

# MISE EN EVIDENCE DE L'IMPACT DE LA RHEOLOGIE DES BOUES DIGEREES LORS DE LEUR TRANSPORT EN CONDUITE

A. CHARLES<sup>1</sup>, T. RIBEIRO<sup>2</sup>, V. ROCHER<sup>3</sup>, S. AZIMI<sup>3</sup>, J.-C. BAUDEZ<sup>1</sup> & S. A. BAHRANI<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Institut Mines Télécom Nord Europe ; <sup>2</sup> Institut Polytechnique UniLaSalle ; <sup>3</sup> Direction Innovation SIAAP

## Contexte

L'efficacité du procédé de méthanisation des boues en usine d'épuration est limitée par la maîtrise de leur transport au niveau des recirculations en conduites.

- Phénomènes limitants derrière les verrous scientifiques de la thermo-rhéologie et du transport des boues en conduite :
  - Le colmatage des conduites
  - L'inadéquation de la puissance de pompage
  - L'augmentation superflue des pertes de charge
- En vue d'assurer au niveau opérationnel l'amélioration du transport des boues dans le procédé, il est alors nécessaire de :
  - Apporter les connaissances pour réaliser la caractérisation de leur thermo-rhéologie
  - Etudier expérimentalement le transport en conduite de tels fluides<sup>1</sup>

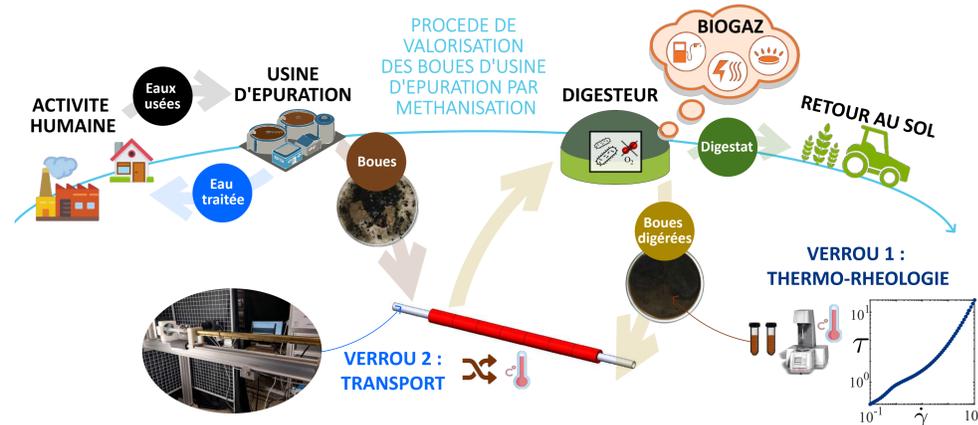


Figure 1 : Verrous à l'amélioration du contrôle du transport des boues digérées en usine d'épuration

## Caractérisation thermo-rhéologique

- Le premier étape pour la caractérisation a été d'établir les protocoles de caractérisation sur rhéomètre adaptés aux boues digérées en laboratoire (IMT Nord Europe) et sur une plateforme de caractérisation industrielle (SIAAP Cité de l'Eau).

Ces protocoles, publiés dans Techniques Sciences Méthodes n°10 2023<sup>2</sup>, permettent de quantifier les caractéristiques potentielles :

- Seuil d'écoulement
- Rhéofluidification
- Viscoélasticité
- Thixotropie
- Dépendance thermique

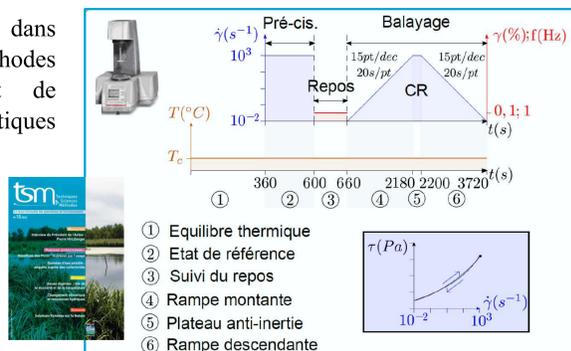


Figure 2 : Exemple du protocole de courbes d'écoulement des boues digérées

- La seconde étape pour la caractérisation a été l'application des protocoles de caractérisation sur rhéomètre. Les résultats<sup>2</sup> montrent :
  - 1ère caractéristique prépondérante : **caractère seuil** ( $\tau_0$ )
  - 2ème caractéristique prépondérante : **rhéofluidification** ( $n$ )
  - Visco-élasticité et thixotropie non significatives
  - Modèle **Herschel-Bulkley** non modifié adapté ( $\tau = \tau_0 + K\dot{\gamma}^n$ )
  - Condition thermophile montre un écart à faible sollicitation avec les conditions mésophiles et psychrophiles.
  - Points d'attention concernant le **glissement aux parois**, le volume d'échantillon et l'équilibre thermique mis en évidence.

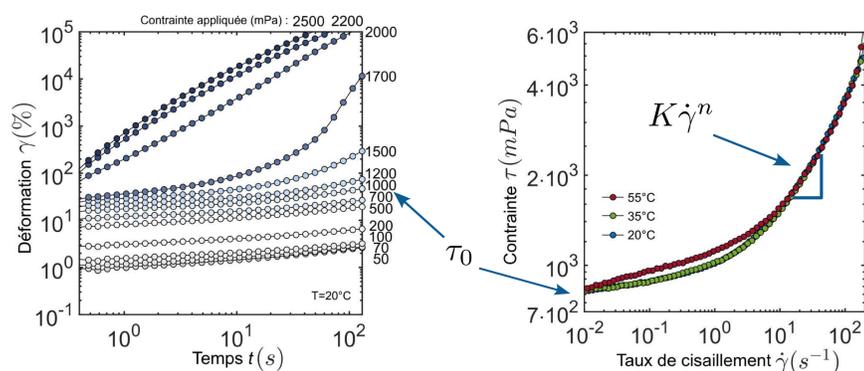


Figure 3 : Résultats des essais de fluages à T=20 °C (gauche) et de courbe d'écoulement (droite)

## Conclusions

- La thermo-rhéologie des boues digérées en usine d'épuration a été caractérisée à l'aide de protocoles sur rhéomètre, développés à cette occasion, montrant que leurs caractéristiques rhéologiques principales sont leur contrainte seuil d'écoulement et leur rhéofluidification (modèle d'Herschel-Bulkley).
- Cette thermo-rhéologie a montré un impact sur les régimes d'écoulement de ces fluides lors du transport en conduite, selon une route rhéo-inertielle de transition vers la turbulence associée à un retard de la transition, une transition plus lisse et une asymétrie de l'écoulement.

## Etude expérimentale du transport

- Des fluides de travail type gel (Carbopol) reproduisant les caractéristiques mesurées sur les boues digérées ( $\tau_0$ ,  $K$ ,  $n$ ) ont été produits. Un dispositif expérimental de laboratoire dédié a été entièrement conçu pour permettre la visualisation des structures d'écoulement couplée avec la mesure de pertes de charges en fonction du régime d'écoulement (nombre de Reynolds) :

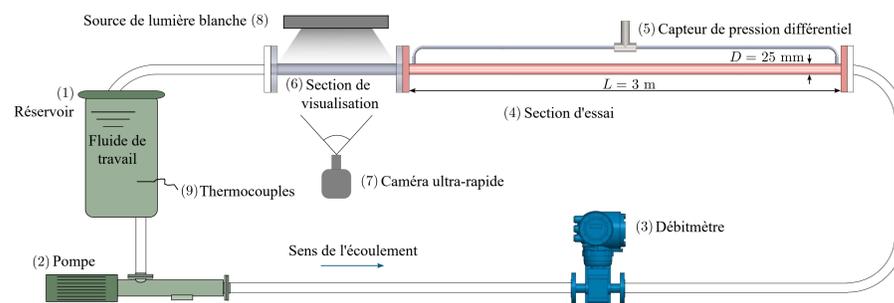
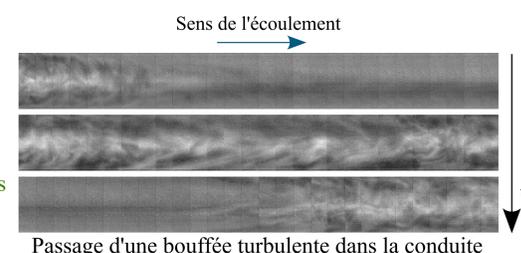


Figure 4 : Schéma du dispositif expérimental d'étude du transport en conduite

- Les visualisations et les pertes de charges ont mis en évidence la **route rhéo-inertielle de transition** du régime laminaire vers le régime turbulent pour les fluides à seuil rhéofluidifiants (Herschel-Bulkley). Cette transition diffère de la transition newtonienne classiquement supposée :
  - Retard à la turbulence
  - Transition plus lisse
  - Régime de pré-transition
  - Asymétrie de l'écoulement.

Figure 5 : Visualisations des structures d'écoulement au cours du temps en régime intermittent (Re=3 875)



- La transition rhéo-inertielle vers la turbulence se traduit par :
  - Evolution des pertes de charges engendrées qui diffère de celle d'un fluide newtonien.
  - Caractéristiques non-newtoniennes de la rhéologie des boues stabilisant l'écoulement (Fluide 1)
  - Compétition avec l'augmentation de la viscosité apparente lorsque les caractéristiques non-newtoniennes s'accroissent (Fluide 2)

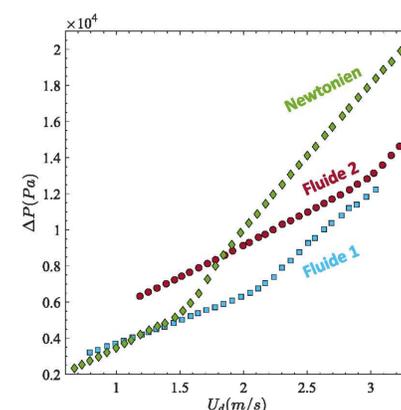


Figure 6 : Impact de la rhéologie sur les pertes de charges engendrées

## Perspectives

- La caractérisation en amont et en suivi, ainsi que l'étude expérimentale sur l'écoulement, sont alors des outils très intéressants pour améliorer le dimensionnement des unités et pour le choix de conditions opératoires adaptées.
- Les conditions thermiques ainsi l'extension aux boues non digérées de l'usine d'épuration font l'objet d'études à travers le projet *i-TRANSBOUE* mené à l'IMT Nord Europe depuis début 2024.

<sup>1</sup> Charles A. (2023) Etude thermo-rhéologique de boues digérées : Application à l'écoulement en conduite dans le procédé de méthanisation. Thèse. Université de Lille

<sup>2</sup> Charles A. et al. (2023) Mieux comprendre l'écoulement des boues digérées : rôle de la viscosité et de la température. Techniques Sciences Méthodes. 10. 35-45. 10.36904/tsm/202310035.