



INSTITUT NATIONAL  
DES SCIENCES  
APPLIQUÉES  
TOULOUSE



# JRI Biogaz méthanisation 2020

24-26 mars 2020

TOULOUSE

*en partenariat avec*





INSTITUT NATIONAL  
DES SCIENCES  
APPLIQUÉES  
TOULOUSE



# Brassage de fluides épais par injection de gaz pour la méthanisation

## Approches expérimentale et numérique

L. Jossic, A. Hojeij, A. Magnin  
Laboratoire Rhéologie et Procédés



Laboratoire  
Rhéologie et  
Procédés

P. Séchet, C. Bonamy,  
Laboratoire des Ecoulements Géophysiques et Industriels



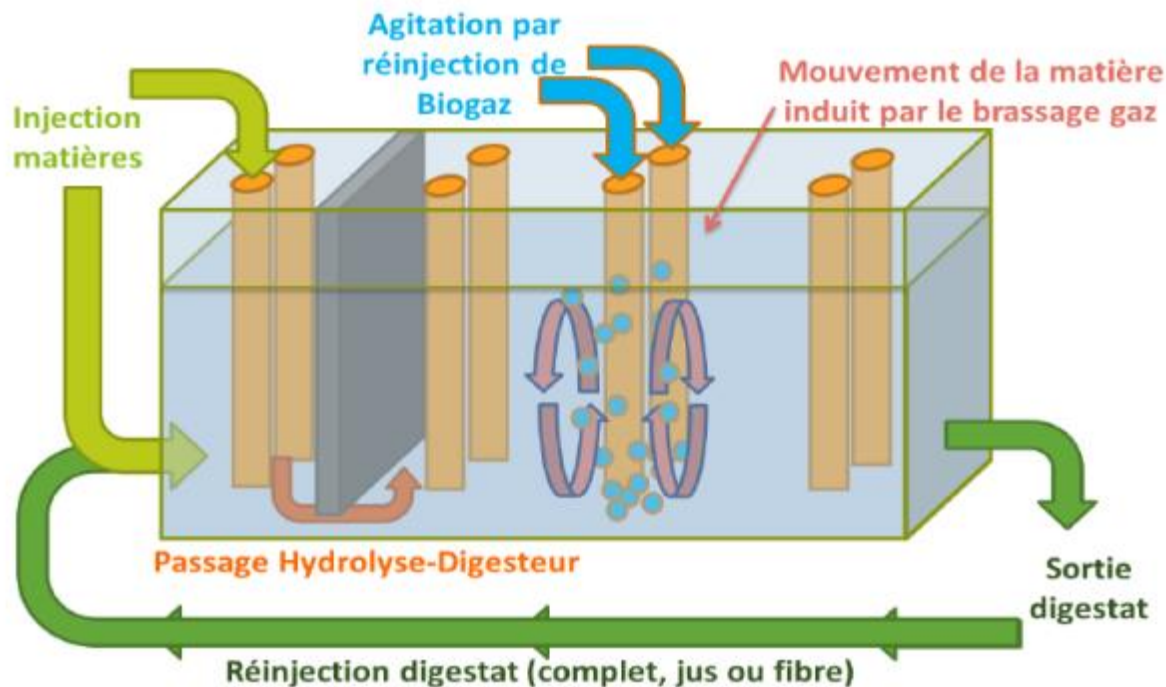
F. Blanc, S. Hattou  
Arkolia Energies



# Injection de gaz pour la méthanisation

## Ecoulements :

- inertiels
- di-phasiques
- matière épaisse
- tri-dimensionnels
- instationnaires



Source : Industrialisation du procédé ARKOMETHA : Procédé de méthanisation voie épaisse, semi-piston par agitation pneumatique, 5èmes JOURNEES de la METHANISATION 6-7-8 décembre 2016, Chambéry

## Objectifs de l'étude :

- Caractériser la dynamique des inclusions gazeuses
- Identifier la morphologie des zones d'agitation
- Quantifier l'intensité d'agitation de la matière épaisse

# Morphologie des écoulements

- Formation d'une cavité d'air entre le point d'injection et la paroi inférieure du réservoir
- Détachement de bulles successives avec une fréquence caractéristique
- Remontée des bulles vers la surface libre
  - recirculations locales
  - recirculation en volume
- Explosion des bulles au niveau de la surface libre



*Pilote de laboratoire*

# Plan

- Dispositif expérimental
- Modélisation et simulation numérique
- Cavité gazeuse au point d'injection
- Morphologie et dynamique des bulles
- Recirculation de la phase liquide
- Conclusions

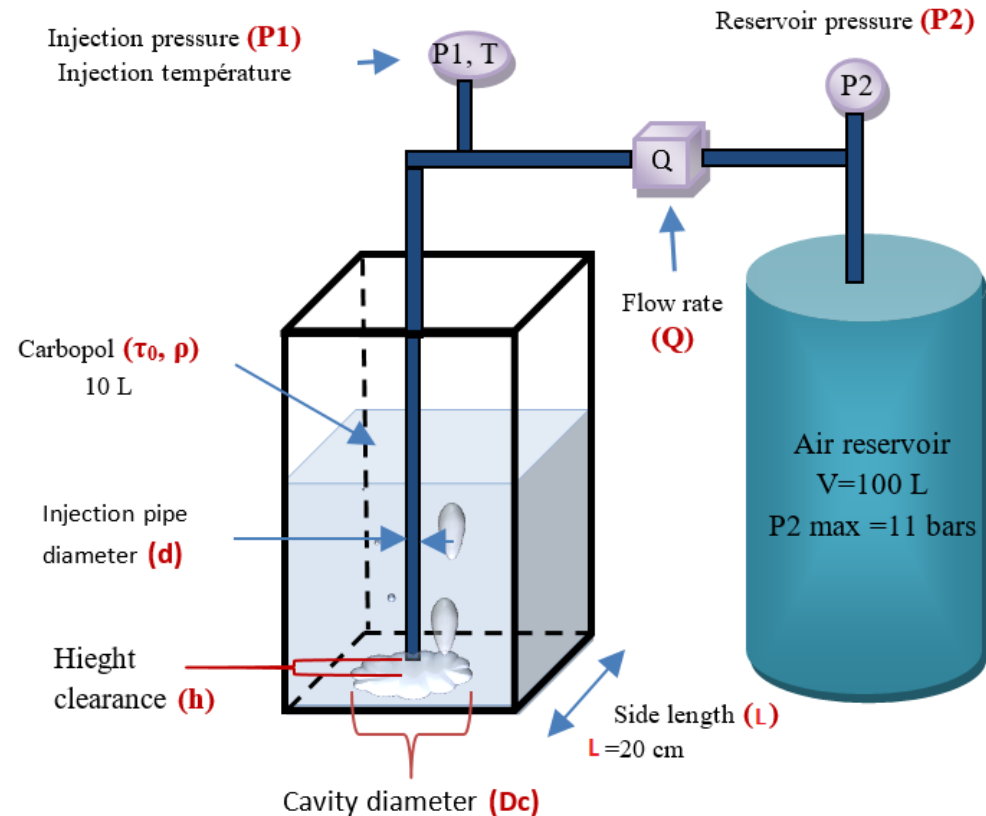
# Dispositif expérimental

**Paramètres d'injection**  
débit constant,  
jusqu'à  $10\text{m}^3/\text{h}$

Dimension du réservoir  
de 20 à 60 cm

Hauteur de fluide : 25cm

**Techniques expérimentales**  
Suivi de particules  
Colorimétrie



# Fluide modèle transparent

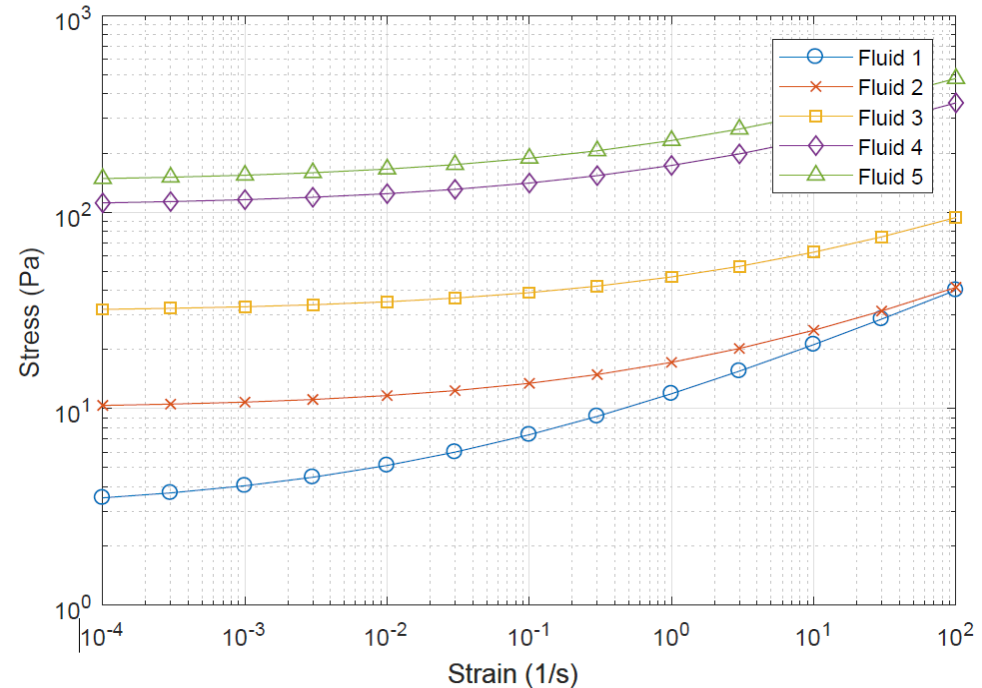
## Gel

- transparent
- fluide à seuil d'écoulement
- non-thixotrope

## Modèle de Herschel-Bulkley :

$$\begin{aligned} \tau > \tau_0 & \quad \tau = \tau_0 + K\dot{\gamma}^n \\ \tau < \tau_0 & \quad \dot{\gamma} = 0 \end{aligned}$$

$\tau_0$       contrainte seuil  
 $K$         consistance  
 $n$         indice d'écoulement





# Simulation numérique

## OpenFOAM

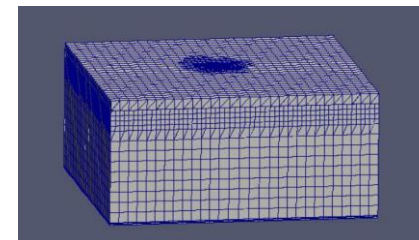
- Méthode Volume of Fluid
- Fraction volumique :  $\alpha$

## Equations gouvernantes

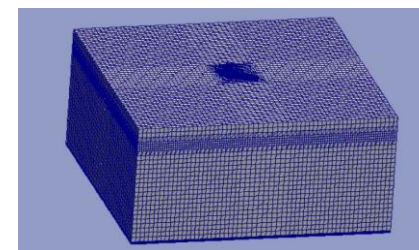
- Conservation de la masse
- Conservation de la qdm
- Modèle bi-visqueux

## Résolution

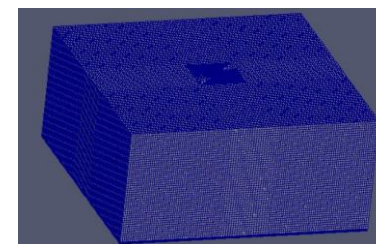
- Méthode des volumes finis
- Solver InterDyN Foam (polyphasique, incompressible, fluides non-Newtoniens )
- Maillage dynamique avec raffinement aux interfaces
- Temps de calcul 1 à 2 jours sur Cluster régional



$\delta x = 2 \text{ cm}$



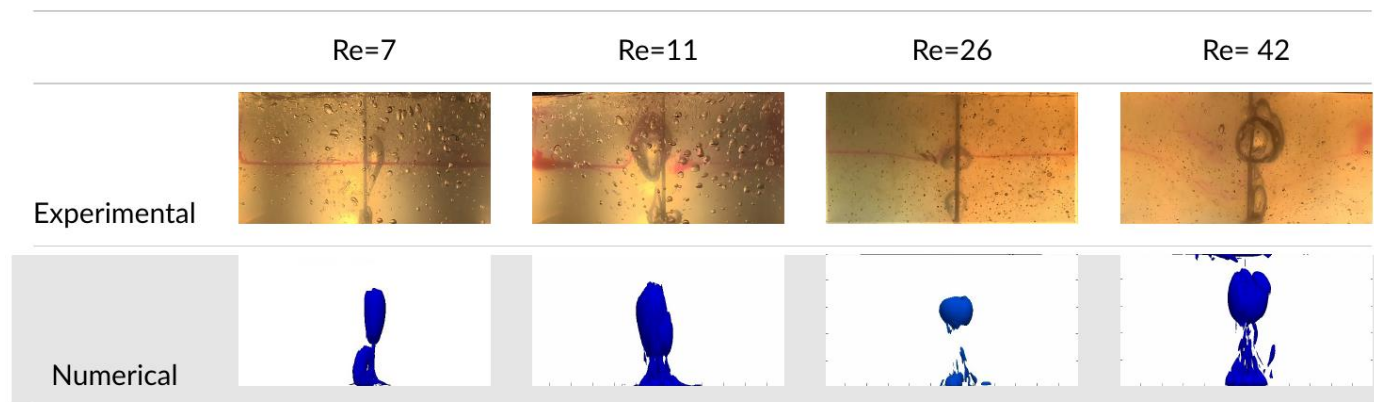
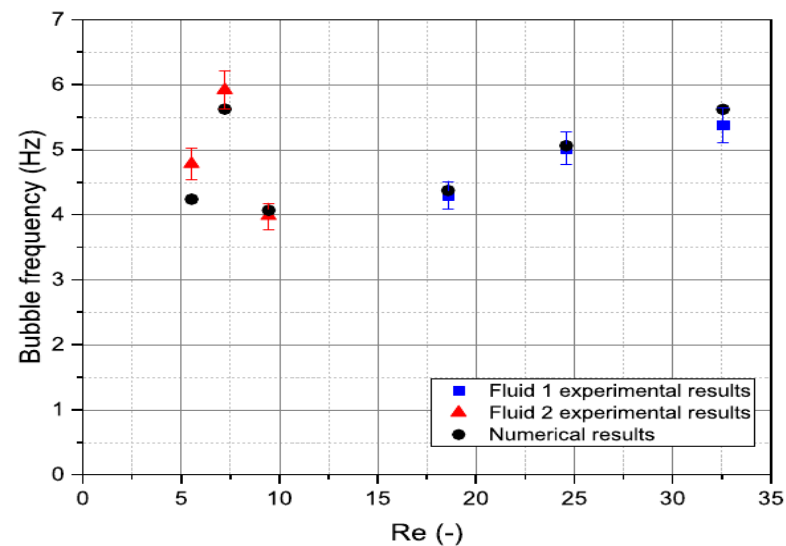
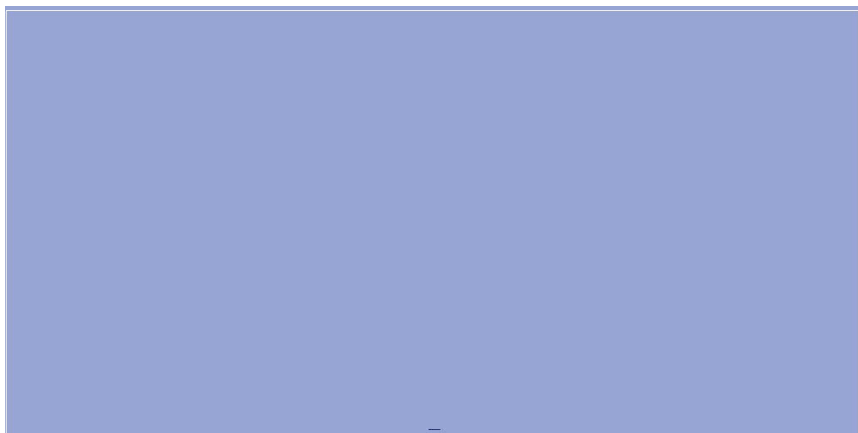
$\delta x = 1 \text{ cm}$



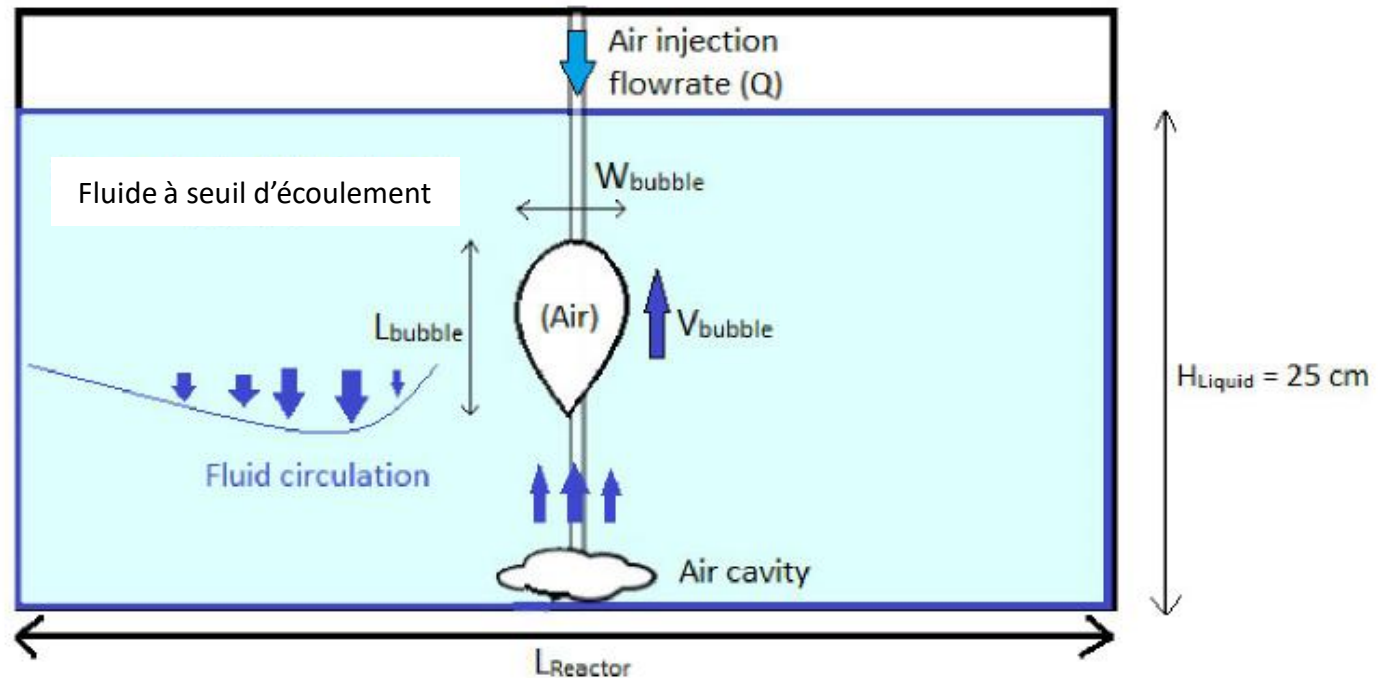
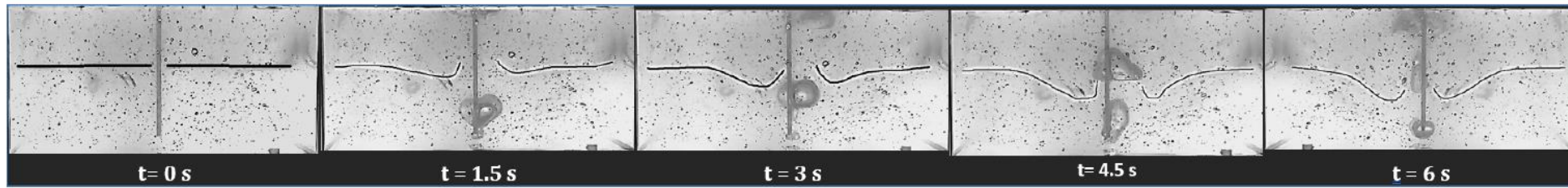
$\delta x = 0,5 \text{ cm}$



# Comparaison expérimental / numérique

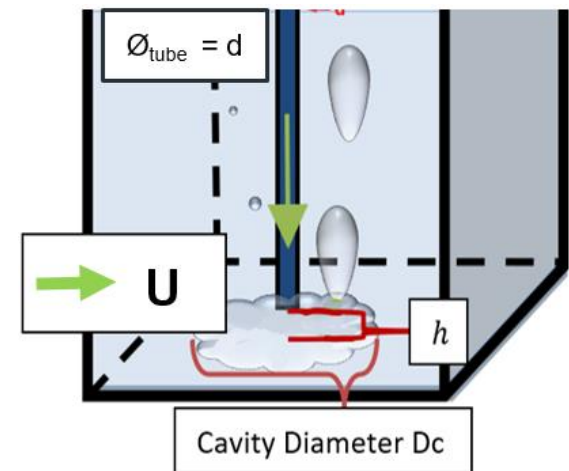
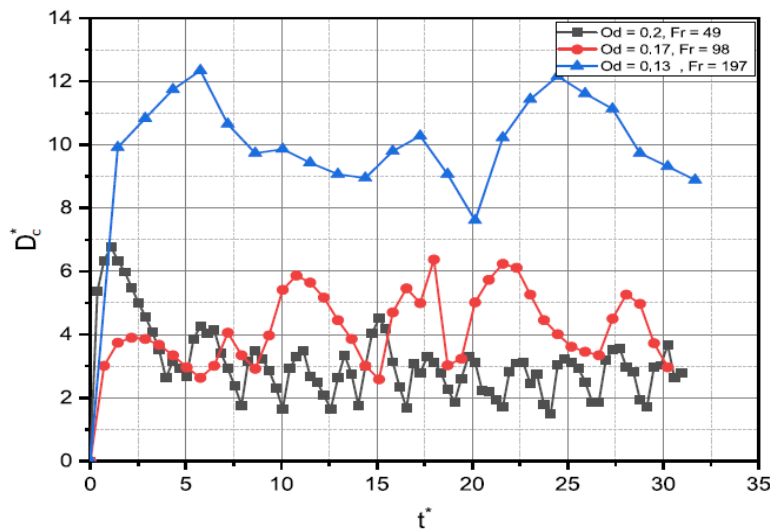
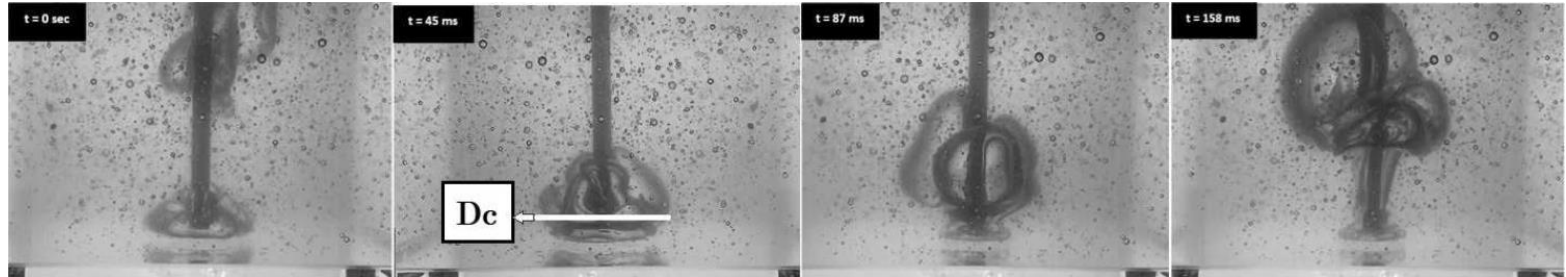


# Modélisation de l'écoulement



# Cavité gazeuse au point d'injection

## Observations expérimentales



# Analyse dimensionnelle de la cavité

Nombre de Reynolds

$$Re_I = \frac{\rho_I U^{2-n} d^n}{k}$$

Nombre de Froude

$$Fr = \frac{U}{\sqrt{dg}}$$

Nombre d'Oldroyd

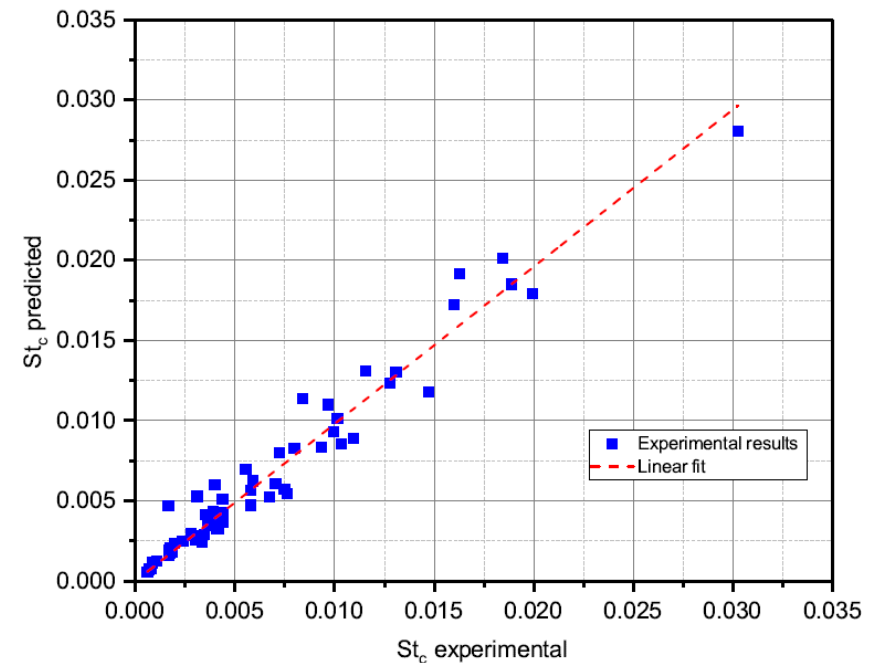
$$Od = \frac{\tau_0}{k \left( \frac{U}{d} \right)^n}$$

Fréquence de détachement

$$St_c = 0.2 Re_I^{0.22} Fr^{-1.54} Od^{-0.2} h^{*-0.12}$$

$$\frac{Re_I^{0.22}}{Od^{0.2}} \approx \left( \frac{\rho_I U^2}{\tau_0} \right)^{0.2}$$

- Les bulles se détachent quand les forces de flottabilité  $\gg$  résistance due au fluide
- La fréquence est gouvernée par les effets d'inertie et la contribution visqueuse du fluide

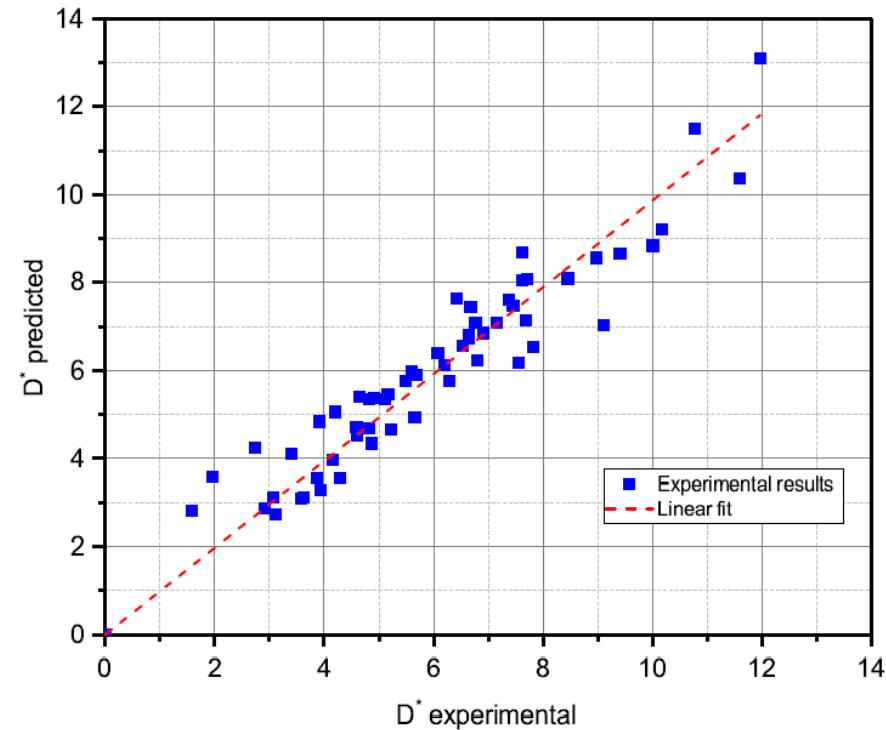


# Diamètre de la cavité

$$D_c^* = 0.45 Re_l^{0.08} Fr^{0.44} Od^{-0.05} h^{*-0.2}$$

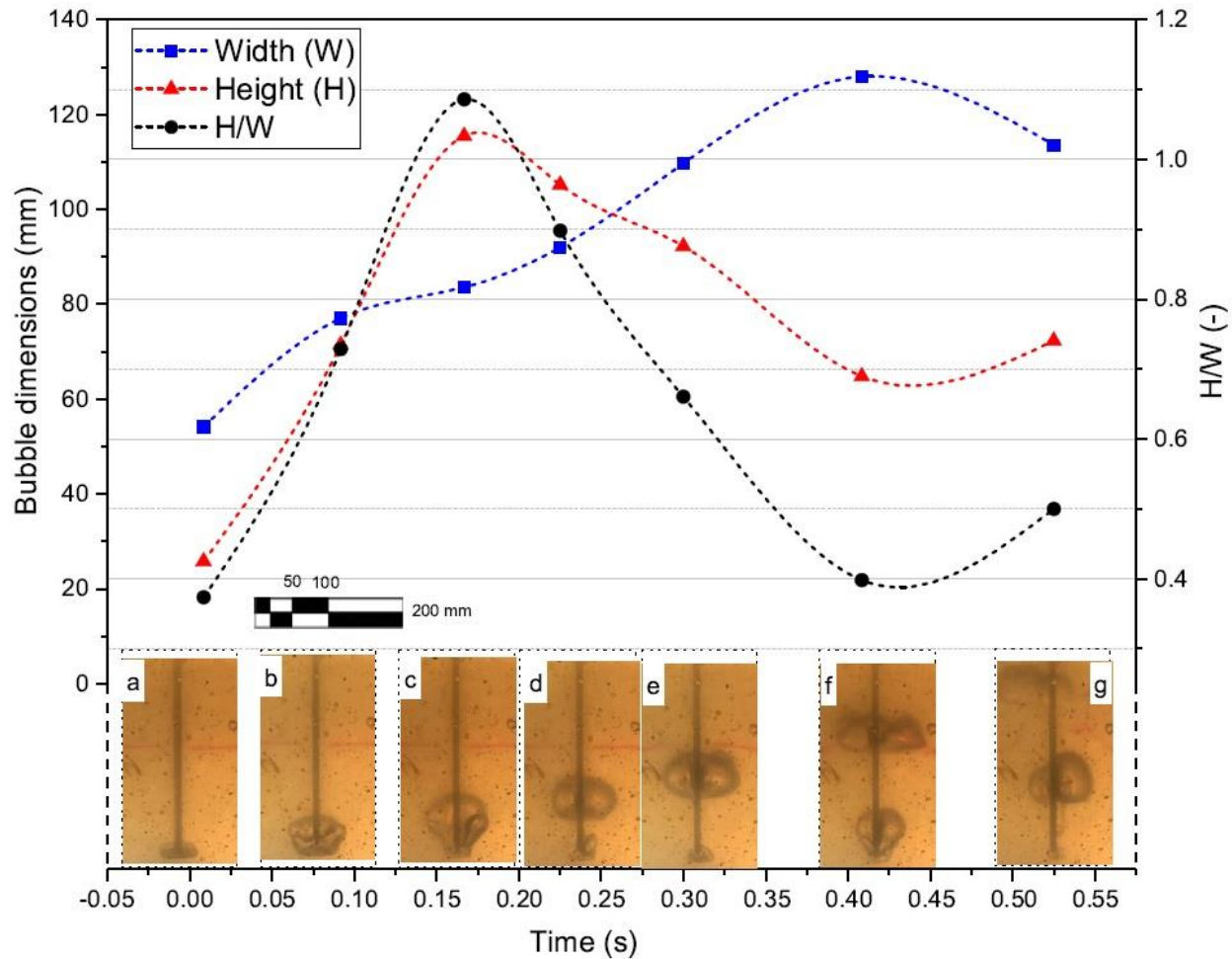
- Le diamètre dépend principalement de Fr et de l'entrefer
- Le diamètre est principalement gouverné par l'inertie du jet de gaz
- Une équation simplifiée peut-être obtenue:

$$D_c^* = 0.6 Fr^{0.54} h^{*-0.16}$$



# Dynamique des bulles

Evolution de la morphologie depuis le point d'injection jusque la surface libre





# Lois d'échelle de la bulle

## Rayon caractéristique de la bulle

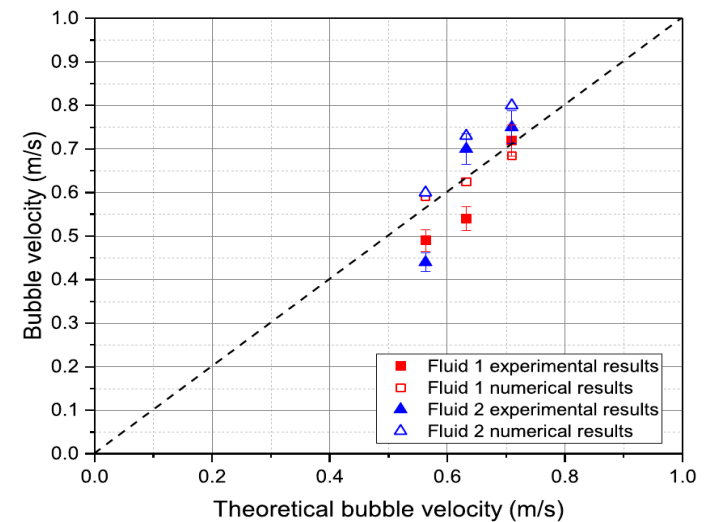
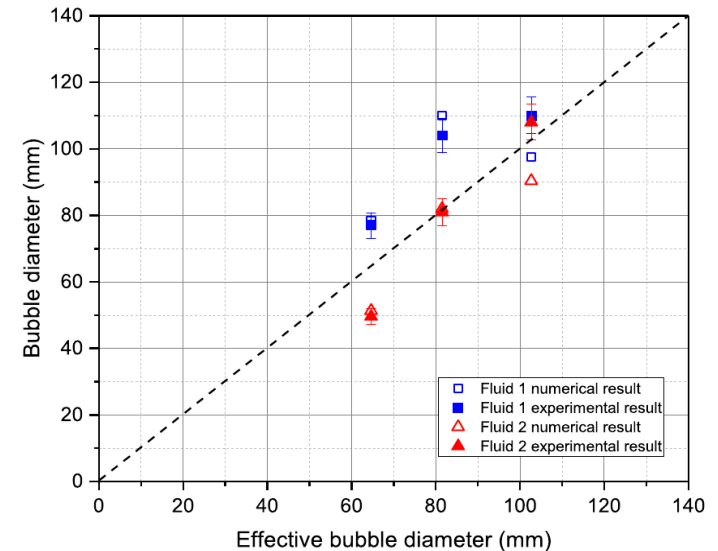
Conservation du débit  $Q = V_b \cdot F_b$

$$R = \left( \frac{3Q}{4\pi F_b} \right)^{1/3}$$

## Vitesse caractéristique de la bulle

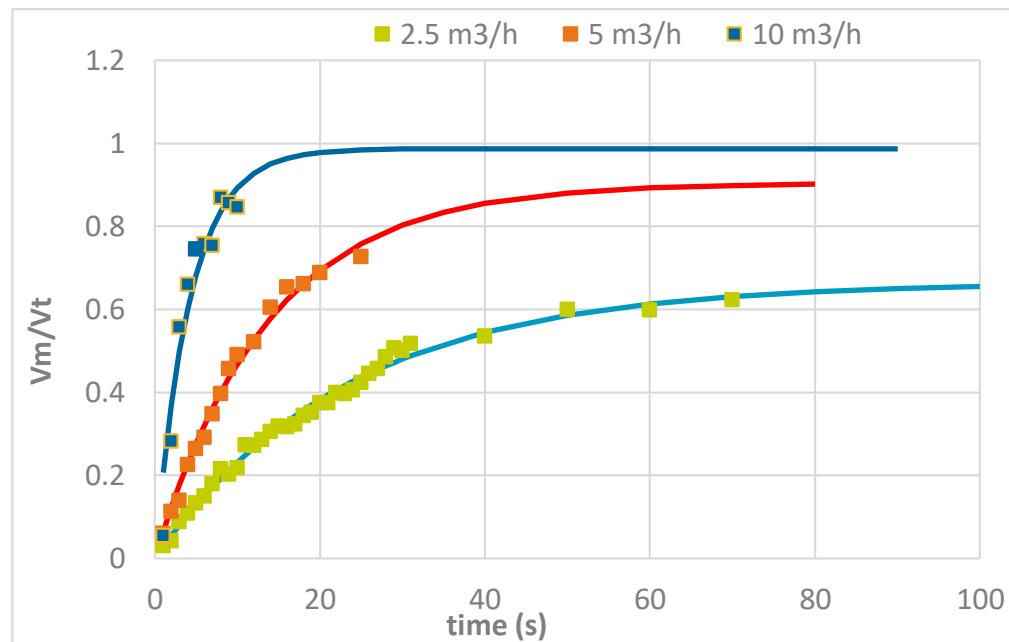
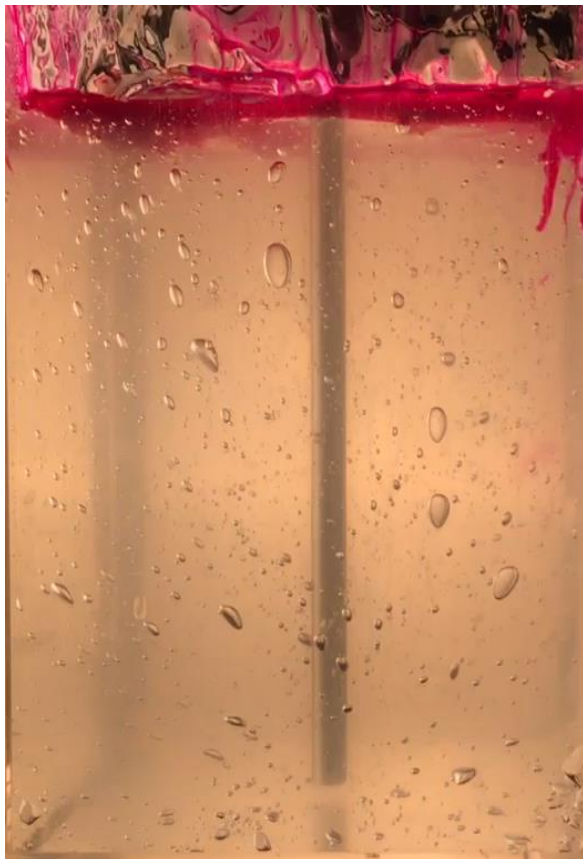
Equilibre inertie / flottabilité

$$U = \sqrt{gR}$$



# Zones d'agitation effective

Evolution temporelle de la zone de mélange par colorimétrie



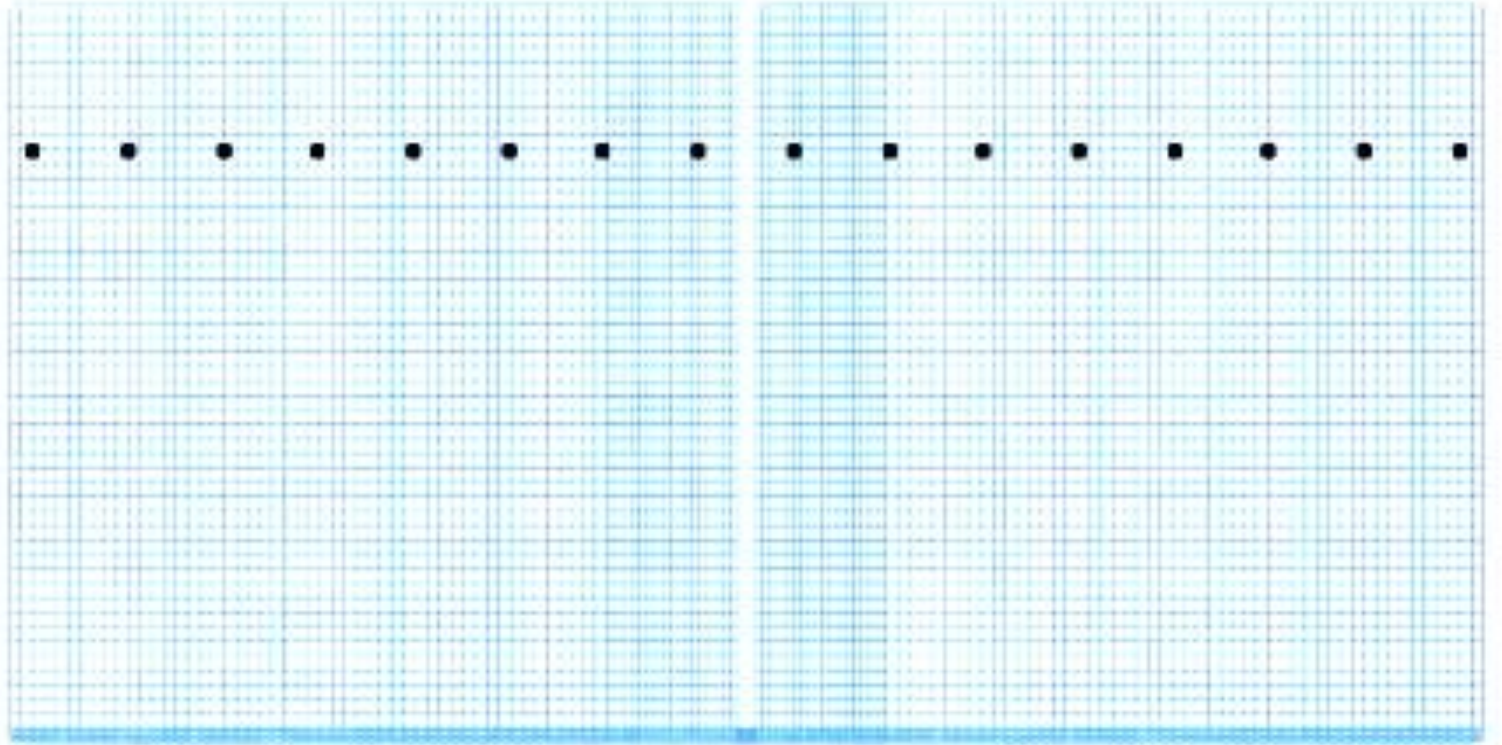
$$\frac{V_{mixed}}{V_{total}} = k(1 - e^{-\frac{t}{\tau}})$$

$\tau$  : échelle de temps caractéristique du mélange

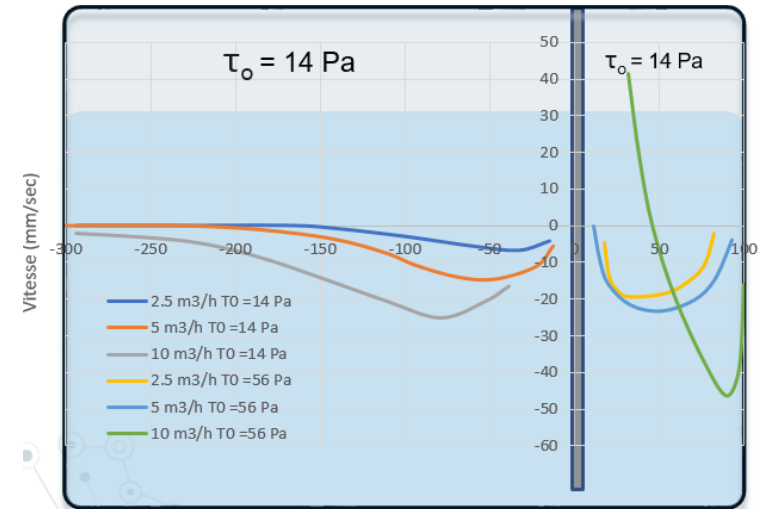
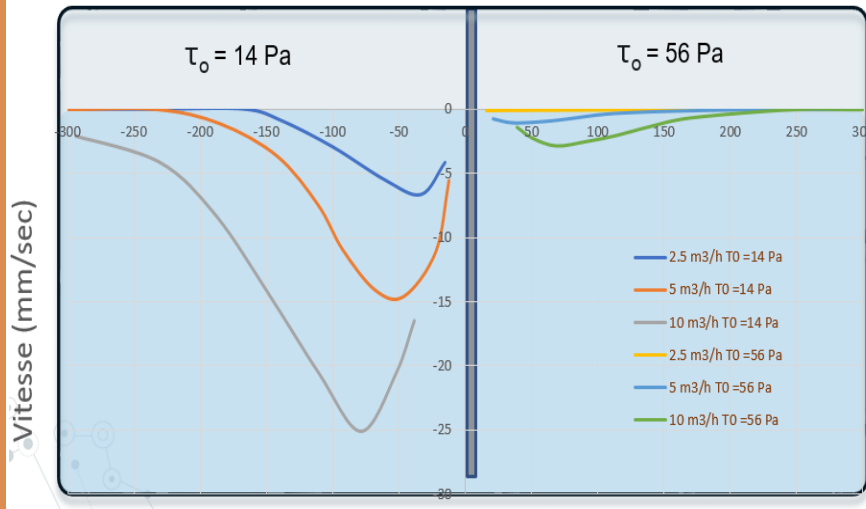
$k$  : volume maximal agité

Corrélés aux nombres adimensionnels qui gouvernent l'écoulement

# Suivi lagrangien de particules



# Débit de fluide recirculant



$$Q_l^v = \frac{1}{\tau_d} \int_L y_{disp}(x) \times 2\pi x dx$$

## Mise en évidence de l'influence

- de la contrainte seuil
- du débit d'injection
- de la taille du digesteur

# Conclusions et perspectives

Une approche expérimentale et numérique a permis de quantifier la dynamique et la morphologie

- de la cavité de gaz au point d'injection,
- des bulles.

L'étendue et la forme de la zone d'agitation effective peut être correctement prédite en fonction des paramètres opératoires d'injection.

Ces outils constituent une aide au dimensionnement et aux conditions d'injection de nouveaux digesteurs.