

Optimiser les traitements des boues : de nouvelles avancées en matière de caractérisation physique

Émilie Dieudé-Fauvel ^a, Jean-Christophe Baudez ^a et Henri Van Damme ^b

En 2000, l'épuration des eaux usées urbaines génère en France environ 850 000 tonnes de matières sèches de boues résiduelles urbaines par an, soit 9 millions de tonnes de boues brutes. Cette production n'a cessé d'augmenter, pour atteindre aujourd'hui les 1,1 millions de tonnes de matières sèches. Pour les professionnels du traitement des eaux usées, l'une des priorités est de limiter les coûts d'élimination, de transport et de stockage inhérents à l'augmentation des volumes produits. Pour ce faire, il est possible d'agir plus particulièrement à deux niveaux : soit améliorer le traitement des boues et notamment l'étape de déshydratation, soit favoriser leur valorisation (principalement agricole) en leur donnant une meilleure maniabilité et un aspect moins repoussant. Cela passe notamment par une caractérisation efficace du matériau et de sa consistance.

La caractérisation des boues résiduelles a fait l'objet de diverses recherches durant ces vingt-cinq dernières années. Les boues présentent une grande variété de composition et de structures. D'un point de vue rhéologique, ce sont des matériaux viscoélastiques dont le comportement est qualitativement indépendant de la composition (Baudez, 2001). À l'échelle du laboratoire, le comportement mécanique des boues est déterminé par rhéométrie. Sur le terrain, pour caractériser plus aisément leur consistance, le principal critère utilisé à ce jour est la siccité,

selon la norme NF U44-041. Néanmoins, il a été démontré que la fraction solide est un critère insuffisant (Spinosa et Wichman, 2004) : d'autres paramètres doivent être pris en compte en plus de la teneur en eau, tels que la teneur en matières grasses (Baudez, 2001) ou la force ionique (Forster, 1982, 1983, 2002).

Ainsi, étant donné les besoins des professionnels du domaine des boues, l'objectif du travail présenté ici est de trouver une solution au problème de caractérisation physique rencontré sur le terrain : il s'agira de mettre au point des outils performants utilisables à la fois en laboratoire et *in situ*, avec la possibilité de réaliser des mesures sur les lignes de traitement.

La démarche mise en place se base sur les résultats bibliographiques antérieurs. Les rôles majeurs des matières grasses et de la teneur en eau ainsi que de la force ionique ont été démontrés. Or, il s'avère que les premières présentent des caractéristiques isolantes, alors que la fraction minérale des boues (qui fait écho à la force ionique) est plutôt conductrice. En nous inspirant d'autres domaines (alimentaire, génie civil, science des sols) et à partir de telles données, nous avons choisi d'utiliser un nouvel outil pour la caractérisation des boues résiduelles : la spectroscopie d'impédance électrique (EIS¹) et les mesures de conductivité. Cette étude vise donc à démontrer comment le couplage entre mesures électriques et rhéologiques (encadré 1) peut améliorer la caractérisation des boues.

1. Electrical impedance spectroscopy.

Les contacts

a. Cemagref Clermont-Ferrand, UR TSCF, Technologies et systèmes d'information pour les agrosystèmes, Domaine des Palaquins, 03150 Montoldre
b. ESPCI, École supérieure de physique et de chimie industrielles, 10 rue Vauquelin, 75231 Paris Cedex 5

Encadré 1

D'un point de vue théorique, des analogies entre les domaines électriques et rhéologiques sont connues

En effet, il existe un parallèle entre :

- contrainte τ et intensité i ,
- déformation γ et tension u
- complaisance J et résistance R
- viscosité η et capacité C .

Ainsi, à partir d'une équation rhéologique, en procédant aux substitutions ci-dessus, une équation électrique sera obtenue. Cependant, il est aisé de démontrer qu'il n'y a pas de relation directe entre les équations équivalentes. De plus, en considérant une particule à l'état stationnaire au sein d'un électrolyte, l'égalité entre les forces électriques et de frottement (Stokes) permet d'obtenir une relation de proportionnalité inverse entre viscosité (d'un fluide newtonien) et conductivité :

$$\sigma = \frac{1}{\rho} = \frac{nq^2}{6\pi\eta r}$$

Pour un fluide newtonien de type électrolyte, il existe donc une relation de proportionnalité inverse entre conductivité et viscosité.

Matériels et méthodes

Différents matériels et méthodes ont été mis en place. L'influence de plusieurs paramètres sur le comportement électrique et rhéologique des boues a été déterminée : température, siccité, vieillissement et sels.

Matériaux et physico-chimie

Des boues résiduelles, d'origine et d'âge différents ont été analysées. Elles ont été prélevées dans différentes stations, en Allier, après déshydratation ou dans le bassin d'aération. La siccité moyenne est de 15 % pour les boues pâteuses et de 4 % pour les liquides. Elle a été déterminée par séchage à 60° C pendant 72 heures (ASAE² Standards, 1999).

Étant donnés les objectifs de nos expérimentations, les matériaux ont d'abord été homogénéisés grâce à un long cisaillement (20 minutes à 100 rpm³ à l'aide d'un mélangeur Rayneri Turbotest) avant d'être préparés de la façon suivante :

– température : les échantillons ont été placés dans un bain thermostatique et soumis à une rampe lente de température allant de 4 à 35° C. La limite supérieure a été définie de manière à limiter l'évaporation ;

– siccité : différentes concentrations de boues ont été préparées à partir d'un même échantillon en utilisant de l'eau déminéralisée ;

– vieillissement : une quantité suffisante de boue fraîche a été prélevée puis laissée au repos dans un récipient clos de manière à reproduire les conditions de stockage anaérobie. Les échantillons sont prélevés après différents temps de stockage ;

– ajout de sel : du chlorure de potassium a été ajouté en différentes concentrations, de 0 à 22,3 % de la masse initiale de matières sèches de la boue pour modifier la concentration de charges libres.

À l'exception des tests de vieillissement, tous les échantillons ont été stockés à 4° C de façon à limiter la fermentation.

De plus, le pH⁴, la siccité et la température sont des paramètres systématiquement déterminés pour chacune des mesures.

Rhéologie

Les mesures rhéologiques ont été réalisées avec un rhéomètre MCR300 (Paar Physica) équipé de cylindres coaxiaux à large entrefer et surfaces rugueuses (rayon interne de 12,5 mm, rayon

2. American Society of Agricultural Engineers.

3. En anglais, *revolution per minute* ou *rotation per minute* : unité pour mesurer une vitesse de rotation.

4. Potentiel hydrogène.

externe de 19,5 mm, longueur de 70 mm) (photo 1). Une telle géométrie permet de comparer une large gamme de matériaux (de très liquides à pâteux), de s'affranchir des hétérogénéités des boues en utilisant un volume suffisant d'échantillon et de minimiser les pertes par évaporation.

Pour éviter les changements dus à l'évolution chimique et microbiologique des boues, des tests rapides étaient nécessaires. De plus, à l'exception de l'analyse de l'effet de la température, les mesures ont été réalisées à 6° C.

Les grandeurs étudiées en rhéologie sont le module de rigidité G et la viscosité apparente η mesurée pour un gradient de vitesse $\dot{\gamma}$ égal à 100 s⁻¹. Les protocoles respectifs sont les suivants :

– mesure du module de rigidité. Il a été déterminé lors de mesures à faible déformation en appliquant un angle de déformation constant. La contrainte résultante évolue alors en fonction du temps (Baudez, 2006) :

$$\tau = G_0 \exp(-bt^n) + kt^m,$$

où chaque terme de l'équation correspondrait à une relaxation (α puis β) par analogie avec les systèmes vitreux. La valeur considérée comme étant le module d'élasticité ou de rigidité du matériau est la constante G_0 . Concrètement, la valeur de G_0 est déterminée à partir d'expériences de 120 secondes ;

– mesure de la viscosité apparente : cisaillement de 2 min à 180 rpm, repos de 1 min,



▲ Photo 1 – Rhéomètre MCR300 avec géométrie Couette.

application d'un gradient de vitesse de 100 s⁻¹ jusqu'à ce que la contrainte atteigne une valeur constante. La viscosité apparente est le ratio entre la contrainte et le gradient de cisaillement ;

– lors de la rampe de température, la boue a été soumise pendant 90 min à un cisaillement constant de 20 mrad⁵.

L'utilisation de la géométrie choisie nécessite de recalculer la contrainte et le gradient de vitesse appliqués ou mesurés. Pour ce faire, les travaux de Piau (1979) et de Coleman *et al.* (1966) ont été utilisés.

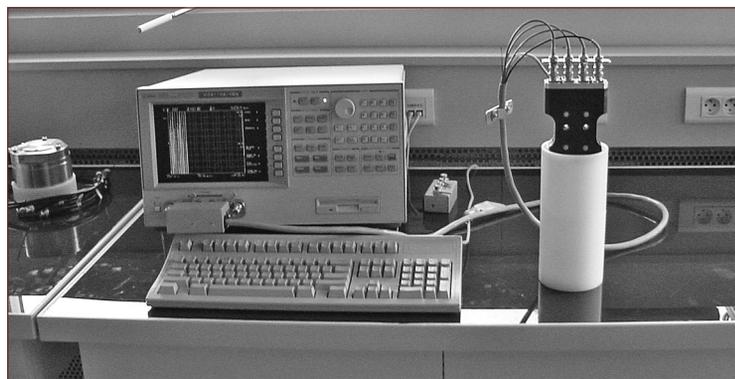
Mesures électriques

La spectroscopie d'impédance électrique consiste à appliquer un courant alternatif en réalisant un balayage en fréquences et en mesurant la réponse du système. Nous avons utilisé un appareil Agilent 4294A Precision Impedance Analyzer, avec une sonde à deux électrodes (diamètre : 2,95 mm, écart : 49,6 mm, longueur immergée : 73,75 mm) (photo 2). Les échantillons sont transférés dans un bécher de 500 mL conçu pour que la sonde reste fixe. Le courant est de 50 mV et les mesures sont réalisées sur une plage de fréquences allant de 40 Hz à 110 MHz. Chaque valeur est la moyenne d'au moins trois mesures, l'écart type étant inférieur à 5 %. La spectroscopie d'impédance permet d'obtenir le module et la phase d'impédance, $|Z|$ et θ . La résistivité ρ est déterminée à partir du module d'impédance selon la relation $|Z| = \rho \frac{L}{S}$ où L est la longueur des électrodes et S la section du bécher.

Parallèlement, des mesures simples de conductivité σ ont également été réalisées (avec un conductimètre WTW LF 530 fonctionnant à une fréquence de 4 kHz).

5. Symbole du milliradian.

▼ Photo 2 – Impédancemètre avec la sonde adaptée.



Pour chaque matériau et chaque paramètre, les propriétés électriques et rhéologiques ont été étudiées séparément puis corrélées. La suite de l'article détaille les résultats les plus marquants : l'évolution de tous les paramètres mesurés ne sera donc pas explicitée.

Résultats

Influence de la température

Pour une boue donnée, viscosité apparente et résistivité évoluent de façon similaire. On distingue deux types de lois en fonction de la consistance initiale de la boue. Pour une boue dite liquide, une loi d'Arrhenius décrit les phénomènes observés alors que pour une boue pâteuse, il s'agit d'une loi de type VTF (Vogel-Tammann-Fulcher) modifiée par ajout d'une constante, ce qui suggère l'existence de transitions vitreuses au sein de la boue. Pour η et ρ , on a :

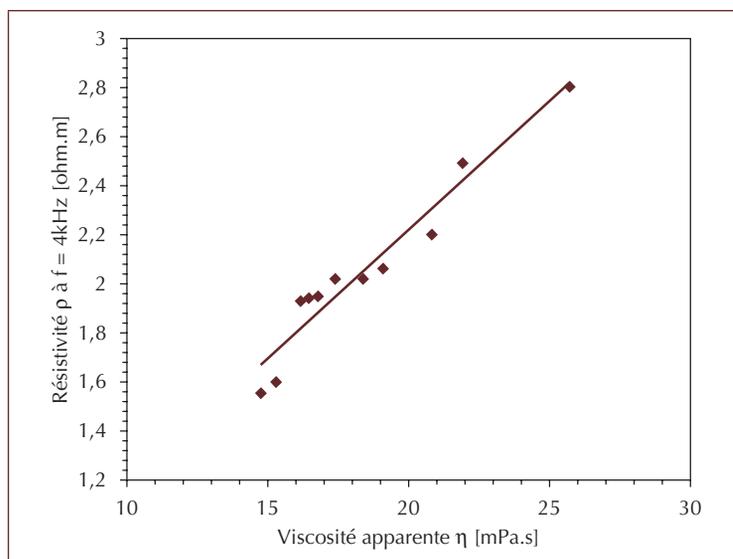
$$k \exp\left(\frac{Ea}{RT}\right) \quad (1)$$

et

$$a \exp\left(\frac{b}{T - T_0}\right) + c \quad (2)$$

où Ea est l'énergie d'activation, T_0 la température de transition vitreuse, k , a , b et c des constantes.

▼ Figure 1 – Résistivité en fonction de la viscosité apparente d'une boue liquide lors d'une rampe croissante de température.



Pour une même boue, les coefficients k , a , b et c diffèrent selon la nature de la variable mesurée (électrique ou rhéologique). Par contre, il y a égalité entre les énergies d'activation des équations électriques et rhéologiques, ce qui permet d'en déduire que ce sont les mêmes mouvements moléculaires et les mêmes interactions qui interviennent d'un point de vue électrique et rhéologique. De plus cela aboutit à une relation linéaire entre viscosité et résistivité (figure 1) :

$$\rho = \frac{1}{\sigma} = k\eta + \lambda \quad (3)$$

Ce type de relation entre viscosité et résistivité (ou conductivité) est similaire au résultat déjà connu sur les liquides (électrolytes). Par analogie, on peut alors poser l'hypothèse selon laquelle, sous l'effet de la température, ce sont surtout les espèces ioniques (charges libres) qui influencent le comportement du matériau (mouvement brownien).

Impact de la siccité

Une nouvelle fois, paramètres électriques et rhéologiques évoluent de façon semblable, selon des lois de puissance :

$$\sigma = a\phi^n \quad (4)$$

et

$$\eta = \alpha\phi^m \quad (5)$$

La corrélation entre ces paramètres suit donc également une loi de puissance (figure 2) :

$$\sigma = K\eta^p \quad (6)$$

Un tel résultat n'est pas sans évoquer la loi d'Archie (1942) qui relie la porosité et la conductivité des roches (matériaux solides) : $\sigma = \sigma_e \Phi^m$, démontrant ainsi le rôle joué par la structure dans la capacité du matériau à conduire le courant.

Vieillessement : impact des charges

Le vieillissement entraîne une fluidification des boues ainsi qu'une augmentation de leur capacité à conduire le courant. De tels résultats

sont notamment attribués à l'impact des micro-organismes qui consomment (et détruisent) les macromolécules présentes dans les boues. Ainsi, il se produit une modification du réseau (moins dense) et une apparition de molécules plus petites et chargées électriquement expliquant l'accroissement de conductivité.

De plus, les analyses physico-chimiques montrent une augmentation de la fraction minérale en lien avec celle du temps de stockage. Le rôle joué par la fraction minérale a été confirmé par le biais d'expériences d'ajout de chlorure de potassium, les résultats étant similaires à ceux obtenus lors du vieillissement. Cela montre aussi comment l'ajout de sels peut engendrer une défloculation des boues et donc leur fluidification, phénomène parfois observé lors du traitement.

En termes de corrélation, on observe une relation linéaire entre résistivité et viscosité des boues liquides et une perte de la linéarité pour les boues pâteuses, ce qui souligne une nouvelle fois l'impact de la structure et des charges libres sur les propriétés électriques des boues (figure 3) :

$$\rho = \frac{1}{\sigma} = a\eta + b \quad (7)$$

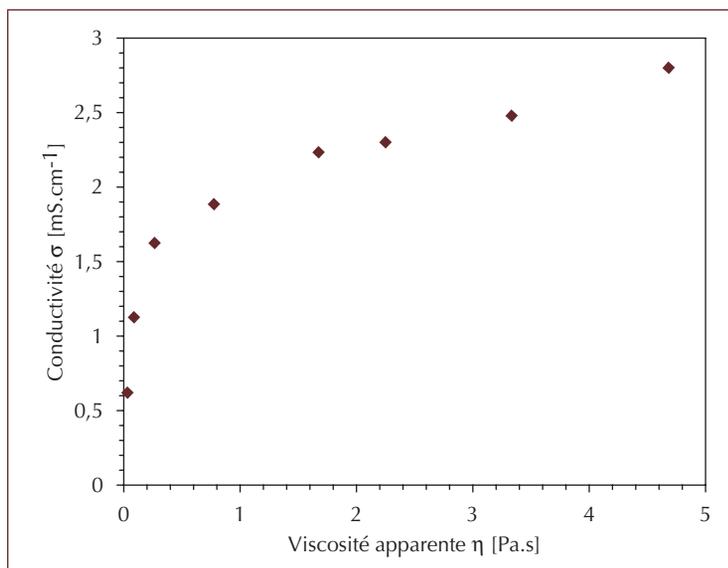
Bilan

Ainsi, en résumant l'ensemble des résultats obtenus à travers cette méthode double d'analyse des boues, on distingue deux sortes de comportements :

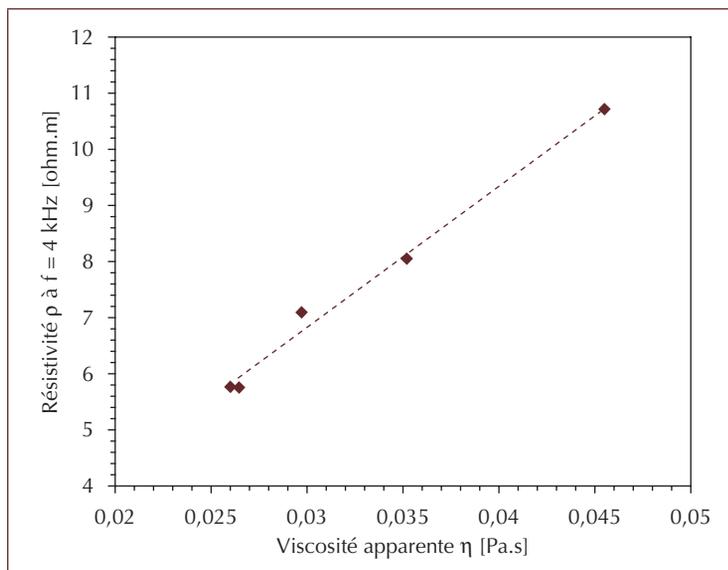
- soit la corrélation entre les grandeurs électriques et rhéologiques est de type liquide avec une relation linéaire ;
- soit elle est de type solide, avec une loi plus complexe, souvent de type loi de puissance.

Outre le lien entre la structure d'un matériau et ses caractéristiques électriques, on observe ici une forme de dualité de comportement avec une alternance liquide-solide illustrant le caractère intermédiaire des matériaux pâteux.

Compte tenu de l'ensemble des résultats obtenus (Dieudé-Fauvel, 2007) et de ce constat, on peut alors exprimer l'hypothèse suivante, selon laquelle la résistivité des matériaux pâteux en général et des boues résiduaires en



▲ Figure 2 – Conductivité en fonction de la viscosité apparente pour différentes dilutions d'une même boue.



▲ Figure 3 – Résistivité en fonction de la viscosité apparente lors du vieillissement d'une boue liquide. Courbe modèle en pointillés.

particulier s'exprime comme une combinaison de la résistivité « solide » du réseau et de celle « liquide » :

$$\rho = x\rho_{structure} + (1-x)\rho_{liquide} \quad (8)$$

Autrement dit :

$$\rho = x\rho_{charges\ liées} + (1-x)\rho_{charges\ libres} \quad (9)$$

Le premier terme reflète l'effet de la concentration (et de la composition de la boue), le second celui des charges et de la température. Ainsi, en reprenant les résultats précédents, la résistivité peut alors s'exprimer comme une fonction complexe de la viscosité :

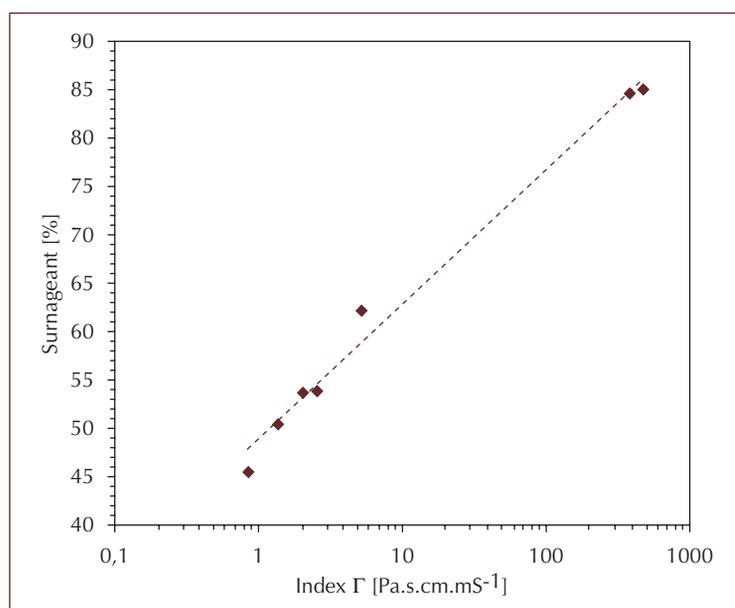
$$\rho = f(\eta^n) + g(\eta) \quad (10)$$

Des travaux ultérieurs ont fait l'objet d'un article et explicitent la relation univoque entre résistivité et viscosité des boues (Dieudé-Fauvel *et al.*, à paraître).

Applications

Alors qu'une simple proportionnalité inverse entre la conductivité et la viscosité des liquides est observée, pour les pâtes et les solides, la relation devient plus complexe, ce qui souligne l'impact de la structure sur les propriétés électriques. Les notions ainsi mises en évidence sont celles de porosité et de connectivité du réseau de particules.

▼ Figure 4 – Surnageant obtenu par centrifugation en fonction de l'indice de déshydratabilité G . Courbe modèle en pointillés ($a = 6,03$; $b = 48,75$; $R^2 = 0,988$).



La déshydratation d'un réseau étant notamment fonction de sa porosité, cela nous ramène à l'une des questions soulevées par les industriels, celle de la déshydratation des boues.

Indice de déshydratabilité

Considérons le paramètre Γ tel que $\Gamma = \rho\eta^p$, ρ étant la résistivité et η la viscosité apparente à 100 s^{-1} et p étant constant pour toutes les boues testées ($p = 2,28$).

Soit s le surnageant obtenu par centrifugation (avec une centrifugeuse Sigma, selon un protocole de $20\ 000\text{ g}$ pendant 30 min à 18° C).

Pour toutes les boues testées, on obtient une relation unique (figure 4) :

$$s = a\ln\Gamma + b = a\ln\rho + a p\ln\eta + b \quad (11)$$

Quelle que soit la boue, le paramètre Γ peut donc être corrélé avec la quantité de surnageant obtenu par centrifugation. Par conséquent, il peut être considéré comme un indicateur du potentiel de déshydratation de la boue testée.

De ce fait, cet indice de déshydratabilité constitue un outil pour l'optimisation du traitement secondaire, incluant la possibilité de faire des mesures en ligne.

Cet indice de déshydratabilité est une première piste. Pour être utilisé concrètement, il devra être testé sur un plus grand nombre d'échantillons. Une autre méthode de déshydratation pourrait également être envisagée (avec une cellule de filtration par exemple).

Transition liquide-pâteux

Un autre résultat de ces travaux est l'obtention d'une définition expérimentale plus précise de la transition entre les états liquides et pâteux des boues.

À travers les mesures rhéologiques, on constate que dès qu'une boue ne sédimente plus, il est possible d'en déterminer le module de rigidité. Par conséquent, une boue ne pourra être définie comme liquide que lorsqu'elle sédimente. Dès qu'elle ne sédimente plus, cela constitue la preuve de l'existence d'un réseau de particules et la boue est considérée comme pâteuse.

Prenons maintenant des boues pâteuses. L'outil de terrain le mieux adapté pour définir leur seuil

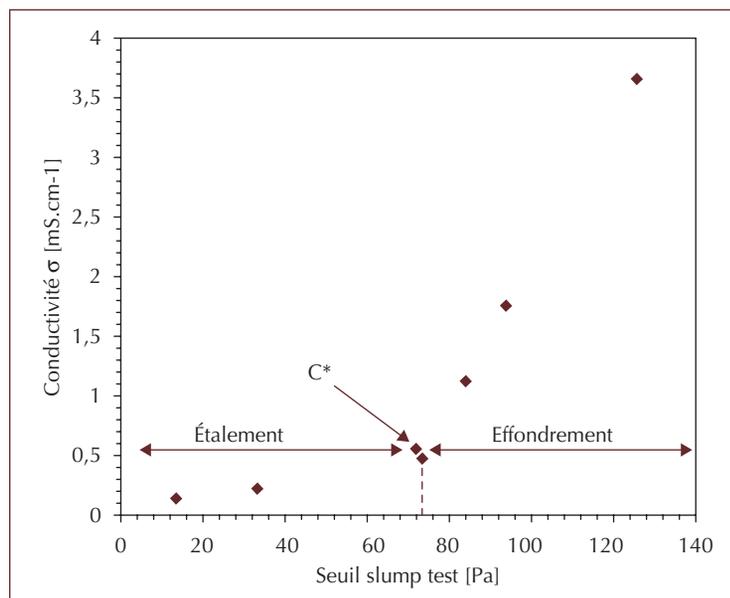
d'écoulement est le *slump test* (Baudez et al., 2004). En utilisant cette méthode, le seuil des boues les plus fluides est défini par étalement et celui des boues plus consistantes, par effondrement. Pour une boue donnée et dont la siccité varie, en corrélant les valeurs de seuil obtenues à des mesures de conductivité, on observe un net changement de comportement de part et d'autre d'un seuil correspondant à une concentration critique à partir de laquelle il y a changement de méthode du *slump test* (figure 5). La combinaison des deux types de mesures permet donc d'affiner la définition de la zone de transition liquide-pâteux, correspondant à la hausse de conductivité.

Conclusion

L'optimisation des traitements et de la valorisation sont les principales voies d'amélioration de la gestion des déchets et notamment des boues résiduaires. Néanmoins, la complexité et la grande variabilité de celles-ci rendent leur caractérisation – et par extension les procédés de traitement – plus difficile. De plus, il est difficilement envisageable de procéder à une analyse chimique fine du matériau. La double approche proposée ici, en couplant rhéologie et mesures électriques, permet de s'affranchir de cette analyse chimique. De plus, en pratique, la démarche mise en œuvre s'est appuyée sur l'analyse de matériaux modèles, ce qui a abouti à une meilleure compréhension des phénomènes observés sur les boues.

Les résultats obtenus ont mis en évidence l'impact majeur de la nature des charges, libres ou liées, sur les propriétés électriques et rhéologiques des boues. Ils constituent un nouveau pas pour la caractérisation des boues résiduaires, puisque l'outil utilisé est adaptable en ligne et permet de traduire les effets des matières grasses et de la fraction ionique, mis en évidence par le passé, mais non pris en compte dans les méthodes actuelles de caractérisation. Il faudra aussi noter qu'à l'instar des liquides ou des solides, une relation entre conductivité et viscosité des matériaux pâteux a été mise en évidence.

Ces travaux ouvrent ainsi la voie à de nombreuses perspectives. D'un point de vue plutôt fondamen-



tal, ils constituent une avancée dans la connaissance et la définition de l'état pâteux : la dualité de comportement solide-liquide a été soulignée par les différentes corrélations électricité-rhéologie. Cette double approche pourra être complétée par l'utilisation d'autres techniques complémentaires (la microscopie par exemple). De plus, en termes d'applications, les premiers résultats montrent comment cette méthode de caractérisation pourra être utilisée à des fins d'optimisation des procédés de déshydratation des boues ainsi que des voies de valorisation. La possibilité de mettre en place des mesures *in situ* et la sensibilité des mesures à des éléments ioniques tels que les flocculants permettront également d'intervenir en station sur d'autres procédés de traitement des boues. Une des perspectives envisagées serait de pouvoir substituer les mesures électriques à celles rhéologiques, afin de déterminer la consistance des boues. À ce jour, cela n'est pas encore possible : l'élaboration d'abaques sera nécessaire. Enfin, cette méthode n'est pas applicable au seul domaine des boues : elle est également applicable à d'autres matériaux tels que les produits agro-alimentaires ou les polymères. □

▲ Figure 5 – Conductivité en fonction du seuil d'écoulement déterminé au *slump test*.

Résumé

Dans le contexte socio-économique actuel, la production de boues résiduaires augmente et leur management devient une préoccupation essentielle. D'un point de vue pratique, pour limiter les volumes et assurer le succès de leur valorisation (par l'épandage notamment), il est nécessaire d'optimiser le traitement secondaire des boues et de caractériser leur consistance.

Dans cet objectif, en tenant compte des difficultés rencontrées par les professionnels, nous nous sommes intéressés à la double contribution des mesures rhéologiques et électriques, ces dernières visant à s'affranchir du manque de connaissances quant à la composition des boues. En effet, bien que la rhéologie soit un outil performant, elle nécessite un savoir-faire et du matériel souvent coûteux alors que les mesures électriques sont moins chères et plus simples à mettre en œuvre. Les similarités existant entre les domaines électrique et rhéologique ainsi que l'utilisation de l'outil électrique pour analyser des matériaux tels que le béton (qui présente un comportement proche de la boue) nous ont amenés à choisir les mesures de conductivité et la spectroscopie d'impédance électrique comme nouvelles méthodes d'analyse.

Ainsi, afin de substituer les mesures électriques à celles rhéologiques pendant les procédés de traitement des boues et afin de développer notre connaissance de leur comportement, nous avons étudié à la fois des boues résiduaires et des matériaux modèles. À travers l'étude de différents paramètres (concentration, pH, vieillissement, température), nous avons démontré l'importance de la nature des charges, libres ou liées, sur les propriétés électriques et rhéologiques des matériaux. De plus, à l'instar des électrolytes et de solides tels que les roches, une relation entre conductivité et viscosité des matériaux pâteux a été mise en évidence.

Par la suite, la méthode a été appliquée à des boues résiduaires. L'impact des plusieurs paramètres a été déterminé : matières sèches, température, degré de fermentation, sels. Cela nous a permis d'affiner la caractérisation des boues et de déterminer un indice de déshydratabilité qui a pour but d'améliorer le contrôle des procédés de traitement des boues.

L'objectif de cette communication est de montrer le potentiel de cette double méthode d'analyse constituée par la combinaison des mesures électriques et rhéologiques sur les boues.

Abstract

According to the current social economical and environmental context, sewage sludge production is increasing and their management is of major concern. On a practical point of view, to limit the volumes and to assure their valorisation success (for example agricultural spreading), it is necessary to optimize sludge secondary treatment and to characterize their consistency.

With this purpose, taking into account the difficulties the professionals are confronted with, we focused on the combined contribution between rheological and electrical measurements, the latter aiming at overcoming the lack of knowledge about sludge composition. Indeed, though rheology is a performing tool, it needs a real expertise and often expensive equipments, whereas electrical measurements are cheaper and easier to perform. The similarities existing between rheological and electrical domains just as the use of electrical techniques to analyse materials such as concrete (which has a behaviour close to sludge) leads us to choose conductivity measurements and electrical impedance spectroscopy as new ways of analysis.

Thus, in order to substitute electrical for rheological measurements during sludge treatment process and also to develop our knowledge of sludge behaviour we studied both sludge and other materials. Through the study of many parameters (concentration, pH, aging, temperature), we demonstrated the importance of the nature of the charges, bound or free, on electrical and rheological characteristics of the material. Moreover, similarly to liquid electrolytes or solids as rocks, we established the existence of a relationship between the conductivity and the viscosity of pasty materials.

Secondly, this analytical method was applied to sewage sludge. The impact of many parameters on the electrical and rheological behaviour of sewage sludge was determined : dry content, temperature, fermentation degree, salts. That allowed us to improve sludge's characterization and to determine an indicator for their dewaterability which would lead to a better control of sewage sludge treatment processes.

The purpose of this communication is to show the potential of this double analytical method based on the combination of rheological and electrical measurements on sewage sludge.

Bibliographie

- AFNOR, NF U44-041, 1985, Matières fertilisantes. Boues des ouvrages de traitement des eaux usées urbaines.
- ASAE Standards, 1999, Norme S358.2 de l'American Society of Agricultural Engineers, St-Joseph, Michigan.
- ARCHIE, G.-E., 1942, The electrical resistivity log as an aid in determining some electrical characteristics, *Transactions American Institute Mineralogical and Metallurgical Engineers*, n° 146, p. 54-67.
- BAUDEZ, J.-C., 2001, *Rhéologie et physico-chimie des boues résiduares pâteuses pour l'étude du stockage et de l'épandage*, Sciences de l'environnement, Paris, École nationale du génie rural, des eaux et des forêts, 235 p.
- BAUDEZ, J.-C., AYOL, A., COUSSOT, P., 2004, Practical determination of the rheological behavior of pasty biosolids, *Journal of Environmental Management*, 72(3), p. 181-188.
- BAUDEZ, J.-C., 2006, *Vieillessement physique des boues résiduares sous cisaillement et influence de la concentration*, GFR, Cherbourg.
- COLEMAN, B.-D., MARKOWITZ, H., NOLL, W., 1966, *Viscometric flows of Non-Newtonian Fluids*, Springer-Verlag, Berlin.
- DIEUDE-FAUVEL, E., 2007, *Apport couplé des propriétés rhéologiques et diélectriques pour l'optimisation du traitement secondaire et de la valorisation des boues résiduares*, Sciences des matériaux, université Pierre et Marie Curie, Montoldre.
- DIEUDÉ-FAUVEL, E., BAUDEZ, J.-C., VAN DAMME, H., (à paraître), Improving rheological sludge characterization with electrical measurements, *Chemical Engineering Research and Design*.
- FORSTER, C.-F., 1982, Sludge surfaces and their relation to the rheology of sewage sludge suspensions, *Journal of Chemical Technology and Biotechnology*, n° 32, p. 799-807.
- FORSTER, C.-F., 1983, Bound water in sewage sludges and its relationship to sludge surfaces and sludge viscosities, *Journal of Chemical Technology and Biotechnology*, n° 33B, p. 76-84.
- FORSTER, C.-F., 2002, The rheological and physico-chemical characteristics of sewage sludges, *Enzyme and Microbial Technology*, 30(3), p. 340-345.
- GUEGUEN, Y., PALCIAUSKAS, V., 1992, *Introduction à la physique des roches*, Paris, Hermann, éditeurs des sciences et des arts.
- PIAU, J.-M., 1979, Non-Newtonian fluids, *Techniques de l'Ingénieur*, p. A710-A711.
- SPINOSA, L., WICHMAN, K., 2004, Sludge characterization : the role of physical consistency, *Water Science and Technology*, 49(10), p. 59-65.
- VOGEL, H., 1921, *PHYS.*, Z., 22 645, FULCHER, C.-S., 1925, *Journal of American Ceramic Society*, n° 8, 339 p.