



**HAL**  
open science

# Maîtrise des biofilms dans les réacteurs de méthanisation à biomasse fixée : retour sur 15 ans de recherche

Nicolas Bernet

## ► To cite this version:

Nicolas Bernet. Maîtrise des biofilms dans les réacteurs de méthanisation à biomasse fixée : retour sur 15 ans de recherche. Colloque Bioadhésion, Biocontamination des surfaces (BioAdh2021), Mar 2021, Visioconférence, France. hal-04179465

**HAL Id: hal-04179465**

**<https://hal.inrae.fr/hal-04179465v1>**

Submitted on 9 Aug 2023

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

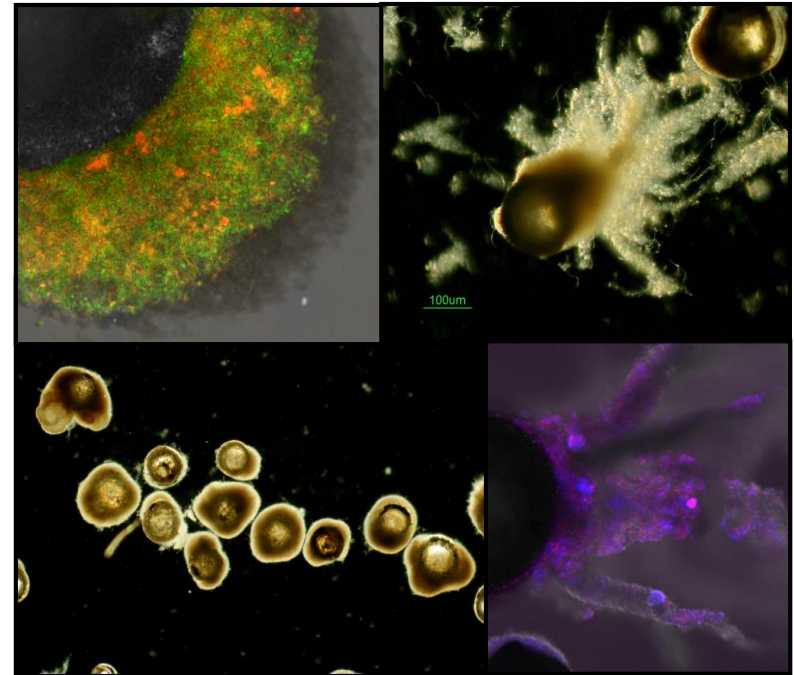


Distributed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License

# ➤ Maîtrise des biofilms dans les réacteurs de méthanisation à biomasse fixée : retour sur 15 ans de recherche

**NICOLAS BERNET**

INRA UR 0050, LABORATOIRE DE BIOTECHNOLOGIE DE L'ENVIRONNEMENT, F-11100 NARBONNE



# ➤ Introduction

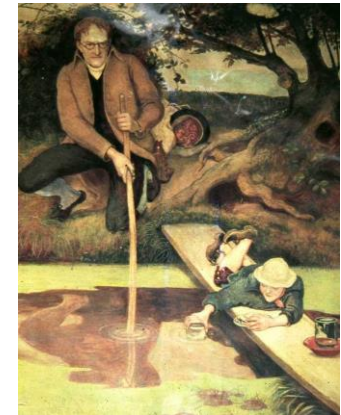
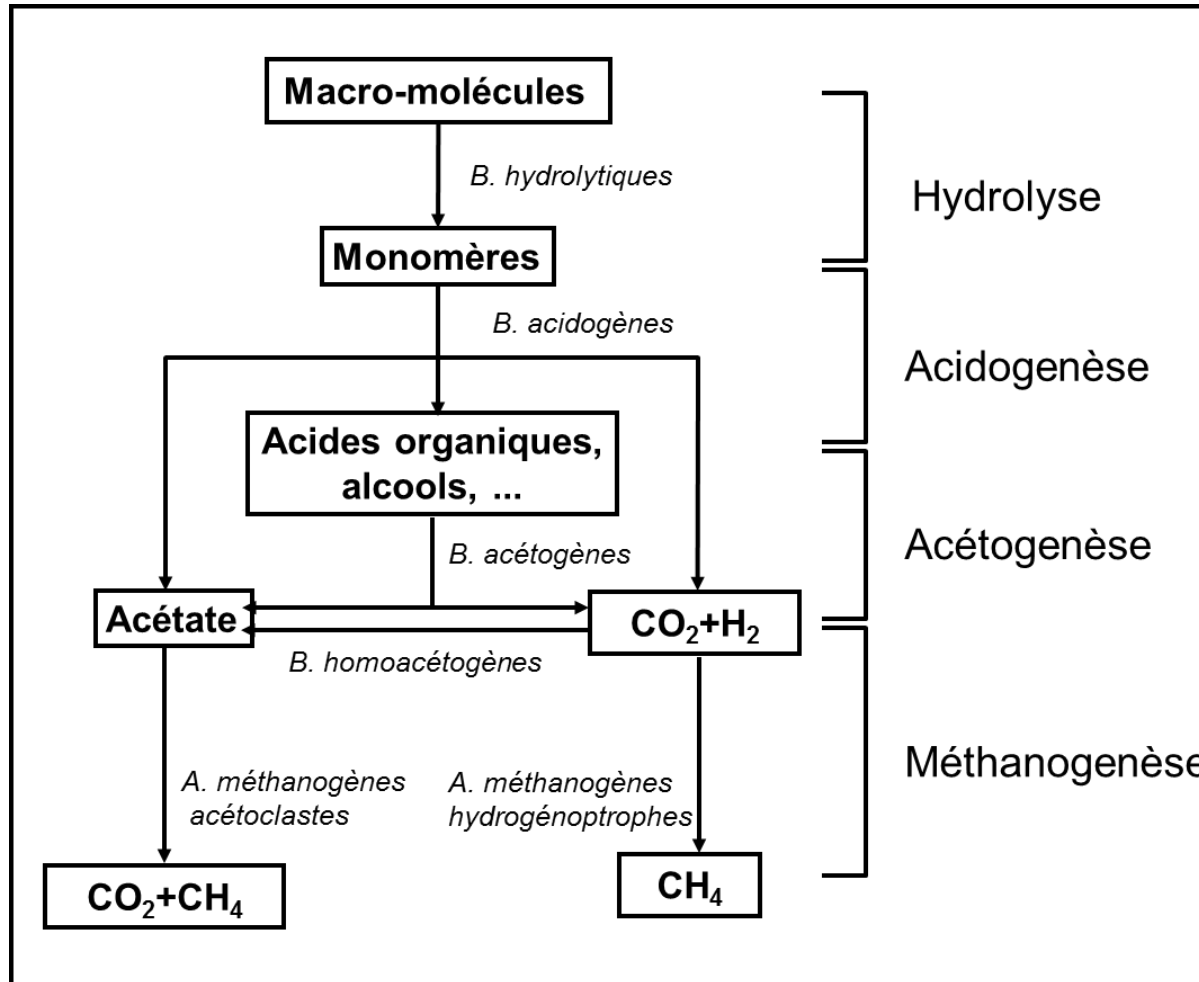


**INRAE**

Maîtrise des biofilms dans les réacteurs de méthanisation à biomasse fixée

17/03/2021 /BioAdh'2021 : Bioadhésion – Biocontamination des surfaces/ N. BERNET

# ➤ La digestion anaérobie ou méthanisation

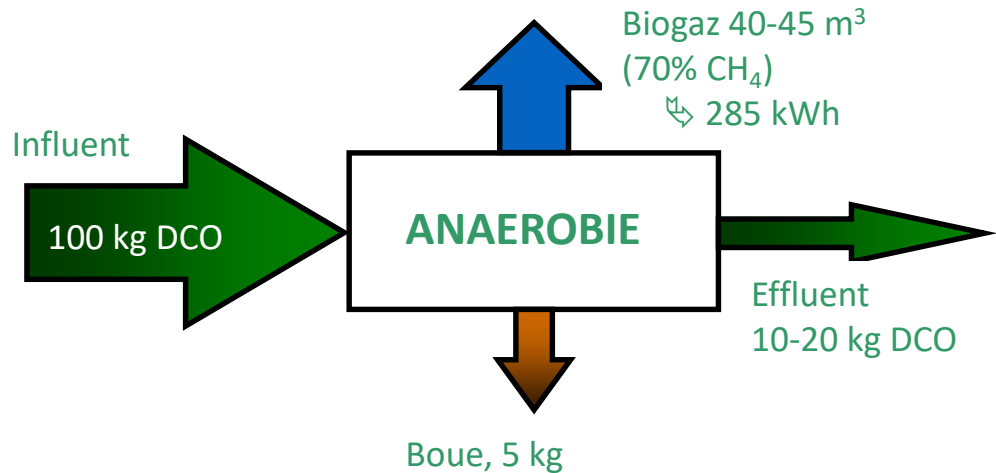
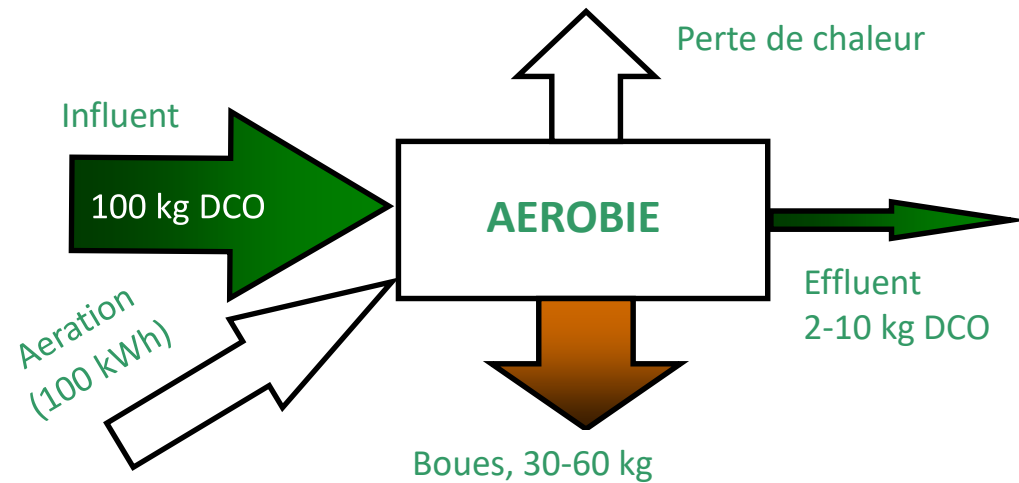


INRAE

Maîtrise des biofilms dans les réacteurs de méthanisation à biomasse fixée

17/03/2021 /BioAdh'2021 : Bioadhésion – Biocontamination des surfaces/ N. BERNET

# ➤ Intérêt de la méthanisation

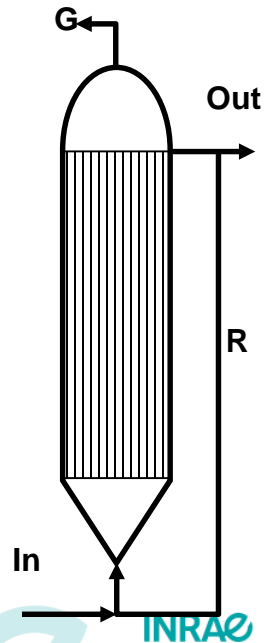


# ➤ Traitement anaérobie d'effluents industriels

La plupart des procédés anaérobies de traitement d'effluents sont :

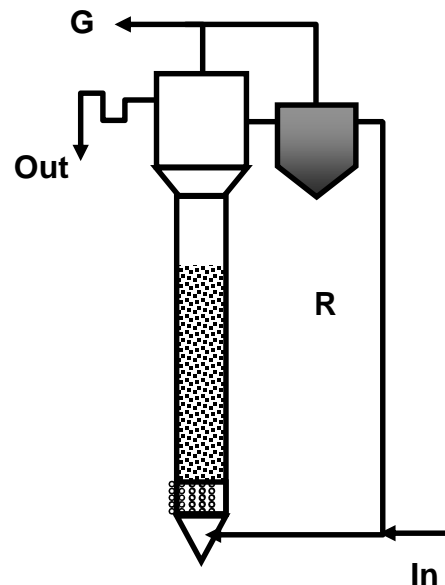
- Des réacteurs granulaires (UASB, EGSB, IC)
- Des procédés à biofilms (lits fixes, lits fluidisés)

## Filtere anaérobie

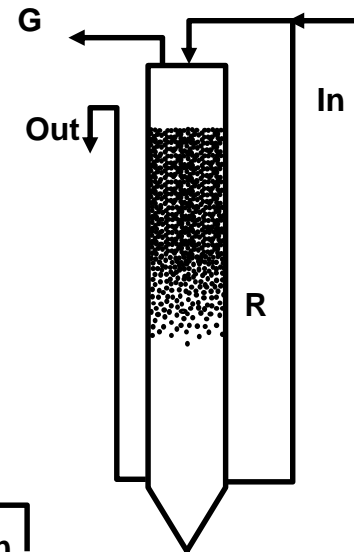


## Procédés à lit mobile

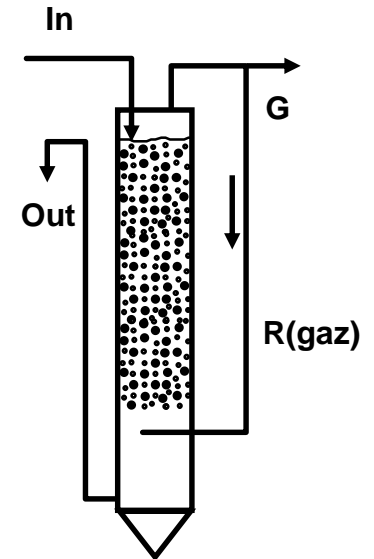
*Lit fluidisé*



*Lit fluidisé inverse*



*Lit turbulé inverse*



# ➤ Plan de la présentation

## 1 - Démarrage des réacteurs : comment développer un biofilm actif le plus rapidement possible?

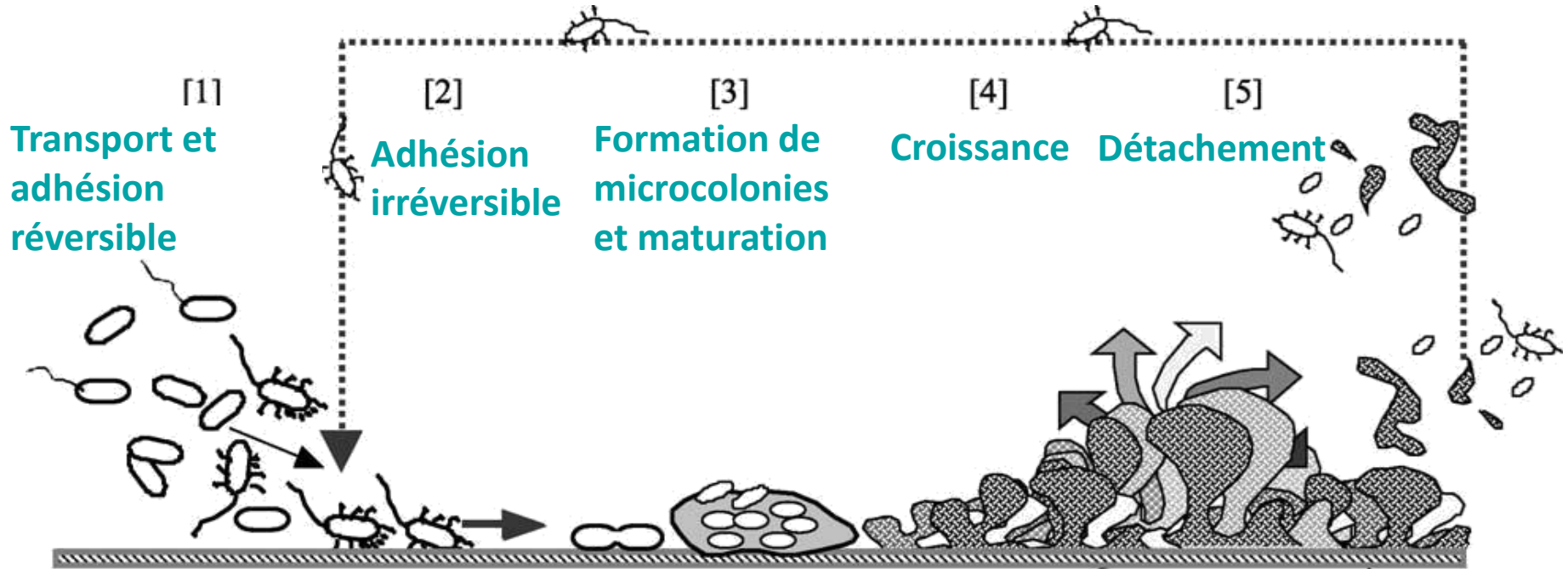
- Inoculation et choix du matériau
- Stratégie de démarrage
- Le rendement en méthane : un indicateur du développement du biofilm

## 2 – Après le démarrage: comment contrôler le procédé pour maintenir un biofilm actif?

- Filtre anaérobie: colmatage
- Lits mobiles : possibilité de contrôle dynamique



# ➤ Formation du biofilm



*Modèle de formation du biofilm (Ghigo, 2003)*

## Développement du biofilm

Équilibre dynamique entre **croissance et détachement**

### Mécanismes du détachement

- Phénomènes physiques : cisaillement, collisions
- Phénomènes biologiques : vieillissement, prédation



➤ Démarrage des réacteurs :  
comment développer un biofilm actif le plus  
rapidement possible?



# ➤ Démarrage des réacteurs de méthanisation à biofilm

## Inoculation et choix du support

Origine et composition de l'inoculum

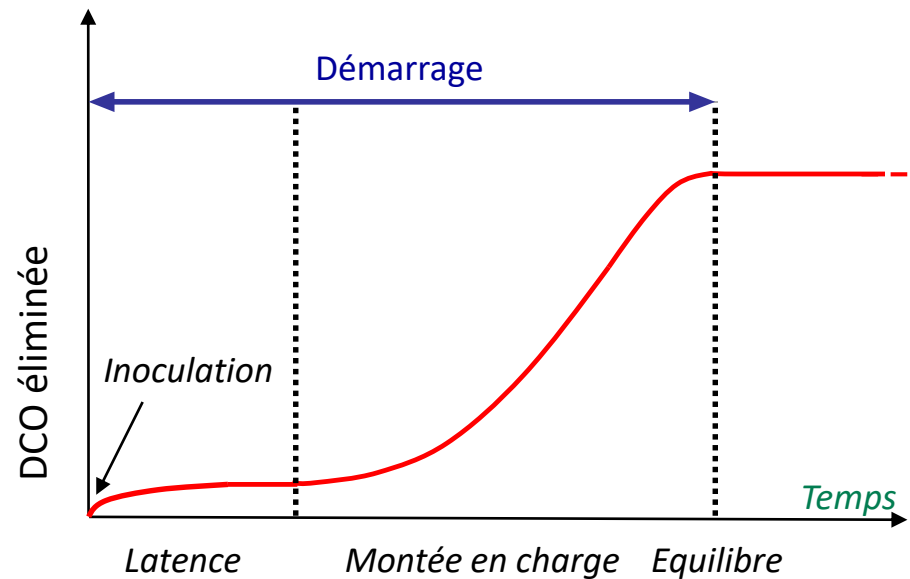
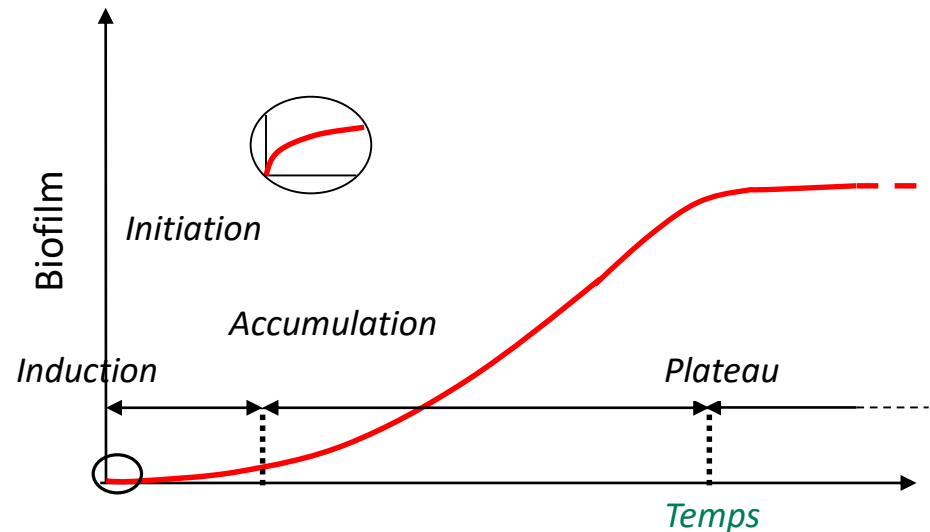
Rôle du support dans la sélection

Durée de la phase de contact batch avant le démarrage du continu

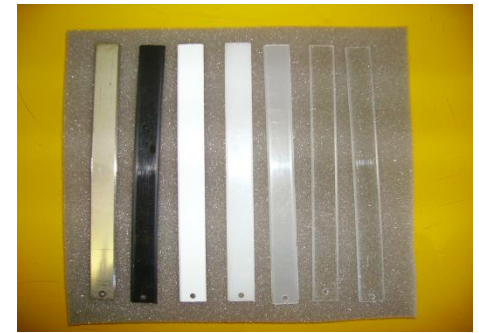
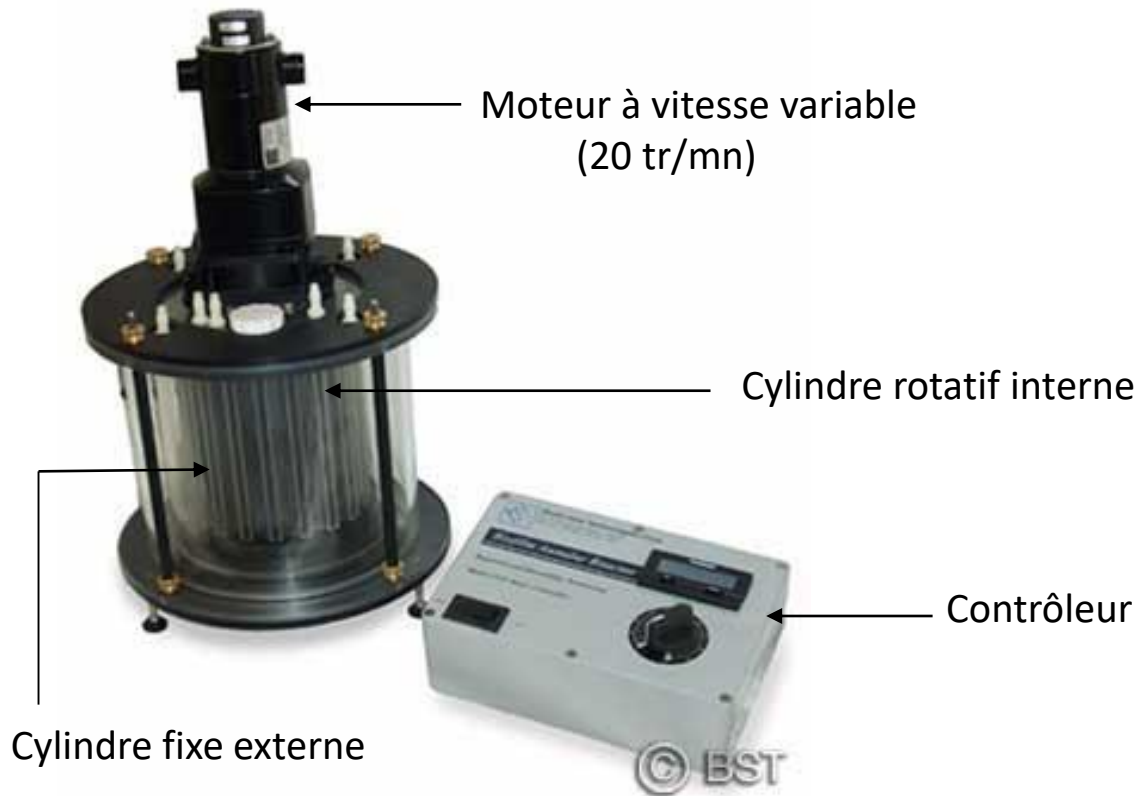
## Augmentation de la charge

Conditions opératoires (hydrodynamique, TSH)

Stratégie d'augmentation de la charge appliquée



# ➤ Impact du matériau support sur l'adhésion



14,58 mm x 149,9 mm x 1,6 mm

Inoculation avec une communauté microbienne de méthanisation

*Habouzit et al. (2011) Bioresource Technology*

INRAE

Maîtrise des biofilms dans les réacteurs de méthanisation à biomasse fixée

17/03/2021 /BioAdh'2021 : Bioadhésion – Biocontamination des surfaces/ N. BERNET

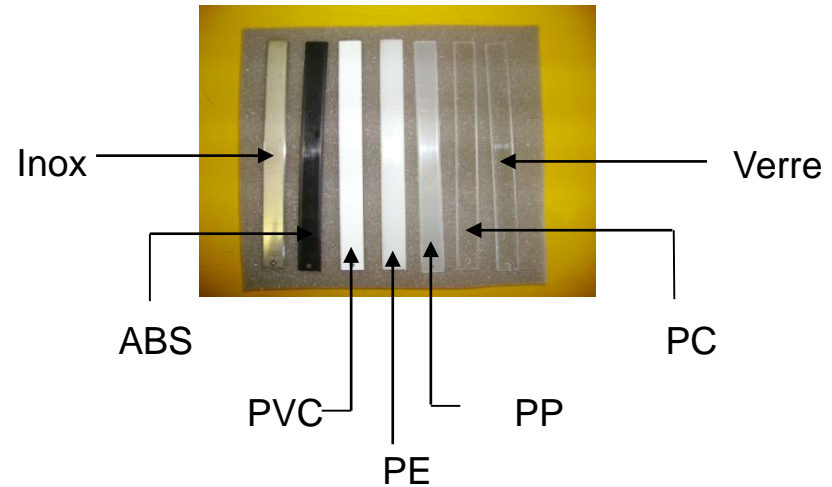
p. 10

# ➤ Impact du matériau support sur l'adhésion

Caractérisation des matériaux (rugosité, énergie de surface)

Caractérisation de l'adhésion **après 2 h de contact** :

- Analyse d'image (taux de recouvrement)
- Analyse des communautés (% Archées)



Materials	Adhesion (%)
Polypropylene (PP)	1.37 ± 0.44
Stainless steel	1.32 ± 0.31
Polyethylene (PE)	1.29 ± 0.38
Acrylonitrile butadiene styrene (ABS)	0.79 ± 0.20
Polycarbonate (PC)	0.68 ± 0.30
Borosilicate glass	0.29 ± 0.15
Polyvinyl chloride (PVC)	0.19 ± 0.12



INRAE

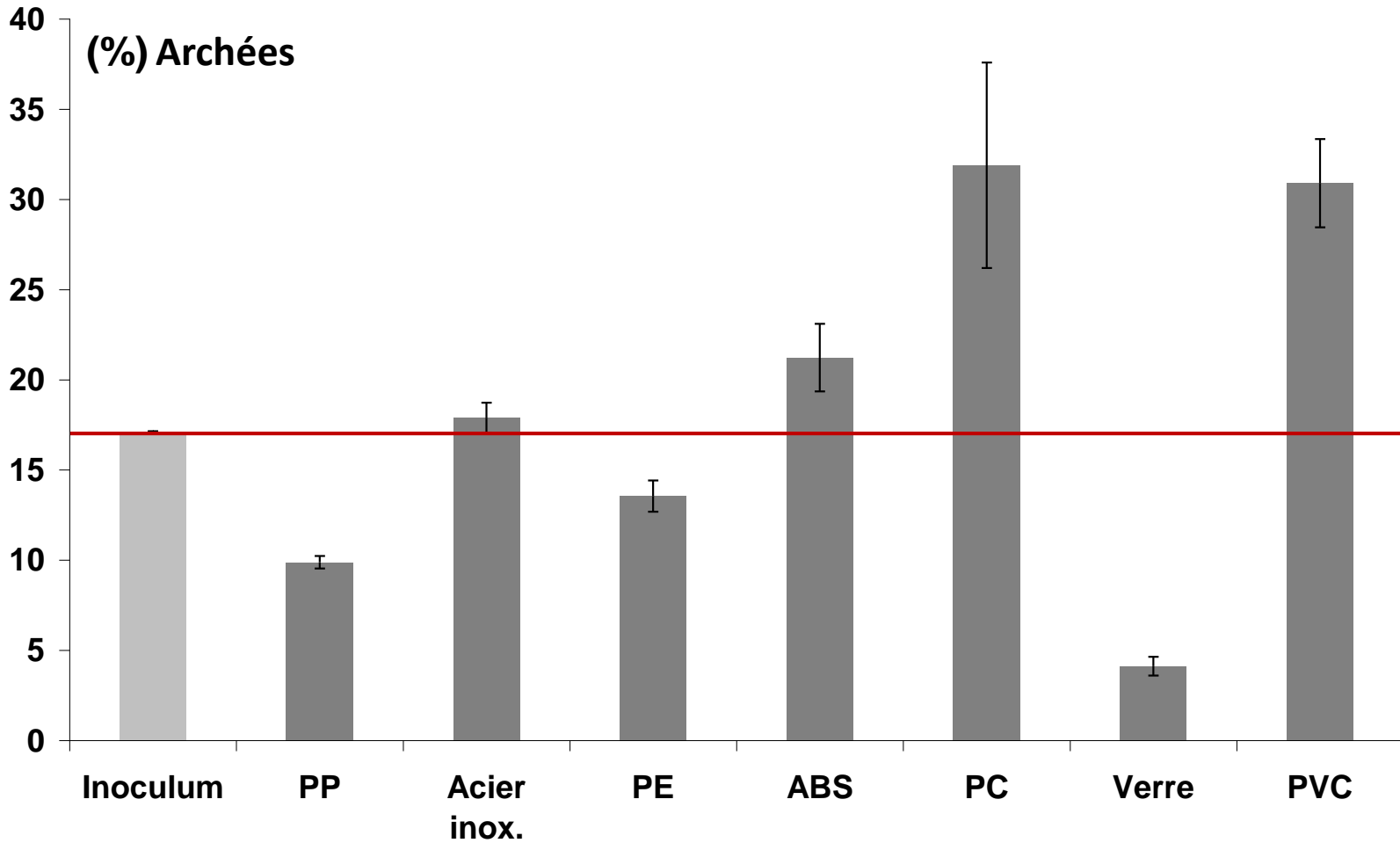
Maîtrise des biofilms dans les réacteurs de méthanisation à biomasse fixée

17/03/2021 /BioAdh'2021 : Bioadhésion – Biocontamination des surfaces/ N. BERNET

*Habouzit et al. (2011) Bioresource Technology*

p. 11

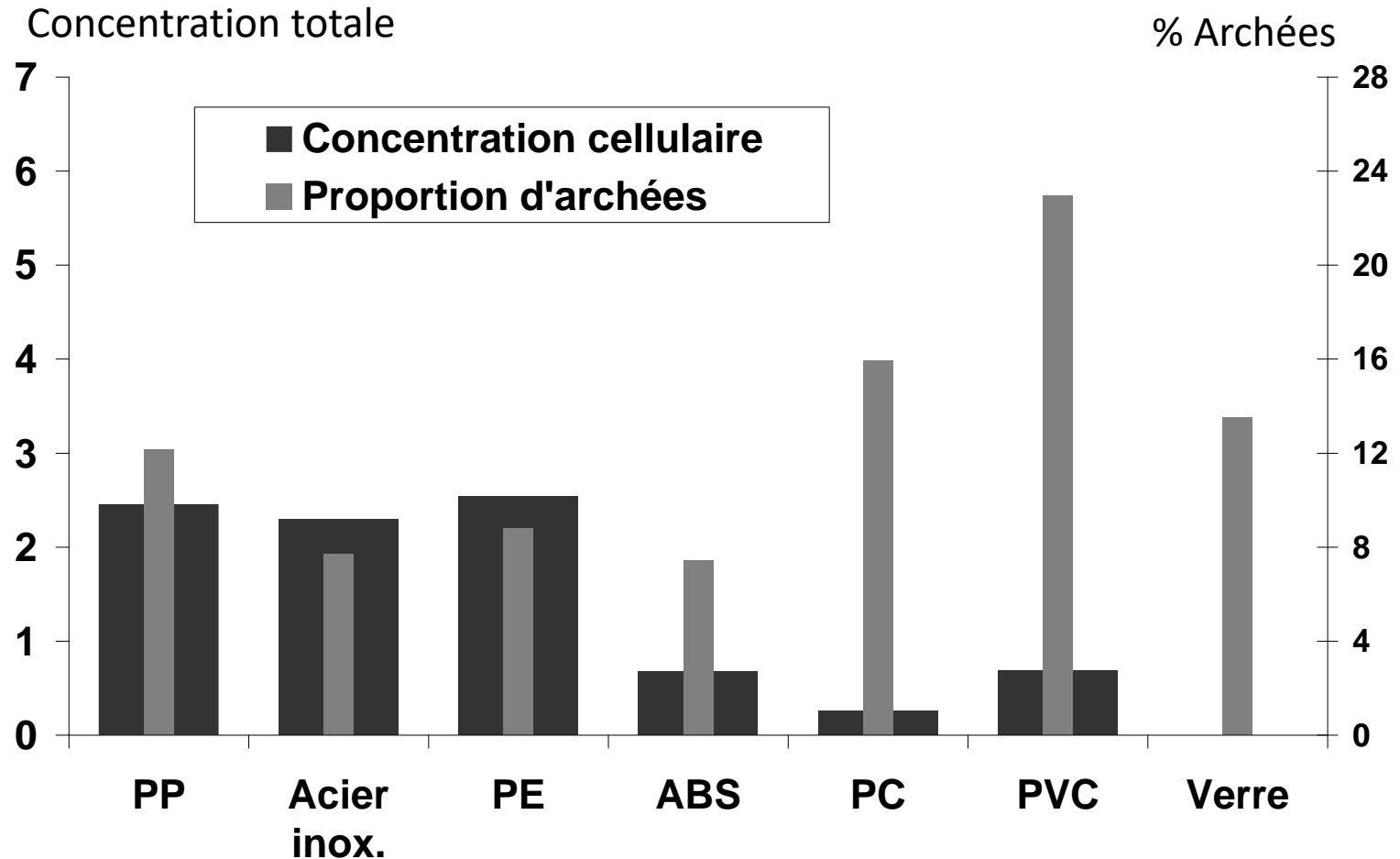
## ➤ Impact du matériau support sur l'adhésion



*Habouzit et al. (2011) Bioresource Technology*

# ➤ Impact du matériau support sur la colonisation

## Caractérisation de la colonisation après 15 jours

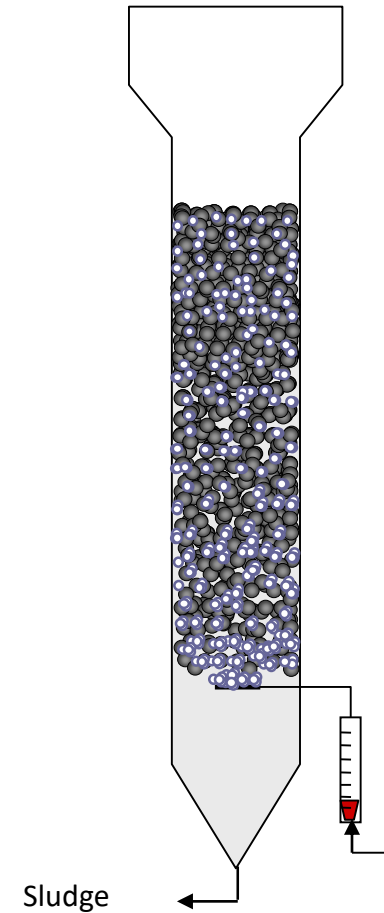


# ➤ Réacteur à lit turbulent inverse (LTI)

## Réacteur triphasique

- Fluidisation par recirculation du biogaz
- Matériau particulaire flottant

- ↗ Bon mélange
- ↗ Contrôle facile de l'expansion du lit
- ↗ Décanteur pour récupérer la biomasse en excès
- ↗ Contraintes hydrodynamiques (contrôle du biofilm)

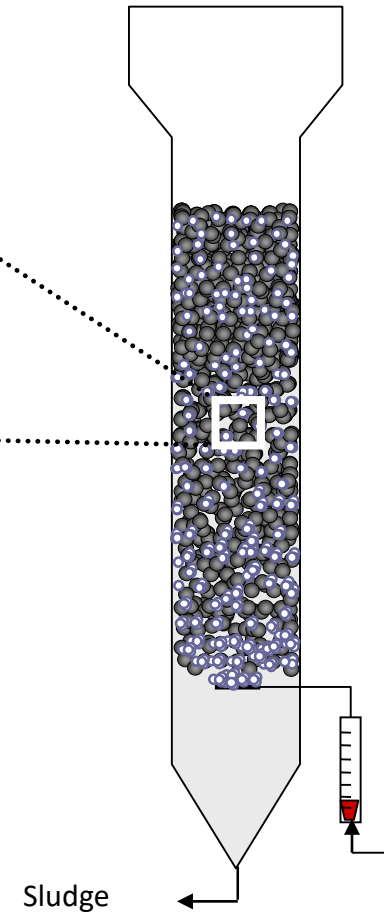
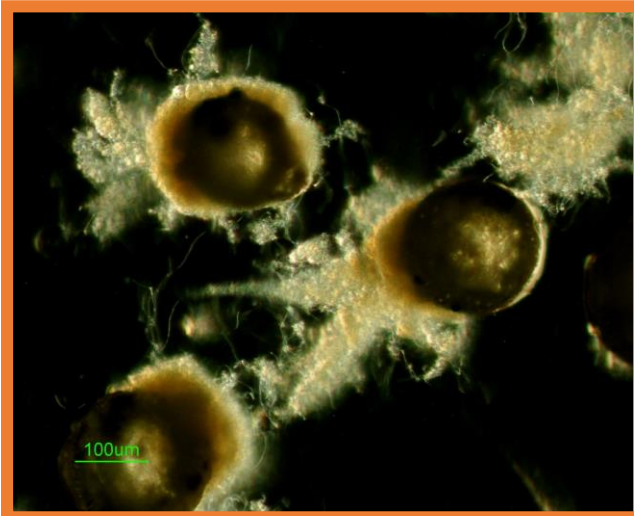


# ➤ Réacteur à lit turbulent inverse (LTI)

Particules de matériau

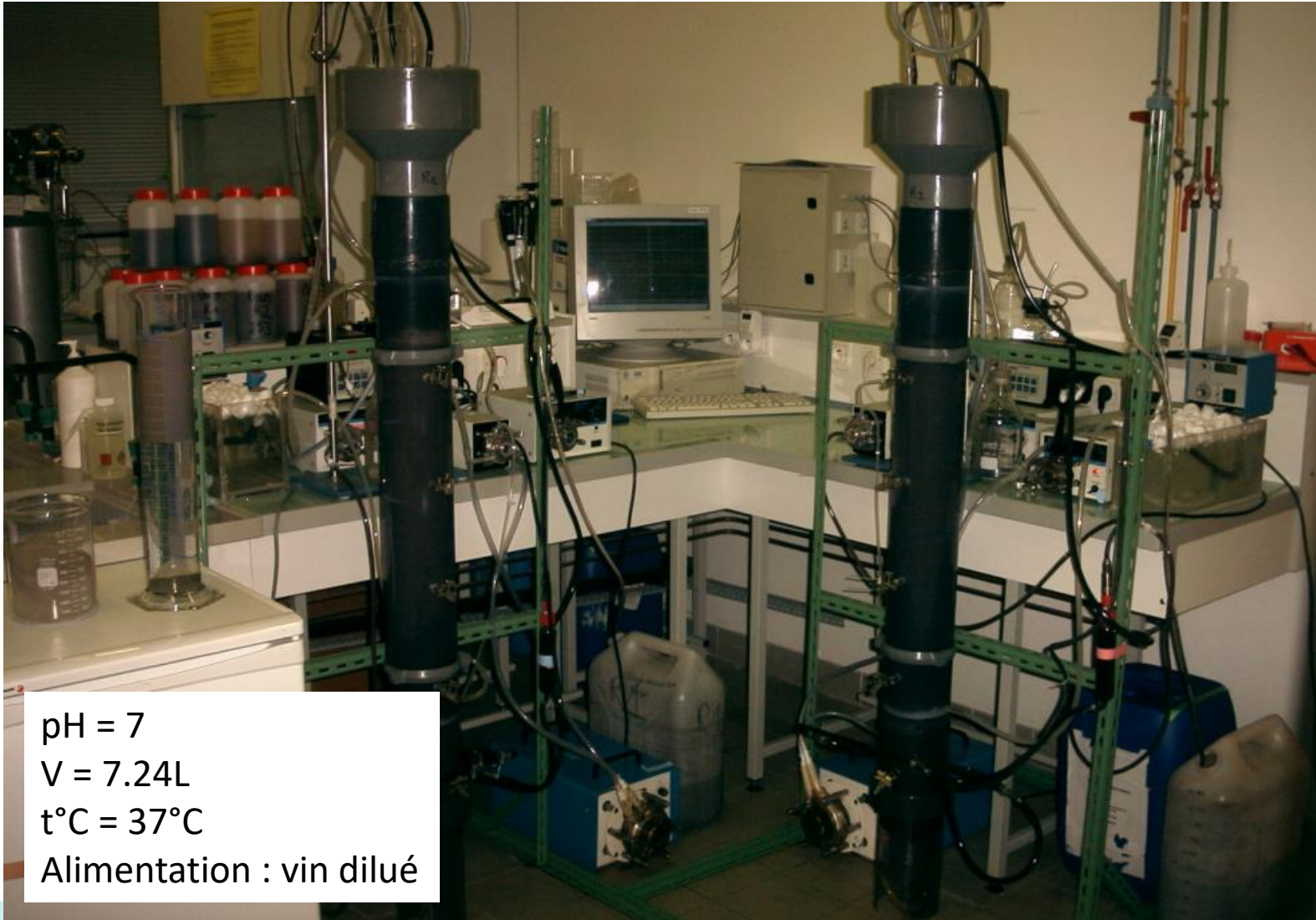


$\varnothing = 192 \mu\text{m}$   
 $\rho = 0,696$





## ➤ Réacteur à lit turbulé inverse (LTI)



pH = 7

V = 7.24L

t°C = 37°C

Alimentation : vin dilué

# ➤ Impact de l'hydrodynamique sur le développement du biofilm

LTI : caractérisé par une forte turbulence qui génère de l'attrition



Impact de l'hydrodynamique sur la croissance du biofilm

Démarrage de 2 LTI : 2 vitesses de gaz différentes

- Faibles contraintes:  $Ug_1 = 1 \text{ mm.s}^{-1}$  = vitesse minimale de fluidisation
- Fortes contraintes:  $Ug_2 = 10 \text{ mm.s}^{-1}$  = vitesse maximale

Uniformisation des vitesses après la phase de colonisation



Contrôle actif de l'épaisseur du biofilm

Après la phase de démarrage

⇒ Uniformisation des vitesses de gaz:  $Ug_1 = Ug_2 = 7 \text{ mm.s}^{-1}$

# ➤ Impact de l'hydrodynamique sur le développement du biofilm

## Conditions de démarrage

Inoculation massive en batch pendant 24h

Alimentation en continu

- TSH = 1 jour
- Taux de dilution > taux de croissance des microorganismes

## Montée en charge

Progressive avec un maintien de 80% d'épuration de la matière organique (DCO)

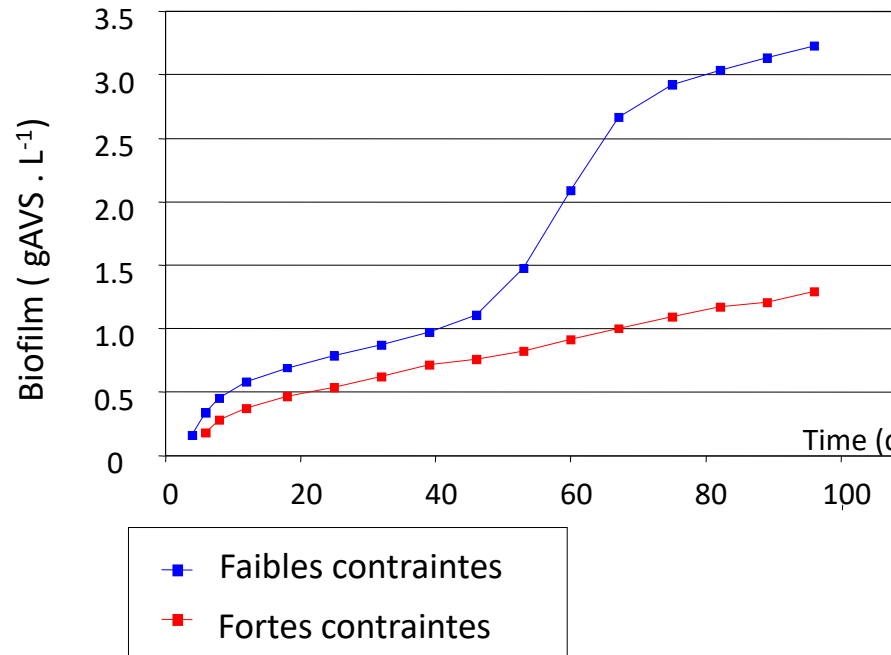
**Vitesse élevée** : 0,5 à 6 gDCO.L<sup>-1</sup>.j<sup>-1</sup> en **72 jours**

**Vitesse faible** : 0,5 à 6 gDCO.L<sup>-1</sup>.j<sup>-1</sup> en **64 jours**

*Cresson et al. (2007) Water Research*

# Impact de l'hydrodynamique sur le développement du biofilm

## Accumulation de biofilm

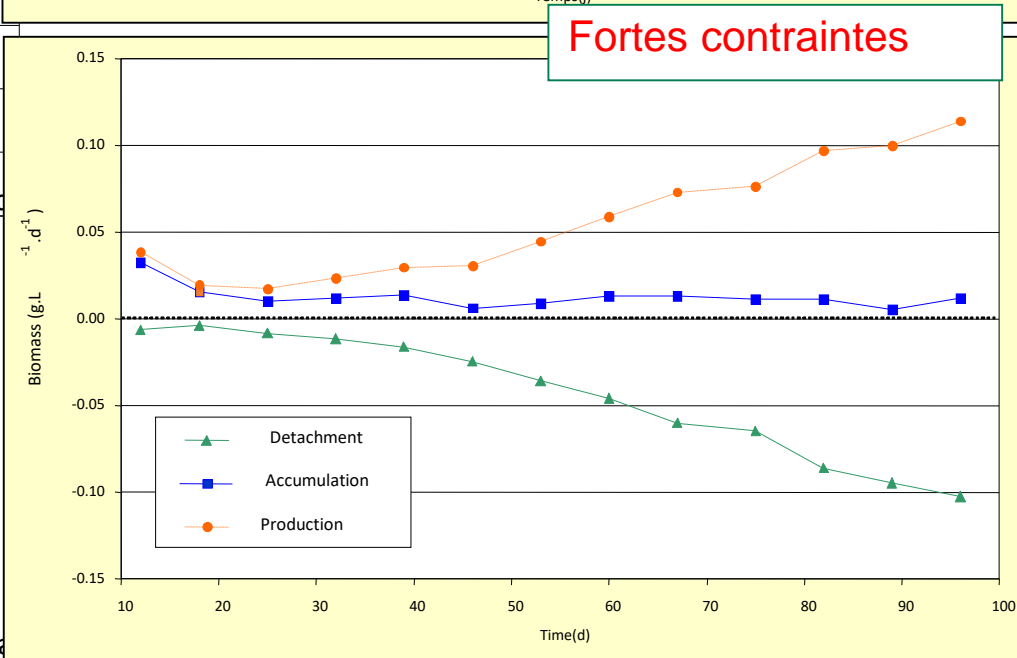
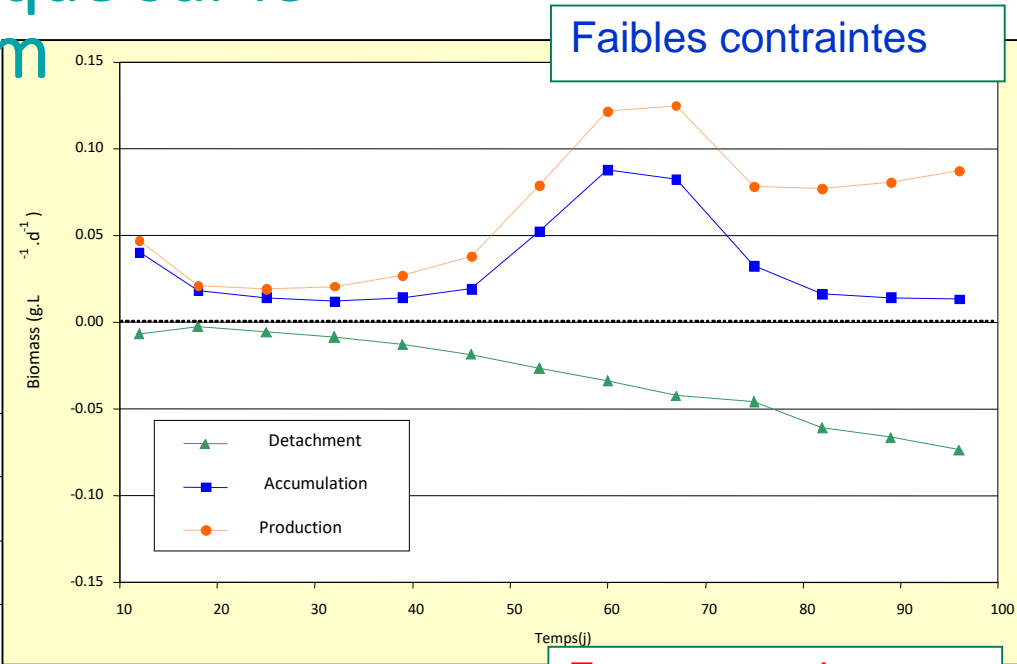


Cresson et al. (2007) Water Research

INRAE

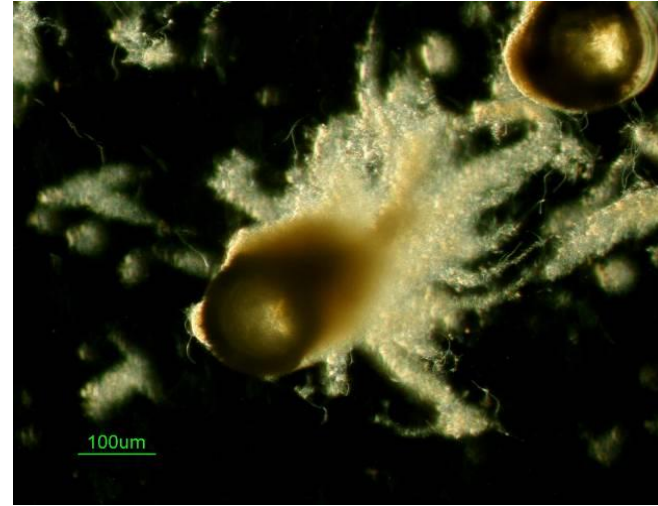
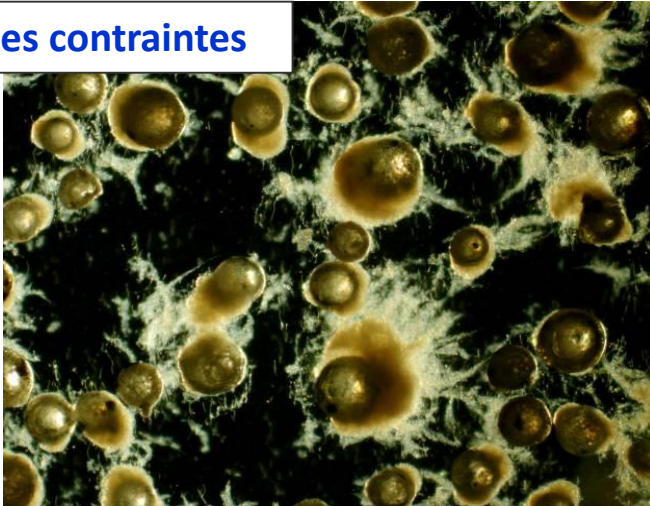
Maîtrise des biofilms dans les réacteurs de méthanisation

17/03/2021 /BioAdh'2021 : Bioadhésion – Biocontamination des surfaces/ N. BERNET

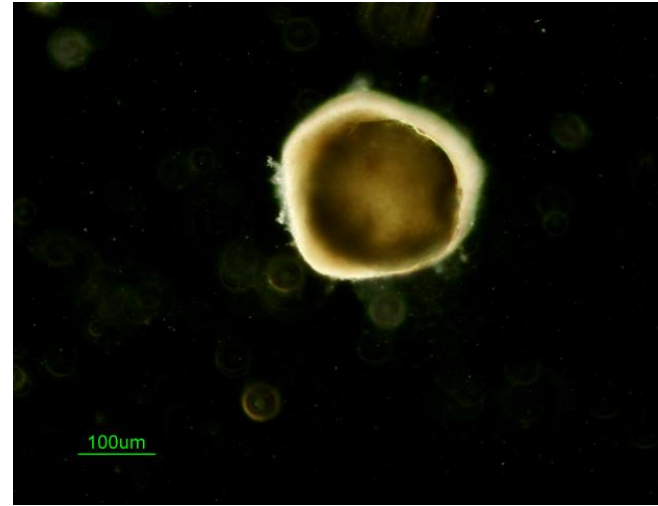
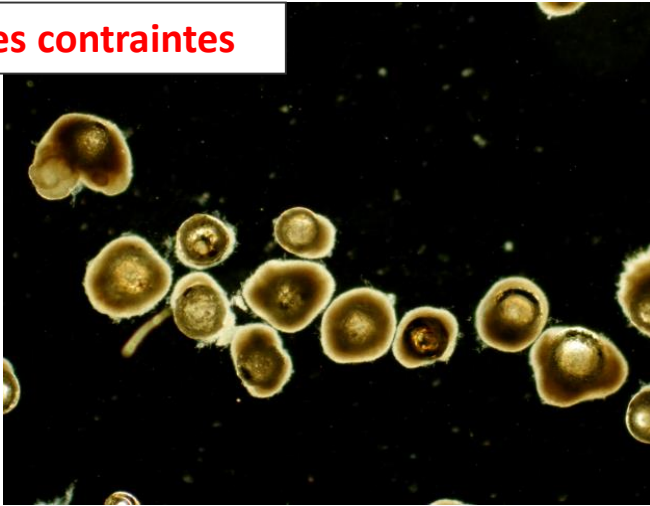


# ➤ Impact de l'hydrodynamique sur le développement du biofilm

Faibles contraintes



Fortes contraintes



*Cresson et al. (2007) Water Research*



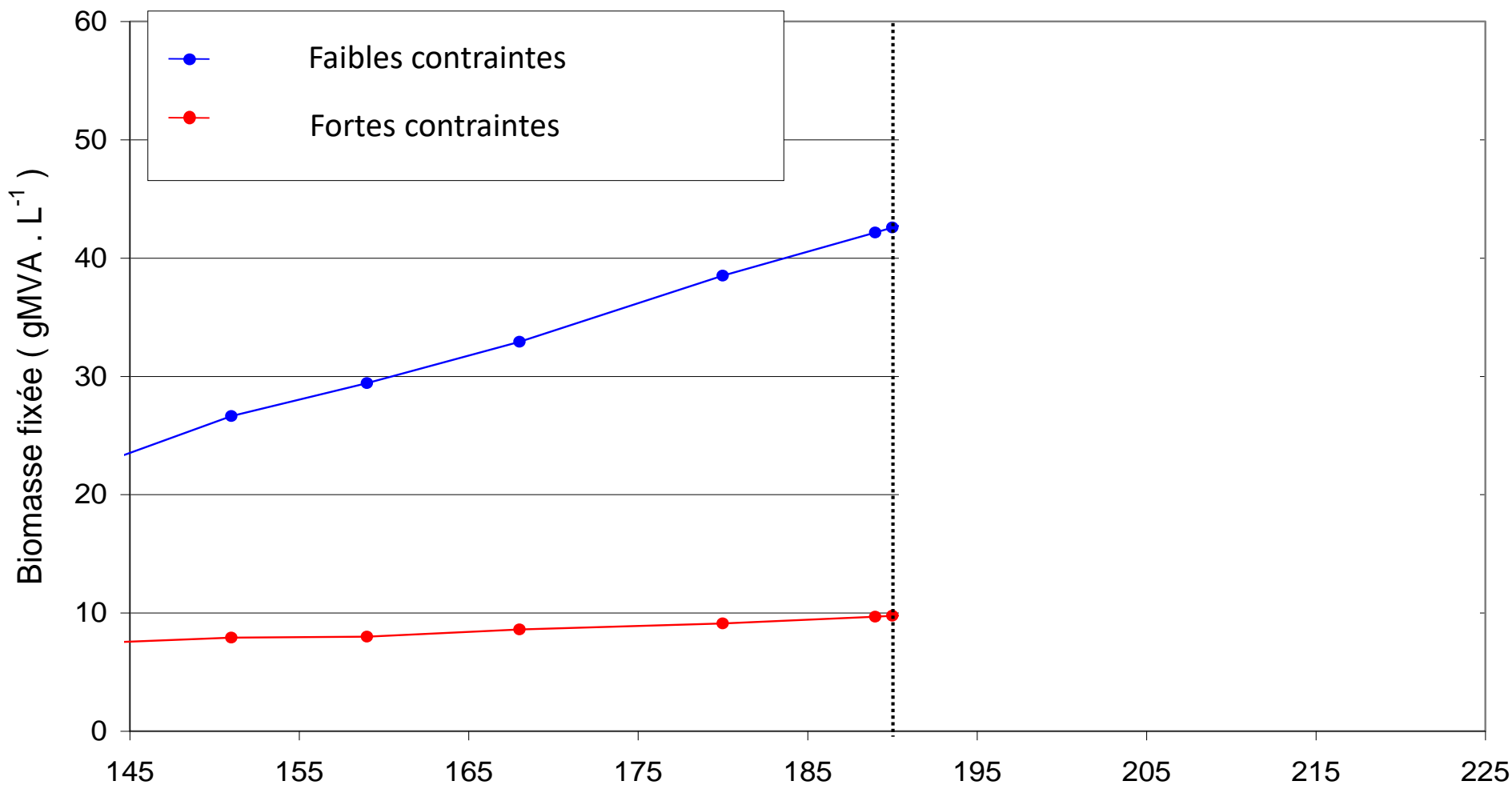
INRAE

Maîtrise des biofilms dans les réacteurs de méthanisation à biomasse fixée

17/03/2021 /BioAdh'2021 : Bioadhésion – Biocontamination des surfaces/ N. BERNET

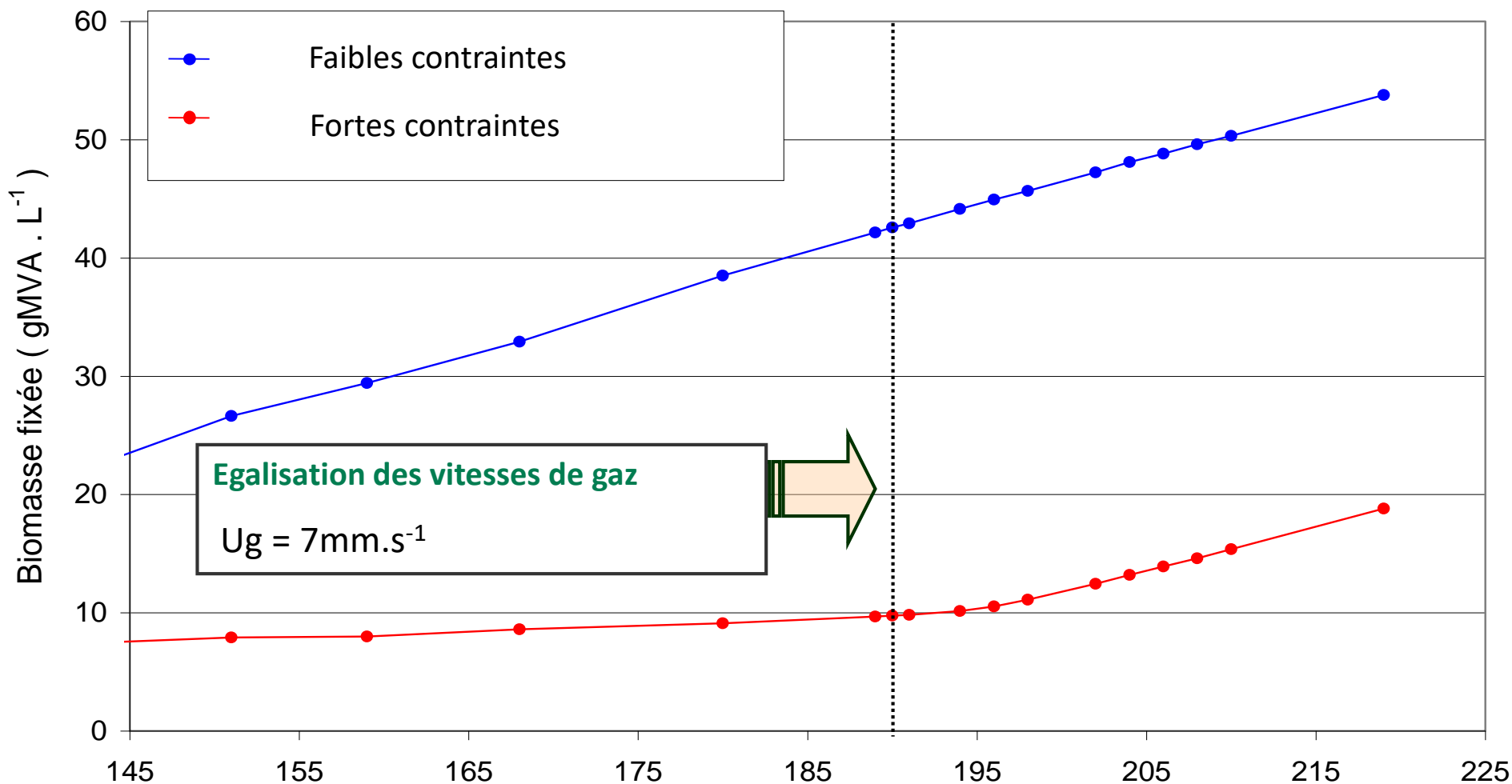
# ➤ Impact de l'hydrodynamique sur le développement du biofilm

## Egalisation des vitesses de gaz



# ➤ Impact de l'hydrodynamique sur le développement du biofilm

## Egalisation des vitesses de gaz



INRAE

Temps (j) Cresson et al. (2007) Water Research

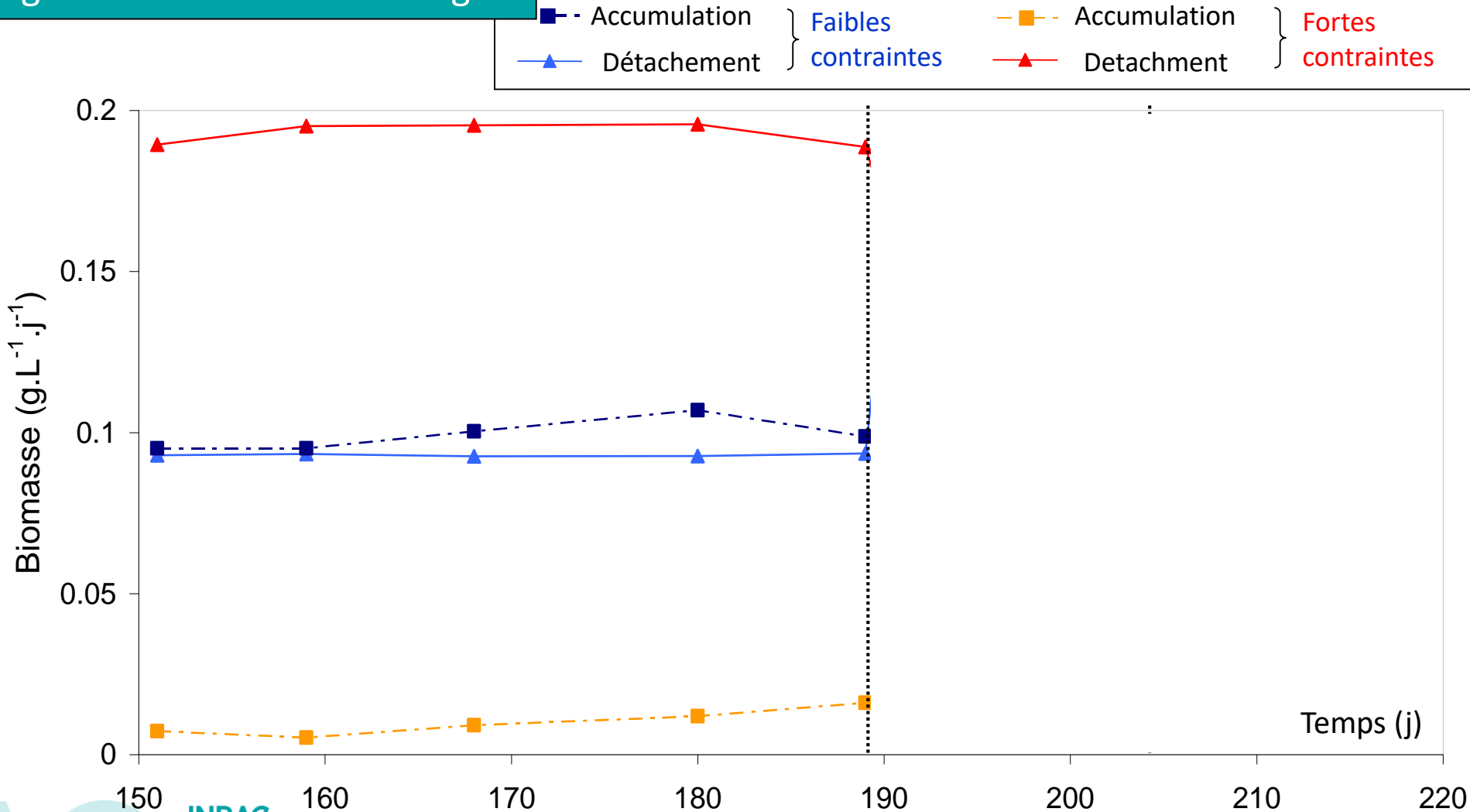
Maîtrise des biofilms dans les réacteurs de méthanisation à biomasse fixée

p. 22

17/03/2021 /BioAdh'2021 : Bioadhésion – Biocontamination des surfaces/ N. BERNET

# ➤ Impact de l'hydrodynamique sur le développement du biofilm

Egalisation des vitesses de gaz



INRAE

Maîtrise des biofilms dans les réacteurs de méthanisation à biomasse fixée

17/03/2021 /BioAdh'2021 : Bioadhésion – Biocontamination des surfaces/ N. BERNET

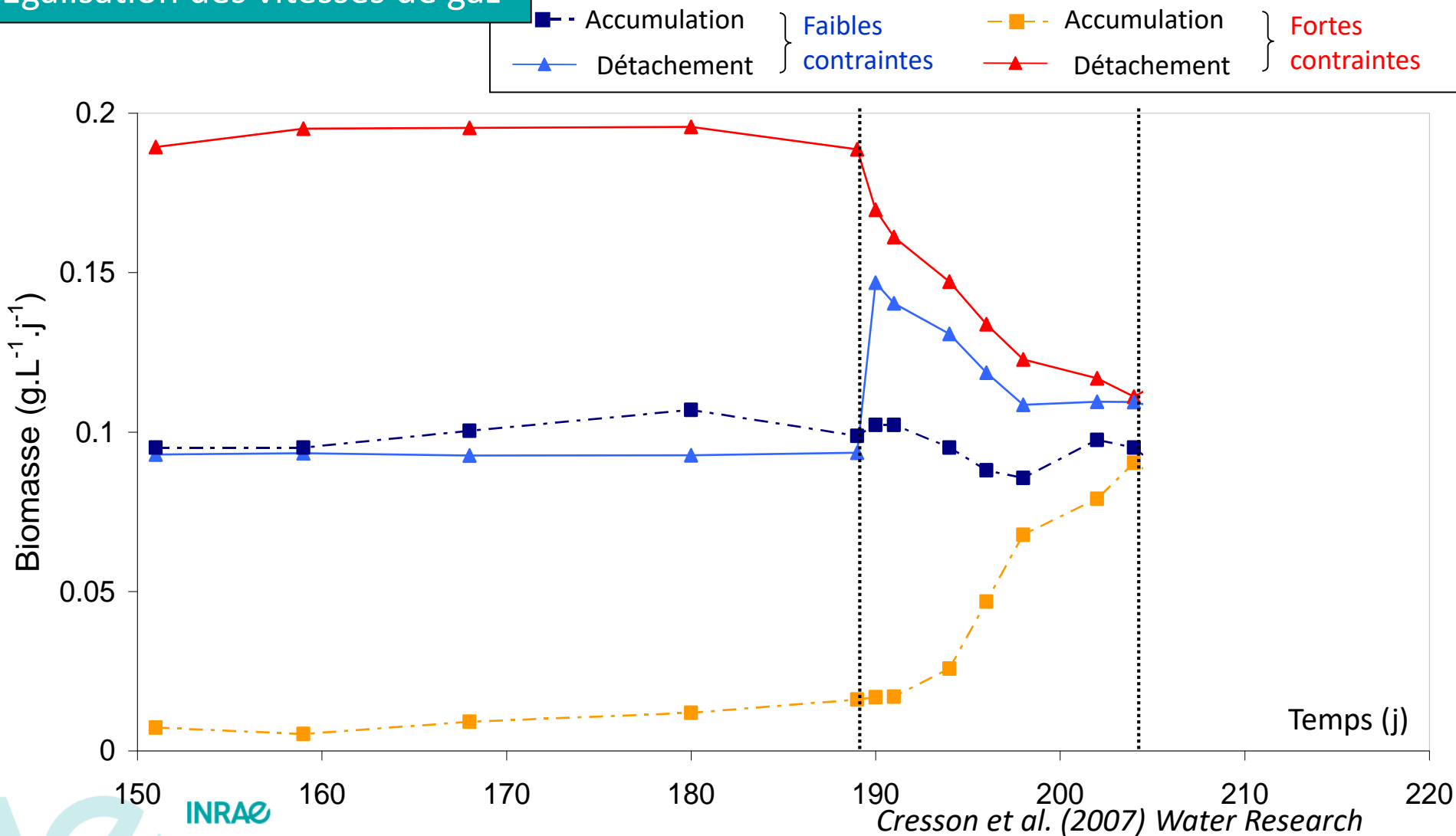
Cresson et al. (2007) Water Research

p. 23



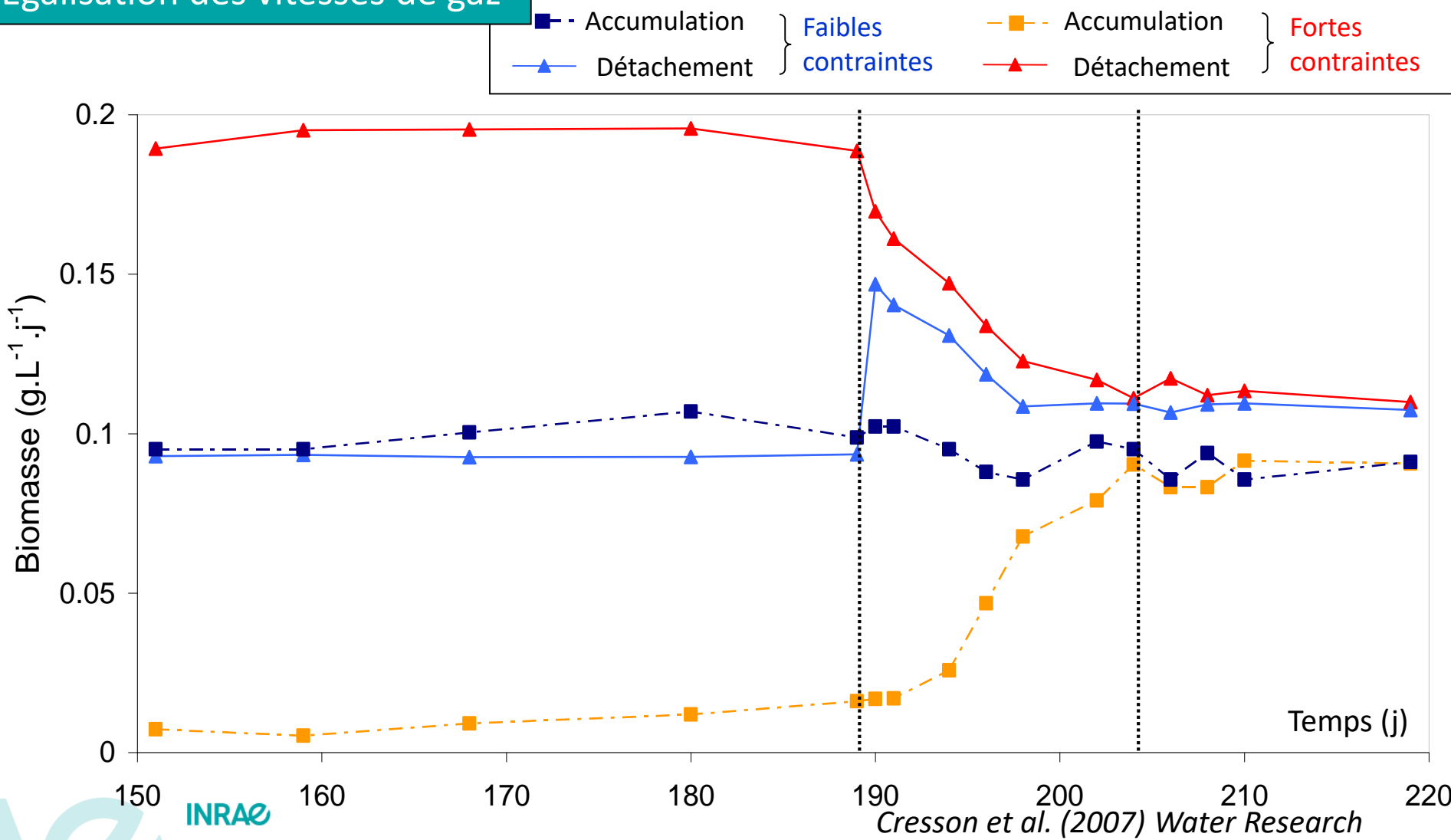
# ➤ Impact de l'hydrodynamique sur le développement du biofilm

Egalisation des vitesses de gaz



# ➤ Impact de l'hydrodynamique sur le développement du biofilm

Egalisation des vitesses de gaz



INRAE

Cresson et al. (2007) Water Research

Maîtrise des biofilms dans les réacteurs de méthanisation à biomasse fixée

17/03/2021 /BioAdh'2021 : Bioadhésion – Biocontamination des surfaces/ N. BERNET

# ➤ Impact de l'hydrodynamique sur le développement du biofilm

## Faibles contraintes:

⇒ Démarrage plus rapide, plus de biofilm

## Fortes contraintes:

⇒ Activité spécifique plus élevée:

3,5 g DCO / g Biofilm . j vs. 1,8 g DCO / g Biofilm . j

## Pendant le démarrage, il faut maximiser l'accumulation de biofilm

### Egalisation des vitesses de gaz

⇒ Augmentation de la vitesse ⇒ faible augmentation du détachement

⇒ Baisse de la vitesse ⇒ augmentation de l'accumulation de biofilm

Après stabilisation, même comportement des deux réacteurs

## Après le démarrage, utilisation de la vitesse de gaz pour contrôler l'épaisseur du biofilm

# ➤ Impact du Temps de Séjour Hydraulique sur le développement du biofilm

## Conditions de démarrage

Inoculation  $\Rightarrow$  période batch très courte (quelques heures)

Faibles contraintes hydrodynamiques :  $U_g = 1 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$

## Montée en charge

Augmentation exponentielle de la charge de  $0,5$  à  $20 \text{ g}_{\text{COD}} \cdot \text{L}^{-1} \cdot \text{j}^{-1}$  en 30 jours

### Lessivage rapide

TSH constant TSH = 1 jour, concentration croissante en  $\text{DCO}_{\text{in}}$

$\text{DCO}_{\text{in}}$  de  $0,5$  ( $t_0$ ) à  $20 \text{ g}_{\text{DCO}} \cdot \text{L}^{-1}$  ( $t+31 \text{ jours}$ )

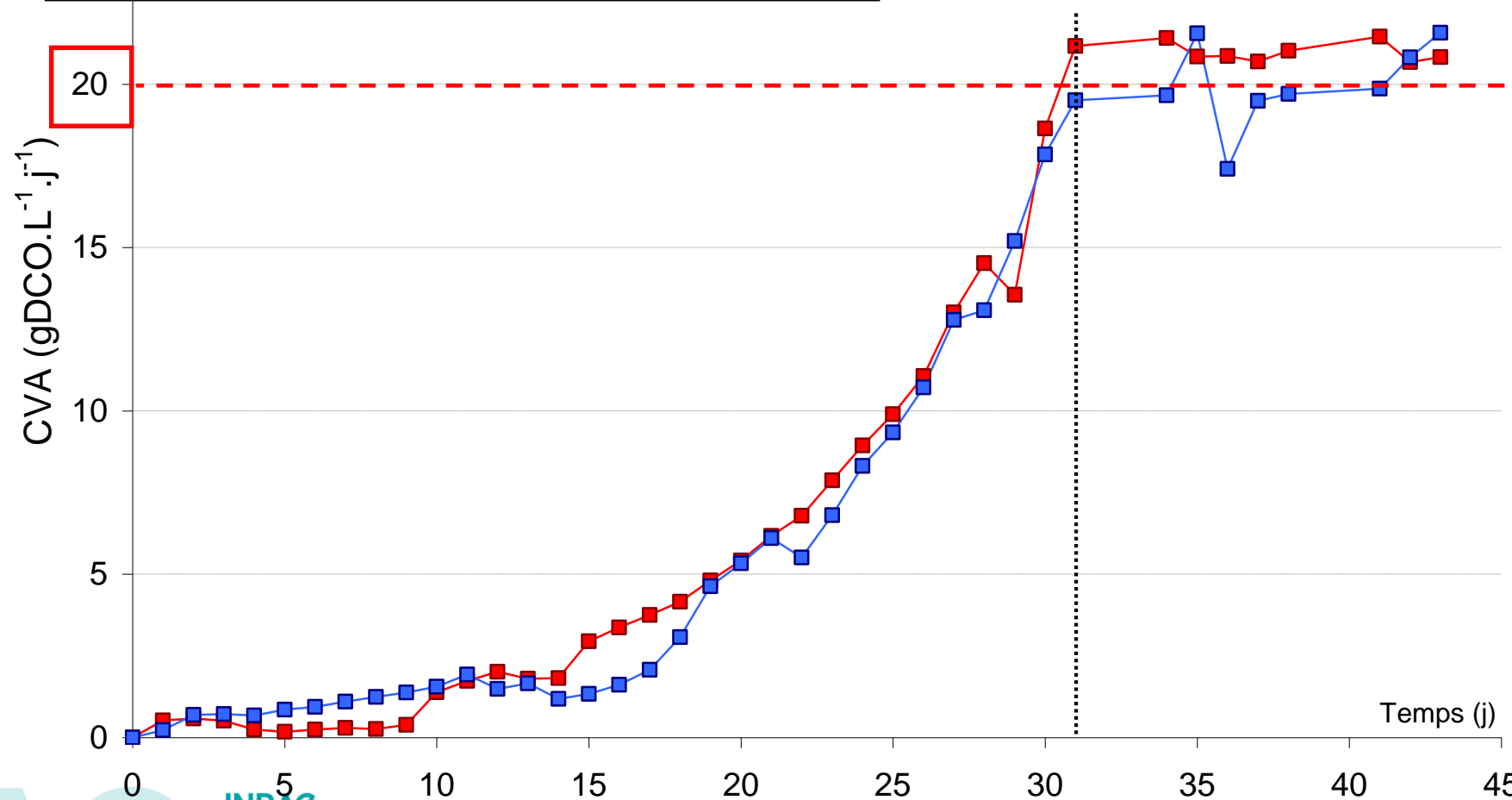
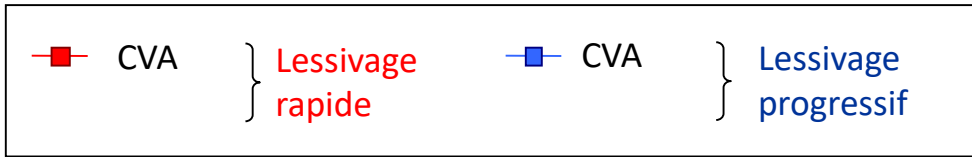
### Lessivage progressif

$\text{DCO}_{\text{in}}$  constante =  $20 \text{ g}_{\text{COD}} \cdot \text{L}^{-1}$

TSH décroissant de 40 jours ( $t_0$ ) à 1 jour ( $t+31 \text{ days}$ )

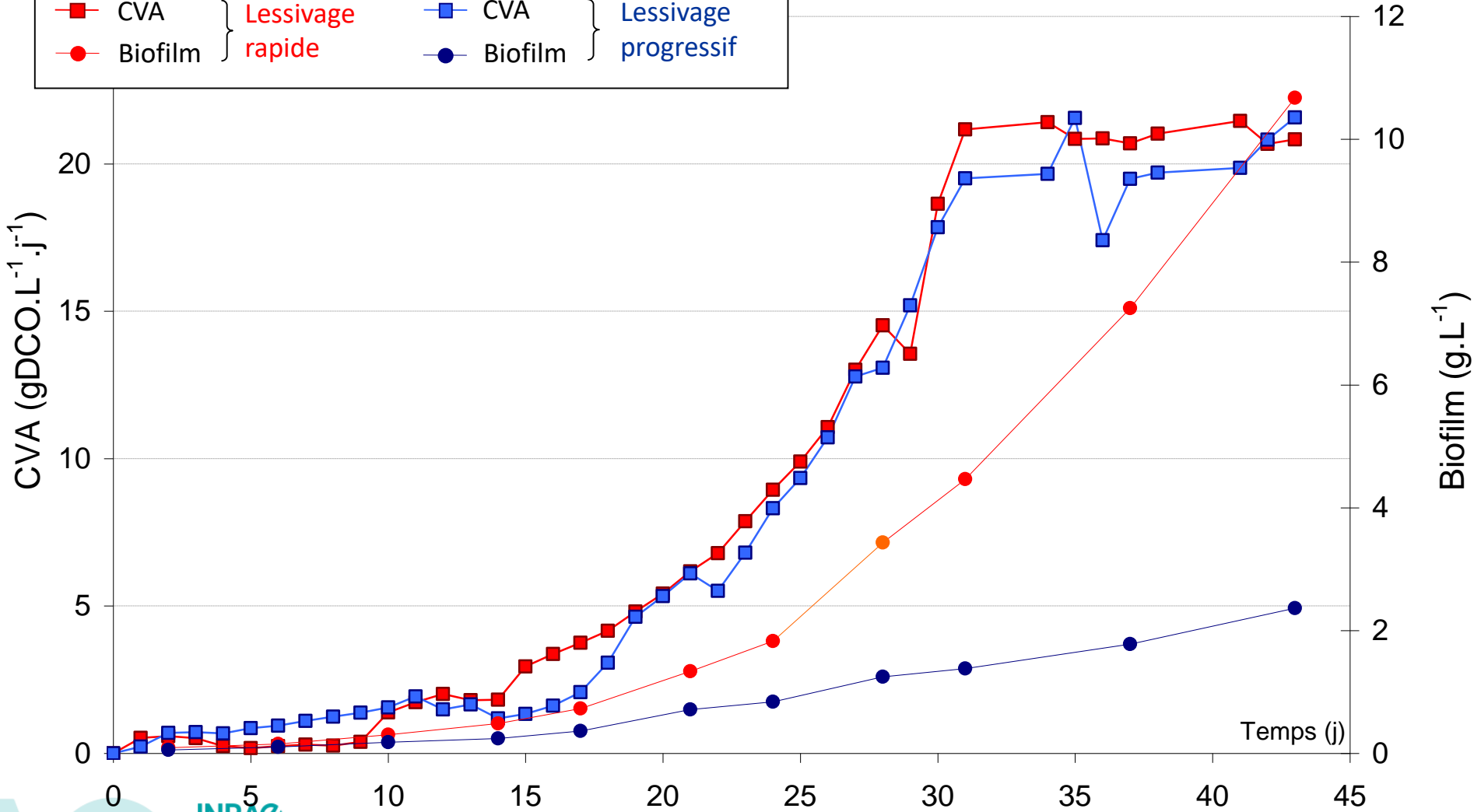
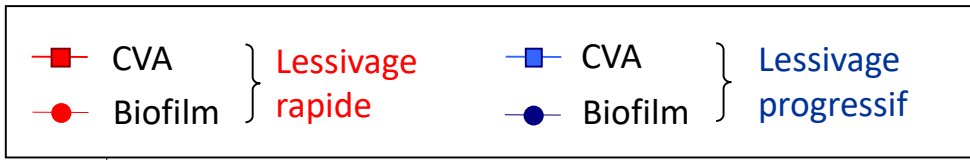
# Impact du Temps de Séjour Hydraulique sur le développement du biofilm

Montée en charge



# Impact du Temps de Séjour Hydraulique sur le développement du biofilm

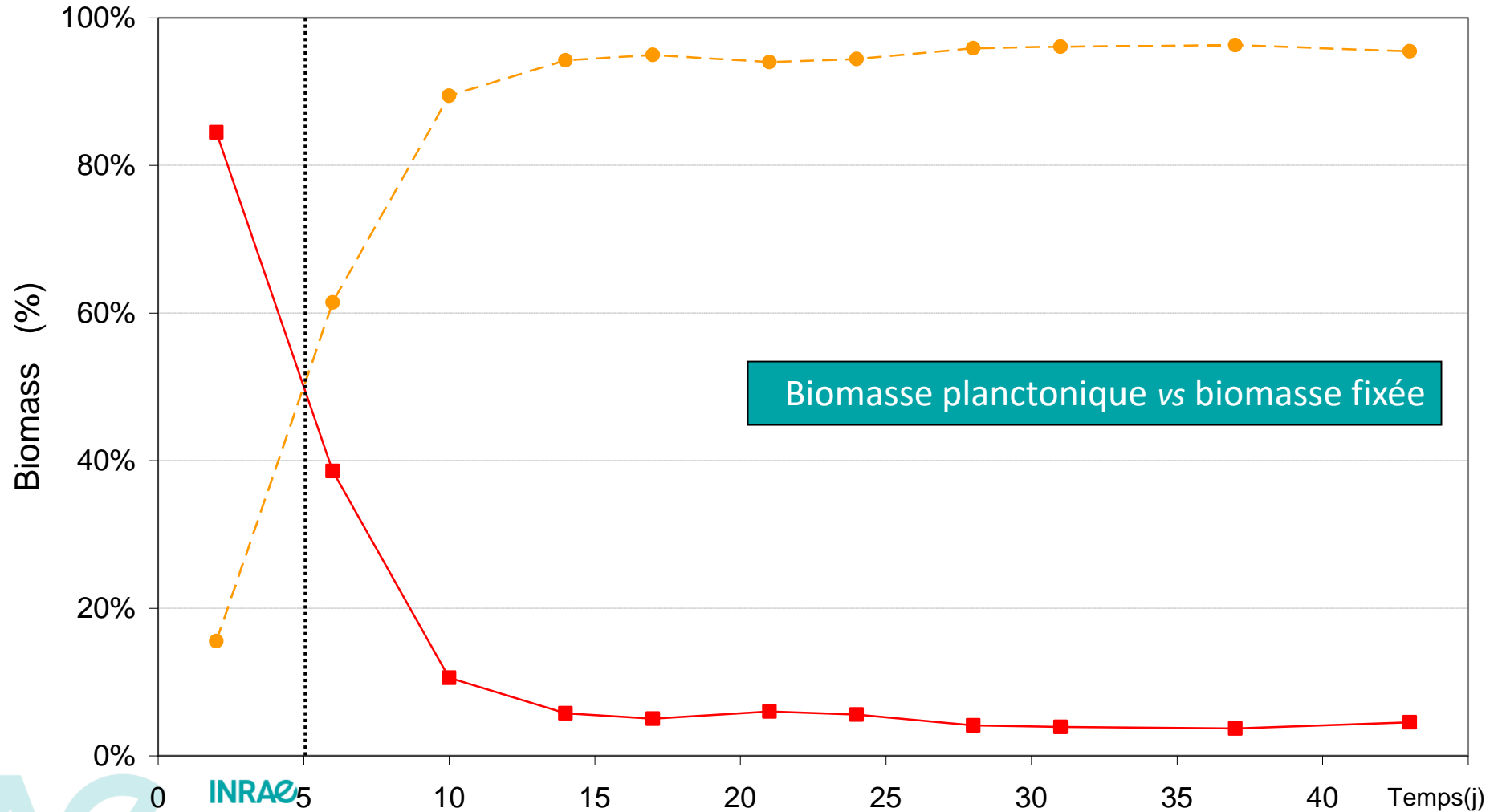
Croissance du biofilm



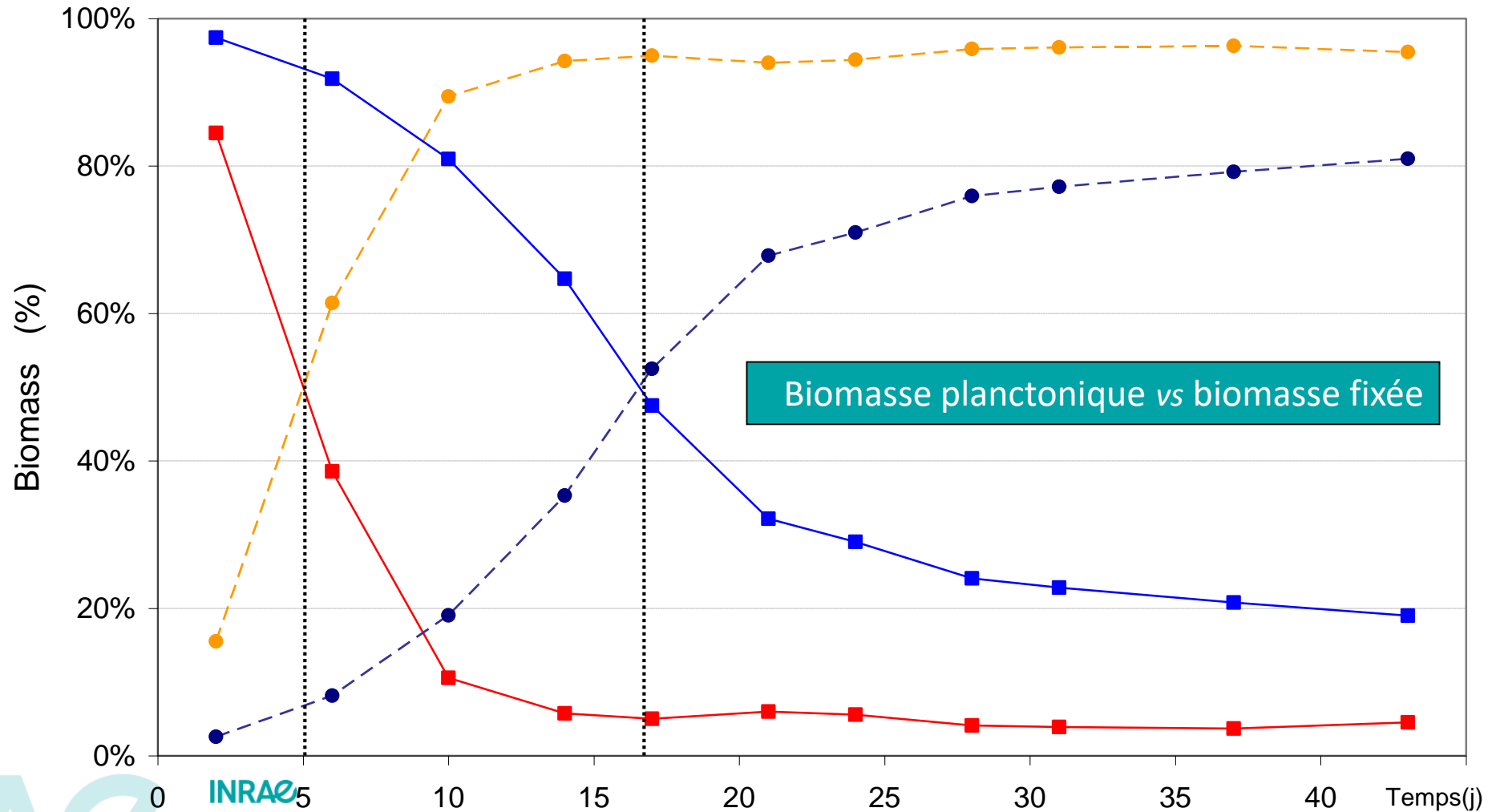
Cresson et al. (2008) Water Research



# ➤ Impact du Temps de Séjour Hydraulique sur le développement du biofilm



# ➤ Impact du Temps de Séjour Hydraulique sur le développement du biofilm





# ➤ Impact du Temps de Séjour Hydraulique sur le développement du biofilm

## Performances des réacteurs

- Les deux stratégies ont permis d'atteindre l'objectif initial, mais
- **Lessivage rapide : meilleures performances**
  - ⇒ + 17% DCO éliminée, + 19% méthane produit
- Accumulation d'AGV
  - Conversion éthanol / AGV : **7 % lessivage rapide** vs **13% lessivage progressif**
  - **Lessivage progressif** : forte accumulation d'AGVs à la fin de la montée en charge: **2.5g.L<sup>-1</sup> vs 0.3 g.L<sup>-1</sup> pour le lessivage rapide**)

## Formation du biofilm

- **Lessivage rapide: accumulation de biofilm**
  - ⇒ 4,5 x plus de biomasse à la fin de la montée en charge (44 jours)



**TSH court ⇒ Taux de dilution > taux de croissance**

**Favorise le développement du biofilm**

**INRAE**

Maîtrise des biofilms dans les réacteurs de méthanisation à biomasse fixée

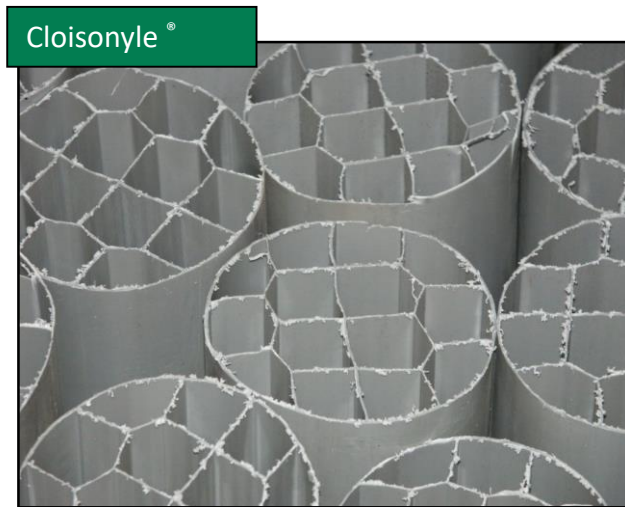
17/03/2021 /BioAdh'2021 : Bioadhésion – Biocontamination des surfaces/ N. BERNET

p. 32

*Cresson et al. (2008) Water Research*

# ➤ Validation à l'échelle pilote sur un lit fixe

Application des résultats obtenus au démarrage d'un **réacteur à lit fixe de 1 m<sup>3</sup>** alimenté avec des vinasses de distillerie



## Conditions de démarrage :

- Très courte inoculation en batch (quelques heures)
- TSH constant de 1 jour (utilisation d'un bac de dilution)
- Suivi du pH et des AGV

INRAE

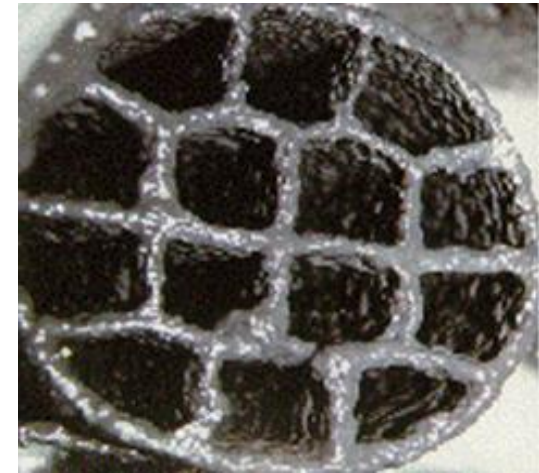
Maîtrise des biofilms dans les réacteurs de méthanisation à biomasse fixée

17/03/2021 /BioAdh'2021 : Bioadhésion – Biocontamination des surfaces/ N. BERNET

## ➤ Validation à l'échelle pilote sur un lit fixe

Montée en charge de  $0.5$  à  $20 \text{ g}_{\text{DCO}} \cdot \text{L}^{-1} \cdot \text{j}^{-1}$  à 80% abattement de la DCO

⇒ La durée de la montée en charge dépend de la stratégie de montée en charge choisie :



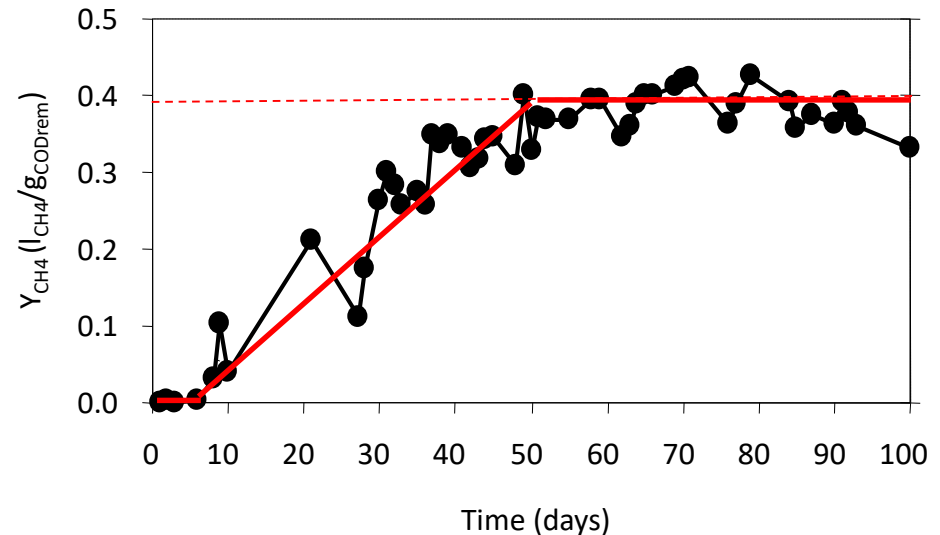
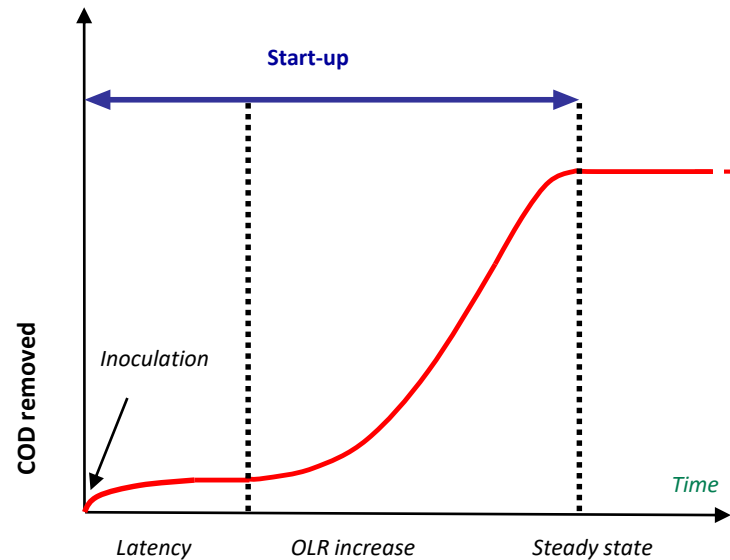
1. Montée en charge en imposant un abattement de 80% de la DCO : **53 jours**
2. Montée en charge plus agressive suivant un schéma prédéfini : **34 jours**

 Confirme les résultats obtenus en LTI

Stratégies applicables pour le démarrage de digesteurs industriels

# ➤ Le rendement en méthane : un indicateur du développement du biofilm

- $Y_{CH_4}$  = rapport du **méthane produit** sur la **DCO éliminée**
- $Y_{CH_4}$  augmente jusqu'à  $0,35 \text{ NL.gDCO}^{-1}$  éliminée ( $0,39\text{L}$  à  $35^\circ\text{C}$ ).
- Indicateur du ratio catabolisme/anabolisme (méthane vs. biofilm)
- Peut être utilisé en-ligne pour suivre le développement du biofilm



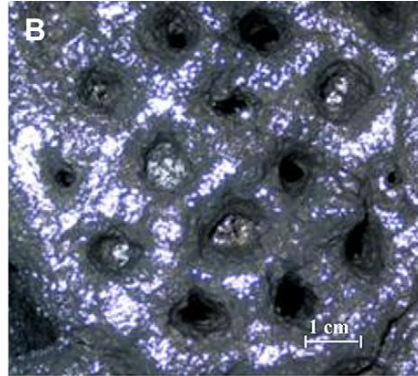
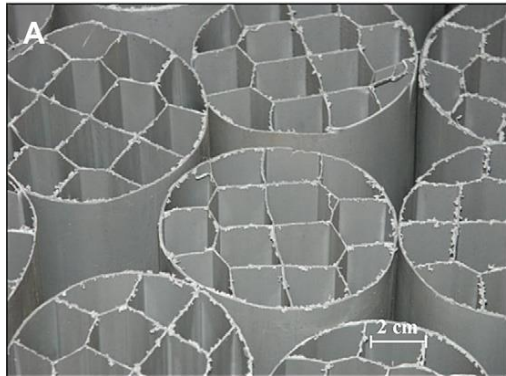
➤ Après le démarrage:  
comment contrôler le procédé pour maintenir  
un biofilm actif?



# ➤ Comment maintenir un biofilm actif ?

## Réacteur à lit fixe

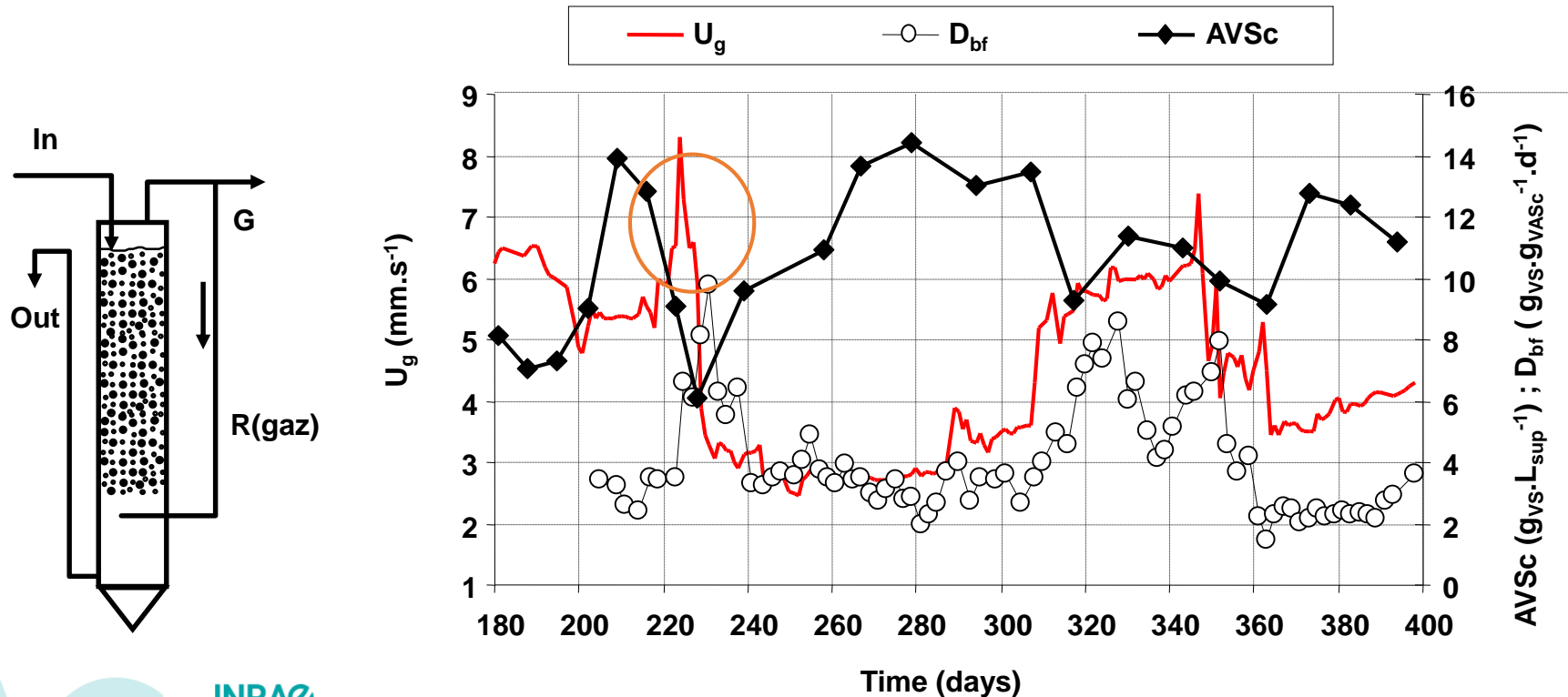
- Possibilité de ralentir le colmatage en utilisant des garnissages orientés (cloisonnnyl)
- Colmatage inévitable à terme (plusieurs années de fonctionnement)



# ➤ Comment maintenir un biofilm actif ?

## Biofilm particulaire

- Contrôle du cisaillement: vitesse de recirculation du liquid ou du gaz
- Augmentation par pulse de la vitesse de gaz dans un LTI : augmentation du détachement ( $D_{bf}$ )
- Changement sur le long terme: modification des caractéristiques du biofilm



# ➤ Conclusions

## Démarrage

- Inoculation : temps de contact court
- Montée en charge: TSH court pour lessiver la flore plactonique et faibles contraintes hydrodynamiques
- Importance du choix du matériau pour favoriser l'adhésion des archées méthanogènes

## Etat d'équilibre

- Contrôle actif de l'épaisseur du biofilm pour maintenir des performances optimales : hydrodynamique
- Favoriser les procédés qui permettent un décolmatage occasionnel (matériau flottant)





# ➤ Remerciements

## Chercheurs

René Moletta, Pierre Buffière,  
**Michel Torrijos**, Renaud Escudié,  
J-Philippe Delgenès, J-Philippe Steyer

## Doctorants

Sébastien Michaud,  
Romain Cresson, Frédéric Habouzit



INRAE

