

La rhéologie au service de l'amélioration des épandages de boues résiduaireuses pâteuses : résultats d'expériences sur maquette

Hervé Tabuteau^a, Jean-Christophe Baudez^a et Philippe Coussot^b

Chacun d'entre nous rejette quotidiennement des eaux usées qui génèrent des boues résiduaireuses après traitement en station d'épuration. L'élimination de ces déchets est au cœur du débat social. Leur mise en décharge est désormais interdite et les gestionnaires de station d'épuration privilégient deux voies d'élimination : l'incinération – non traitée ici – et la valorisation agricole. D'un abord plus écologique que l'incinération, la valorisation agricole est la filière retenue par les petites et moyennes stations d'épuration, ce qui représente plus de la moitié du volume de boues produites. Cependant, compte tenu de l'instauration du principe de précaution que nous connaissons tous, la réglementation est stricte : seules les boues ayant une valeur fertilisante sont épandues, en respectant un plan d'épandage qui intègre les besoins agronomiques des cultures, le type de sol et les apports d'engrais déjà effectués. Pour aider la collectivité à recycler ses déchets, l'agriculteur utilise les boues comme un amendement complémentaire qui doit répondre à ses exigences agronomiques et donc être correctement épandu.

Or, trop souvent encore, on assiste plus à une évacuation des boues hors de la station d'épuration qu'à une fertilisation contrôlée, dans la mesure où d'une part, les capacités de stockage en station sont systématiquement sous-évaluées (Baudez, 2003), et d'autre part, faute de matériel performant et adapté, la régularité d'épandage est aléatoire, tant longitudinalement que transversalement, (Thiron et Chabot, 2003). En effet, l'essentiel du parc de matériel utilisé pour les

boues est dérivé des épandeurs utilisés pour les fumiers, notamment ceux équipés de table d'épandage. Cependant, ces deux matériaux sont fort différents du point de vue de leur structure. Les premiers s'apparentent à des solides qui se déforment peu, tandis que les boues sont des fluides aux propriétés complexes mal définies, (Baudez, 2001).

Si la valorisation agricole des boues veut être pérenne, il faut que l'agriculteur soit satisfait et trouve son compte dans l'opération : la répartition au champ doit être conforme à ses attentes, sans surdosage excessif, quelle que soit la nature de la boue. Le prestataire d'épandage doit idéalement être en mesure de quantifier les caractéristiques du matériau à épandre et, en fonction de celles-ci, de régler son épandeur correctement pour obtenir une répartition uniforme du matériau sur le champ. Aussi, pour optimiser les procédés d'épandage, la conception du matériel doit permettre des réglages aisés et rapides sur la base des caractéristiques d'écoulement du matériau, elles-mêmes facilement mesurables. Nous sommes ici face à un problème à deux entrées : d'une part, quelles sont les caractéristiques rhéologiques pertinentes et d'autre part, sur quels critères doivent s'appuyer les réglages ?

Notre étude s'est ainsi focalisée sur le comportement de la boue sur le disque d'épandage, pour étudier la répartition transversale ; la répartition longitudinale fera l'objet de travaux à venir. Au stade actuel, nous nous sommes limités au cas très simple d'une maquette équipée d'un disque

Les contacts

a. Cemagref, UR Technologies, systèmes d'information et procédés pour l'agriculture et l'agroalimentaire, Domaine des Palaquins, 03150 Montoldre
b. Laboratoire commun CNRS/ENPC/LCPC, Laboratoire des matériaux et des structures du génie civil, 2, allée Kepler, 77420 Champs-sur-Marne

lisse, sans pales, et nous avons scindé notre approche en deux phases. La première s'est orientée vers l'étude du matériau, au cours de laquelle nous avons démontré qu'à l'instar de nombreux autres matériaux pâteux, les boues résiduairees présentent une brutale transition entre un comportement viscoélastique solide et un comportement visqueux, et que cette transition se produit systématiquement pour une contrainte critique que l'on dénomme τ_c .

La seconde phase s'est intéressée au matériel proprement dit, où nous avons pris en considération ce comportement rhéologique particulier pour étudier plus spécifiquement l'étalement de plusieurs produits sur le disque, en utilisant une maquette instrumentée. Nous avons mis en évidence l'existence de lois d'échelle : il suffit dès lors de déterminer la contrainte critique définie précédemment pour déduire les paramètres nécessaires à l'étalement du matériau sur le disque, et donc de prédire les réglages idoines des épandeurs en fonction des caractéristiques de la boue.

La caractérisation rhéologique des boues résiduairees

Parce que longtemps considérées comme un produit sans grande valeur ajoutée, l'intérêt porté aux boues résiduairees est assez récent, notamment du point de vue bibliographique, et les quelques travaux déjà réalisés dans le domaine de la rhéologie portent essentiellement sur les boues liquides, soit dans le cadre de l'optimisation des procédés de traitement, où les paramètres rhéologiques peuvent affecter les opérations de filtration, d'épaississement ou de déshydratation, (Frost et Owens, 1982 ; Campbell et Crescuolo, 1982, 1983), soit pour le calcul des pertes de charge dans le cadre de la réalisation de systèmes de pompages, (Carthew *et al.*, 1983 ; Mulbarger *et al.*, 1981). Ces études montrent que les boues résiduairees suffisamment épaisses (cependant liquides) ont un comportement non newtonien, à seuil et souvent thixotrope, (Campbell et Crescuolo, 1982 ; Colin *et al.*, 1976).

Plusieurs modèles ont été proposés pour décrire leur comportement. Les plus courants sont de trois types :

- Ostwald pseudo-plastique (Hatfield, 1938 ; Behn, 1962 ; Valioulis, 1980) ;
- Bingham plastique (Babbitt, 1939 ; Geinopolos et Katz, 1964 ; Frost et Owens, 1982 ; Spinosa *et al.*, 1989 ; Battistoni, 1997) ;

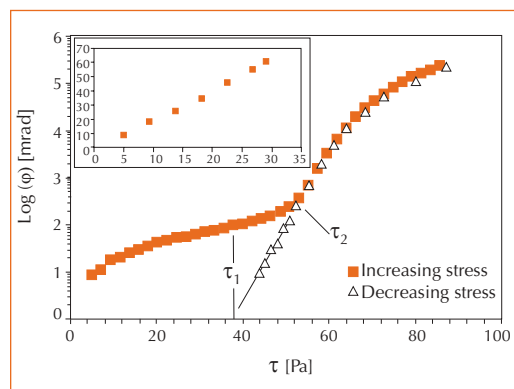
– Herschel-Bulkley (Johnson, 1961 ; Mulbarger *et al.*, 1981).

Dans le cas des boues pâteuses, les données bibliographiques sont encore moins nombreuses, (Poitou *et al.*, 1997 ; Baudez, 2001 ; Baudez et Cousot, 2001 ; Chaari *et al.*, 2003). Les rares résultats publiés montrent que ces matériaux sont viscoélastiques à seuil, dont les caractéristiques mécaniques dépendent davantage des interactions entre constituants solides que de la concentration en matière sèche, habituellement utilisée pour définir la boue. Cependant, quelle que soit leur origine ou leur composition, trois régimes d'écoulement (figure 1) peuvent être systématiquement définis pour les boues pâteuses :

- $\tau < \tau_1$ viscoélastique linéaire
- $\tau_1 < \tau < \tau_2$ viscoélastique non linéaire
- $\tau_2 < \tau$ purement visqueux

Ce comportement particulier signifie qu'avant que le boue ne s'écoule de manière homogène, elle se sera d'abord déformée en bloc avant de se liquéfier progressivement jusqu'à ressembler à un liquide. Ces résultats ont cependant été obtenus en supposant un cisaillement homogène du matériau dans tout l'entrefer lorsqu'on applique une contrainte au niveau du mobile. Des avancées nouvelles montrent qu'en fait de nombreux matériaux présentent des hétérogénéités au niveau de leur mode d'écoulement, (Raynaud

▼ Figure 1 – Angle de rotation en fonction de la contrainte appliquée pour respectivement des rampes par paliers croissants entrecoupés de courtes périodes de repos et de rampes par paliers décroissants sans repos. L'encart indique le comportement linéaire aux faibles contraintes.



et al., 2002 ; Coussot et al., 2002). Aussi, pour approfondir les connaissances sur la rhéologie des boues résiduaireuses, nous avons appliqué une nouvelle méthode de reconstruction du profil des vitesses, (Baudez et al., 2004), validée par IRM. Le principe consiste à utiliser un rhéomètre à contrainte contrôlée, muni d'une géométrie à cylindres coaxiaux à large entrefer et à imposer plusieurs séries de tests similaires sous différentes amplitudes de contrainte de cisaillement.

Nous avons utilisé dans le cas présent un rhéomètre Paar-Physica MC1+, équipé d'une géométrie couette à large entrefer (12 mm), et à surfaces rugueuses pour éviter le glissement. Systématiquement, la boue a été précisailée à 800 tours/mn pendant 10 mn puis laissée au repos pendant 30 mn avant d'être introduite dans le cylindre. Ce protocole préliminaire permet d'homogénéiser le matériau de manière à avoir des mesures les plus reproductibles possibles. Ensuite, le matériau est introduit dans le rhéomètre puis précisailé à nouveau à 300 tours/mn pendant 2 mn, et laissé ensuite au repos pendant 1 mn avant d'imposer une contrainte de cisaillement pendant 1 mn. Cette séquence « précisaillement-repos-palier de contrainte », qui assure d'avoir un état initial du matériau identique à chaque fois, est reproduite plusieurs fois de suite avec des niveaux de contrainte variables mais inférieurs au premier qui sert de référence. Ces niveaux de contraintes sont choisis de manière à avoir une résolution graphique suffisante, sachant que la contrainte varie comme l'inverse du carré du rayon du mobile (1).

$$\tau = \frac{M_i}{2\pi R_i^2 L} = \frac{M_1}{2\pi R_1^2 L} \Leftrightarrow M_i R_i^2 = M_1 R_1^2 \Leftrightarrow R_i = R_1 \cdot \sqrt{\frac{M_1}{M_i}} \quad (1)$$

La technique a été décrite en détails par Baudez et al. (2004). Enfin, pour éviter que le matériau ne sèche pendant l'expérience qui dure relativement longtemps (environ 2 h), l'échantillon est recouvert d'un film de paraffine. La comparaison des niveaux de contrainte mesurés pendant la phase de précisaillement permet en outre de vérifier qu'aucun effet perturbateur relatif aux caractéristiques du matériau ne vient biaiser les mesures.

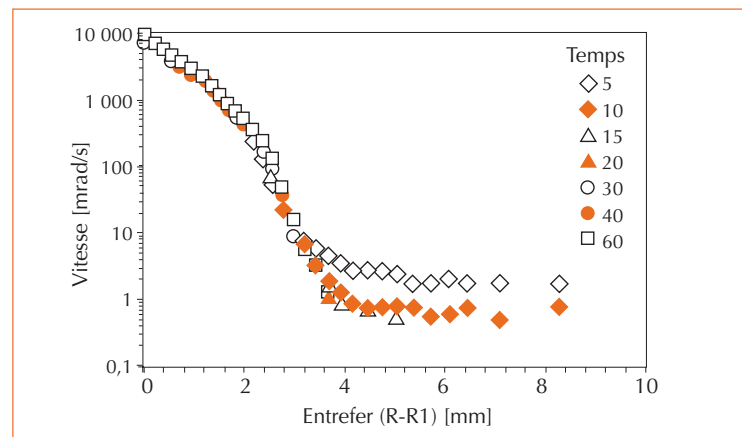
Expérimentalement, on mesure l'angle de rotation ϕ_i du mobile pour chaque palier de couple appliqué M_i et, considérant le couple maximal appli-

qué comme référence, on calcule la vitesse de rotation v_i à différents temps à partir de l'angle ϕ_i et de la position R_i dans l'entrefer. On reconstruit ainsi le profil des vitesses dans l'entrefer (figure 2) avec l'équation suivante :

$$v_i(t) = f(R_i) \Leftrightarrow \frac{\partial(\phi_i \cdot R_i)}{\partial t} = f\left(R_i \cdot \sqrt{\frac{M_1}{M_i}}\right) \quad (2)$$

La reconstruction du profil des vitesses au cours du temps s'avère particulièrement intéressante et novatrice pour définir le comportement rhéologique des matériaux complexes tels que les boues pâteuses : durant les premiers instants (figure 2), le matériau semble cisailé sur une longue distance, puis progressivement, il se produit une séparation en deux zones. La première, proche du mobile, s'écoule en régime permanent avec une vitesse non nulle tandis que pour la seconde, la vitesse de rotation s'annule. Sur la figure 2, après 15 secondes, on n'enregistre plus de vitesse au-delà de 4 mm d'entrefer : il apparaît une brutale rupture de pente dans le profil des vitesses qui s'apparente, en régime permanent, à une courbe tronquée. À l'instar de nombreux autres matériaux, (Baudez et Coussot, 2004), les boues résiduaireuses présentent donc une dualité de comportement. Elles sont viscoélastiques solides ou liquides et la transition entre ces deux états est abrupte : le matériau devient liquide et s'écoule quasi instantanément à une vitesse de cisaillement supérieure à une vitesse critique.

▼ Figure 2 – Profil de vitesse au sein de l'échantillon lorsqu'une contrainte est appliquée. Rapidement une transition a lieu et au-delà de 15 secondes, on n'enregistre plus de vitesse de rotation au-delà de 4 mm. Dans la partie fluide, le régime permanent est immédiatement atteint, toutes les courbes se superposent.



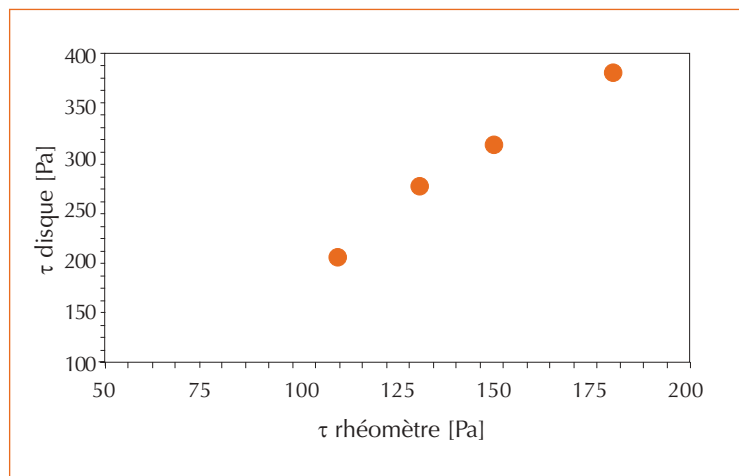
Cette transition élastique-liquide résulte essentiellement de la propagation de la zone d'interface. Aux premiers instants, tout l'échantillon est viscoélastique solide. Le déplacement de cet interface est en fait le fruit des propriétés temporelles de la phase solide (viscoélastique) du matériau (Baudez et Coussot, 2004). Cette interface est, comme on va le voir par la suite, de première importance dans l'analyse du comportement de la boue sur le disque, dans la mesure où seule la partie visqueuse peut s'étaler : une zone de fracture se propage dans l'échantillon.

Application à l'épandage sur un disque rotatif

Nous avons conçu une maquette simplifiée d'une table d'épandage à partir d'un disque de 40 cm de diamètre, relié à un moteur électrique piloté par un variateur de vitesse et un temporisateur. Une caméra vidéo rapide (250 images par secondes) est située au choix, à la verticale ou à l'horizontale du disque, de manière à visualiser l'étalement du volume par le dessus ou la diminution de la surface libre par le côté.

La vitesse maximale du disque et la durée de la rampe pour atteindre cette vitesse sont programmées via un boîtier de commande. Un échantillon de matériau de forme cylindrique (H, R) est placé au centre du disque, puis le disque est mis en rotation. Plusieurs expériences sont réalisées, en faisant varier le matériau, le volume initial (hauteur, rayon), la vitesse maximale et la pente de la rampe pour atteindre cette dernière. Dans toutes les expériences qui ont été faites ici, nous avons utilisé du gel de Carbopol qui a exactement les mêmes propriétés rhéologiques

▼ Figure 3 – Relation linéaire de pente 2 entre le seuil de contrainte en élongation, calculé à partir des expériences sur le disque, et le seuil de contrainte en cisaillement, mesuré au rhéomètre.



qu'une boue pâteuse (Baudez, 2001), et qui est plus souple d'utilisation car non fermentescible : on peut reproduire les tests à loisirs et comparer les résultats.

Aux instants initiaux, dès le démarrage du disque, on a un écoulement radial, de sorte qu'en coordonnées polaires, l'équation du mouvement (3) s'écrit :

$$\frac{\partial \tau}{\partial z} = -\rho \omega^2 r$$

$$\Leftrightarrow \tau(r, z) = \rho \omega^2 \cdot r(H - z) \quad (3)$$

Au fur et à mesure de l'accélération, la contrainte en tout point augmente, le matériau se déforme d'abord élastiquement, mais l'écoulement ne démarre que lorsque la contrainte critique (en élongation) $\tau_{c,e}$ est dépassée au point de coordonnées $(R, 0)$, c'est-à-dire lorsque la vitesse de rotation atteint une valeur critique :

$$\tau_{c,e} = \rho \omega_c^2 \cdot RH \Leftrightarrow \omega_c = \sqrt{\frac{\tau_{c,e}}{\rho RH}} \quad (4)$$

Aux faibles contraintes, le comportement rhéologique du matériau est celui d'un solide viscoélastique, comme nous l'avons démontré dans la partie précédente. Dans ce cas (Hibbeler, 1991), la contrainte maximale que l'on peut imposer selon une direction normale est égale à la moitié de la pression appliquée, ce qui entraîne que la contrainte en élongation est égale à deux fois la contrainte en cisaillement. La figure 3 montre que la contrainte de rupture sur le disque est ainsi égale à deux fois la contrainte critique mesurée au rhéomètre.

Aussi l'équation (4) devient :

$$\omega_c = \sqrt{\frac{2 \cdot \tau_c}{\rho RH}} \quad \text{où } \tau_c \text{ est la contrainte critique mesurée au rhéomètre.}$$

Connaissant ω_c et la pente de la rampe d'accélération imposée au disque, on détermine alors de manière indépendante le temps critique t_c à partir duquel l'écoulement démarre.

$$t_c = \frac{1}{\alpha} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot \tau_c}{\rho RH}} \quad \text{avec } \omega = \alpha \cdot t \text{ où } \alpha \text{ est la pente de la rampe de vitesse appliquée.}$$

Cette valeur est utilisée dans toute la suite pour adimensionnaliser les données temporelles,

(figure 4). L'étalement ne démarre ainsi que pour un temps caractéristique égal à un, ce qui permet par la suite de comparer les différents résultats entre eux.

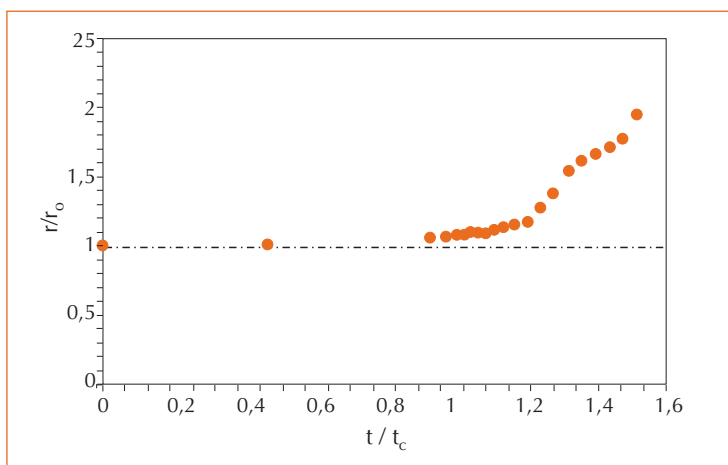
Sous une forme adimensionnelle, on montre que quel que soit le volume de matériau utilisé, (figures 5 et 6), l'étalement ne démarre que lorsque la contrainte transmise au matériau dépasse la contrainte critique. Une fois le matériau en écoulement, l'équation (3) n'est plus valable, et donc, la contrainte calculée ne correspond plus à la contrainte réelle, ce qui explique la décroissance de la courbe.

La mise en évidence de lois d'échelle en utilisant des critères adimensionnels pour étudier l'étalement de matériaux pâteux sur un disque en rotation permet une importante simplification du problème. Il n'est pas nécessaire de multiplier les volumes d'échantillon ou les rampes de vitesses, sachant qu'il existe des similitudes entre les données. Il suffit désormais de fixer un gabarit et une rampe d'accélération et de se focaliser uniquement sur les caractéristiques intrinsèques des matériaux. Comme précédemment, quelle que soit la consistance du matériau, l'étalement ne démarre que lorsque la contrainte régissant le passage d'un solide viscoélastique à un liquide visqueux a été franchie (figure 7, page 54) pour une vitesse de rotation critique qui correspond à un temps critique nécessaire pour atteindre cette vitesse lors de la rampe d'accélération, lui-même calculé indépendamment des expériences sur le disque.

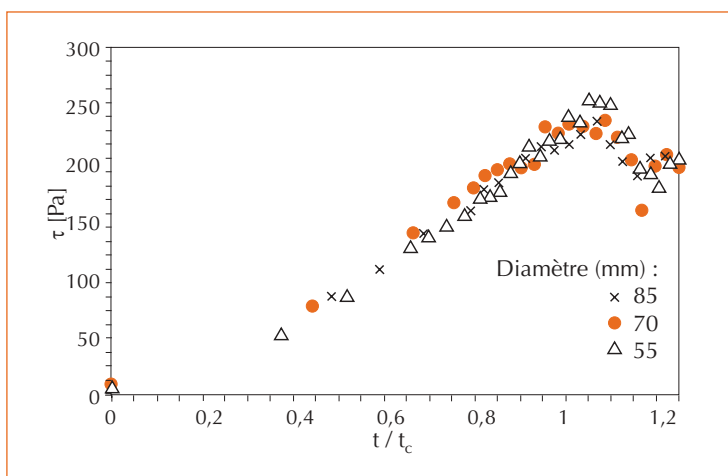
Bien qu'établis en utilisant des gels, biologiquement et mécaniquement plus stables, tous ces résultats sont valables sur des boues résiduaire, (figure 8, page 54). On retrouve les lois d'échelle précédentes, en adimensionnalisant les données par le rayon initial et le temps critique, lui-même calculé à partir de la vitesse de rotation.

Cependant, comme déjà évoqué précédemment, lorsque l'étalement a démarré, l'équation (3) n'est plus valide. Il faut tenir compte des effets inertiels. Considérant qu'à chaque instant, la contrainte appliquée au fluide en mouvement est égale à la contrainte critique, un rapide bilan des forces

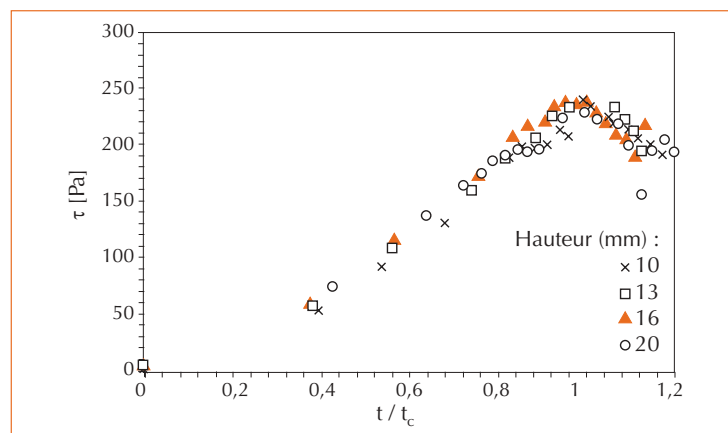
► Figure 6 – Comportement du matériau sur le disque pour plusieurs hauteurs initiales.



▲ Figure 4 – Évolution du rayon adimensionnel du cylindre de matériau en fonction du temps adimensionnel d'expérimentation, déterminé en calculant le temps critique t_c .



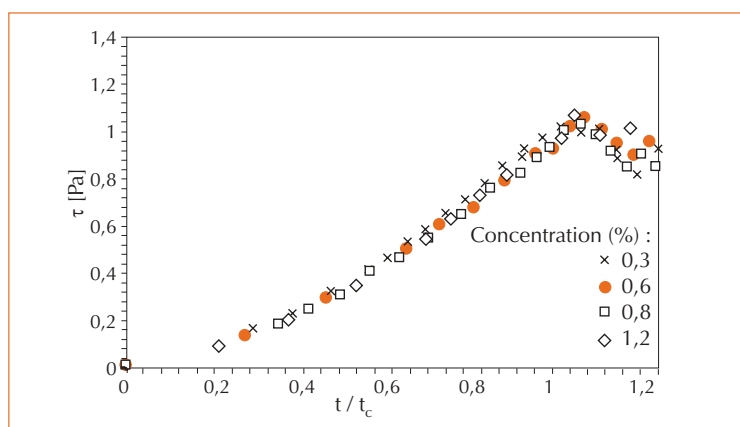
▲ Figure 5 – Comportement du matériau sur le disque pour plusieurs rayons initiaux. Sous forme adimensionnelle, l'étalement démarre systématiquement au même moment.



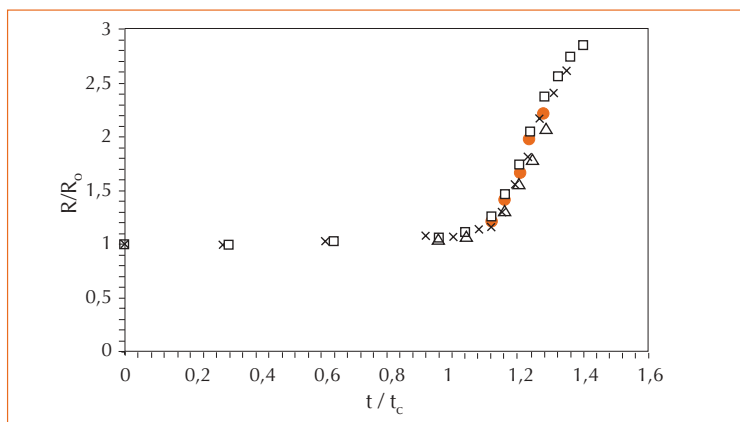
permet d'aboutir à l'équation du mouvement suivante :

$$\frac{\tau_c}{\rho} = h\omega^2 r + gh \frac{dh}{dr} \quad (5)$$

La résolution numérique de cette équation, par simulation, est la prochaine étape des travaux de recherche en cours sur l'épandage centrifuge des matériaux organiques complexes, tels que les boues de station d'épuration.



▲ Figure 7 – Étalement sur le disque de plusieurs matériaux, élaborés à partir de carbopol de concentration variable. Sous forme adimensionnelle, l'étalement débute systématiquement lorsque la contrainte critique est dépassée, après un temps critique lié à la rampe d'accélération.



▲ Figure 8 – Évolution du rayon d'étalement adimensionnel en fonction du temps d'accélération pour une boue pâteuse.

Conclusion

À l'instar de nombreux autres matériaux pâteux, les boues résiduaire présentent un comportement dual, où se succèdent une partie viscoélastique solide et une partie visqueuse. La transition entre ces états est abrupte et se produit pour une contrainte de cisaillement critique au-delà de laquelle le matériau se comporte comme un liquide qui atteint quasi immédiatement une vitesse d'écoulement en régime permanent.

Pendant l'épandage, que nous avons reproduit de manière simplifiée grâce à une maquette, la dualité de comportement devient flagrante. La boue résiduaire ne se déforme pas tant que la vitesse n'a pas dépassé une vitesse critique, intimement liée à la contrainte de cisaillement critique définie précédemment. Au-delà de cette vitesse, une partie du matériau s'écoule brutalement, tandis qu'une autre, plus proche de l'axe de rotation, et de fait soumise à des contraintes de cisaillement inférieures au seuil ne s'écoule pas.

Dès lors, il suffit de connaître un unique paramètre, la contrainte critique de la boue à épandre, pour déterminer la vitesse de rotation à appliquer au disque de manière à ce que la majeure partie du volume s'écoule. Ce résultat va à l'encontre de nombreuses idées reçues sur la difficulté d'épandre des boues à cause de leur comportement aléatoire, difficilement maîtrisable. On sait désormais que qualitativement, la plupart des boues sont rhéologiquement semblables et qu'un unique critère, le seuil de contrainte, est nécessaire pour prédire les conditions de démarrage de l'étalement. Il reste désormais à comprendre et modéliser l'étalement sur le disque, de manière à définir les conditions expérimentales permettant d'amener le matériau à la périphérie du disque avec une vitesse non nulle, condition *sine qua non* pour que l'épandage (éjection du matériau) ait effectivement lieu.

Lorsque tous les phénomènes inhérents à l'étalement d'un fluide sur un disque, équipé ou non de pales, seront maîtrisés, le passage à une phase plus industrielle, où l'épandage se fera en conditions réelles, permettra de valider le bien-fondé de notre démarche. □

Résumé

Dans cet article, l'épandage des boues de station d'épuration est étudié sous l'angle mécanique, en se focalisant sur la table d'épandage et en prenant en compte les caractéristiques rhéologiques du matériau. On montre d'abord que les boues pâteuses présentent un comportement dual où se mêlent une partie viscoélastique solide et une partie visqueuse. La transition brutale entre ces deux états s'opère pour une contrainte critique qui s'avère de première importance pour l'étude de l'épandage. En effet, sur les disques en rotation d'une table d'épandage, le matériau ne se déforme que de manière élastique partiellement réversible tant que cette contrainte n'est pas dépassée, et au-delà, l'étalement est brusque. On montre enfin qu'en normalisant les caractéristiques rhéologiques et les paramètres de réglage du disque, quel que soit le matériau, l'étalement démarre systématiquement au même moment, lorsque la vitesse dépasse une vitesse critique qui peut être déterminée indépendamment des expériences avec le disque.

Abstract

Agricultural reuse of pasty sewage sludge is analyzed in the mechanical viewpoint. We first present a new concept of rheological characterisation which shows that these materials present a dual behavior with both viscoelastic solid-like and viscous liquid-like parts. The abrupt transition occurs at a critical shear stress which is of importance to study the spreading. On a rotating disk, the material flows abruptly only when the critical shear stress is reached. We finally show that in a dimensionless form, the spreading starts always at a critical point which can be easily determined independently.

Bibliographie

- BABBIT, H.-E., 1939, *Laminar Flow of Sludges in Pipes with Special Reference to Sewage Sludge*, Eng. Experimental Station, Univ. of Illinois, Urbana, USA.
- BAUDEZ, J.-C. ; COUSSOT, P., 2001, Rheology of aging, concentrated, polymeric suspensions: application to pasty sewage sludges, *J. Rheol.*, 45, p. 1123-1140.
- BAUDEZ, J.-C., 2001, *Rhéologie et physico-chimie des boues résiduaires pâteuses pour l'étude du stockage et de l'épandage*, thèse de doctorat, Engref, Paris, 235 p.
- BAUDEZ, J.-C. ; COUSSOT, P., 2004, Abrupt transition from viscoelastic solid-like to liquid-like behavior in jammed materials, soumis à *Physical Review Letters*.
- BAUDEZ, J.-C. ; RODTS, S. ; CHATEAU, X. ; COUSSOT, P., 2004, A new technique for reconstructing instantaneous velocity profiles from viscometric tests – Application to pasty materials, *Journal of Rheology*, 48, 1, p. 69-82.
- BEHN, V.-C., 1962, Experimental Determination of Sludge Flow Parameters, *J. of Sanitary Eng. Div.*, Proceedings of ASCE, SA3, p. 39-54.
- CAMPBELL, H.-W.; CRESCUOLLO, P.-J., 1982, The Use of Rheology for Sludge Characterization, *Wat. Sci. Tech.*, 14, p. 475-489.
- CHAARI, F. ; RACINEUX, G. ; POITOU, A. ; CHAOUICHE, M., 2003, Rheological behavior of sewage sludge and strain induced dewatering, *Rheol. Acta*, 42, p. 273-279.
- COLIN, F.; CORNIER, J.-C. ; DANIEL, J.-L. ; JACQUART, J.-C. ; LEFORT, D. ; MATHIAN, R. ; BRAUNSTEIN, J.-P., 1976, Caractérisation des Boues Résiduaires. Travaux Français dans le cadre de l'action européenne, *Tech. Sci. Mun.*, 1, p. 3-23.

COUSSOT, P. ; RAYNAUD, J.-S. ; BERTRAND, F. ; MOUCHERONT, P. ; GUILBAUD, J.-P. ; HUYNH, H.-T. ; JARNY, S. ; LESUEUR, D., 2002, Coexistence of liquid and solid phases in flowing soft-glassy materials, *Phys. Rev. Lett.*, 88, p. 218-301.

FROST, R.-C. ; OWENS, J.-A., 1982, A Method of Estimating Viscosity and Designing Pumping Systems for Thickened Heterogeneous Sludges, *8th Int. Conf. Hydr. Trans. Solids in Pipes*, Johannesburg, SA, p. 485-501.

GEINOPOLOS, A. ; KATZ, W.-J., 1964, A Study of the Rotating Cylinder Sludge Collector in the Dissolved Air Flotation Process, *J.W.P.C.F.*, 36, 6, p. 712-721.

HATFIELD, W.-B., 1938, The Viscosity of Pseudoplastic Properties of Sewage Sludges, *Sewage Works J.*, 10, p. 3-25.

HIBBELER, R.-C., 1991, *Mechanics of material*, Macmillan ed, New York.

JOHNSON, M., 1961, *First Report on the W.R.C. Sewage Sludge in Landfills*, IAWPRC Sludge Mgt. Conference, Loyola Marymount Univ. Los Angeles, USA.

MULBARGER, M.-G. ; COPAS, S.-R. ; KORDIC, J.-R. ; CASH, F.-M., 1981, Pipeline Friction Losses for Wastewater Sludges, *J.W.P.C.F.*, 53, p. 1303-1313.

POITOU, A. ; RACINEUX, G. ; BURLION, N., 1997, Identification and measurement of pastes rheological properties, effects of water dissociation, *Wat. Sci. Technol.*, 36, 11, p. 19-26.

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, *J. Rheol.*, 46, p. 709-732.

SPINOSA, L. ; SANTORI, M. ; LOTITO, V., 1989, Rheological Characterization of Sewage Sludges, *Recycling Int.*, K.-J. Thomékozmiensky, 2, p. 847-854.

THIRION, F. ; CHABOT, F., 2003, *Épandage des boues résiduelles et effluents organiques. Matériels et pratiques*, Cemagref Éditions, 191 p.

THIRION, F. ; CHABOT, F. ; ZWAENEPOEL, P., 1998, *Integrated weighting platform for manure spreader regulation*, International Conference on Agricultural Engineering, Oslo.

VALIOULIS, I., 1980, *Relationship between Settling, Dewatering and Rheological Properties of Activated Sludge*, Master of Science Thesis, Cornell Univ., Ithaca, New-York, USA.