



 Laboratoire Rhéologie et Procédés

 **Cerege**
CENTRE EUROPÉEN DE RECHERCHE ET D'ENSEIGNEMENT DES GÉOSCIENCES DE L'ENVIRONNEMENT

 **M2P2**

 **GFR**

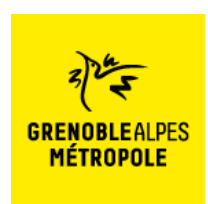
 **SFGP**
SOCIÉTÉ FRANÇAISE DE GÉNIE DES PROCÉDÉS

 **CODEGEPR**

1^{er} Workshop

Rhéologie et traitement biologique des eaux et des déchets

Grenoble
19 juin 2018



Thématique scientifique



Le déficit de connaissance sur la rhéologie et la mécanique des fluides dans le domaine du traitement des eaux et des déchets constitue un frein à l'innovation et à l'optimisation des procédés de traitements. L'objectif de ce workshop est de rassembler les communautés scientifiques, académique et industrielle, concernées par ces problématiques de traitement de l'eau et des déchets, dans le but de faire émerger de nouvelles collaborations entre les différents acteurs du domaine. On cherchera également à faire ressortir les potentialités d'améliorations des procédés offertes par des actions de recherche dans ce domaine. Dans ce cadre, toutes les filières de traitement (anaérobie, aérobie, anoxiques...) seront considérées, depuis les boues de station d'épuration, jusqu'à la valorisation des déchets dans des procédés tels que la méthanisation.

Le format retenu pour ce workshop est de nature à favoriser le dialogue et les échanges entre industriels et universitaires. Ils exposeront chacun les problématiques auxquelles ils sont confrontés, leur compréhension des phénomènes et les voies de développement qu'ils identifient. Le workshop est ouvert aux doctorants et chercheurs ainsi qu'aux ingénieurs de recherche et développement des entreprises du domaine.

Un prix du meilleur poster, parrainé par le CODEGEPRA, sera remis en fin de journée

Comité d'organisation

Laurent Jossic	Laboratoire Rhéologie et Procédés
Nicolas Roche	CEREGE
Isabelle Seyssiecq	Laboratoire M2P2
Marc Arousseau	CODEGEPRA
Albert Magnin	Laboratoire Rhéologie et Procédés

Programme du workshop		
8:30	9:00	Café et accueil
9:00	9:10	Introduction
9:10	9:50	René Moletta Moletta Méthanisation La méthanisation des déchets : des technologies à développer.
9:50	10:15	Frédéric Blanc, Stéphane Hattou Arkolia Energies Agitation pneumatique au sein d'un procédé de méthanisation voie épaisse, technologie Arkométha.
10:15	10:40	Emeric Leclerc Aquapole Grenoble Valorisation énergétique des boues au travers de la production de biométhane à partir de biogaz de méthanisation.
10:40	11:10	Pause café & poster
11:10	11:35	Albert Magnin¹, Victor Ruys¹, Laurent Jossic¹, Nadia El Kissi¹, Hassen Benbelkassam² 1 Laboratoire Rhéologie et Procédés, 2 INSA Lyon Rhéométrie de la matière concentrée hétérogène pour la méthanisation : les déchets agricoles.
11:35	12:00	Laurent Vachoud, Emilie Ruiz, Michèle Delalonde, Christelle Wisniewski Qualisud, Univ. Montpellier Rhéologie des boues activées : impact de la nature des composés présent dans les phases solides et liquides.
12:00	12:25	Marion Alliet, Dominique Anne-Archard, Claire Albasi ENSIACIET Rhéologie des boues de Bàm, viscoplasticité et thixotropie, influence sur les contraintes de cisaillement dans les carters membranaires.
12:25	13:40	Pause repas & poster
13:40	14:20	Pierre Buffière¹, Renaud Escudie², Hassen Benbelkacem¹ 1 INSA Lyon, 2 INRA Narbonne Phénomènes physiques en milieu biologique dense et hétérogène, application au procédé de méthanisation.
14:20	14:45	Jamal Hamdani^{1,2}, Mohsen Karrabi³, Kelly Ohanessian², Isabelle Seyssiecq², Nicolas Roche⁴ 1 Univ. Polytech. Mohammed VI, 2 M2P2, 3 Univ. Ferdowsi de Mashhad, 4 CEREGE Optimisation du fonctionnement des stations d'épuration des eaux usées par une approche rhéologique.
14:45	15:10	Oumar Thiene¹, Emilie Dieude Fauvel¹, Jean-Christophe BAUDEZ^{1,2} 1 IRSTEA, 2 IMT Lille Douai Impact de l'histoire mécanique sur les propriétés rhéologiques des boues résiduares.
15:10	15:40	Pause café & Remise du prix du meilleur poster parrainé par le CODEGEPRA
15:40	16:05	Mohamed Mouzaoui¹, Martial Sauceau¹, Jean-Christophe Baudetz^{2,3}, Patricia Arlabosse¹ 1 Mines ALBI, 2 IRSTEA, 3 IMT Lille Douai Comment éviter les problèmes de fracture et d'évaporation durant la caractérisation rhéologique, à haute température, des boues déshydratées.
16:05	16:30	Arnaud Cockx, Nicolas Diétrich, Jérôme Morchain, Alain Liné LISBP Toulouse De l'utilisation de fluides modèles pour l'étude de l'hydrodynamique et des transferts en bioréacteur gaz-liquide.
16:30	17:00	Conclusions

Sommaire

1. Présentations orales

René Moletta Moletta Méthanisation La méthanisation des déchets : des technologies à développer.	p. 5
Frédéric Blanc, Stéphane Hattou Arkolia Energies Agitation pneumatique au sein d'un procédé de méthanisation voie épaisse, technologie Arkométha.	p. 6
Albert Magnin¹, Victor Ruys¹, Laurent Jossic¹, Nadia El Kissi¹, Hassen Benbelkassam² 1 Laboratoire Rhéologie et Procédés, 2 INSA Lyon Rhéométrie de la matière concentrée hétérogène pour la méthanisation : les déchets agricoles.	p. 8
Laurent Vachoud, Emilie Ruiz, Michèle Delalonde, Christelle Wisniewski Qualisud, Univ. Montpellier Rhéologie des boues activées : impact de la nature des composés présent dans les phases solides et liquides.	p. 9
Marion Alliet, Dominique Anne-Archard, Claire Albasi ENSIACIET Rhéologie des boues de Bàm, viscoplasticité et thixotropie, influence sur les contraintes de cisaillement dans les carters membranaires.	p. 10
Pierre Buffière¹, Renaud Escudie², Hassen Benbelkacem¹ 1 INSA Lyon, 2 INRA Narbonne Phénomènes physiques en milieu biologique dense et hétérogène, application au procédé de méthanisation.	p. 11
Jamal Hamdani^{1,2}, Mohsen Karrabi³, Kelly Ohanessian², Isabelle Seyssiecq², Nicolas Roche⁴, 1 Univ. Polytech. Mohammed VI, 2 M2P2, 3 Univ. Ferdowsi de Mashhad, 4 CEREGE Optimisation du fonctionnement des stations d'épuration des eaux usées par une approche rhéologique.	p. 12
Oumar Thiene¹, Emilie Dieude Fauvel¹, Jean-Christophe BAUDEZ^{1,2} 1 IRSTEA, 2 IMT Lille Douai Impact de l'histoire mécanique sur les propriétés rhéologiques des boues résiduaire.	p. 13
Mohamed Mouzaoui¹, Martial Sauceau¹, Jean-Christophe Baudez^{2,3}, Patricia Arlabosse¹ 1 Mines ALBI, 2 IRSTEA, 3 IMT Lille Douai Comment éviter les problèmes de fracture et d'évaporation durant la caractérisation rhéologique, à haute température, des boues déshydratées.	p. 14

2. Posters

Fenglin Liang¹, Martial Sauceau¹, Gilles Dusserre², Jan-Louis Dirion¹, Patricia Arlabosse¹ 1 Mines Albi, 2 Institut Clément Ader	p. 15
Identification des paramètres rhéologiques (à température ambiante) de boues déshydratées par compression uniaxiale	
Yannick Fayolle¹, Camilo Duran¹, Timo Larsson¹, Arnaud Cockx², Sylvie Gillot³ 1 IRSTEA Antony, 2 INSA Toulouse, 3 IRTSEA Lyon	p. 16
Comportement rhéologique des boues activées de différentes origines : mesure, modélisation et paramètres influents	
Vince Bakos¹, Laurent Vachoud², Michèle Delalonde², Benjámín Sandor Gyarmati³, András Szilagyí³, Márk Tardy Gábor¹, Andrea Jobbágy¹, Christelle Wisniewski² 1 Budapest University, 2 QualiSud Montpellier, 3 Budapest University	p. 17
Activated sludge rheology : relevant tool for indication of follow-up of filamentous and viscous bulking	
Albert Magnin¹, Victor Ruys¹, Nadia El Kissi¹, Hassen Belbenkasssem², Pierre Buffière², Stéphane Hattou³ 1 Laboratoire Rhéologie et Procédés, 2 INSA Lyon, 3 Arkolia	p. 18
Evolution du seuil d'écoulement des substrats issus des fumiers pailleux en fonction de la distribution de la phase liquide	
Ali Hojeij, Laurent Jossic, Albert Magnin Laboratoire Rhéologie et Procédés	p. 19
Brassage de fluides épais par injection de gaz	

La méthanisation, des technologies à développer

MOLETTA René^{a*}

Moletta méthanisation

1504 route des bottières, 73470 Novalaise

La méthanisation est la transformation de la matière organique en méthane et gaz carbonique (que l'on nomme le biogaz), par un consortium microbien anaérobie fonctionnant en anaérobiose. C'est une fermentation naturelle qui est exploitée par l'homme dans des réacteurs biologiques que l'on nomme digesteurs. Elle est appliquée dans le traitement des déchets afin de produire de l'énergie et pour la réduction de la DCO dans le cas des effluents. Cette réaction biologique est réalisée sous des conditions de température et de pression normales. Le consortium microbien anaérobie est caractérisé par une croissance lente micro-organismes. Les températures peuvent aller de 10 à 60 °C et des pH variant 6,5 à 8,5.

Les technologies appliquées aux traitements des effluents sont très différentes de celles qui sont appliquées aux déchets. Dans le premier cas la matière transformée arrive sous forme soluble, par contre, pour le traitement des déchets, la matière doit subir une première étape d'hydrolyse afin d'être solubilisées puis consommée par les microorganismes. On peut mettre en œuvre des réacteurs de types mélangés ou pistons. La fermentation peut-être continue, discontinue, en fed-batch... La méthanisation des effluents a été largement appliquée dans l'industrie, notamment dans les stations d'épuration des industries agroalimentaires, ce qui se traduit par une grande variété de technologies. Par contre pour les déchets cette diversité plus restreinte. Il est évident que tous ces développements technologiques ont manqué d'apports systématiques du génie chimique notamment dans l'acquisition de connaissances des caractéristiques physiques des digesteurs et de leur impact sur l'activité biologique.

Pour le traitement des effluents la principale stratégie est la rétention des micro-organismes par la formation d'un biofilm que l'on cherche à garder dans le digesteur. Les aspects importants sont de nature hydraulique (homogénéité), la rétention de la biomasse produite, et sa mise en œuvre de manière obtenir des cinétiques optimales et constantes. Ceci se fait dans des réacteurs mélangés qui subissent aussi les caractéristiques de la matière organique entrante (ce qui peut se traduire des problèmes particuliers, comme la formation de mousse par exemple). Les temps de séjour sont généralement, de quelques heures à un ou deux jours.

Pour le traitement des déchets on est dans des systèmes où la matière entrante très hétérogène et c'est la teneur en matière sèche (MS) dans le digesteur qui va conditionner les technologies utilisées : réacteurs mélangés (fermentation « humides » avec 8 à 15 % MS) ou réacteurs pistons (fermentation « sèche » avec 25 à 30 % de MS). Les temps de séjour dans le digesteur sont bien plus importants que pour les effluents et peuvent atteindre les valeurs de 50 à 60 jours. Pour les réacteurs mélangés, les aspects agitation sont extrêmement importants et différents types de systèmes sont utilisés et adaptés. Ils conditionnent les cinétiques du digesteur. Ils servent aussi à faciliter l'extraction du biogaz éviter la formation d'un croustage à l'interface gaz-liquide. L'acquisition des informations physico-chimiques via des capteurs en ligne ou pas, est aussi est aussi à développer.

Pour la mise en œuvre de fermentation « sèche » on peut fonctionner en continu ou en discontinue. On est dans des systèmes à très forte viscosité donc avec des difficultés pour obtenir une bonne homogénéité des caractéristiques physico-chimiques digesteur (qui dépendront aussi de la teneur plus ou moins importante de MS). Dans le système pistons, il est nécessaire de recycler une partie du digestat pour le mélanger à la matière entrante. Dans les systèmes mélangés, l'agitation est principalement effectuée par l'introduction du bio gaz en bas du digesteur. On se heurte à ce même type de problème que précédemment pour les capteurs permettant d'acquérir caractéristiques du mélange les valeurs physico-chimiques importantes.

* Auteur/s à qui la correspondance devrait être adressée : rene.moletta@moletta-methanisation.fr

Caractérisation rhéologique de la matière entrante pour la mise en œuvre du procédé de méthanisation voie épaisse agitation pneumatique ARKOMETHA.

BLANC Frédéric^{a*}, CAMBERLAIN Jules^a, HATTOU Stéphane^a

^a ARKOLIA ENERGIES

ZA du Bosc – 16 rue des Vergers, 34130 Mudaison

Il existe de nombreux procédés qui permettent de mettre en œuvre la technique de méthanisation, lesquels sont classés en plusieurs catégories, procédés dit en voie liquide (siccité < 10% Matière sèche) généralement en continu, le procédé en voie sèche ou voie épaisse (siccité > 20%MS) qui peut être réalisé en batch (garage) ou en continu (digesteur piston).

Au regard des fortes siccités rencontrées sur les déchets agricoles et péri-urbains, la voie épaisse semble la plus adaptée. Les avantages de celle-ci sont multiples, notamment grâce à des tailles de réacteurs compacts, une consommation d'eau plus faible, un pré-traitement mécanique limité et une quantité de digestat réduite en sortie. En revanche, il existe encore certains verrous technologiques quant à sa mise en œuvre. Outre les aspects biochimiques, la principale difficulté de la voie sèche concerne les écoulements au sein des digesteurs.

Dans le cadre du développement de la technologie Arkometha, ce sujet a fait l'objet de travaux de thèses (V.Ruys 2017) menés en collaboration étroite avec le laboratoire de rhéologie des procédés de Grenoble. Ces études ont permis de mettre en évidence que la notion de MS n'était pas le paramètre le plus pertinent pour le dimensionnement et la conduite des procédés en voie sèche. Une méthode de caractérisation rhéologique de la matière appliquée à la méthanisation voie sèche a donc été développée.

Celle-ci consiste à déterminer le taux de MS dit critique à l'aide d'une balance thermogravimétrique, point à partir duquel il n'y a plus d'eau libre au sein de l'échantillon, et où la mise en mouvement de la matière devient problématique.

Un rhéomètre de grande dimension pour substrat (RGDS) a également été conçu pour permettre de mesurer le seuil d'écoulement d'échantillons complexes à forte contraintes granulométriques. Le profil rhéologique peut alors être réalisé en mesurant le seuil d'écoulement d'un échantillon à différents taux de MS.

Ces caractéristiques rhéologiques nous apparaissent indispensables pour une bonne maîtrise du procédé voie épaisse. Elles sont utilisées pour le dimensionnement du système d'agitation pneumatique sur les futures installations ARKOMETHA et permettent de déterminer les limites de fonctionnement, quant à la MS en entrée du digesteur.

Procédé ARKOMETHA, technologie voie épaisse par agitation pneumatique

La technologie ARKOMETHA tire son originalité de son système d'agitation pneumatique. Il est composé de cannes d'injections plongeantes dans la matière depuis la toiture jusqu'au plancher du digesteur. Celles-ci sont reliées à un caisson mis sous pression par un compresseur de biogaz. En fonction des caractéristiques rhéologiques du mélange et des paramètres d'agitation sélectionnés, la détente du biogaz engendre une force suffisante pour dépasser le seuil d'écoulement, ce qui permet la mise en mouvement et le brassage de la matière.

Méthodologie de caractérisation rhéologique de la matière

La scissométrie est la technique employée pour la mesure du seuil d'écoulement de la matière, elle met en œuvre la rotation lente d'une pale de 4 lames dans un échantillon, il en résulte une mesure du couple

en fonction du temps. Le couple maximum et les dimensions de la pale utilisée permettent d'évaluer le seuil selon les formules suivantes (Nguyen & Boger, 1985) :

$$\tau_0 = \frac{C_{max}}{K} \text{ avec } K = \frac{\pi \cdot D^3}{2} \cdot \left(\frac{H}{D} + \frac{1}{3} \right) \text{ où :}$$

τ_0 = seuil de contrainte (Pa), C_{max} = couple maximum (Nm), D = diamètre de la pale (m). H = hauteur de la pale (m).

Le laboratoire d'Arkolia énergies est équipé d'un rhéomètre de terrain spécialement conçu pour tenir compte des particularités des substrats à forte granulométrie (RGDS : Rhéomètre de Grande Dimension pour les Substrats). Celui-ci dispose de plusieurs jeux de cuves (2, 8 et 60L) et de pâles étalonnée avec des fluides modèles.

La siccité à partir de laquelle la matrice utilisée ne présente plus d'eau libre, appelée aussi teneur en eau liée (W_c), a été déterminée par une technique de séchage (Vaxelaire & Cézac, 2004; García-Bernet et al., 2011). L'échantillon préalablement préparé, est mis à évaporer sur une balance thermogravimétrique réglée à 80°C. La perte de masse est suivie en ligne, il en résulte une vitesse d'évaporation en fonction du poids de l'échantillon.

Dans les conditions de séchage appliquées, la fraction d'eau libre présente une vitesse d'évaporation constante. En revanche la fraction d'eau liée, de par la nature de ses différentes liaisons, aura tendance à présenter un profil d'évaporation décroissant. Le point critique, appelé aussi W_c , correspond au point d'inflexion sur la courbe d'évaporation en fonction de la masse de l'échantillon. Celui-ci est ensuite ramené à la MS critique, siccité à partir de laquelle les écoulements deviennent limitant.

Un outil de calcul a été développé en interne pour identifier avec précision le point d'inflexion de la courbe d'évaporation.

Conclusions

Ces techniques ont été appliquées à l'échelle industrielle, pour dimensionner le système d'agitation pneumatique d'une installation de 250 kWe en cours de construction. Leurs mise en œuvre sont également prévue dans le cadre d'un projet commercial de co-digestion de déchets péri-urbains pour déterminer les limites d'acceptabilité de MS en entrée de digestion.

Des travaux sur la viscosité et l'hydrodynamique au sein des digesteurs voie épaisse sont en cours de réalisation pour faciliter le pilotage.

Références

- J.Vaxelaire, P.Cezac, Moisture distribution in activated sludges : a review, *Water Res.* 38 (2004) 2215 - 2230.
- D.Garcia-Bernet et al. Water distribution in biowastes and digestates of dry anaerobic digestion technology. *Chemical Engineering Journal* 172 (2011) 924 – 928.
- V.Ruys, Rhéologie des résidus agricoles pour un procédé multi-étapes de méthanisation voie épaisse. *Laboratoire de rhéologie et procédés. Ecole Doctorale Ingénierie - Matériaux, Mécanique, Environnement, Energétique, Procédé, Production.* (2017).
- Nguyen Q. Dzuy and D.V. Boger, Direct Yield Stress Measurement with the Van Method, *Journal of rhéologie* 29, 335 (1985).

Rhéométrie de la matière concentrée hétérogène pour la méthanisation : les déchets agricoles

MAGNIN Albert^{a*}, RUYS Victor^a, JOSSIC Laurent^a, EL KISSI Nadia^a et BENBELKACEM Hassen^b

^aLaboratoire Rhéologie et Procédés, Univ. Grenoble Alpes, CNRS, BP 53 38041 Grenoble cedex 9

^bLGCI-E-DEEP, 9 rue de la physique, 69100 Villeurbanne

La méthanisation en voie sèche en mode continu est un procédé en plein de développement, notamment pour le traitement de résidus agricoles. Les produits traités industriellement sont un mélange de fumier, de lisier, des déchets agricoles, des pailles, d'ensilages et de liquide.

Pour avancer dans l'optimisation de la formulation des mélanges par rapport aux processus biologiques de traitement ou dans l'optimisation du dimensionnement des méthaniseurs, il est essentiel de caractériser les propriétés rhéologiques de ces mélanges agricoles à méthaniser. La première de ces caractéristiques est le seuil de contrainte de ces suspensions concentrées mais également la viscosité au-delà de ce seuil d'écoulement. En effet la méthanisation en mode continu n'est pas un processus statique qui pourrait être caractérisé uniquement par le seuil d'écoulement, mais un processus dynamique du point de vue hydrodynamique lors du malaxage, du transport et du brassage. Pour établir une loi de comportement qui puisse être utilisée dans le dimensionnement des méthaniseurs ou introduite dans la modélisation numérique pour simuler le comportement des matériaux lors des opérations de brassage par exemple, la caractérisation rhéométrique doit se mener de façon contrôlée du point de vue de la mécanique des milieux continus et des principes de la viscosimétrie. Ces contraintes nécessitent d'éliminer les techniques empiriques non contrôlées et d'obtenir des valeurs absolues des paramètres rhéométriques.

Ces mélanges sont complexes, hétérogènes, concentrés en matière solide fibreuse. Ces matériaux sont biphasiques (liquide-solide) voire triphasiques à cause de la présence de biogaz ou d'air. Ils sont notamment composés des agrégats et des particules fibreuses de plusieurs centimètres de long. Ces tailles centimétriques imposent des contraintes dans les caractérisations rhéologiques pour conserver raisonnablement les hypothèses de milieu continu afin d'avoir accès aux propriétés rhéologiques de volume.

Les matériaux traités se présentent sous une forme pâteuse caractérisée par la présence d'un seuil d'écoulement. La présence de ce seuil d'écoulement va introduire la problématique du glissement à la paroi qu'il va falloir éliminer. De plus, les matériaux, notamment les intrants, ont des consistances relativement élevées.

Dans cet exposé, nous détaillerons une méthodologie pour maîtriser les difficultés citées et pour déterminer les propriétés rhéologiques (seuil d'écoulement et viscosité) de ces suspensions pâteuses concentrées et hétérogènes.

* Auteur à qui la correspondance devrait être adressée : albert.magnin@univ-grenoble-alpes.fr

Impact de la nature et des caractéristiques des phases liquide et solide des boues activées sur leur comportement rhéologique

VACHOUD Laurent*, RUIZ Emilie, DELALONDE Michèle, WISNIEWSKI Christelle.

UMR QualiSud, UFR des Sciences Pharmaceutiques et Biologiques, Université de Montpellier, 15 Avenue Charles Flahault BP 14491, 34093 Montpellier Cedex 5, France.

Les boues activées associées aux procédés de traitement biologique des eaux usées peuvent être assimilées à des suspensions de particules solides (flocs bactériens) dans une phase liquide (solution aqueuse contenant des composés hydrosolubles organiques ou minéraux). La caractérisation rhéologique de ces boues représente un outil pertinent pour optimiser les différentes opérations des procédés en place dans les filières de traitement (pompage, aération, agitation, séparation liquide-solide...). Si le rôle de la quantité de matières solides en suspension sur le comportement rhéologique des boues a été largement étudié dans la littérature, l'impact de la nature de ces solides ainsi que celui de la nature des solutés ont été peu abordés. Le principal objectif de cette étude est ainsi d'étudier les propriétés rhéologiques des boues en relation avec la nature des composés constituant les phases solide et liquide. Pour cela, des mesures rhéologiques ont été conduites sur des boues activées dont la composition a été modifiée par actions mécaniques (concentration en matières solides en suspension (MES) par décantation, centrifugation) ou par dopage (ajout de MES et de composés hydrosolubles de différentes natures). L'évolution de la viscosité en fonction de la concentration en MES pour différentes natures de solides est représentée sur la figure 1. Si la viscosité augmente avec la teneur en MES (comme classiquement observé), la relation viscosité - MES est fortement impactée par la nature des matières solides. Ainsi, l'augmentation de la viscosité est beaucoup plus limitée dans le cas du dopage avec des matières solides minérales et sèches que lors de l'ajout de matières solides hydratées. Ce résultat peut être expliqué par la teneur en eau des particules et par leur composition chimique (organicité). La composition en solutés de la boue a été modifiée par ajout de xanthane et d'un sel minéral (KCl, figure 2). On observe, à partir d'une concentration en xanthane de 2 g.L⁻¹, une élévation significative de la viscosité de la boue alors que le KCl a impact beaucoup plus faible. La nature des solutés apparait ainsi avoir une influence sur le comportement rhéologique de la boue. Cette étude a montré que les paramètres rhéologiques de la boue sont fortement impactés par la nature de la phase solide. Le rôle clef de la nature et de la masse molaire des solutés a également été mis en évidence. Ces résultats contribuent à une meilleure connaissance de la relation entre la composition de la boue et ses paramètres rhéologiques.

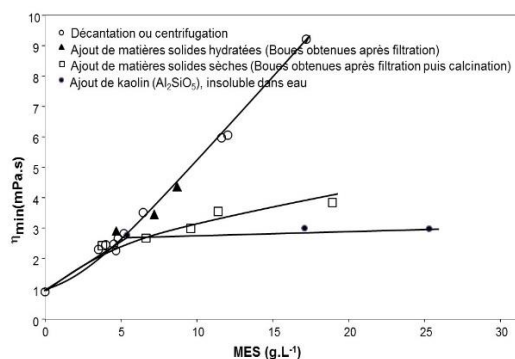


Figure 1. Evolution de la viscosité en fonction des MES pour différents types de particules.

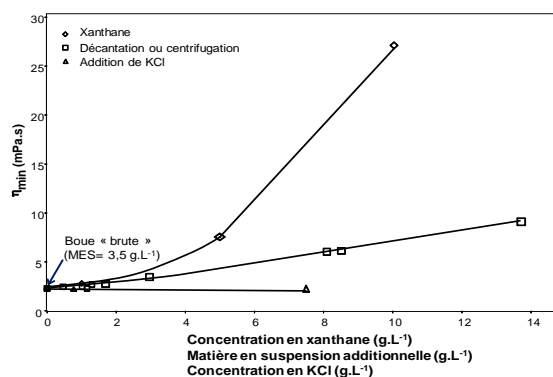


Figure 2. Evolution de la viscosité en fonction des MES, de la concentration en xanthane et de la concentration en KCl.

* Auteur/s à qui la correspondance devrait être adressée : laurent.vachoud@umontpellier.fr

Rhéologie des boues de BioRéacteur à Membranes, viscoplasticité et thixotropie, influence sur les contraintes de cisaillement dans les carters membranaires

ALLIET Marion^{a,b}, ANNE-ARCHARD Dominique^{b,c}, ALBASI Claire^{a,b},

^a Laboratoire de Génie Chimique, Université de Toulouse, CNRS-INPT-UPS,

4 Allée Emile Monso, BP 44362, Toulouse, France

^b Fédération Fermat 118 route de Narbonne 31062 TOULOUSE

^c Institut de Mécanique des Fluides de Toulouse (IMFT), Université de Toulouse, CNRS,

2 Allée du Professeur Camille Soula 31400 Toulouse, France

Les bioréacteurs à membranes immergées sont des procédés de traitement des eaux usées de plus en plus utilisés pour répondre à des contraintes de bonne et constante qualité des eaux traitées (Krzeminski et al. 2017). L'aération par grosses bulles est l'une des stratégies utilisées pour la limitation du colmatage des membranes. Son efficacité augmente avec le débit d'air jusqu'à un débit optimal (Meng et al. 2008), ainsi qu'avec un fonctionnement intermittent (Van Kaam et al. 2006). Afin de comprendre ces effets macroscopiques, plusieurs mécanismes locaux ont été identifiés pouvant agir favorablement ou défavorablement. La rhéologie de la suspension complexe qu'est la boue est un élément essentiel pour comprendre l'écoulement de ces bulles et leur action sur la boue et les floccs (Braak et al. 2017).

Les études de rhéologie de ces boues ont été réalisées avec un rhéomètre Mars III équipé d'une géométrie plan-plan striée. Si ces mesures doivent être effectuées avec précaution car pouvant donner lieu à des artefacts (formation de macro-structures lors d'un cisaillement continu, Günther et al. 2011), elles donnent un comportement viscoplastique des boues. Des études expérimentales en eau et en boue menées dans un carter de membrane (Braak et al. 2017) ont montré des vitesses de bulles significativement plus faibles dans la boue. La simulation par CFD a donné des contraintes de cisaillement, avec la boue, supérieures d'un ordre de grandeur à celles observées en eau. Enfin des travaux expérimentaux très récents montrent, lors de l'utilisation de boues dans un carter semi-industriel, des chemins préférentiels qui n'existent pas dans l'eau, observation qui a également été faite dans le cas de bulles en fluide viscoplastique (Mougin et al., 2012).

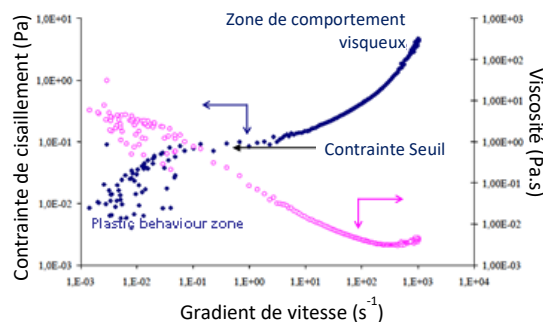


Figure 1. Rhéogramme caractéristique d'une boue de BRM

Références

- Braak E., C. Albasi, D. Anne-Archard, S. Schetrite et M. Alliet, 2017, Chem. Eng. Technol.40(8) 1453-1465
Günther J., M. Alliet, C. Guigui, C. Albasi, S. Schetrite, O. Lorain, C. Cabassud et D. Anne-Archard, 2011, Récents Progrès en Génie des Procédés, Numéro 101. Ed. SFGP, Paris, France.
Krzeminski P., L. Leverette, S. Malamis et E. Katsou, 2017, Journal of Membrane Science 527, 207-227.
Meng, F., F. Yang, B. Shi, et H.Zhang. 2008, Separation and Purification Technology 59(1) 91-100.
Van Kaam R., D. Anne-Archard, M. Alliet, S. Lopez, and C. Albasi, 2006, Desalination, vol.199 1-3, pp. 482-484
Mougin N., A. Magnin et J. M. Piau, 2012, Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics 171-172, 42-55

Phénomènes physiques en milieu biologique dense et hétérogène : application au procédé de méthanisation

Pierre BUFFIERE^{a*}, Renaud ESCUDIÉ^b et Hassen BENBELKACEM^a

^aUniversité de Lyon, INSA-LYON, laboratoire DEEP « Déchets Eaux Environnement et Pollutions »
9 rue de la Physique, 69621 Villeurbanne Cedex

^bINRA, Laboratoire de Biotechnologie de l'Environnement
Avenue des Etangs 11100 Narbonne

Les procédés biologiques appliqués au traitement des boues et des déchets, tels que la méthanisation, le compostage, ou la dégradation en centre de stockage, sont caractérisés par des propriétés spécifiques : ils sont par nature denses et hétérogènes, rendant ainsi caduques les approches classiques.

Les études sur les phénomènes physiques associés à la méthanisation en voie épaisse ont été initiées lors du programme ANR ANAMIX il y a déjà 10 ans. Il s'agit bien de développer des connaissances expérimentales et théoriques sur les effets locaux de la physique sur le fonctionnement global des procédés. A cet égard, le teneur en eau demeure un paramètre clé à bien des égards.

Les outils développés tels que l'analyse de la distribution des états de l'eau [1] ont permis de proposer une explication plus claire des propriétés physiques mais aussi cinétiques de la matière. Dans ce cadre, une première approche du comportement rhéologique et de sa dépendance aux propriétés locales a été esquissée [2]. De la même manière, les effets de consistance ont également un impact sur les cinétiques biologiques et sur les propriétés de transfert [3,4,5]. Mais il s'agit aussi de rendre compte du caractère hétérogène des suspensions, et de l'impact que ce dernier peut avoir sur le fonctionnement du procédé à un échelle plus importante : ainsi, les propriétés de sédimentation sont fortement liées à la teneur en eau [6] et surtout au caractère cohésif de la matière, qui reste encore difficile à appréhender d'un point de vue analytique.

Les perspectives de recherche sont donc vastes, et le développement d'outils physiques (et en particulier rhéologiques) dédiés à des milieux denses et hétérogènes demeure un enjeu scientifique majeur pour la recherche. Il s'agit aussi d'un enjeu industriel, car les avancées en recherche sont associées à des besoins, à la fois en termes de conception de procédés (organes de pompage et de mélange) mais aussi en termes de pilotage des installations.

[1]. Garcia-Bernet, D., Buffière, P., Latrille, E., Steyer, J.P., Escudié, R. 2011. Water distribution in biowastes and digestates of dry anaerobic digestion technology. *Chemical Engineering Journal*, **72**, 924-928.

[2]. Garcia-Bernet, D., Loisel, D., Guizard, G., Buffière, P., Steyer, J.P., Escudié, R. 2011. Rapid measurement of the yield stress of anaerobically-digested solid waste using slump tests. *Waste Management*, **31**(4), 631-635.

[3]. Benbelkacem, H., Bollon, J., Bayard, R., Escudié, R., Buffière, P. 2015. Towards optimization of the total solid content in high-solid (dry) municipal solid waste digestion. *Chemical Engineering Journal*, **273**(0), 261-267.

[4]. Bollon, J., Benbelkacem, H., Gourdon, R., Buffière, P. 2013. Measurement of diffusion coefficients in dry anaerobic digestion media. *Chemical Engineering Science*, **89**, 115-119.

[5]. Abbassi-Guendouz, A., Brockmann, D., Trabaly, E., Dumas, C., Delgenes, J.P., Steyer, J.P., Escudié, R. 2012. Total solids content drives high solid anaerobic digestion via mass transfer limitation. *Bioresource Technology*, **111**, 55-61.

* Auteur/s à qui la correspondance devrait être adressée : pierre.buffiere@insa-lyon.fr

Optimisation du fonctionnement des stations d'épuration des eaux usées par une approche rhéologique.

HAMDANI Jamal^{1,2}, KARRABI Mohsen³, HOANESSIAN Kelly², SEYSSIECQ Isabelle², ROCHE Nicolas⁴,

¹Université Mohammed VI Polytechnique, Benguérir, Maroc

²Aix Marseille Univ, CNRS, Centrale Marseille, M2P2, Aix-en-Provence, France

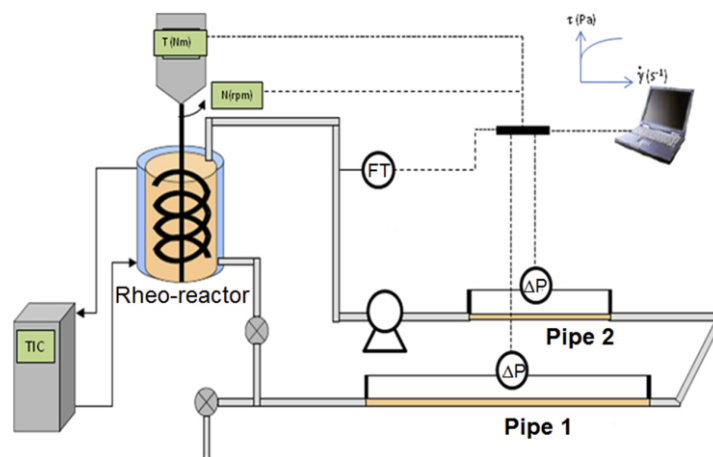
³Univ. Ferdowsi de Mashhad, Iran

⁴Aix Marseille Univ, CNRS, IRD, INRA, Coll France, CEREGE, Aix-en-Provence, France

Les procédés de traitement des eaux usées par boues activées ou par bioréacteurs à membrane (MBR) sont les procédés les plus utilisés au cours des dernières décennies. Pour répondre aux charges de pollution de plus en plus grandes et aux niveaux de rejet de plus en plus contraignants, ces procédés doivent devenir de plus en plus efficaces et une grande attention doit être accordée à leur optimisation. L'optimisation du fonctionnement des stations d'épuration des eaux usées par approche rhéologique est le sujet du présent travail.

L'objectif est de déterminer le comportement non-newtonien des suspensions biologiques communément appelées boues, utilisées pour l'épuration biologique des eaux usées grâce à un dispositif expérimental de caractérisation rhéologique *in situ*.

Représentation schématique du banc expérimental



Le banc rhéologique utilisé (schéma ci-dessus) se compose d'un bioréacteur équipé d'un double ruban hélicoïdal (système HRI, Helicoidal Ribbon Impeller) et d'une boucle de recirculation des boues en écoulement dans deux conduites de diamètres différents (système pipes). Le système HRI est équipé d'un moteur et d'un couple-mètre permettant la détermination *in situ* du rhéogramme des boues dans des conditions de réacteur agité. Le système pipes est équipé de deux capteurs de pression différentielle et d'un débitmètre qui par la mesure des pertes de charge et du débit volumique sous différentes conditions de pression, nous permettent d'obtenir *in situ* les paramètres rhéologiques conduisant à l'élaboration des rhéogrammes en canalisation.

Pour chaque concentration en MES étudiée (~ 10 à 40 g/L), les paramètres (τ_y , K et n) du modèle de Herschel-Bulkley sont déterminés sur la base des rhéogrammes de référence mesurés par un rhéomètre de laboratoire (AR5501). Ces rhéogrammes de référence sont ensuite comparés aux rhéogrammes obtenus avec les différents systèmes (HRI et pipes) de mesure *in situ*.

Impact de l'histoire mécanique sur les propriétés rhéologiques des boues résiduaires

O.Thiene^{a*}, E. Dieudé-Fauvel^a, J.C. Baudez^{a,b}

^aIrstea, UR TSCF, Domaine des Palaquins,
 40, route de Chazeuil, Montoldre F-03150, France

^bIMT Lille Douai - Site de Bourseul,
 941 rue Charles Bourseul, CS 10838, 59508 Douai Cedex

*oumar.thiene@irstea.fr

La connaissance des propriétés rhéologiques des boues résiduaires depuis l'entrée jusqu'en sortie de filière de traitement demeure un élément majeur pour l'optimisation des procédés (Dentel 1997). Cependant leur détermination précise s'avère encore difficile et la littérature sur le sujet est disparate (Eshtiaghi *et al.* 2013). Une des causes majeures de cette disparité est liée à la thixotropie (Eshtiaghi *et al.* 2013) qui se définit comme l'évolution des propriétés rhéologiques avec le temps et l'histoire mécanique du matériau. Ce travail s'est focalisé sur les impacts de l'histoire mécanique sur les propriétés d'écoulement des boues.

L'impact de l'histoire mécanique sur différents paramètres rhéologiques (module élastique, seuil d'écoulement et viscosité infinie) a donc été étudié sous plusieurs conditions de cisaillement. Les résultats montrent que l'histoire mécanique n'a aucun effet sur le régime purement visqueux des boues. En revanche, tous les paramètres rhéologiques liés au régime solide diminuent avec l'intensité de l'histoire mécanique. Un plateau est atteint pour les boues faiblement concentrées en matière sèche et/ou à faible teneur en matière organique. Aucun plateau n'est atteint pour les boues de fortement concentrées et à forte teneur en matière organique. Mais dans tous les cas, la cinétique d'évolution de ces paramètres rhéologiques en fonction de l'histoire mécanique est la même (Figure 1). Il apparaît donc que l'histoire mécanique est un élément fondamental à prendre en compte pour modéliser les écoulements des boues.

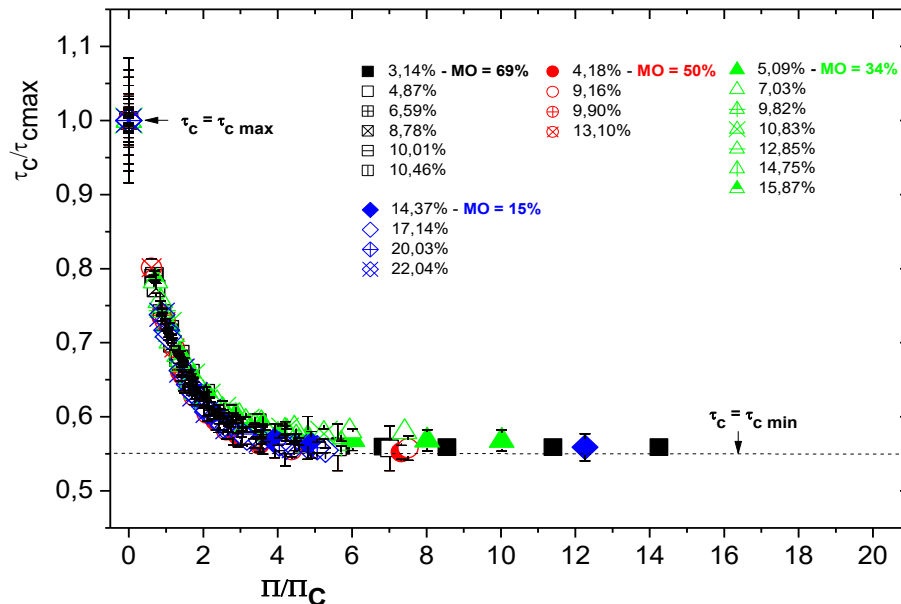


Figure 1 : Seuil d'écoulement adimensionné de boues résiduaires en fonction de l'histoire mécanique adimensionnée et de la teneur en matière organique (MO).

Références

- Dentel, S. K. (1997). "Evaluation and role of rheological properties in sludge management." *Water Science and Technology*, **36**(11): 1-8.
- Eshtiaghi, N., F. Markis, S. D. Yap, J. C. Baudez and P. Slatter (2013). "Rheological characterisation of municipal sludge: a review." *Water Res* **47**(15): 5493-5510.

Comment éviter les problèmes de fracture et d'évaporation durant la caractérisation rhéologique à haute température des boues déshydratées

MOUZAOUI Mohamed^{a,b}, BAUDEZ Jean-Christophe^c, SAUCEAU Martial^a et ARLABOSSE Patricia^a

^aUniversité de Toulouse; Mines Albi; CNRS; Centre RAPSODEE

Campus Jarlard, F-81013 Albi, France.

^bIrstea, UR TSCF

Domaine des Palaquins, F-03150 Montoldre, France.

^cIMT Lille Douai, Direction de la Recherche et de l'Innovation,

F-59508, Douai, France

La production de boues résiduaire augmente chaque année et devient un véritable défi pour les stations d'épuration (STEP) (Fytily and Zabaniotou, 2008). Pour réduire les volumes et faciliter la réutilisation de la matière organique, le séchage thermique est l'une des opérations les plus couramment utilisées dans les grandes STEP. L'optimisation de la consommation d'énergie des sécheur à palettes peut être obtenue par un contrôle précis des paramètres de fonctionnement, parmi lesquels le temps de séjour qui est directement lié à la vitesse d'écoulement dans le sécheur (Arlabosse et al., 2012; Charlou et al., 2015). Ceci implique la connaissance des paramètres rhéologiques des boues pour des teneurs en matières sèches (MS) supérieures à 20 % et de leur dépendance en température lors du séchage. Cependant, en raison des effets perturbateurs tels que les fractures (Baudez and Coussot, 2001; Chaari et al., 2003) et l'évaporation, les mesures rhéologiques ne sont pas entièrement représentatives des propriétés intrinsèques des boues. Ce travail s'intéresse donc au développement de procédures expérimentales permettant des mesures rhéologiques à des MS et des températures élevées. Dans un premier temps, une procédure spécifique a été développée pour corriger l'impact des fractures à température ambiante. Elle est basée sur la détermination exacte de la surface réellement cisailée, calculée en appliquant un balayage de contraintes entrecoupé par des mesures à un état de référence (Mouzaoui et al., 2018). La mise en œuvre de cette procédure a permis de déterminer correctement les caractéristiques viscoélastiques pour des MS de 14 à 45 %. Ensuite, une configuration accessible pour tout rhéomètre commercial couplant un plan et un cylindre a permis le contrôle de l'évaporation pendant les mesures pour des températures allant jusqu'à 80 °C. Le suivi dans le temps de la réponse rhéologique à 80 °C a permis de montrer une similarité de comportement, quelle que soit la MS. Dans le futur, le couplage de ces procédures va permettre une étude rhéologique complète pour des gammes de MS et de températures rencontrées au cours du séchage.

Références

- Arlabosse, P., Ferrasse, J.H., Lecomte, D., Crine, M., Dumont, Y., Léonard, A., 2012. Efficient sludge thermal processing : from drying to thermal valorisation. In *Modern Drying Technology : Energy Savings* 4, 295–329.
- Baudez, J.C., Coussot, P., 2001. Rheology of aging, concentrated, polymeric suspensions e Application to pasty sewage sludges. *J. Rheol.* 45 (5) 1123–1139.
- Chaari, F., Racineux, G., Poitou, A., Chaouche, M., 2003. Rheological behavior of sewage sludge and strain-induced dewatering. *Rheol Acta* 42, 273–279.
- Charlou, C., Milhé, M., Sauceau, M., Arlabosse, P., 2015. A new methodology for measurement of sludge residence time distribution in a paddle dryer using X-ray fluorescence analysis. *Water Research* 69, 1–8.
- Fytily, D., Zabaniotou, A., 2008. Utilization of sewage sludge in EU application of old and new methods: A review. *Renew. Sustain. Energy Rev* 12, 116–140.
- Mouzaoui, M., Baudez, J.C., Sauceau, M., Arlabosse, P., 2018. Experimental rheological procedure adapted to dewatered sludge up to 44% dry matter. *water research journal* 133, 1–7. doi:10.1016/j.watres.2018.01.006

Identification des paramètres rhéologiques (à température ambiante) de boues déshydratées par compression uniaxiale

LIANG Fenglin^a, SAUCEAU Martial^a, DUSSEYRE Gilles^b, DIRION Jean-Louis^a,
ARLABOSSE Patricia^a

^aUniversité de Toulouse; Mines Albi; CNRS; Centre RAPSODEE
Campus Jarlard, 81013 Albi CT Cedex 09, France

^bInstitut Clément Ader, Université de Toulouse, CNRS, Mines Albi, UPS, INSA ISAE-SUPAERO
Campus Jarlard, 81013 Albi CT Cedex 09, France

Dans ce travail, une méthodologie complète, associant mesures et modélisation, a été développée afin de caractériser les propriétés rhéologiques des boues résiduelles (Liang, 2016). Elle s'adresse à des boues dont le comportement s'apparente à celui d'un solide mou (évalué par un test d'affaissement) et elle peut être mise en œuvre tant que le matériau n'a pas dépassé sa limite de plasticité (mesurée selon un protocole adapté de la norme ASTM D 4318). Dans cette étude, cette méthodologie a été appliquée à des boues centrifugées, dont la teneur en solides était proche de 20 %.

La méthode inclut des essais mécaniques en compression uniaxiale (à très grande déformation, à petite déformation avec un ou plusieurs cycles de charge et de décharge) sur un texturomètre (Liang et al., 2017). Ces essais permettent d'identifier le seuil de fracturation du matériau, les ordres de grandeur du module d'Young, de la viscosité et du seuil de plasticité.

Un modèle mécanique analogique a ensuite été établi. Le comportement visco-élasto-plastique des boues sous une sollicitation uniaxiale de charge-décharge a pu être simulé par un modèle conceptuel, dit 'Burgers-Patin', basé sur les lois fondamentales de Hooke, de Newton et de Ludwik pour la plasticité. L'optimisation des 8 paramètres du modèle a été réalisée avec Matlab[®] en mettant en œuvre une méthode de régression multiple non linéaire à plusieurs étapes.

La sensibilité de la méthode à des changements de propriétés induits par des procédés ou par un stockage a ensuite été évaluée. Il a ainsi été montré qu'un malaxage rend le matériau plus facile à déformer, avec une diminution du seuil et de la rigidité du matériau, et qu'un stockage rend également les boues plus facile à déformer.

Références

- Liang F., 2016, Caractérisation et modélisation du comportement rhéologique des boues résiduelles urbaines concentrées, Thèse de doctorat, Ecole nationale des Mines d'Albi-Carmaux
Liang, F., M. Saucéau, G. Dusserre et P. Arlabosse, 2017, A uniaxial cyclic compression method for characterizing the rheological behavior of mechanically dewatered sewage sludge, *Water Res.* 113, 171-180

Comportement rhéologique des boues activées de différentes origines : Mesure, modélisation et paramètres influents

FAYOLLE Yannick^{a,*}, DURAN Camilo^a, LARSSON Timo^a, COCKX Arnaud^b, GILLOT Sylvie^c

^a Irstea, UR HBAN, Centre d'Antony, 1 Rue Pierre Gilles de Gennes, F-92761 Antony, France

^b Université de Toulouse, INSA, INP, LISBP, 135 Avenue de Rangueil, Toulouse, France

^c Irstea, UR REVERSAAL, Centre de Lyon-Villeurbanne, F-69625 Villeurbanne Cedex, France

* Auteur correspondant : yannick.fayolle@irstea.fr

Les boues biologiques constituent des matrices complexes, composées de floccs bactériens et d'un liquide interstitiel contenant des substances dissoutes. Bien que les références de la littérature s'accordent pour les considérer comme un fluide non-newtonien rhéofluidifiant, il n'existe pas de consensus sur une loi de comportement unique en lien avec les différentes origines des boues mais également les protocoles de caractérisation mis en œuvre (Ratkovich et al. 2013). Cependant, une meilleure connaissance de ces propriétés est nécessaire, celles-ci affectant les performances et le coût énergétique des procédés en impactant notamment les rendements d'oxygénation des systèmes d'aération (Duran et al., 2017) et leur pompage (Slatter, 2001). L'objectif de cette étude est donc de constituer une base de données des propriétés rhéologiques de boues biologiques issues de différentes installations et d'interpréter ces comportements au regard des propriétés physico-chimiques et biologiques des différents échantillons.

Les propriétés rhéologiques de boues ont été mesurées à l'aide d'un rhéomètre capillaire conçu pour cet objectif ($\dot{\gamma}$ de 50 à 400 s^{-1}). Ces mesures ont été réalisées sur un ensemble de 18 échantillons de boues liquides (de 2,3 à 10,2 $g_{MES} \cdot L^{-1}$), provenant de 5 STEPs traitant des eaux résiduaires urbaines (boues activées classiques et bioréacteurs à membranes). En parallèle de ces mesures, la caractérisation physico-chimiques de ces échantillons a été réalisée (MES, MVS, DCO, DCO soluble, tensioactifs, tension de surface, volume hydrostatique de floccs, indice de boues, distribution granulométrique des floccs, microscopie).

Les résultats montrent que, bien que les propriétés rhéologiques des boues soient significativement liées à la concentration en matières en suspension (MES), d'autres propriétés des boues telles que la taille des floccs, leur cohésion (résistance au cisaillement) et leur densité influencent également la viscosité apparente (Figure 1a). Si la modélisation des rhéogrammes obtenus montre que les modèles à deux paramètres (Bingham et Ostwald de Waele) sont les plus adaptés, les observations réalisées mettent également en évidence la nécessité d'intégrer l'influence du cisaillement sur les distributions de tailles de floccs lors de la définition de protocoles de mesure des propriétés rhéologiques.

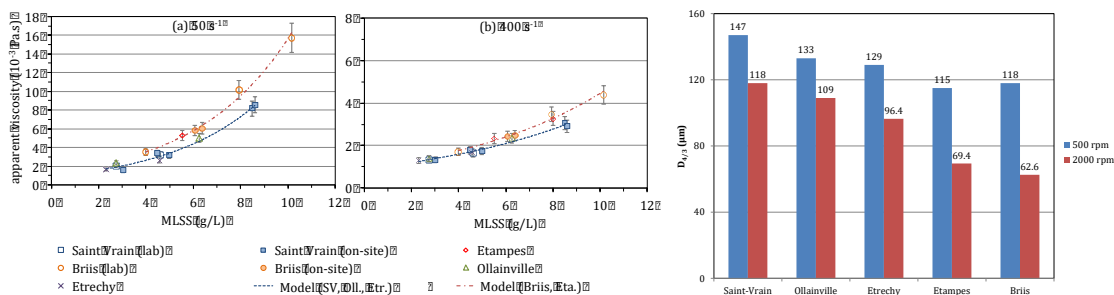


Figure 1. (i) Viscosité apparente en fonction de [MES] à un taux de cisaillement de (a) 50 et (b) 400 s^{-1} pour les différentes origines de boues (ii) diamètre volumique moyen ($D_{4/3}$) des floccs biologiques pour chaque échantillon et vitesse d'agitation dans l'échantillonneur du granulomètre

Références

- Durán, C., Fayolle, Y., Pechaud, Y., Cockx, A., Gillot, S., 2016, Impact of suspended solids on the activated sludge non-newtonian behaviour and on oxygen transfer in a bubble column, *Che. Eng. Sci.*, 141, pp. 154-165.
- Ratkovich, N., Horn, W., Helmus, F.P., Rosenberger, S., Naessens, W., Nopens, I., Bentzen, T.R., 2013, Activated sludge rheology: A critical review on data collection and modelling, *Wat. Res.*, 47 (2), pp. 463-482.
- Slatter, P., 2001, Sludge pipeline design, *Wat. Sci. and Tech.*, 44 (10), p. 367

Activated sludge rheology: relevant tool for indication and follow-up of filamentous and viscous bulking.

BakosVince^a, Vachoud Laurent^{b*}, Delalonde Michèle^b, Sándor Gyarmati Benjámin^c, Szilágyi András^c,
Márk Tardy Gábor^a, Jobbágy Andrea^a, Wisniewski Christelle^b

^aDepartment of Applied Biotechnology and Food Science, Budapest University of Technology and Economics, Budapest, Hungary

^bUMR QualiSud,UFR Sciences Pharmaceutiques and Biologiques, Montpellier, Université de Montpellier, Montpellier, France

^cDepartment of Physical Chemistry and Materials Science, Budapest University of Technology and Economics, Budapest, Hungary

Introduction, aims and scope. Activated sludge (AS) floc structure can highly be affected by bioreactor arrangement and operational conditions. Filamentous bulking, as well as viscous bulking are widely occurring problems. Unfavorable floc structure may lead to remarkably different rheological properties. Purpose of the paper was to investigate variations in the rheological parameters of (AS) with floc structure changes and to prove that follow-up of sludge rheological properties may be a rapid indicator of bulking.

Methodology. Two continuous-flow lab-scale (AS) systems consisted of one aerated basin (9.5 L) and a secondary clarifier (HRT=19h, SRT=23d) were operated by the continuous feed of synthetic wastewater containing acetate, sucrose, NH₄Cl, K₂HPO₄ and minerals. The feed composition and the aeration were different between the two systems with the objectives to develop viscous bulking in system ① and filamentous bulking in system ②. TSS concentration was maintained around 3 g/L during the whole experiments. Flow measurements were carried out by using an Anton Paar Physica MCR 301 rheometer. Shear stress versus shear rate curves were modeled by Ostwald law, the consistency index K (Pa.sⁿ) and the flow behavior index n (dimensionless) were deduced. **Results and major findings.** (AS) floc structure was deteriorated very quickly for both systems and DSVI went up to extremely high values for system ②. Microscopic observations proved that abundance of filaments and formation of extracellular polysaccharides (EPS) became excessive in system ① and ② respectively. Rheological follow-up showed variation in sludge behavior conjointly to the structure changes with an increase of the consistency index all along the experiment for both systems (Figure 1 and 2). Viscous bulking resulted in an important increase of K, with high values. **Main conclusions.** The consistency index K and DSVI follow the same trend whereas the flow behaviour index (n) is poorly impacted. K and DSVI are highly dependent of (AS) flocs structure. K value may be indicative of the presence of filaments or EPS. The follow-up of sludge rheological parameters may be a rapid indicator of bulking and activated sludge rheological characterization is a powerful tool to optimize the operating conditions.

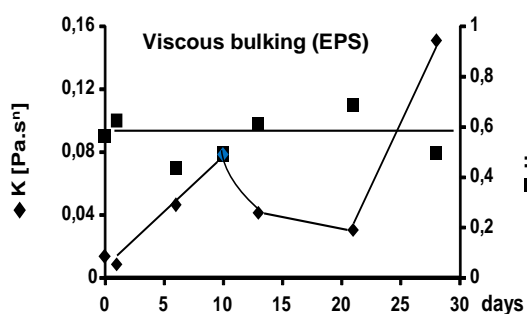


Figure 1. The consistency index (K) and the flow behavior index (n) as a function of time for system ①.

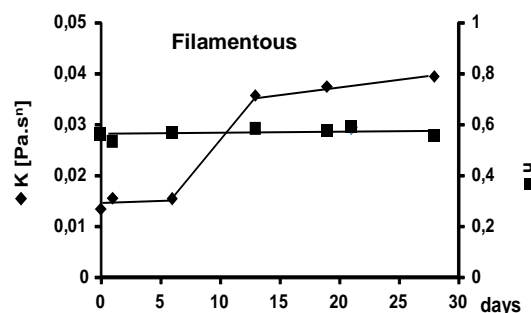


Figure 2. The consistency index (K) and the flow behavior index (n) as a function of time for system ②.

Références

- Wanner, J. and Jobbágy, A. Activated sludge solids separations. Jenkins, D. and Wanner, J. [Eds.] in Activated sludge – 100 years and counting 2014, IWA Publishing, Glasgow, UK:171-193.
Bakos, V., Kiss, B., Jobbágy, A. Problems and causes of marginal nutrient availability in winery wastewater treatment. Acta Alimentaria 2016, 45(4):53.

* Auteur/s à qui la correspondance devrait être adressée : laurent.vachoud@umontpellier.fr

Evolution du seuil d'écoulement des substrats issus des fumiers pailleux en fonction de la distribution de la phase liquide

MAGNIN Albert^{a*}, RUYS Victor^a, EL KISSI Nadia^a
BENBELKACEM Hassen^b, BUFFIERE Pierre^b, HATTOU Stéphane^c

^aLaboratoire Rhéologie et Procédés, Univ. Grenoble Alpes, CNRS, BP 53 38041 Grenoble cedex 9

^bLGCIE-DEEP, 9 rue de la physique, 69100 Villeurbanne

^cARKOLIA Energies, ZA Le Bosc – 16 rue des Vergers, 34130 Mudaison

Parmi les nombreux verrous existants, un enjeu important du développement des procédés continus de méthanisation en voie sèche est la caractérisation du comportement rhéologique des substrats. Il s'agit d'un élément essentiel pour la maîtrise des procédés, notamment pour optimiser le mélange ou pour connaître l'état d'évolution du matériau. Un des paramètres permettant de caractériser la rhéologie du substrat est le seuil de contrainte appliqué pour la mise en écoulement du substrat. Peu d'études sur ce sujet existent. Ici, le gisement concerné est essentiellement lié à l'activité d'élevage (fumiers, lisiers, résidus de culture...). Ces substrats sont des suspensions concentrées en végétaux de tailles variables, pouvant aller jusqu'à plusieurs centimètres. Ces déchets ligno-cellulosiques ont tendance à absorber un volume d'eau important. Or, l'eau est un paramètre clé du procédé, à la fois d'un point de vue biologique (biodisponibilité des substrats, activités réactionnelles) et d'un point de vue hydrodynamique (écoulement, mélange). Le taux de matière sèche MS (% en masse de matière sèche sur la masse totale) est le paramètre utilisé pour caractériser la teneur en solide et en liquide des substrats. Or, une question peut être posée sur la pertinence de ce paramètre dans le cas des substrats agricoles. En effet, l'eau peut se retrouver dans des milieux granulaires sous forme libre ou sous forme liée. La prédominance de l'une ou l'autre forme est-elle susceptible d'influencer les caractéristiques rhéologiques ?

Aussi, l'objectif de ce travail est de savoir si la MS est un paramètre suffisant pour caractériser le comportement rhéologique de substrats agricoles, notamment pour estimer le seuil d'écoulement.

Nous avons mesuré le seuil de contrainte pour trois recettes ayant le même taux de matière sèche (MS) mais avec des fractions massique (F_m) différentes des constituants. Nous avons montré que les seuils sont différents pour une même valeur de la MS pour chaque recette prouvant que MS n'est pas un paramètre pertinent. Le seuil s'accroît avec l'augmentation de la F_m de matière spongieuse qui absorbe un volume d'eau. Cela diminue la F_m d'eau libre qui joue un rôle significatif sur le comportement rhéologique. Nous avons étudié également l'évolution de seuil en fonction de la MS. Nous avons montré qu'il y a un changement de comportement rhéologique important à MS appelé MS_{c2} qui indique visuellement l'absence d'eau libre. Nous avons montré que $MS_{c2} \approx$ la MS correspond au taux d'eau liée critique (MS_{wc}) déterminé par la technique de séchage. Nous avons également de loi d'évolution de seuil en fonction de la MS.

* Auteur à qui la correspondance devrait être adressée : albert.magnin@univ-grenoble-alpes.fr

Brassage de fluides épais pas injection de gaz

HOJEIJ Ali, JOSSIC Laurent, MAGNIN Albert

Laboratoire Rhéologie et Procédés
Univ. Grenoble Alpes, CNRS, BP 53 38041 Grenoble cedex 9

La méthanisation « en voie sèche » met en œuvre des substrats à haute teneur en solide. Du fait de la nature des fluides à traiter, (résidus agricoles, ménagers...), la maîtrise des transferts de matière est un défi. La haute teneur en solides entraîne des consistances et des seuils très élevés qui génèrent des champs d'écoulement spécifiques avec entre autres la coexistence de zones cisailées et rigides. Un des verrous technologiques est la maîtrise du brassage de cette matière épaisse afin d'accroître significativement le rendement de la production de biogaz. Une voie très prometteuse est le brassage pneumatique. L'injection de biogaz sous pression via des cheminées permet la mise en écoulement de la matière et de créer un mouvement convectif autour de la cheminée. Cette solution, plus rentable que le brassage mécanique, permet une agitation plus ou moins intensive à moindre coût.

Dans ce cadre, une installation pilote dont l'objectif est de reproduire les écoulements de brassage pneumatique mis en jeu dans des digesteurs de méthanisation « en voie sèche » a été conçue. La matrice fluide est modélisée par un fluide à seuil transparent. Afin de favoriser le brassage, l'écoulement est généré par injection d'air sous pression contre la paroi inférieure du réservoir. L'impact du jet d'air sur le plan inférieur crée une poche d'air qui peut en première approximation être assimilée à un cylindre de base circulaire. La présente étude montre l'influence de la rhéologie du fluide et des paramètres d'injections, ainsi que de la configuration géométrique de la buse d'injection, sur la morphologie de la poche gazeuse. Par ailleurs, l'intensité du brassage généré par la remontée des bulles a pu être quantifiée en mesurant des temps de mélange et de recirculation, mesurés à l'aide de colorants et par suivi de particules. Les temps de mélange et de recirculation ont pu être reliés à la dynamique des bulles dans laquelle les paramètres rhéologiques jouent un rôle majeur.

* Auteur à qui la correspondance devrait être adressée : laurent.jossic@grenoble-inp.fr