

# Comparaison des caractéristiques physiques des boues avant et après digestion : application à l'optimisation du procédé

**Jean-Christophe Baudez**

17 octobre 2013



[www.irstea.fr](http://www.irstea.fr)



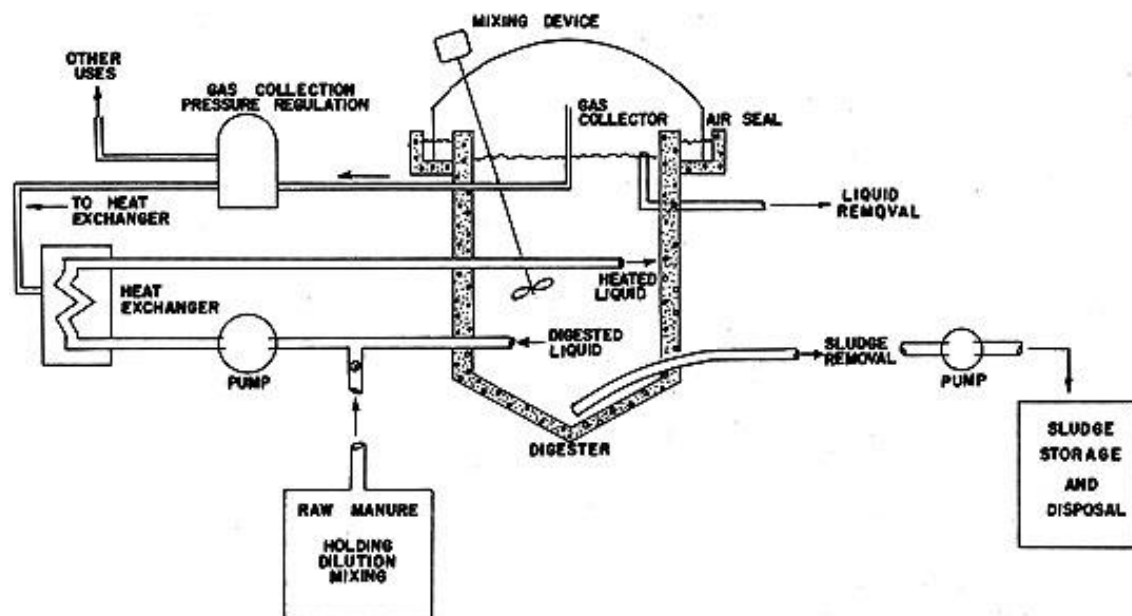
# Fonctionnement mécanique d'un digesteur

(en voie humide)

## Importance de la mécanique des fluides

Les propriétés d'écoulement sont nécessaires à plusieurs étapes du procédé :

- Pompage,
- Mélange,
- Brassage,
- Chauffage,
- Bullage (triphasique)



# Fonctionnement mécanique d'un digesteur

(en voie humide)

## Importance de la mécanique des fluides et de la rhéologie

- Pompage : écoulement en conduite et détermination du débit

$$Q = \frac{\pi R^3}{\tau_p^3} \int_0^{\tau_p} \tau^2 \dot{\gamma}(\tau) d\tau$$

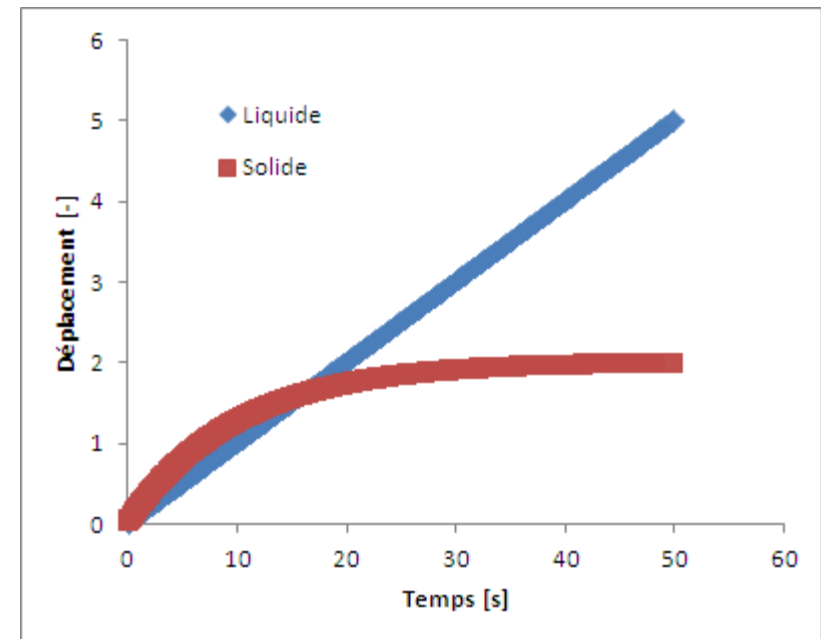
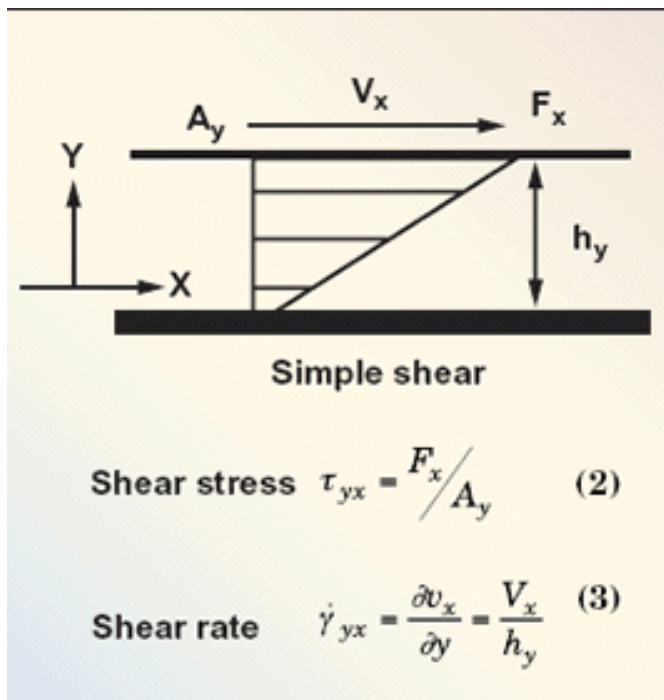
Loi de comportement

- Brassage : élimination des gradients de température ou de concentration  $R_e = \frac{\rho N D^2}{\eta} = \rho N D^2 \frac{\dot{\gamma}}{\tau}$
- Chauffage : dimensionnement des échangeurs de chaleur, relation viscosité-température
- Impact des bulles : le matériau est triphasique
  - L'hypothèse d'incompressibilité du fluide (utilisée en MMC) n'est plus vérifiée
  - Les bulles de biogaz peuvent tout autant augmenter ou diminuer la viscosité apparente du milieu, selon le régime dynamique (Manga et al., 1998) qui dépend des contraintes de cisaillement locales, de la taille des bulles et de leur temps de relaxation.

# Quelques notions de rhéologie

## Application d'une force et mesure d'un déplacement

- Déplacement limité : solide déformable
- Déplacement continu : liquide



Pour s'affranchir du volume, calcul de la contrainte et de la déformation

# Quelques notions de rhéologie

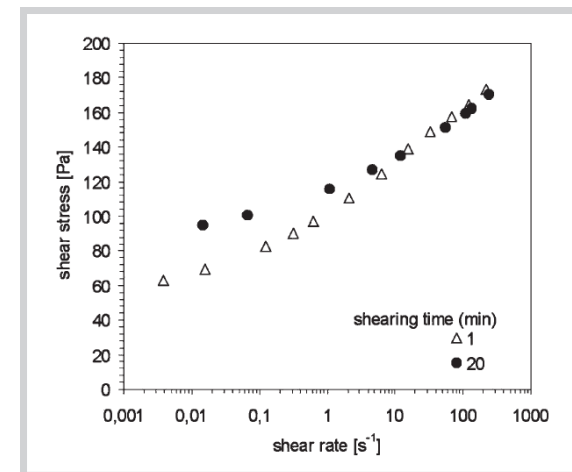
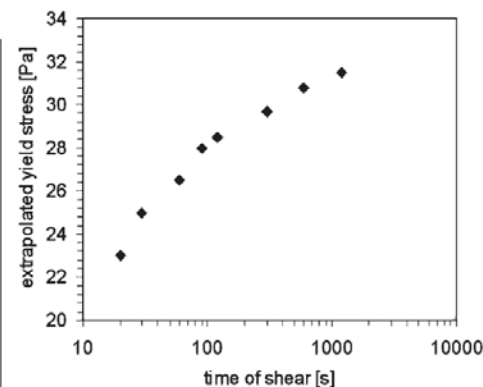
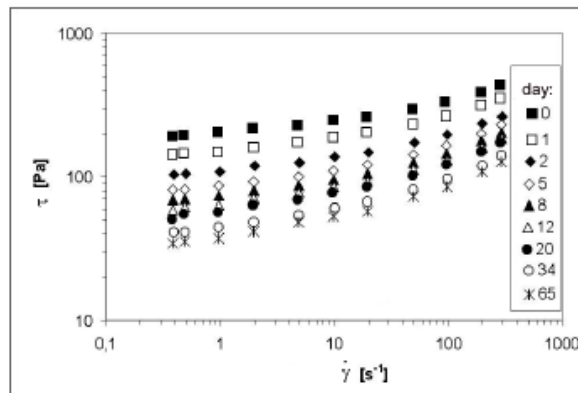
## Loi de comportement

- Solide déformable : relation entre la contrainte et la déformation  $\rightarrow \tau = f(\gamma)$
- Liquide : relation entre la contrainte et la vitesse de déformation  $\rightarrow \tau = f(\dot{\gamma})$
- La viscosité, c'est le rapport  $\tau/\dot{\gamma}$
- Le seuil de contrainte,  $\tau_c$  :
  - $\tau < \tau_c \rightarrow \text{solide}$
  - $\tau > \tau_c \rightarrow \text{liquide}$
- Les différents types de matériaux :
  - Newtoniens et non-Newtoniens (95% des cas)
  - Avec ou sans seuil
  - Rhéo-fluidifiant : la viscosité diminue avec la vitesse de déformation
  - Rhéo-épaississant : la viscosité augmente avec la vitesse de déformation

# Boues primaires et secondaires

## Caractéristiques et comportement rhéologique en écoulement

- Composées de flocs particuliers, d'EPS, qui interagissent avec l'eau par des liaisons électrostatiques : gel-like.
  - Electrostatique : tendance naturelle à s'agglomérer
  - Seuil de contrainte (quand  $\phi > \phi_0$ )
  - Comportement rhéo-fluidifiant ET rhéo-épaississant :  $\dot{\gamma} > \dot{\gamma}_c$ ,  $\eta = f(\dot{\gamma})$  décroît  
 $\dot{\gamma} < \dot{\gamma}_c$ ,  $\eta = f(t)$  croît !!!
- Thixotrope (surtout primaire)
- Se fluidifie avec la fermentation



# Boues primaires et secondaires

## Caractéristiques et comportement rhéologique en écoulement

- La loi de comportement rhéologique, en régime transitoire s'écrit :

$$\tau = \tau_c(t) + K(t) \cdot \dot{\gamma}^n, n < 1$$

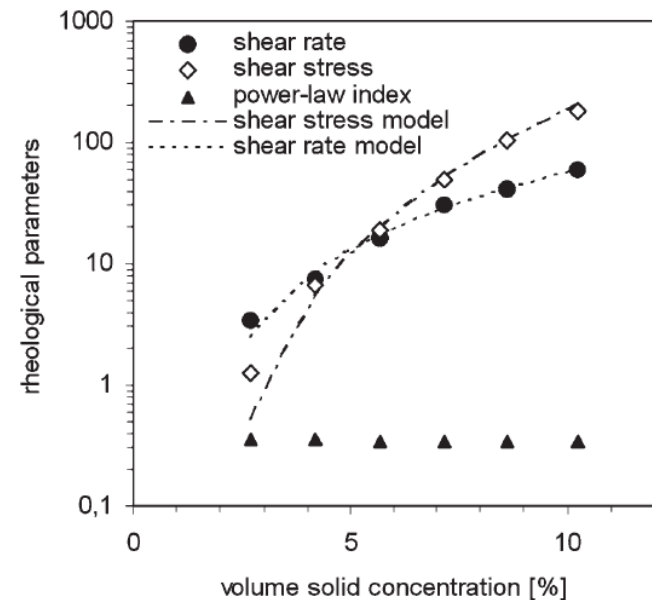
- La loi de comportement, en régime permanent s'écrit :

$$\tau = k\dot{\gamma}^n \Leftrightarrow \frac{\tau}{\tau_c} = \left( \frac{\dot{\gamma}}{\dot{\gamma}_c} \right)^n, \tau \geq \tau_c$$

$$\dot{\gamma} = 0, \tau < \tau_c$$

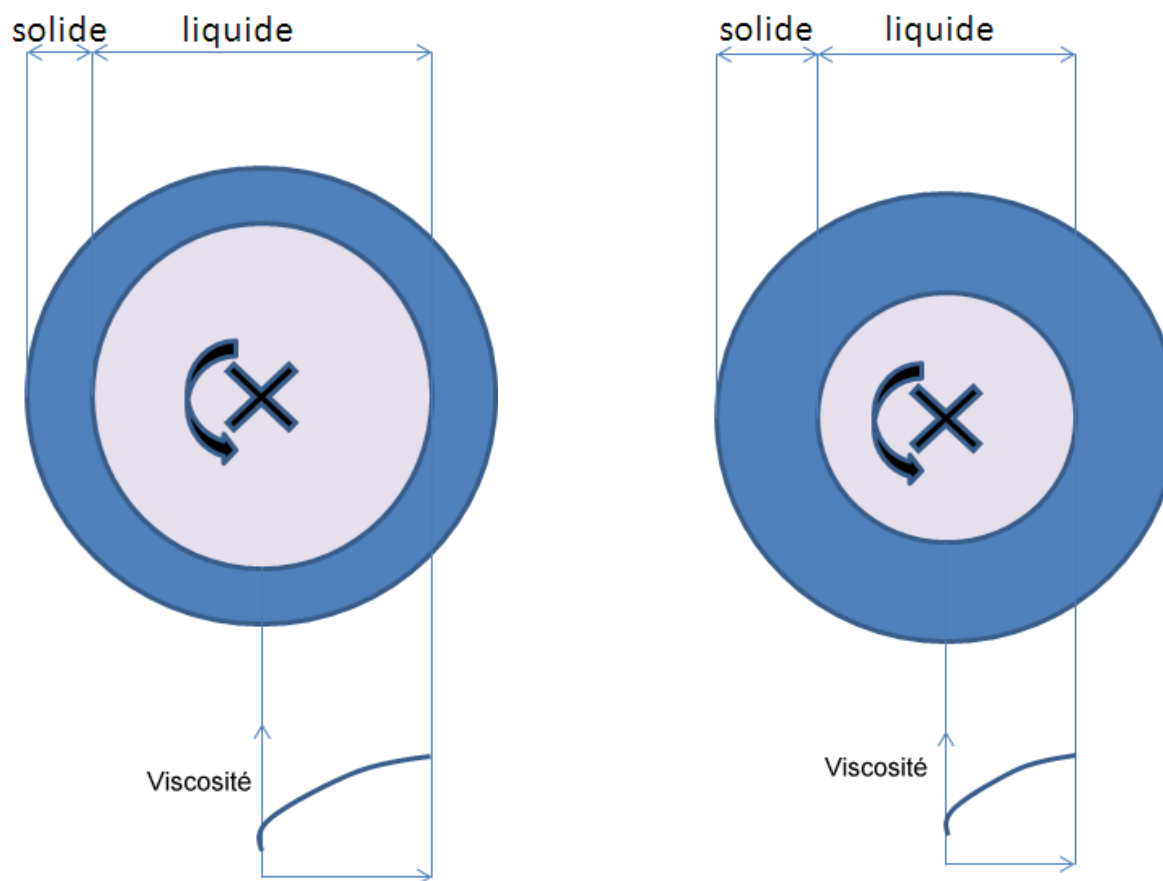
$$\tau_c = \kappa (\Phi - \Phi_o)^q$$

$$\dot{\gamma}_c = \mu (\Phi - \Phi_o)^p$$



# Boues primaires et secondaires

## Impact sur le procédé

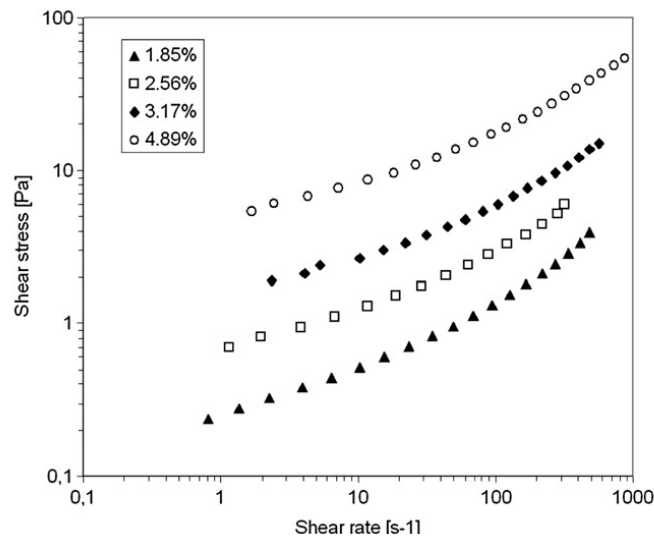




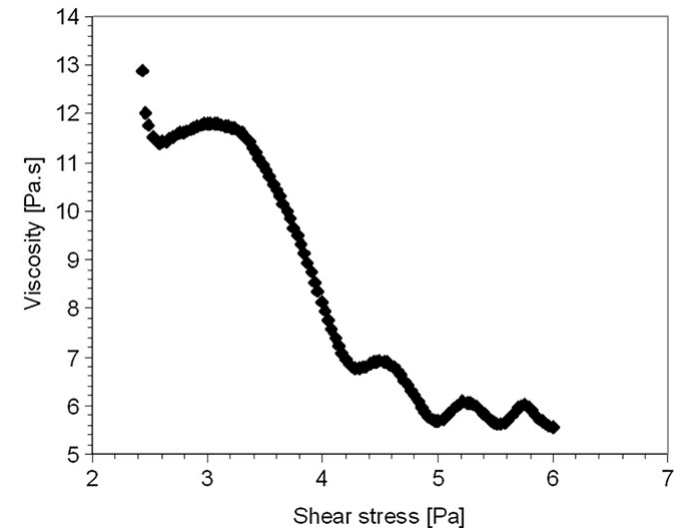
# Boues digérées

## Caractéristiques et comportement rhéologique en écoulement

- Interactions avec l'eau par des liaisons stériques : emulsion-like.
  - Stérique : tendance naturelle à se repousser (physiquement très stable)
  - Seuil de contrainte (quand  $\phi > \phi_0$ ,  $\phi_0$  étant supérieur pour les boues digérées)
  - Comportement rhéo-fluidifiant AVEC des bandes de cisaillement :  $\tau = \tau_c + K \cdot \dot{\gamma}^n$
- Non thixotrope



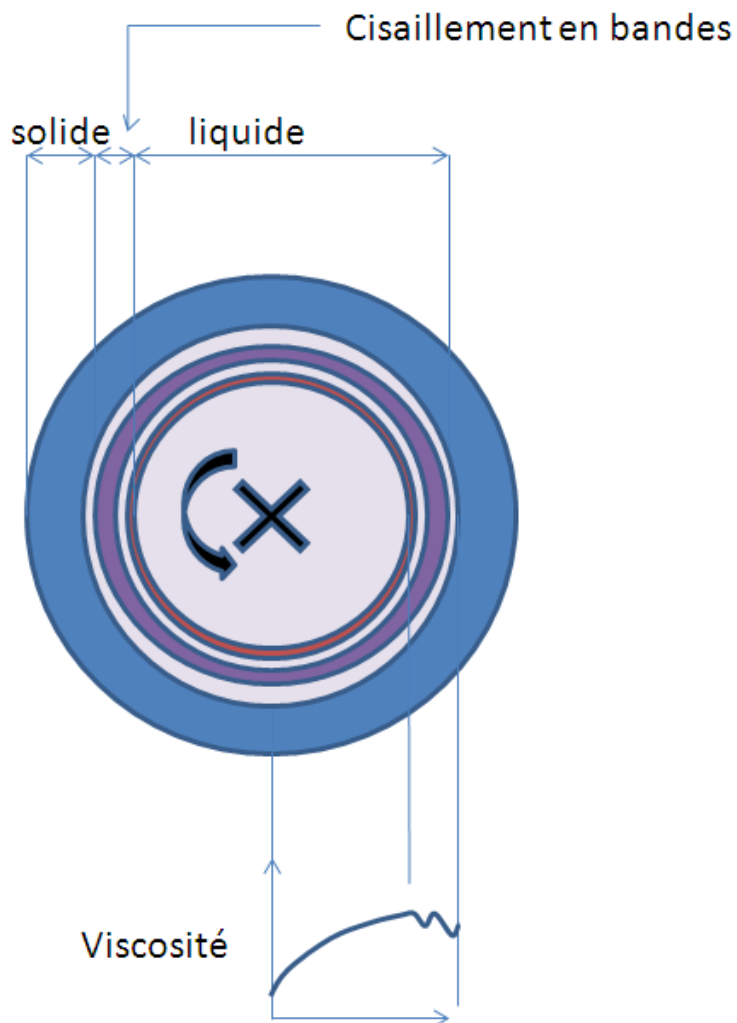
$$\tau_c = \alpha \cdot (\phi - \phi_0)^m$$



$$\dot{\gamma}_{\text{local}} = -r \cdot \frac{\partial(\omega)}{\partial r} \Leftrightarrow \omega = \int_{R_1}^{R_2} \frac{\dot{\gamma}_{\text{local}}}{r} dr \Leftrightarrow \omega = \int_{R_1}^R \frac{f(\tau_{\text{local}})}{r} dr$$

# Boues digérées

Impact sur le procédé

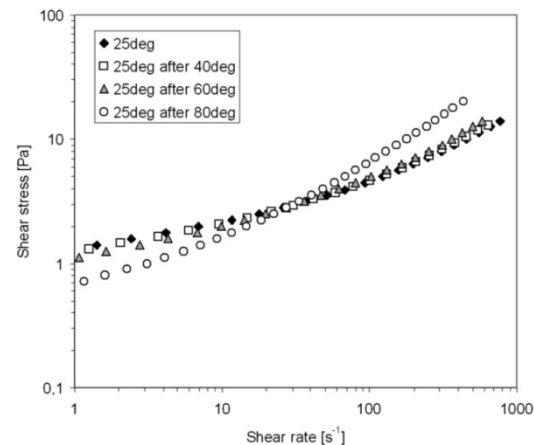
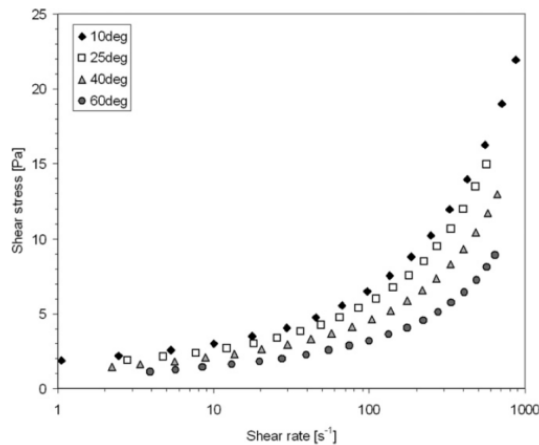


Limiter autant que possible les bandes de cisaillement

# Boues primaires, secondaires et digérées

## Impact de la température

- Caractéristiques rhéologiques diminuent quand la température augmente
- Mais pas réversible : solubilisation **irréversible** de certains composés



Augmentation de la DCO

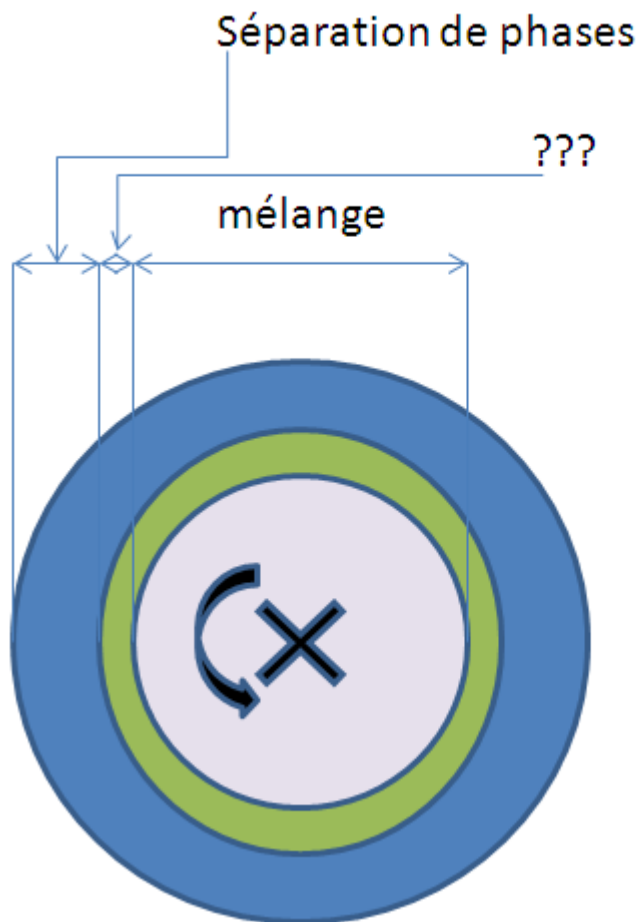
# Boues primaires, secondaires et digérées

## En mélange

- Boue 'brute' : de type gel colloïdal, thixotrope, à seuil, interactions électrostatiques (attractives)
- Boue digérée : de type émulsion, non thixotrope, à seuil, avec des bandes de cisaillement, interactions stériques (répulsives)
- En mélange : hydrophile + hydrophobe = instabilités
  - Régime solide quand la contrainte est inférieure au min des 2 seuils : séparation de phases
  - Régime liquide quand la contrainte est supérieure au max des 2 seuils : mélange 'forcé'
  - Régime intermédiaire quand la contrainte est entre les 2 seuils : ?

# Boues primaires, secondaires et digérées

Impact sur le procédé



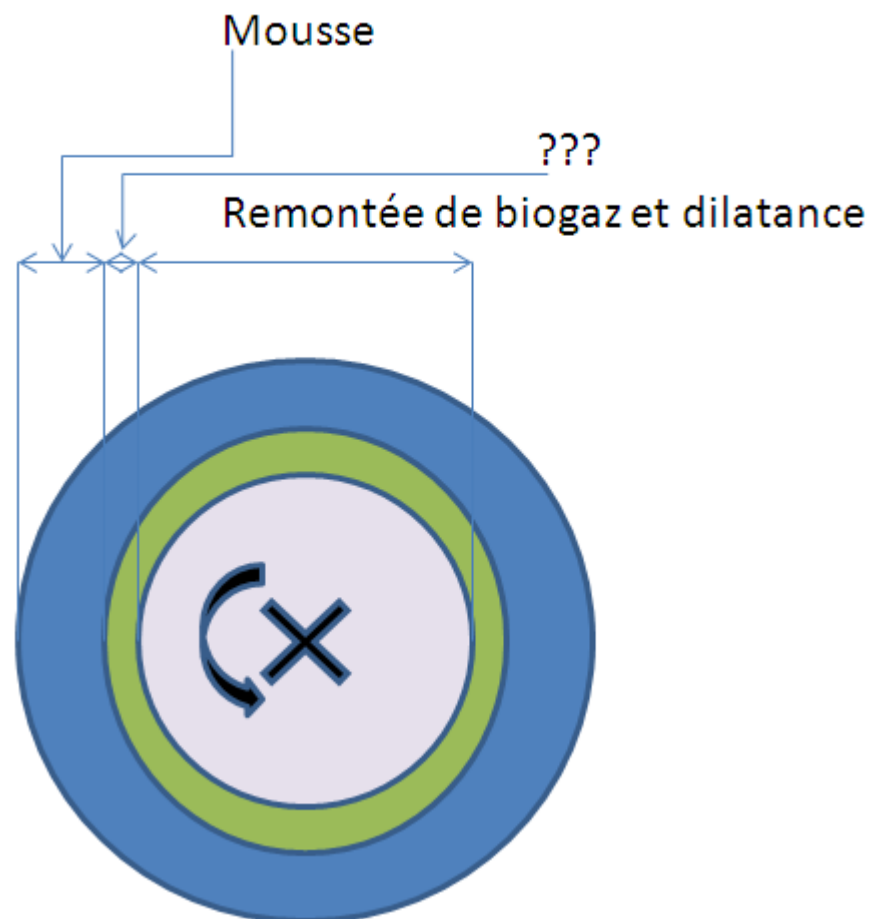
# Boues primaires, secondaires et digérées

## En mélange dans le digesteur

- En présence de biogaz : milieu triphasique → apparition de forces normales au cisaillement (et donc dilatance du milieu; Manga et al., 1998)
- Régime solide : suspension (ou émulsion) + gaz = mousse
- Régime liquide : libération et remontée de bulles par coalescence
- Régime intermédiaire : ?
  - Hypothèse : Llewellyn et al. (2002) définissent  $C_d$ , un nombre adimensionnel, par  $C_d = \lambda \dot{\gamma} / \gamma$ ,  $\lambda$  étant le temps de relaxation des bulles
  - $C_d > 1$  : la présence de bulles diminue la viscosité apparente
  - $C_d < 1$  : la présence de bulles augmente la viscosité apparente

# Boues primaires, secondaires et digérées

Impact sur le procédé

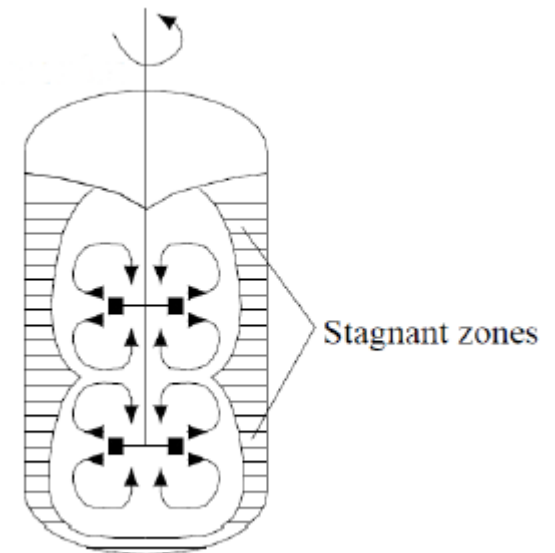


# En conclusion : optimisation du procédé

## En mélange dans le digesteur

- Du biogaz, une émulsion, une suspension de type gel
- Du point de vue de l'écoulement : zones mortes, zones liquides et dilatance
  - Zones mortes = mousse
  - Zones liquides = libération du biogaz
- Limiter les zones mortes\* en optimisant :
  - Le design du réacteur
  - Le mode de brassage et son intensité
  - En fonction des caractéristiques des matériaux

En tout point, le cisaillement local doit être supérieur au seuil de contrainte



\*incluant les bandes de cisaillement



# En conclusion : optimisation du procédé

## Le seuil de contrainte : le paramètre clé

- Pour que localement le cisaillement génère une contrainte supérieure au seuil :
  - Déterminer le(s) seuil(s) en amont, et si possible en ligne
  - Limiter l'écart entre les seuils : adapter une boucle d'épaississement ?
  - Optimiser le mode de brassage
  - Rétroagir en ligne sur les paramètres de conduite du digesteur en fonction des caractéristiques des intrants...
- ... En diphasique
- Reste la question (ouverte) de l'écoulement d'un matériau triphasique.

Merci de votre attention

Journées  
Recherche &  
Industrie  
Biogaz  
Méthanisation  
16-18 oct. 2013

