais simples de mise en œuvre qui permettent d'obtenir, pour peu que l'on exploite un domaine de valeurs de vitesse de cisaillement suffisamment grand, une première description d'un matériau. Les essais réalisés ont montré que les sédiments étudiés étaient des fluides à seuil thixotropes et qu'un traitement par irradiation gamma conduit à une réduction importante du niveau de résistance du sédiment, du fait de l'endommagement des éléments stabilisants inhérents à la présence de microorganismes. Des essais complémentaires en fluage ont été réalisés pour suivre les dynamiques d'évolution de la structure du sédiment au cours du vieillissement et de la transition solide/liquide. Une loi d'évolution en puissance du temps et exponentielle en inverse de la contrainte appliquée a respectivement été identifiée pour ces deux cas. Le fait le plus remarquable est que les dynamiques ne semblent pas affectées par le traitement par irradiation gamma.

Sur la base de ces résultats, un travail de mise au point de fluides modèles transparents a été entrepris et a débouché sur une méthode de préparation de deux fluides modèles à partir d'eau, de glycérol, de carbopol (polymère) et de laponite (argile de synthèse de type hectorite). Les deux derniers constituants sont des additifs très utilisés en rhéologie. Une description détaillée en est faite par PIAU (2007) et MONGONDRY (2003). Les premières caractérisations montrent que l'on est en présence d'un fluide à seuil simple et d'un fluide à seuil thixotrope avec des valeurs de contrainte seuil voisines. La caractérisation des dynamiques fera l'objet d'une étude ultérieure. Cette dernière sera menée à partir de suivis particuliers de traceurs pour deux modes de sollicitation mécanique, l'un en érosion, l'autre en rhéométrie. Compte tenu des

résultats présentés, un intérêt particulier sera porté à la manière dont un saut en contrainte est pratiqué, de manière graduelle ou instantanée.

5. Références bibliographiques

- CATON F., BARAVIAN C. (2007). *Du vieillissement à la rupture des fluides à seuils*, 42ème colloque du Groupe Français de Rhéologie, Clermont-Ferrant.
- COUSSOT P., NGUYEN Q.D., HUYNH H.T., BONN D. (2002). *Viscosity bifurcation in thixotropic, yielding fluids*. Journal of Rheology, 46(3), pp 573-589. doi:10.1122/1.1459447
- MONGONDRY P. (2003). *Structure et comportement rhéologique des suspensions aqueuses de Laponite en présence de plusieurs additifs*. Thèse, Université du Maine
- NICKERSON C.S, KORNFELD J.A. (2005). *A "cleat" geometry for suppressing wall slip*, Journal of Rheology, 49(4), pp 865-874. doi:10.1122/1.1917846
- OVARLEZ G., RODTS S., CHATEAU X., COUSSOT P. (2009). *Phenomenology and physical origin of shear localization and shear banding in complex fluids*. Rheologica Acta, 48(8), pp 831-844. doi:10.1007/s00397-008-0344-6
- PHAM VAN BANG D., OVARLEZ G., TOCQUER L. (2007). *Effets de la densité et de la structuration sur les caractéristiques rhéologique de la vase*. La houille blanche, 2, pp 85-93. doi:10.1051/lhb:2007023
- PIAU J.M (2007). *Carbopol gels: Elastoviscoplastic and slippery glasses made of individual swollen sponges meso- and macroscopic properties, constitutive equations and scaling laws*. Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics, 144, pp 1-29. doi:10.1016/j.jnnfm.2007.02.011
- POUV K.S., BESQ A., GUILLOU S. (2009). *Outils rhéo-optiques pour la caractérisation macroscopique et locale de matériaux transparents*. 44ème colloque du Groupe Français de Rhéologie, Strasbourg.
- RAYNAUD J.S., MOUCHERONT P., BAUDEZ J.C., BERTRAND F., GUILBAUD J.P., COUSSOT P. (2002). *Direct determination by NMR of the thixotropic and yielding behavior of suspensions*. Journal of Rheology, 46(3), pp 709-732. doi:10.1122/1.1463420
- TOLHURST T.J., BLACK K.S., PATERSON D.M., MITCHENER H.J., TERMAAT G.R., SHAYLER S.A. (2000). *A comparison and measurement standardisation of four in situ devices for determining the erosion shear stress of intertidal sediments*. Continental Shelf Research, 20(10-11), pp 1397-1418. doi:10.1016/S0278-4343(00)00029-7
- UHLHERR P.H.T., GUO J., TIU C., ZHANG X.M., ZHOU J.Z.Q., FANG T.N. (2005). *The shear-induced solid-liquid transition in yield stress materials with chemically different structures*. Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics, 125(2-3), pp 101-119. doi:10.1016/j.jnnfm.2004.09.009
- WINTERWERP J.C., VAN KESTEREN W.G.M. (2004) *Introduction to the physics of cohesive sediment dynamics in the marine environment*, Elsevier, 576 p.