

# Utilisation de mesures de viscosités pour le calcul du mélange dans un digesteur

Aline Lebranchu

Fabrice Blanchard, Stéphane Delaunay, Stéphane Pacaud,  
Philippe Marchal, Michel Fick, Eric Olmos

Laboratoire Réactions et Génie des Procédés, UMR CNRS 7274 Nancy

# Plan de la présentation

Partie 1 : Introduction – Problèmes de mélange en digesteurs

Partie 2 : Etablissement d'une loi rhéologique du digestat

Partie 3 : Principe du calcul numérique

Partie 4 : Résultats

4.1 : Champs de viscosités

4.2 : Champs de vitesses moyennes

4.3 : Temps de mélange

Partie 5 : Conclusion

## Partie 1 : Introduction – Problèmes de mélange en digesteurs

Partie 2 : Etablissement d'une loi rhéologique du digestat

Partie 3 : Principe du calcul numérique

Partie 4 : Résultats

4.1 : Champs de viscosités

4.2 : Champs de vitesses moyennes

4.3 : Temps de mélange

Partie 5 : Conclusion

# Introduction – Problèmes de mélange

- Agitation classique des méthaniseurs



Agitateurs non-dimensionnés par rapport à la taille de l'installation.



Réacteurs potentiellement hétérogènes:  
Présence éventuelle de **gradients** de pH, température, substrat, biogaz dissous.



Problèmes de contrôle du procédé ?  
Zones mortes ?

# Introduction – Problèmes de mélange

- Agitation classique des méthaniseurs

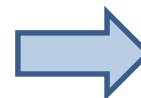
## Problèmes actuels :

- Température non homogène
- pH non homogène
- Substrat non répartis de manière homogène
- etc



## Etude du mélange en digesteur (en réacteur de 2L) :

- Etude de la phase fluide.
- Simulation numérique des écoulements en réacteur de design standard.
- Simulation numérique des écoulement en digesteur muni d'un type d'agitateur performant pour le mélange de fluides visqueux.



## Comparaison des performances d'agitation :

- Champs de vitesses moyens
- Champs de viscosité
- Temps de mélange

Partie 1 : Introduction – Problèmes de mélange en digesteurs

**Partie 2 : Etablissement d'une loi rhéologique du digestat**

Partie 3 : Principe du calcul numérique

Partie 4 : Résultats

4.1 : Champs de viscosités

4.2 : Champs de vitesses moyennes

4.3 : Temps de mélange

Partie 5 : Conclusion

# Comportement rhéologique du digestat

## Comportement rhéologique attendu de lisier de vache :

Comportement non-Newtonien : la viscosité (= sa capacité à s'écouler) du fluide varie avec la contrainte appliquée.

La capacité du fluide à s'écouler varie en fonction de la force qui est appliquée localement sur ce fluide.

- La viscosité du digestat n'est pas homogène dans la cuve : elle dépend de la proximité du fluide à l'agitateur.
- Le profil de viscosité dépend de la vitesse de l'agitateur.
- Modélisation du comportement rhéologique du digestat : loi puissance.

$$\mu = K\dot{\gamma}^{n-1}$$

$\mu$  : viscosité (Pa.s)

$\dot{\gamma}$  : taux de cisaillement ( $s^{-1}$ )

$K$  et  $n$  : paramètres propres à un fluide donné

$K$  : indice de consistance : Plus  $K$  est grand, plus le fluide est épais

$n$  : indice d'écoulement

$n = 1$  : le fluide est Newtonien (ex : eau)

$0 < n < 1$  : fluide rhéofluidifiant : plus le fluide est agité, moins il est visqueux

# Comportement rhéologique du digestat

## ***Principe de la mesure :***

- Fixation de la vitesse d'agitation.
  - Mesure de la force nécessaire pour faire tourner l'agitateur à cette vitesse dans ce fluide : mesure du couple (N.m).
- Mesures faites pour plusieurs vitesses d'agitation.

## ***But :***

- Détermination des paramètres  $K$  et  $n$  pour le fluide étudié.

## ***Résultats :***

- Pour le digestat à un taux de MS = 10 % :

$$K = 5 \text{ Pa.s}^{0,32} \text{ et } n = 0,32$$

$$\rightarrow \mu = 5 \dot{\gamma}^{0,32-1}$$





Partie 1 : Introduction – Problèmes de mélange en digesteurs

Partie 2 : Etablissement d'une loi rhéologique du digestat

**Partie 3 : Principe du calcul numérique**

Partie 4 : Résultats

4.1 : Champs de viscosités

4.2 : Champs de vitesses moyennes

4.3 : Temps de mélange

Partie 5 : Conclusion

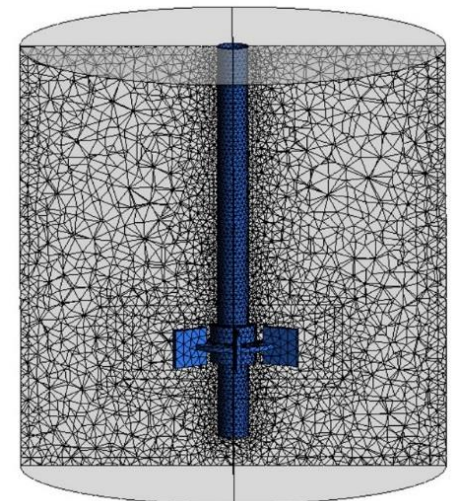
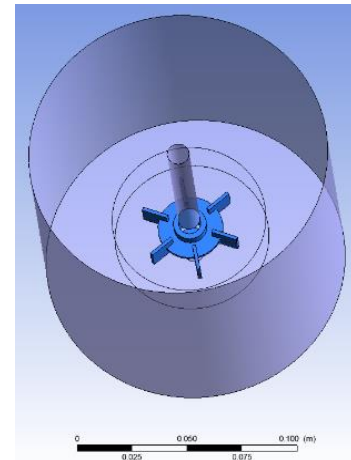
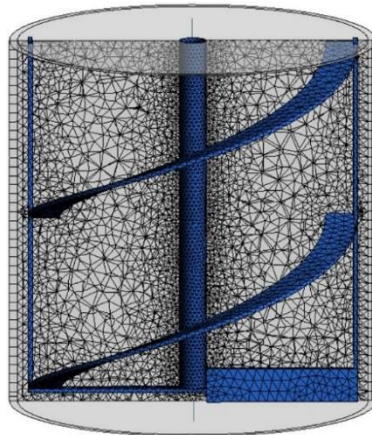
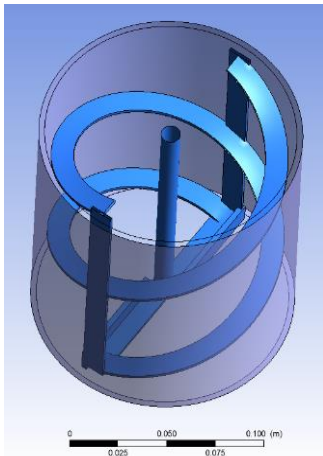
# Principe du calcul numérique

## *Comparaison de 2 types d'agitateurs sur le logiciel commercial ANSYS Fluent :*

- Agitateur de **proximité** : ruban hélicoïdal
- Agitateur **classique** : turbine Rushton

## *Principe de la simulation :*

- Design de la géométrie des digesteurs.
  - Découpage du volume du digesteur en milliers de petits volumes (cellules de calcul). Chaque cellule est supposée homogène (en température, vitesse, viscosité, concentration, etc).
  - L'agitateur est mis en rotation par pas de 0,01s.
- Pour chaque rotation l'ensemble des propriétés est calculé dans chaque cellule.



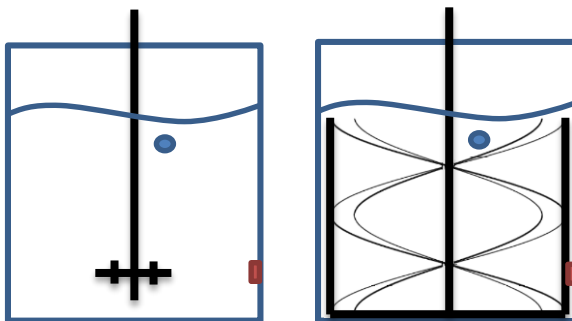
# Principe du calcul numérique

## *Principe de calcul des résultats :*

- Les paramètres de calculs tels que la loi de viscosité sont implémentés dans le modèle.
- **Résolution des équations de Navier-Stokes.**

## *Résultats obtenus*

- Détermination des vitesses moyennes : pour chaque cellule de calcul, la moyenne des vitesses obtenues pendant 1 tour d'agitateur est effectué. → Obtention d'un **champ de vitesses moyen**.
- Détermination des viscosités instantanées : pour une position d'agitateur donnée, l'ensemble des viscosités pour chaque cellule est observé.
- Détermination du **temps de mélange** : une sphère de traceur est ajoutée dans le réacteur. Le temps au bout duquel 95 % de la concentration moyenne est atteinte à la sonde est calculé.



● Traceur ( $t = 0$ )    ■ Sonde

Partie 1 : Introduction – Problèmes de mélange en digesteurs

Partie 2 : Etablissement d'une loi rhéologique du digestat

Partie 3 : Principe du calcul numérique

**Partie 4 : Résultats**

4.1 : Champs de viscosités

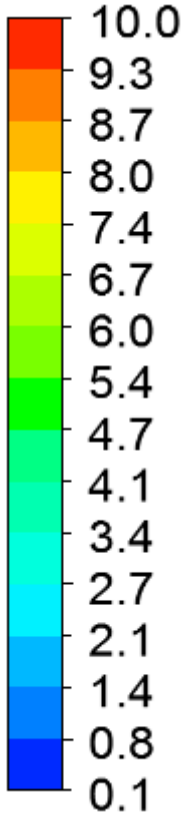
4.2 : Champs de vitesses moyennes

4.3 : Temps de mélange

Partie 5 : Conclusion

# Résultats – Distribution des viscosités

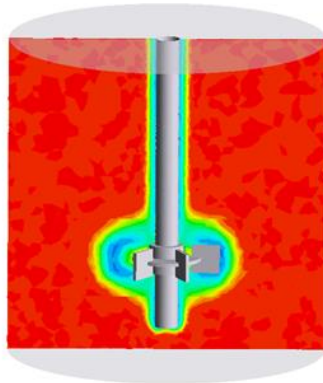
**Viscosité (Pa.s)**



**Turbine  
Rushton**

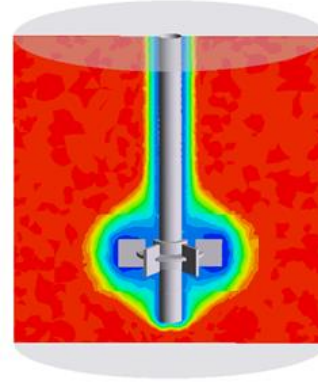
22 rpm

$\mu_{\text{moy}} = 9,6 \text{ Pa.s}$



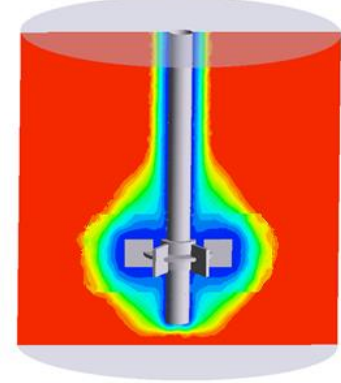
66 rpm

$\mu_{\text{moy}} = 9,5 \text{ Pa.s}$



110 rpm

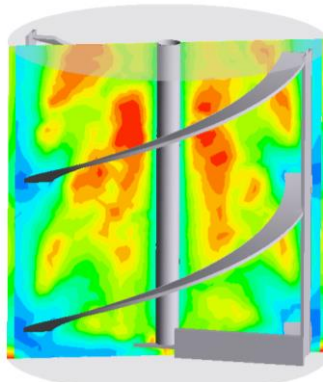
$\mu_{\text{moy}} = 9,3 \text{ Pa.s}$



**Ruban  
hélicoïdal**

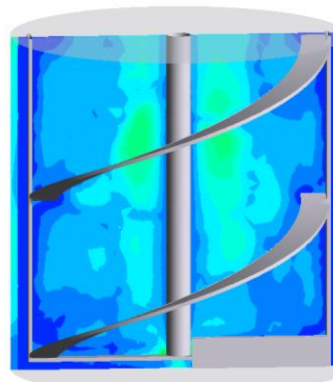
10 rpm

$\mu_{\text{moy}} = 5,2 \text{ Pa.s}$



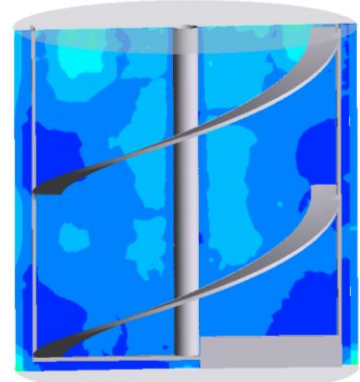
50 rpm

$\mu_{\text{moy}} = 1,8 \text{ Pa.s}$



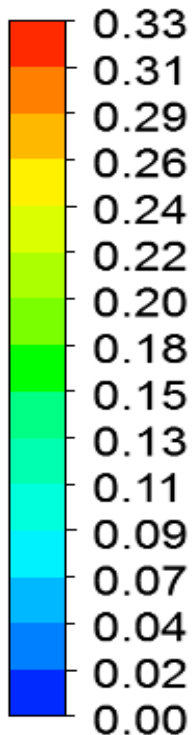
90 rpm

$\mu_{\text{moy}} = 1,0 \text{ Pa.s}$



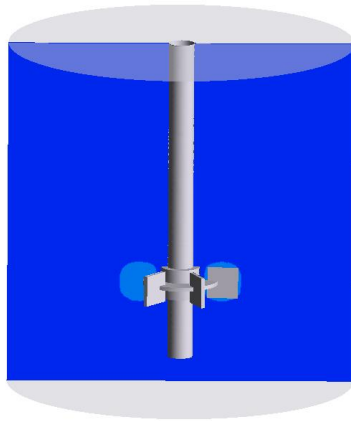
# Résultats – Distribution des vitesses moyennes

**Vitesses moyennes (m/s)**

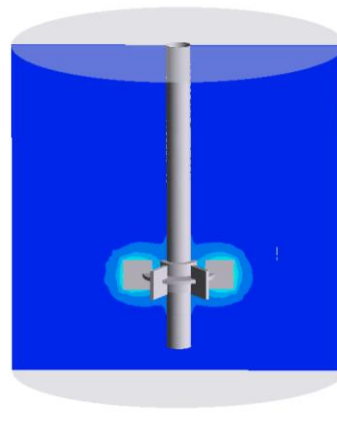


**Turbine Rushton**

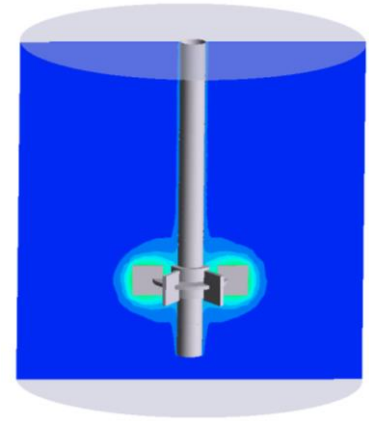
22 rpm  
 $v_{\text{moy}} = 0,0017 \text{ m/s}$



66 rpm  
 $v_{\text{moy}} = 0,0041 \text{ m/s}$

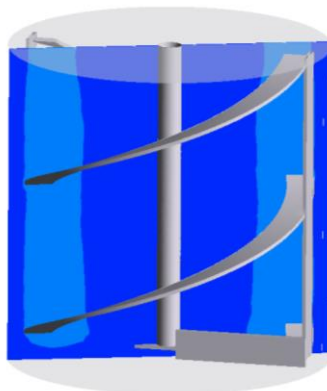


110 rpm  
 $v_{\text{moy}} = 0,0041 \text{ m/s}$

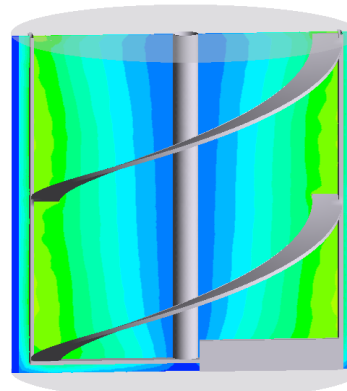


**Ruban hélicoïdal**

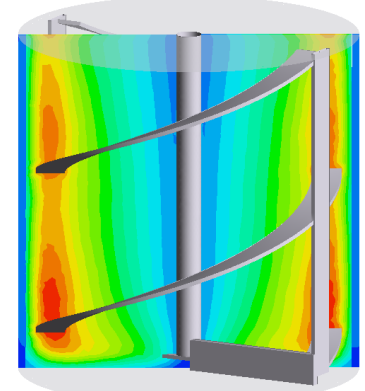
10 rpm  
 $v_{\text{moy}} = 0,02 \text{ m/s}$



50 rpm  
 $v_{\text{moy}} = 0,12 \text{ m/s}$

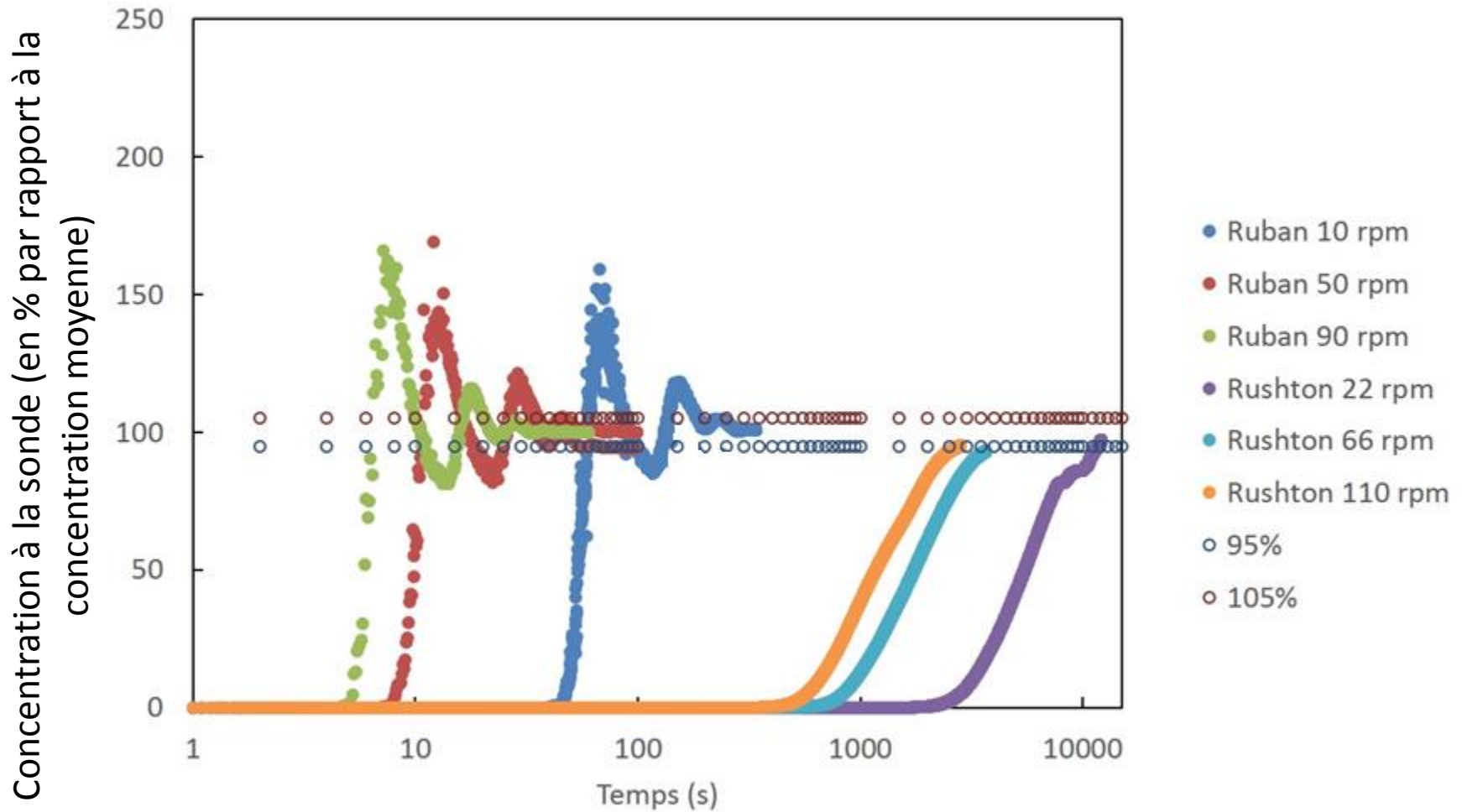


90 rpm  
 $v_{\text{moy}} = 0,17 \text{ m/s}$





# Résultats – Temps de mélange



# Résultats : bilan

Agitateur	Fréquence d'agitation (tr/min)	$\mu_{\text{moy}}$ (Pa.s)	$V_{\text{moy}}$ (m/s)	Temps de mélange (s)
Turbine Rushton	22	9,6	0,0017	11696
	66	9,5	0,0041	4150
	110	9,3	0,0041	2804
Ruban hélicoïdal	10	5,2	0,02	187
	50	1,8	0,12	47
	90	1,0	0,17	21

- Les viscosités moyennes obtenues avec le ruban sont au moins 2 fois inférieures à celles obtenues avec la turbine Rushton.
  - Les vitesses moyennes obtenues avec le ruban sont au moins 10 fois supérieures à celles obtenues avec la turbine Rushton.
- **Les temps de mélange obtenus avec le ruban sont presque 100 fois inférieurs à ceux obtenus avec la turbine Rushton.**



Partie 1 : Introduction – Problèmes de mélange en digesteurs

Partie 2 : Etablissement d'une loi rhéologique du digestat

Partie 3 : Principe du calcul numérique

Partie 4 : Résultats

4.1 : Champs de viscosités

4.2 : Champs de vitesses moyennes

4.3 : Temps de mélange

Partie 5 : Conclusion

# Conclusions

- La caractérisation rhéologique du digestat et la simulation numérique de l'hydrodynamique en digesteur met en évidence **les problèmes de mélange rencontrés lors de la méthanisation**.
  - Agitateur classique → mélange du digestat limité.
  - Agitateur de proximité → meilleur brassage du fluide.
- **Temps de mélange considérablement réduit conduisant à :**
- Substrats plus rapidement répartis et donc probablement plus rapidement consommés.
  - Des températures plus homogènes et donc mieux contrôlées.
  - Une mesure de pH plus représentative de l'ensemble de la cuve.
- **Globalement un meilleur contrôle du procédé est escompté.**

L'approche par mesure de viscosité du digestat et le couplage à une étude CFD permet **un dimensionnement des agitateurs en adéquation avec le fluide utilisé.**

# Merci de votre attention

