

POURQUOI LES BOUES NE TIENNENT PAS EN TAS

Jean-Christophe Baudez
Cemagref

Le stockage des boues résiduaires en station d'épuration est l'indispensable tampon entre l'offre, une production continue, et la demande, une valorisation agricole ou énergétique, discontinue, qui régule les besoins. Les stockages doivent donc être de volume suffisant. Or, ceux-ci sont rapidement saturés parce que les boues ne tiennent pas en tas. L'article présenté ici explique ce phénomène et montre qu'au final, une boue, pâteuse ou solide non chaulée, ne peut tenir en tas, compte-tenu de sa structure. On explique au passage que la lixiviation est une conséquence de l'affaissement des tas de boue.

Sewage sludge is the residue of wastewater treatment, which must be stored before reused in agriculture or incineration. But storage areas appear often under-dimensioned due to creep flow of sludge. In this paper, we intend to demonstrate that a sludge can't be stored in heap because its flowing structure. Using rheometric experiments with pasty sludge and pressure filtration with non-limed solid sludge, we demonstrate that a sludge is deformed as long as an external stress is applied, whichever its structure. Moreover, we show that fermentation affects the heap behavior: the sludge is more fluid during aging, but paradoxically, solid-liquid interactions are stronger. Finally we highlight that leaching is a consequence of the creep flow of sludge in storage areas.

INTRODUCTION

Le traitement des eaux résiduaires urbaines génère des boues dont la teneur en eau dépasse les 95 % avant traitement. Pour limiter les volumes à stocker, mais aussi pour faciliter les opérations de reprise pour la valorisation par l'épandage ou l'incinération, les boues sont déshydratées avant d'être stockées dans l'attente d'une réutilisation. Or, il s'avère souvent que les boues doivent être évacuées avant l'échéance prévue, parce que les aires de stockage sont saturées : les boues s'affaissent sous leur propre poids et les tas n'excèdent pas un mètre de hauteur. Pour stocker les boues produites sur

un semestre avec de telles hauteurs de tas, il faudrait des surfaces considérables, ce qui grèverait les coûts de génie civil lors de la construction des stations d'épuration. Nombre de gestionnaires de station d'épuration sont ainsi confrontés à ce problème récurrent : les boues ne tiennent pas en tas, et il faut les évacuer en catastrophe, en attendant de trouver une solution au problème, pour éviter d'arrêter la filière de traitement en amont.

L'objectif de cet article est de démontrer qu'une boue résiduaire, de par sa nature, ne peut pas tenir en tas, quelle que soit sa consistance, solide ou pâteuse. La première partie sera consacrée aux boues pâteuses. On montrera à l'aide de la rhéologie que ces matériaux, dès qu'ils sont soumis à une contrainte extérieure, se déforment continuellement sous l'action conjuguée d'une composante élastique et d'une composante visqueuse. On soulignera également le rôle de la fermentation, naturelle, qui accélère la déformation pour une même contrainte appliquée. La seconde partie traitera des boues solides non chaulées. En utilisant la filtration sous pression, on montrera qu'à l'instar des boues pâteuses, les boues solides se déforment continuellement, certes plus lentement, et ne tiennent également pas en tas.

LES BOUES PÂTEUSES

Matériels et méthodes

À partir de divers échantillons prélevés dans plusieurs stations d'épuration de taille moyenne, des tests de fluage ont été effectués avec un rhéomètre Paar Physica MCI+, équipé d'une géométrie à cylindres coaxiaux à large entrefer et à surfaces rugueuses pour éviter le glissement aux parois. Pour chaque échantillon, un pré-saisissement à 5 tours par minute pendant deux minutes est effectué avant de laisser la boue au repos pendant 20 mn, de manière à avoir un état « zéro » de référence pour chaque test. Ce test préliminaire permet des mesures répétitives avec une excellente cohérence des résultats.

À l'issue du repos, des paliers de contrainte croissants, de 1 minute chacun, entrecoupés de courtes périodes de repos, de 10 secondes, sont appliqués et on mesure l'angle de rotation du mobile du rhéomètre en fonction du temps d'application de la contrainte. On privilégie ici l'angle de rotation, φ car il n'est pas sûr que la déformation, γ soit homogène au sein du matériau, [Liu et al., 1996].

Résultats et discussion

L'application d'une contrainte constante sur un échantillon de boue engendre un déplacement du mobile, représenté par l'angle de rotation φ en fonction du temps. La courbe représentative $\varphi = f(t)$ est concave et ne dépend que du temps d'application de la contrainte tant que celle-ci reste inférieure à une première contrainte critique τ_1 (fig.1) : les courbes $\frac{\varphi}{\tau}$ se superposent. τ_1 représente le seuil de contrainte au delà de laquelle la boue s'écoule de manière continue, [Baudez, 2001].

En dessous de τ_1 le comportement rhéologique de la boue est semblable à celui d'un solide viscoélastique, et il peut-être représenté (fig. 2) par un modèle de Burgers à 4 paramètres [Baudez, 2001] :

$$\frac{\gamma}{\tau} = \frac{1}{G_0} + \frac{1}{G_1} \left(1 - \exp\left(-\frac{G_1}{\mu_1} t\right) \right) + \frac{t}{\mu_0} \tag{1}$$

$$\Leftrightarrow \frac{\varphi}{\tau} = \alpha + \beta \cdot (1 - \exp(-\kappa \cdot t)) + \delta \cdot t$$

Pour des contraintes supérieures à τ_1 , la courbe $\varphi = f(t)$ possède un point d'inflexion (fig. 1) au delà duquel on peut définir une vitesse de rotation constante pour chaque contrainte appliquée. Ce point d'inflexion apparaît d'autant plus tôt que la contrainte est élevée jusqu'à une seconde contrainte critique τ_2 au delà de laquelle la courbe est uniquement convexe (fig. 3). Lorsqu'elle est convexe, la courbe $\varphi = f(t)$ tend vers une droite asymptote : la vitesse de déformation se stabilise et la boue s'écoule en régime permanent : elle a un comportement purement visqueux, [Baudez et Coussot, 2001].

Connaissant la réponse du matériau à une contrainte, considérons une couche d'épaisseur de boue au sein du tas. Elle subit de la part des couches supérieures une contrainte égale à la masse des couches sus-jacentes divisée par la surface de cette couche δz .

Soumise à cette contrainte, la couche se déforme, mais elle n'a qu'un seul degré de liberté : s'étaler latéralement, (fig. 4), car les couches inférieures l'empêchent de s'enfoncer, (principe de l'action et de la réaction). Cette expansion entraîne une augmentation de la surface de la couche considérée et donc à une diminution de la contrainte appliquée. La boue tend vers un état d'équilibre, pour minimiser la contrainte extérieure qu'elle subit. Au

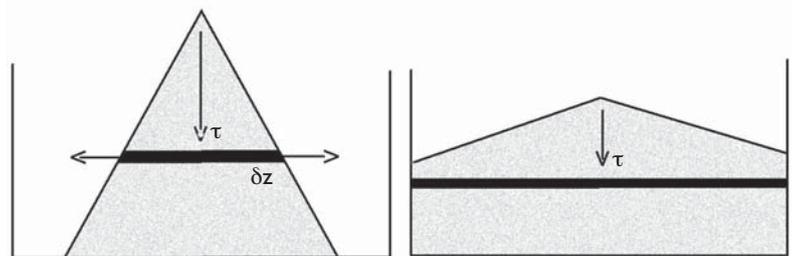


Figure 4 : Schématisation de l'étalement de la boue, sous son propre poids, au stockage

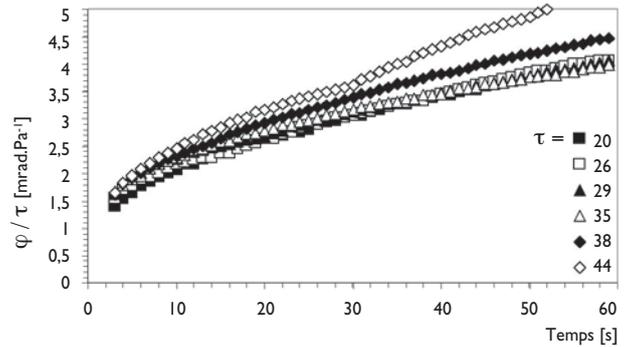


Figure 1 : Rapport de l'angle de déformation et de la contrainte en fonction du temps pour plusieurs niveaux de contraintes. Les courbes se superposent pour des contraintes inférieures à τ_1 . Au delà de la contrainte τ_1 , un point d'inflexion apparaît sur la courbe

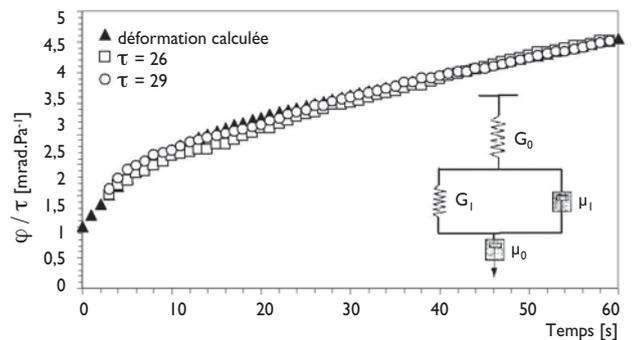


Figure 2 : Schématisation du modèle de Burgers et comparaison entre la mesure et le calcul

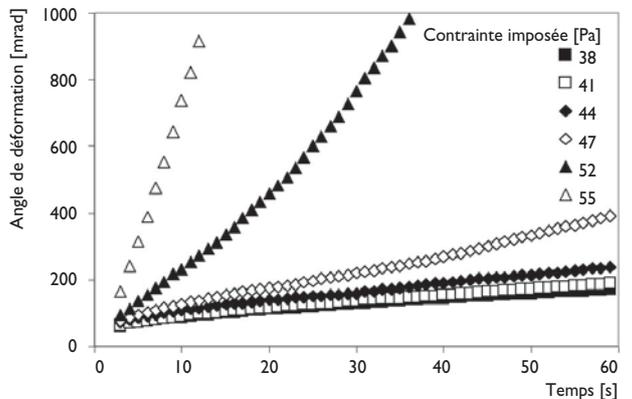


Figure 3 : Angle de déformation en fonction du temps pour des contraintes supérieures à τ_1

stockage, le régime de déformation est toujours un régime linéaire, sous la contrainte τ_1 .

Sous cette contrainte, le ratio $\frac{\gamma}{\tau}$ n'est fonction que du temps : quelle que soit la contrainte appliquée sur la couche δz la déformation est continue et le tas s'affaisse. L'effondrement dure jusqu'à ce que le matériau atteigne les parois de l'aire de stockage (la boue n'a alors plus aucun degré de liberté pour se déformer).

La production de boue étant continue, la masse de boue sus-jacente à la couche δz augmente sans cesse : la contrainte appliquée sur cette couche considérée est de plus en plus intense. Ce qui implique que la déformation est d'autant plus rapide que la production de boue est élevée. Le tas s'affaisse donc d'autant plus vite lui aussi. Enfin, au cours du stockage, une fermentation naturelle se produit, une synthèse d'acides gras volatils a lieu, ce qui induit une liquéfaction de la boue. Pour étudier les effets du vieillissement sur le comportement rhéologique, nous avons analysé trois paramètres représentatifs du régime viscoélastique linéaire $\tau < \tau_1$. Dans le cas présent, les temps d'expérimentation sont longs (plusieurs semaines) : le terme en exponentielle négative du modèle de Burgers étant rapidement négligeable (à partir de 20 secondes) le comportement se rapproche d'un modèle de Maxwell simple :

$$\tau < \tau_1, \frac{\gamma}{\tau} = \frac{1}{G} + \frac{t}{\mu} \quad (2)$$

$$\Leftrightarrow \frac{\varphi}{\tau} = (\alpha + \beta) + \delta \cdot t = \psi + \delta \cdot t$$

Les 3 paramètres représentatifs sont donc $1/\psi$, $1/\delta$, τ_1 , les deux premiers étant mathématiquement liés à l'élasticité et à la viscosité dans la transformation $\psi \leftrightarrow \gamma$. On observe que les paramètres viscoélastiques diminuent avec le temps de stockage selon une loi de puissance de même exposant que la contrainte τ_1 (fig. 5).

$$\frac{\tau_1(t)}{\tau_1^0} = \frac{G(t)}{G_0} + \frac{\mu(t)}{\mu_0} = (1+t)^{-\alpha_0} \quad (3)$$

Au cours du stockage la boue résiduaire se fluidifie, bien que sa concentration solide reste constante, [Baudez, 2001]. La déformation s'accélère, à contrainte appliquée constante, avec l'âge de la boue, ce qui accentue l'effondrement des tas.

Ainsi, la boue stockée se déforme sous l'action de son propre poids, et ce, d'autant plus rapidement que la production est élevée et que la boue est vieille.

Il est raisonnable de penser que si on déshydrate davantage la boue, on va se prémunir de ces problèmes : le comportement viscoélastique linéaire va disparaître au profit d'un comportement plutôt élastique et le comportement sera davantage solide. De plus, avec moins d'eau, les bactéries seront moins mobiles et le vieillissement va être ralenti. Dans cette optique, nous avons donc aussi analysé le comportement des boues solides au stockage.

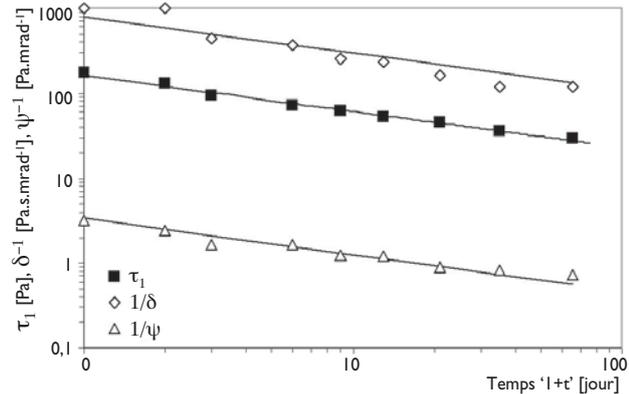


Figure 5 : Evolution des paramètres viscoélastiques en fonction du temps de stockage

LES BOUES SOLIDES

Matériels et méthodes

Les matériaux utilisés ici sont des boues originellement pâteuses, déshydratées sous 3 bars avec un filtre à bandes presseuses. Les boues ont au départ une consistance pâteuse-solide que l'on va déshydrater fortement de manière à étudier le comportement au stockage des boues solides, lorsqu'elles sont soumises à de fortes contraintes. Les tests ont été réalisés avec un appareil à volume de chambre variable : une pression normale est appliquée sur l'échantillon par l'intermédiaire d'un piston. La quantité d'eau extraite ainsi que la course du piston sont enregistrés en continu pendant toute la durée de l'expérience.

La boue a été scindée en deux groupes et l'un d'eux a été mis à fermenter dans un bocal hermétique, dans une étuve à 40°C de manière à accélérer le vieillissement du matériau.

Sur un échantillon du matériau frais, nous avons d'abord appliqué des paliers de pression successifs de 5, 10, 15 et 20 bars, d'une durée de 75 minutes chacun. Ensuite, toujours sur le matériau frais, n'ayant pas subi les tests précédents, nous avons appliqué une pression unique, 30 bars, pendant 15 heures, pour tenter d'atteindre les limites de déshydratation. Cette même expérience, sous 30 bars, a ensuite été réalisée sur la boue vieillie.

Résultats et discussion

Lorsqu'on applique des paliers de pression successifs, quelle que soit la pression appliquée, la course du piston, proportionnelle à la quantité d'eau extraite, est continue et monotone, (fig. 6 page suivante). Par la suite, on parlera davantage du volume d'eau extrait que de la course du piston, plus représentatif des phénomènes se produisant au stockage.

La quantité d'eau extraite dépend davantage de la durée pendant laquelle la pression est appliquée que de l'intensité de la pression elle-même. Si on cale une loi de puissance sur chacune des portions de courbes corres-

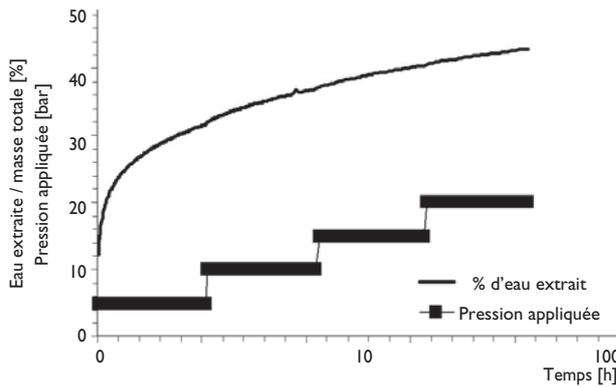


Figure 6 : Filtration sous pression d'un échantillon de boue. La pression augmente par paliers et la quantité d'eau extraite est continue

pendant aux 30 dernières minutes de chaque palier de pression, de manière à être en régime permanent, sans modification de l'origine des temps, les paramètres du modèle sont constants, et ne dépendent pas de la pression (tableau 1).

La consolidation du matériau n'est ainsi fonction que du temps de compression et non pas de l'intensité de la pression, c'est à dire du réarrangement lent des particules (fluage) : tout se passe comme si la pression appliquée par le piston n'était pas transmise au fluide mais était supportée par le squelette déformable des particules au contact qui expulsent l'eau en se réorganisant. On retrouve ainsi l'un des résultats de Rouquerol, [1996], pour qui les limites de déshydratation ne sont pas attribuables à des barrières d'énergies élevées des liaisons eau-matière mais plutôt aux propriétés de déformation du floc.

En appliquant une pression de 30 bars en continu pendant 15 heures sur un échantillon la boue ne cesse de se comprimer et d'expulser de l'eau (fig. 7) : en 15 heures, l'état (théorique) de compaction maximale, où l'on ne peut plus extraire d'eau, n'est pas atteint.

À ce stade, deux résultats peuvent être déduits. D'abord, la boue solide se déforme continuellement sous une pression constante. Tout comme la boue pâteuse, elle flue. Ensuite, en se déformant, lorsqu'elle n'a aucun degré de liberté, la boue expulse de l'eau jusqu'à ce qu'elle ne puisse plus se comprimer (théorique-

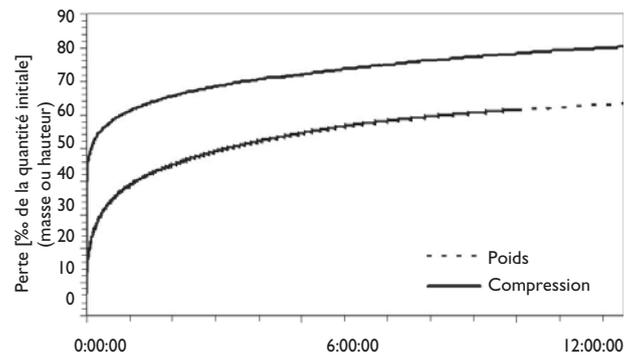


Figure 7 : Pertes en eau et compression de la boue sous 30 bars

ment, ce stade n'ayant pas été atteint au cours de nos essais).

Dans le cas des boues solides, comme dans le cas des boues pâteuses, lorsque la boue s'est étalée jusqu'à atteindre les parois de l'aire de stockage, elle ne peut plus s'étaler. Chaque couche est pourtant soumise aux contraintes imposées par les couches supérieures : le matériau se réorganise en expulsant de l'eau, pour s'opposer à la contrainte. Ces observations rejoignent les résultats de Cossé et al., (2001), sur des boues solides stockées au champ pendant un an. Ils ont tous observés un tassement du tas ainsi qu'une augmentation de la teneur en matière sèche avec la profondeur, jusqu'à 30 %.

Les résultats de Wuart et Effendiatz, (1998), sont encore plus explicites. Ils ont suivi pendant six mois un stockage couvert de boue résiduaire pâteuse, (environ 8 tonnes), possédant un fond drainant afin de récupérer les lixiviats. Ils ont recueilli une importante quantité d'eau, notamment en début d'essai, (cf. tableau 2).

La diminution de la quantité d'eau extraite au cours de cet essai est due en partie au vieillissement de la boue : plus la boue est âgée, à pression appliquée égale, moins elle relargue d'eau, (fig. 8 page suivante).

Ainsi, au stockage, par l'action simultanée du vieillissement et des contraintes exercées par les couches supérieures, la boue s'étale jusqu'à atteindre les parois, (fig. 4). Ensuite, privée de tout degré de liberté, la boue

Tableau 1 : Volume d'eau extrait en fonction du temps, pour différentes pressions appliquées, en régime permanent

Pression appliquée	Plage de temps	Modèle puissance	R ²
5 bars	00:45:04 - 01:14:24	$v = 53,17.t^{0,175}$	0,9999
10 bars	02:01:01 - 02:31:07	$v = 56,76.t^{0,190}$	0,9994
15 bars	03:15:15 - 03:45:21	$v = 58,28.t^{0,197}$	0,9995
20 bars	04:27:30 - 04:57:34	$v = 57,46.t^{0,185}$	0,9994

Tableau 2 : Quantité de lixiviats recueillie pendant 6 mois pour un stockage couvert de 8 tonnes environ

	Lixiviats (litres)	Lixiviats cumulés (l)	Lixiviats cumulés (%)
Mois 1	326	326	50%
Mois 2	114	440	67%
Mois 3	86	526	80%
Mois 4	69	595	90%
Mois 5	39	634	96%
Mois 6	24	658	100%
TOTAL	658		100%

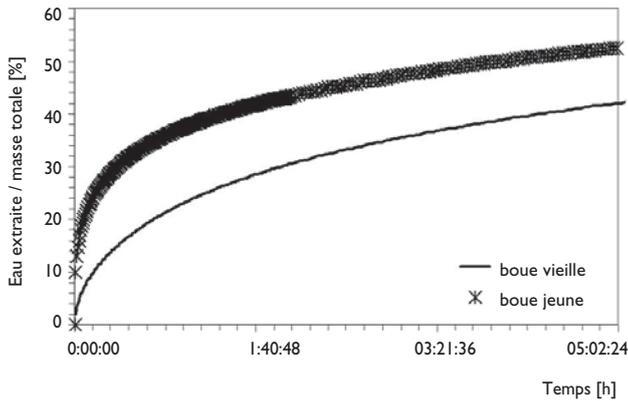


Figure 8 : Eau extraite sur une boue à deux âges différents

se réorganise en expulsant de l'eau pour s'opposer aux effets de la pression. En expulsant de l'eau, l'épaisseur de la couche diminue. Globalement le tas continue de s'affaisser, mais d'autant plus lentement que la boue est âgée, car il est plus difficile d'extraire de l'eau sur une boue vieille que sur une boue jeune, ce qui, au passage, explique les difficultés de déshydratation des boues en station d'épuration après un arrêt prolongée de la chaîne de traitement.

CONCLUSION

À l'aide de tests rhéologiques et de filtration sous pression, nous avons montré qu'une boue résiduaire, pâteuse ou solide, se déforme sous son propre poids. A l'intérieur du tas, une couche de boue est soumise à la pression exercée par les couches supérieures. Si elle possède un degré de liberté, cette couche s'étale, de manière à minimiser la contrainte exercée. Lorsque les parois de l'aire de stockage sont atteintes, la boue n'a plus aucun degré de liberté pour se mouvoir. Pour s'opposer à la contrainte qu'il subit, le matériau se réorganise en expulsant de l'eau. Dans les deux cas, l'épaisseur considérée diminue, et globalement, le tas s'affaisse. De plus, composée d'eau et de matières organiques, la boue fermente naturellement, ce qui entraîne une fluidification : le tas s'affaisse d'autant plus vite que la boue est vieille, mais, paradoxalement, les liaisons eau-solide sont plus fortes : il est plus difficile d'extraire de l'eau sur une boue âgée que sur une boue jeune, en appliquant la même pression.

Ces travaux montrent que malgré l'optimisation des outils de déshydratation, une boue résiduaire ne peut pas tenir en tas, parce que c'est un matériau qui flue. Plus la boue sera sèche, plus lente sera la déformation, mais elle est néanmoins inexorable. Pour des stockages prolongés de plusieurs mois, 9 en moyenne dans le cas de la valorisation agricole, quelle que soit la consistance de la boue, le tas s'affaisse.

D'autres pistes sont à rechercher pour contourner ce problème. Le chaulage pourrait en être une, car il enlève

ve toute élasticité à la boue, mais encore faudrait-il que le mélange chaux-boue soit homogène, ce qui n'est pas toujours le cas.

Jean-Christophe Baudez

Cemagref - Domaine des Palaquins, 03150 Montoldre

Bibliographie

Baudez, J. C., 2001, *Rhéologie et physico-chimie des boues résiduaires pâteuses pour l'étude du stockage et de l'épandage* - Thèse de Doctorat de l'Engref, Paris. 235 p.

Baudez, J. C., Coussot, P., 2001, *Rheology of aging, concentrated, polymeric suspensions - Application to pasty sewage sludge* - J. Rheol. 45, 1123-1140

Cosse, E., Prud'homme, D., Lecorre, V., Goubet, J. J., Wiart, J., 2001, *Évolution d'une boue d'épuration solide stockée au champ pendant un an - Suivi qualitatif et quantitatif des lixiviats produits* - Colloque Logistique des épandages, des effluent d'élevages, des boues de station d'épuration et des déchets industriels, Vichy, 216-222

Liu, A. J., Ramaswamy G., Gang, H., Weitz, D. A., 1996, *Anomalous viscous loss in emulsions* - Phys. Rev. Lett., 76, 16, 3017-3020.

Rouquerol, F., 1996, *Communication personnelle. Réunion Step 2000. Cité par Legrand, V., 1997, Étude du gonflement et de la floculation de gels de polyelectrolytes : application à la déshydratation des boues de station d'épuration* - Thèse de doctorat, Université Paris VI.

Wiard, J., Effendiatz, M., 1998, *Évolution des boues d'épuration pâteuses au cours d'un stockage prolongé et importance des lixiviats produits : Comparaison entre un stockage couvert et non couvert* - TSM, 10, 67-85.0