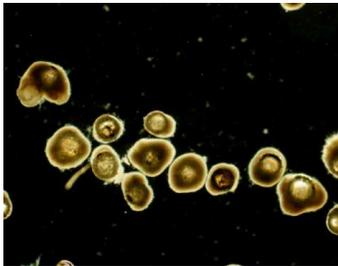
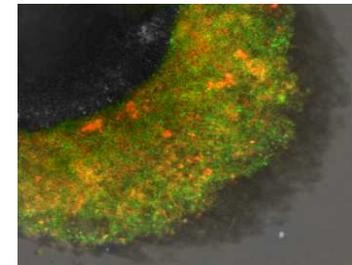


HYDRODYNAMIQUE ET MÉLANGE DANS LES BIORÉACTEURS



RENAUD ESCUDIÉ
LBE – INRA, NARBONNE



Bioréacteurs de traitement des effluents liquides

Enjeux technologiques

Optimisation des capacités d'épuration des procédés

⇒ réduction des volumes d'installation et/ou augmentation de la charge polluante

↪ cinétique de dégradation (adaptation des conditions environnementales)

↪ concentration en biomasse

Stratégie

Effluents liquides: découplage entre TSH et TSB

Technologies pour les effluents liquides

Réacteurs à biomasses libres

micro-organismes \Leftrightarrow forme planctonique / flocs

stratégies de concentration: décantation externe, décantation interne (SBR)...

↳ Bioréacteurs agités mécaniquement ou par incorporation de gaz

Réacteurs à biomasses fixées (intensifs)

micro-organismes \Leftrightarrow biofilm

stratégies de concentration: support inerte pour le développement de la matrice biologique

↳ lits fixes, lits fluidisés

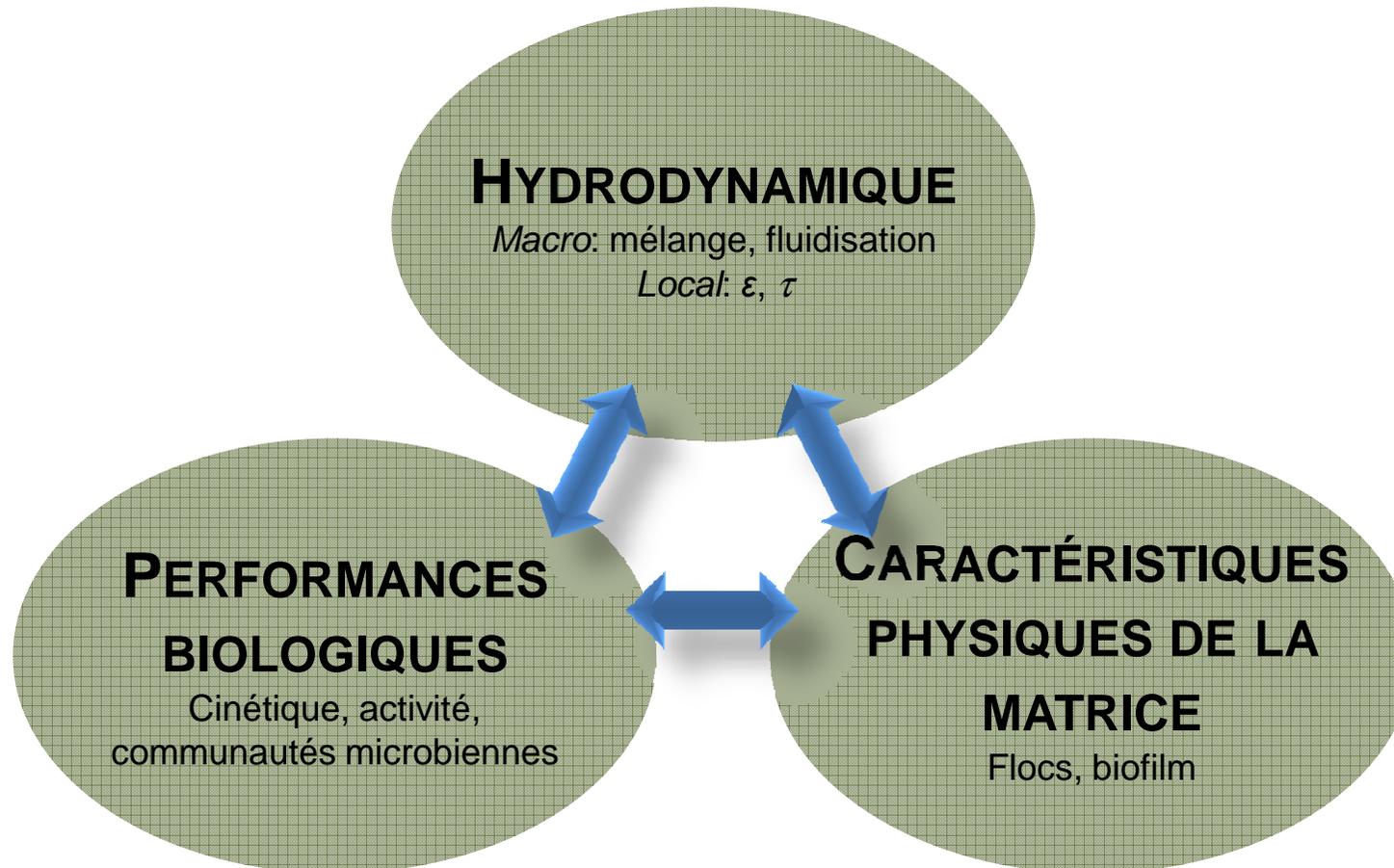
Procédés à lit fixe

- ↗ Rétention de biomasse
- ↗ Facilité de mise en œuvre
- ↗ Fortes charges : $20 \text{ KgDCO.m}^{-3}.\text{j}^{-1}$

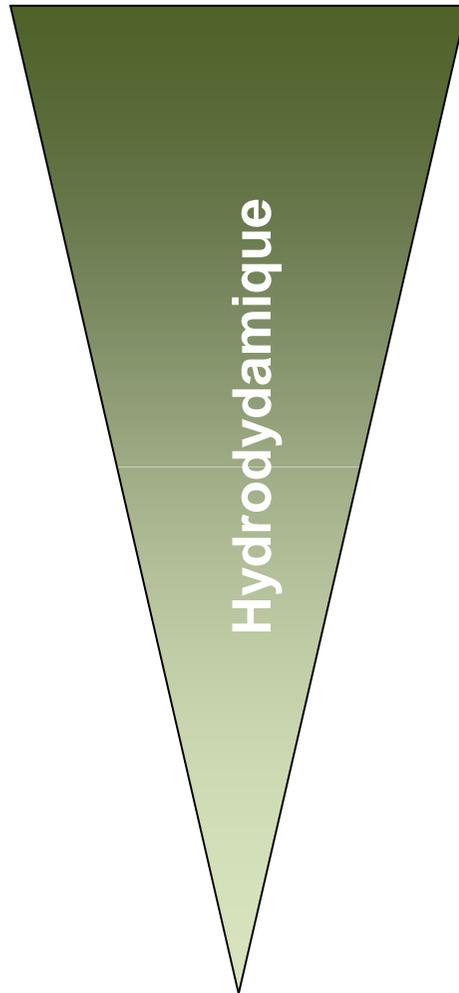
↘ Colmatage

Procédés à lit mobile

- ↗ Évite les problèmes de colmatage
- ↗ Surface spécifique du biofilm élevée ⇒ Favorise les transferts de matière
 - ⇒ Augmente la capacité de conversion volumique des réacteurs
 - ⇒ Réacteurs compacts (faible encombrement)
 - ⇒ Très fortes charges $> 40 \text{ KgDCO.m}^{-3}.\text{j}^{-1}$ (Buffière *et al.* 1996 , Steyer *et al.* 1999)



Echelle Globale



Macromélange:

homogénéisation globale des composés dissous
dispersion des agrégats
transfert de chaleur

Mésomélange/Micromélange

structure des petites échelles turbulentes

Dissipation de l'énergie cinétique turbulente

phénomène d'aggrégation et de rupture des floccs
taille des inclusions liquides (kla)

Echelle locale

1- Modélisation du mélange et des cinétiques biologiques d'un lit fixe anaérobie

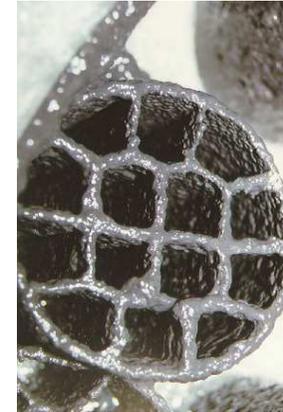
2- Utilisation de l'hydrodynamique pour faciliter le démarrage d'un lit fluidisé anaérobie

1- Modélisation du mélange et des cinétiques biologiques d'un lit fixe anaérobie

2- Utilisation de l'hydrodynamique pour faciliter le démarrage d'un lit fluidisé anaérobie

Mise en service du pilote en 1997

- Volume utile du réacteur: 948 litres
- Utilisation de support de type Cloisonyle (tubes multicanaux)



25 tubes de 3,5 m

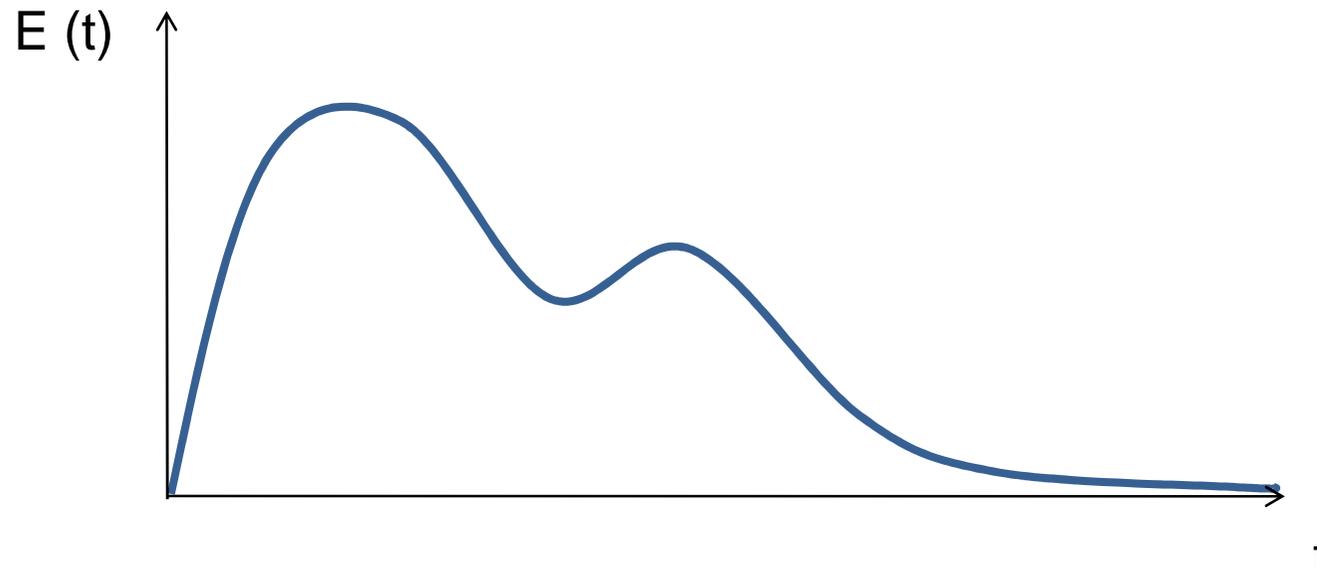
Etat de la colonisation en 2002 ???

Objectifs

- Caractérisation du mélange liquide et influence des conditions opératoires
- Développement d'un modèle du bioréacteur

Distribution du Temps de Séjour Hydraulique (DTS)

mesure les temps de séjour pour l'ensemble des molécules qui entre dans le réacteur => caractériser l'écoulement (le macromélange)



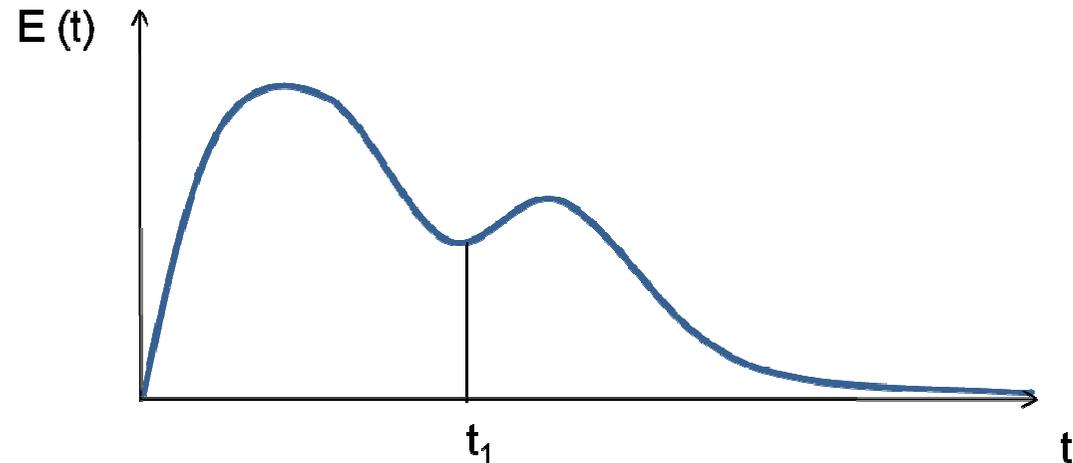
Propriétés

$$\int_0^{\infty} E(t).dt = 1$$

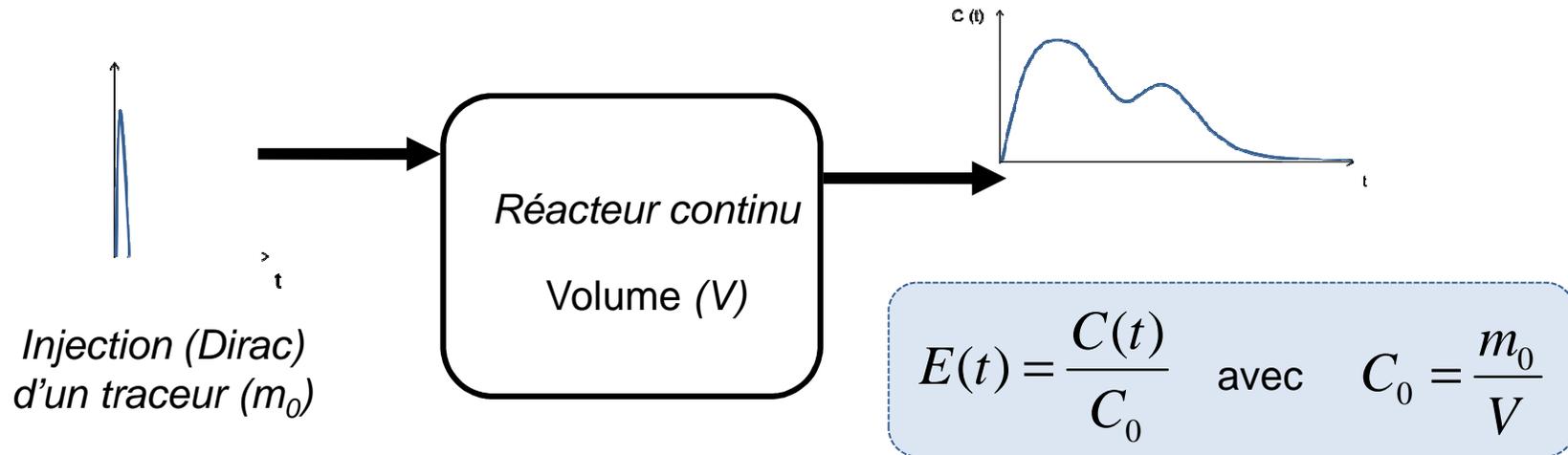
$$\int_0^{t_1} E(t).dt \quad \text{Fraction de liquide qui a séjourné moins longtemps que } t_1$$

$$\int_0^{\infty} t.E(t).dt = \tau \quad \text{Temps de séjour hydraulique (expérimental)}$$

$$\int_0^{\infty} (t - \tau)^2 .E(t).dt = \sigma \quad \text{Variance}$$



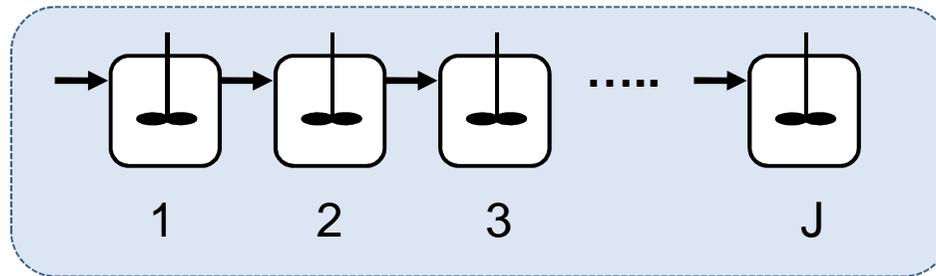
Mise en œuvre



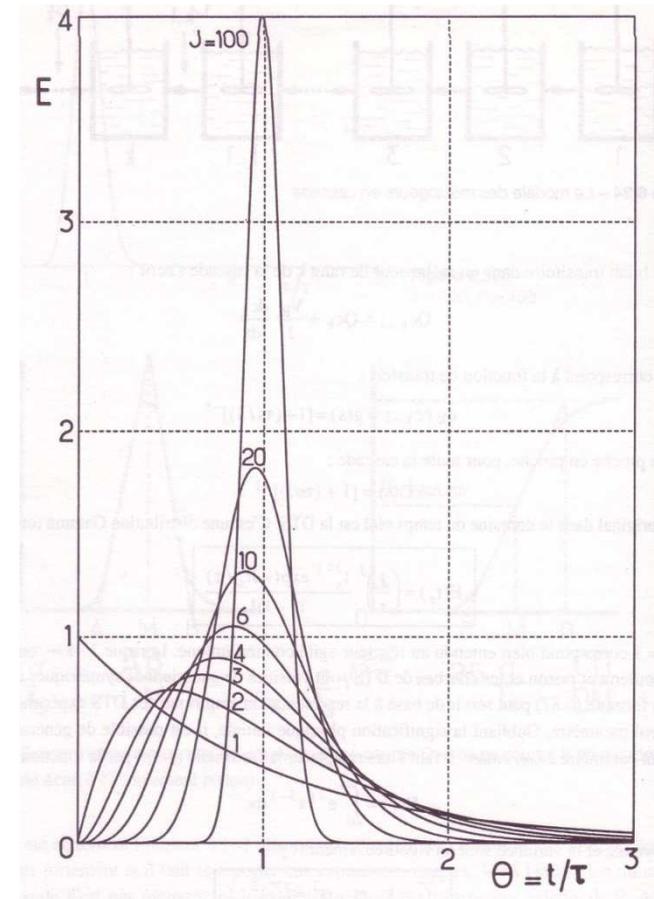
Choix du traceur

- Composé dissous inerte (réaction, inhibition)
- Facilement détectable

J réacteurs parfaitement mélangé en série



$$E(t) = \frac{J}{(J-1)!} (J \cdot t)^{J-1} e^{-J \cdot t}$$

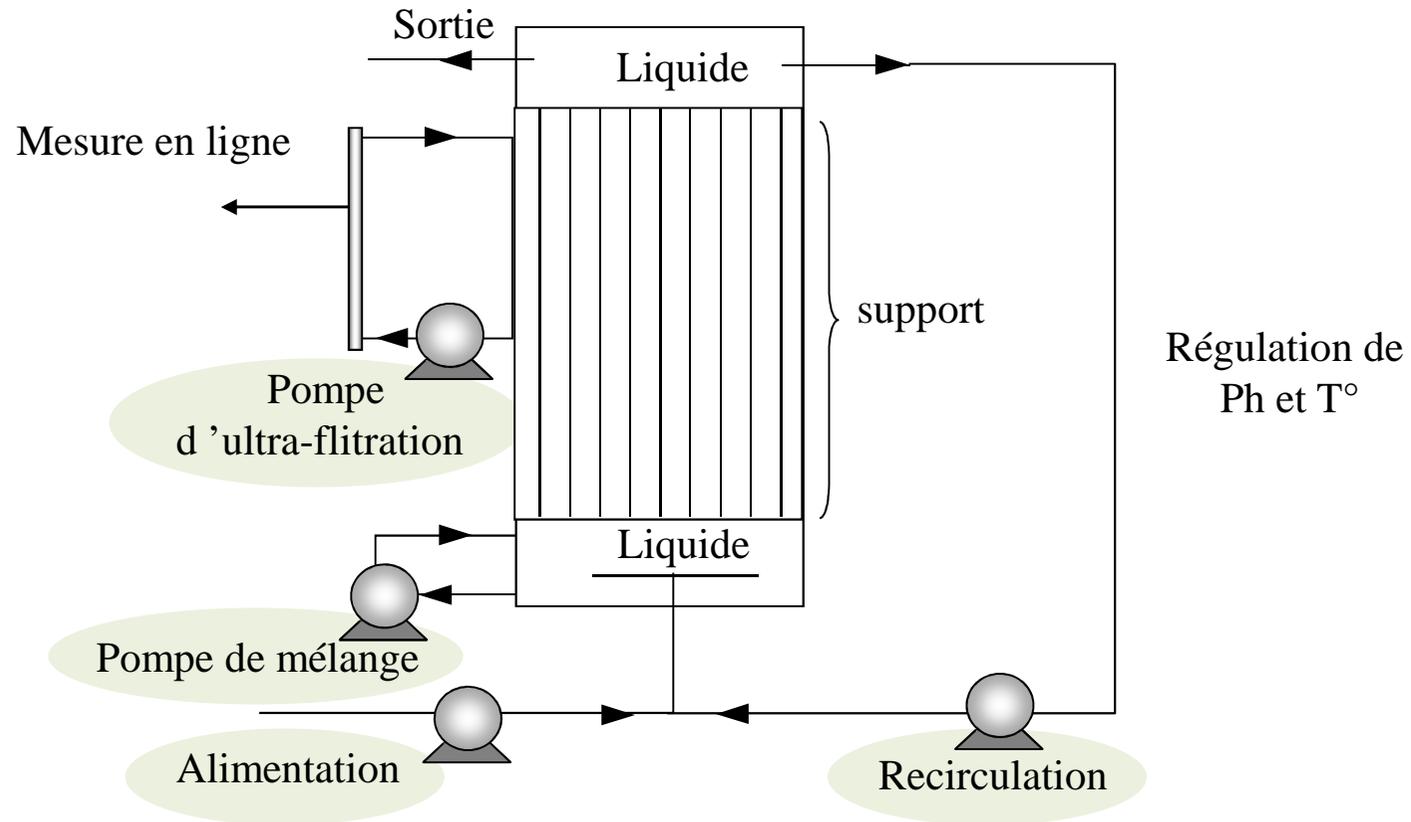


Protocole

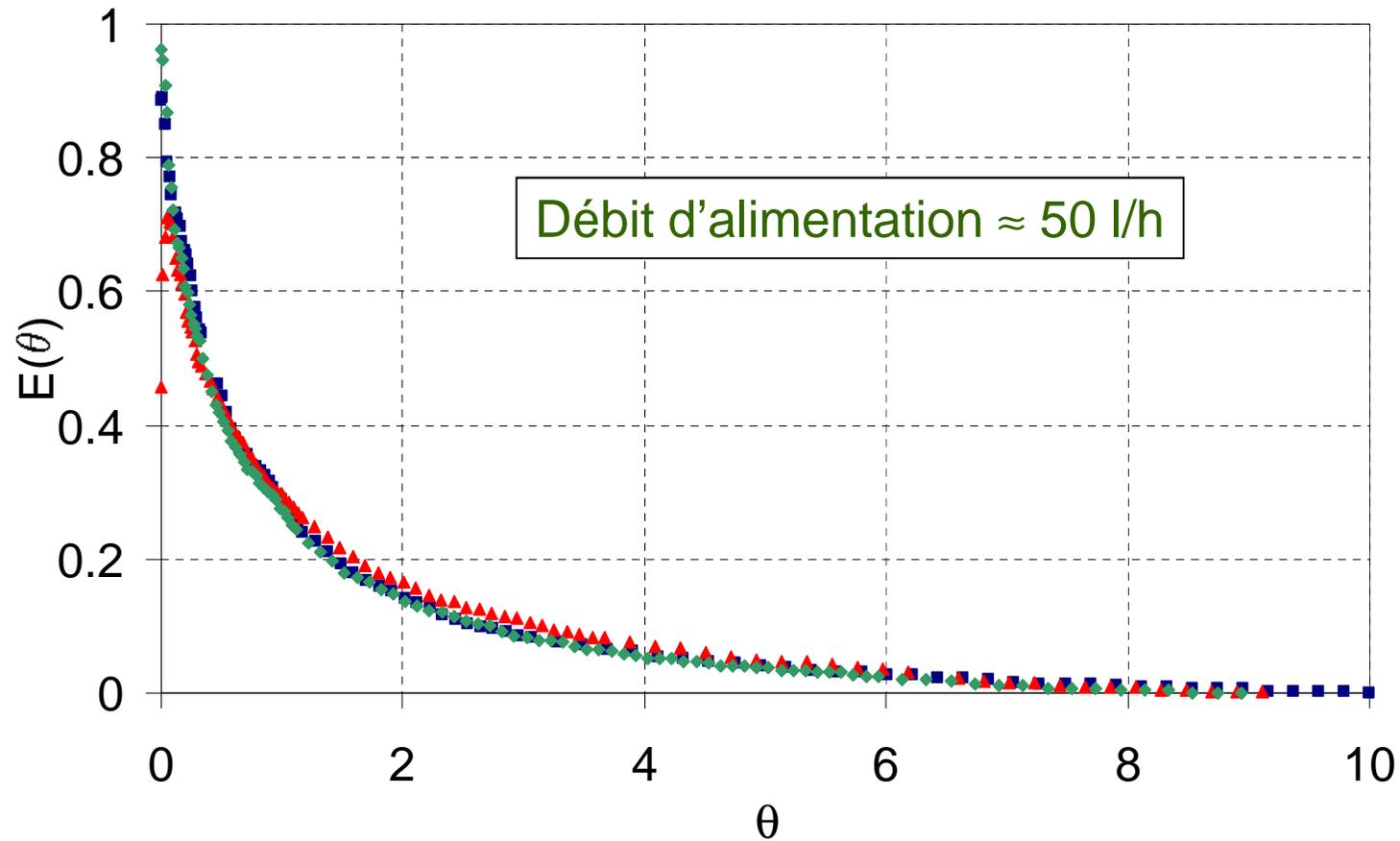
- alimentation du réacteur avec des vinasses
- utilisation du CLi comme traceur (pas de réaction avec la biomasse)
- prélèvement à partir d'échantillonneur automatique
- Centrifugation des solutions à 15000t/min pd 10 min
- dosage avec le photomètre à flamme

Durée de la manipulation $> 8 \tau$

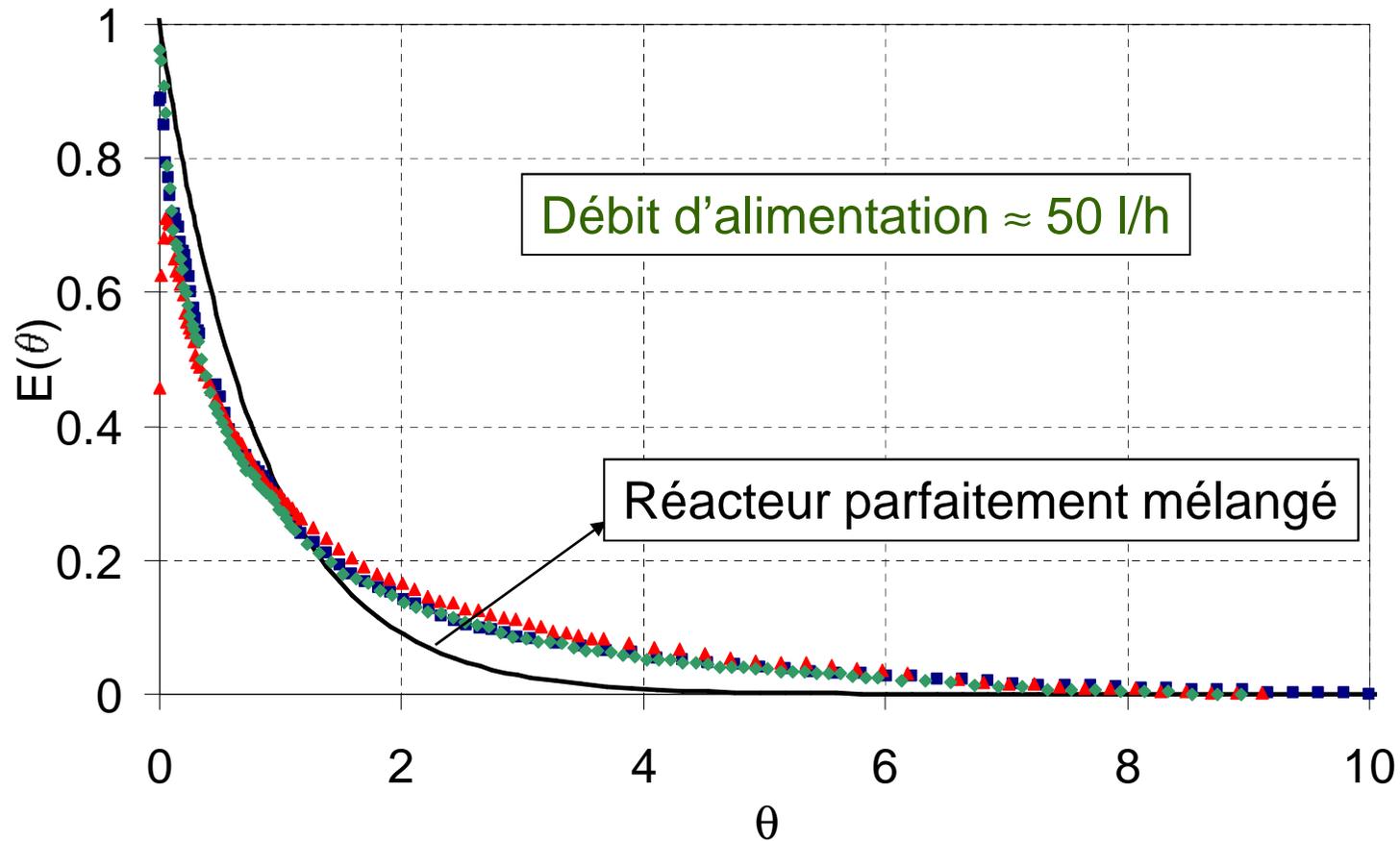
Dispositif expérimental



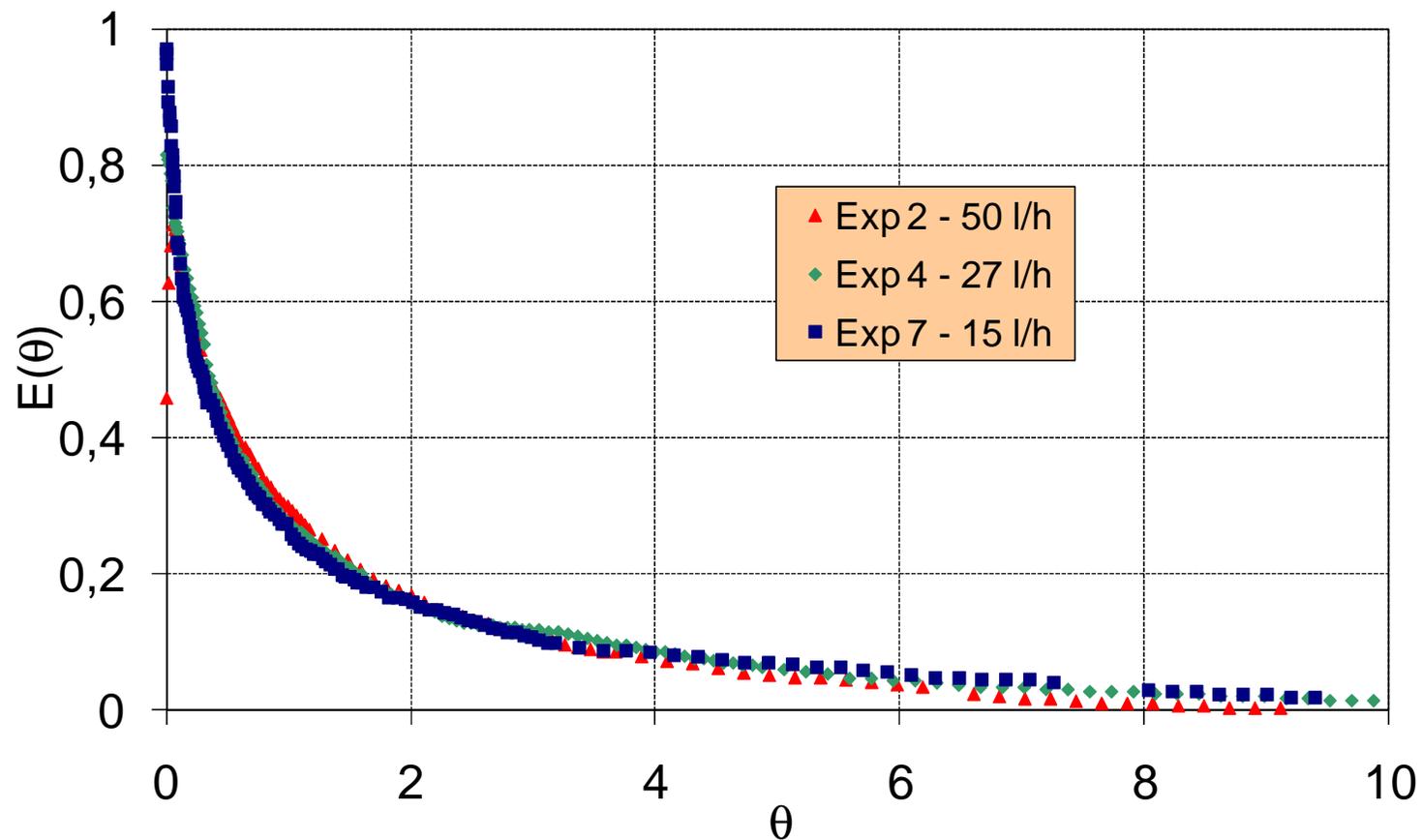
Experiments	Exp 1	Exp 2	Exp 3	Exp 4	Exp 5	Exp 6	Exp 7
Inlet Flow l/h	48	48	46	27	15	13	13
Recycling flow l/h	111	0	129	0	86	0	0
Mixing pump	On	Off	Off	Off	On	Off	Off
Ultra-filtration pump	On	Off	Off	Off	On	Off	Off
Biogas flow l/h	220	194	223	177	115	0	77



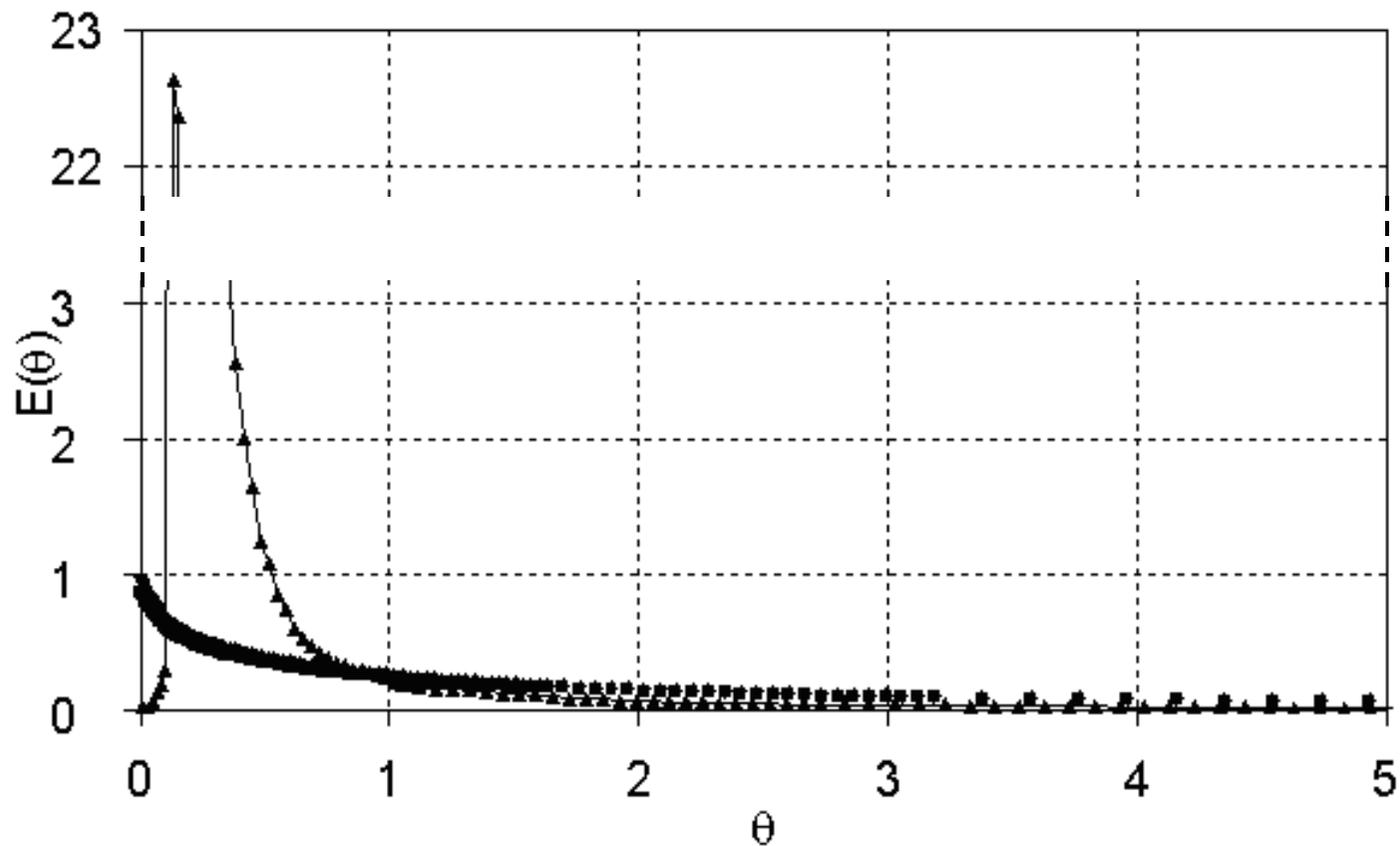
- pas d'influence de la recirculation, de la pompe de mélange et d'UF
- bon mélange du liquide



- apparition d'une « traîné » dans la courbe \Leftrightarrow zone morte
 \Rightarrow transfert biofilm

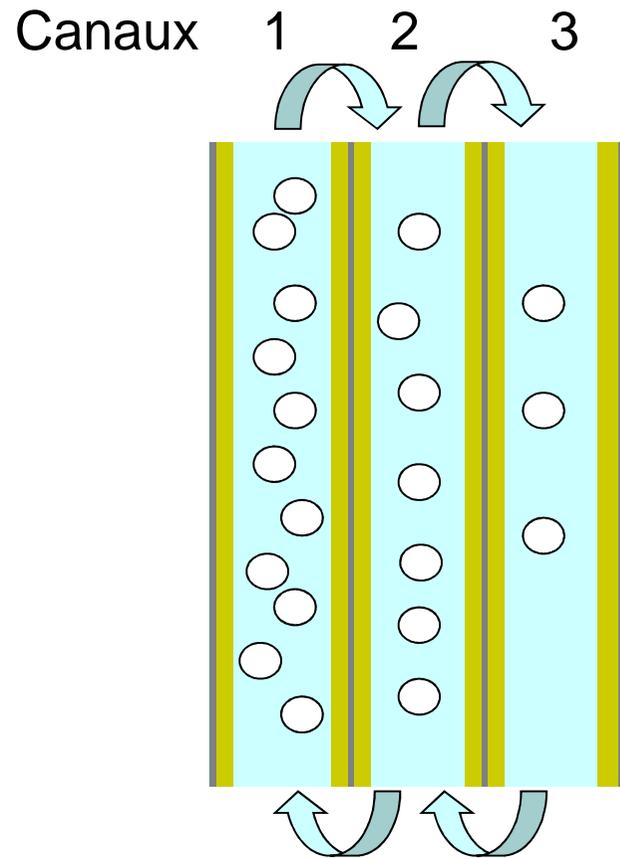


Influence du débit d'alimentation



Rôle moteur de la génération du biogaz sur le mélange

Caractérisation du mélange



Pression statique

$$P_1 < P_2 < P_3$$

Rétention gazeuse

$$\epsilon_{g1} > \epsilon_{g2} > \epsilon_{g3}$$

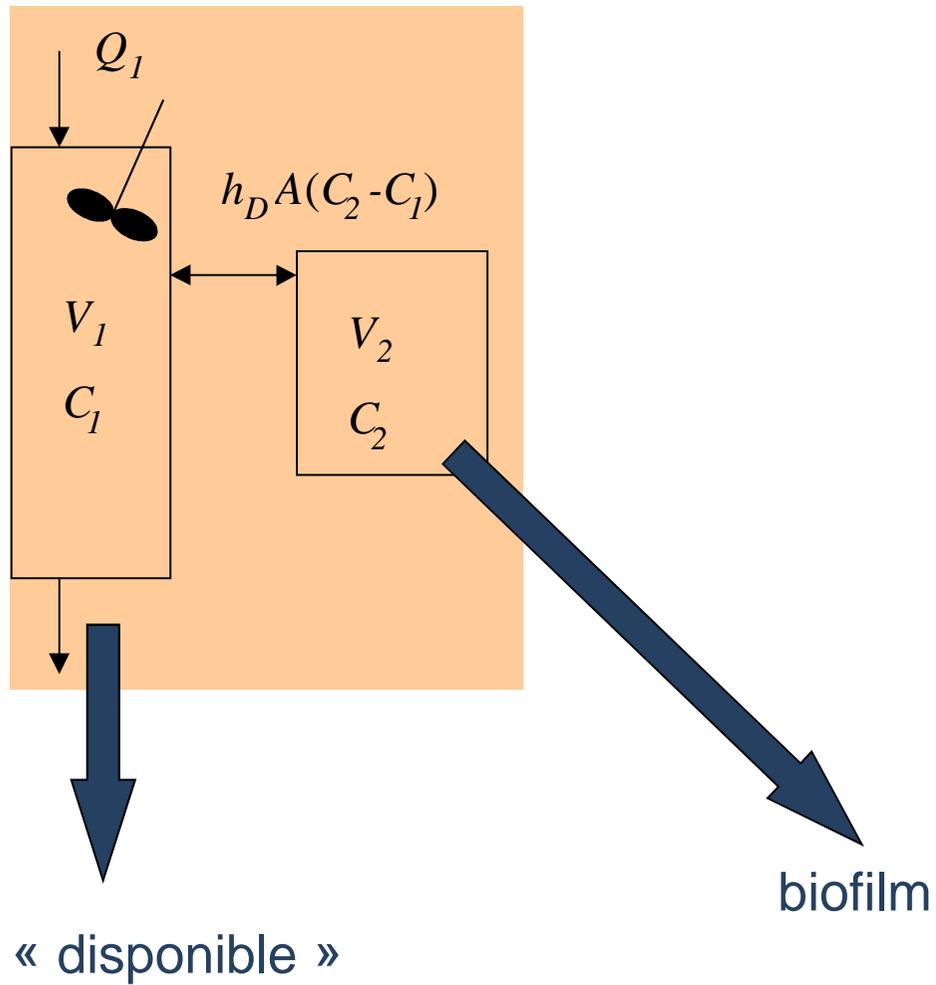
Objectif

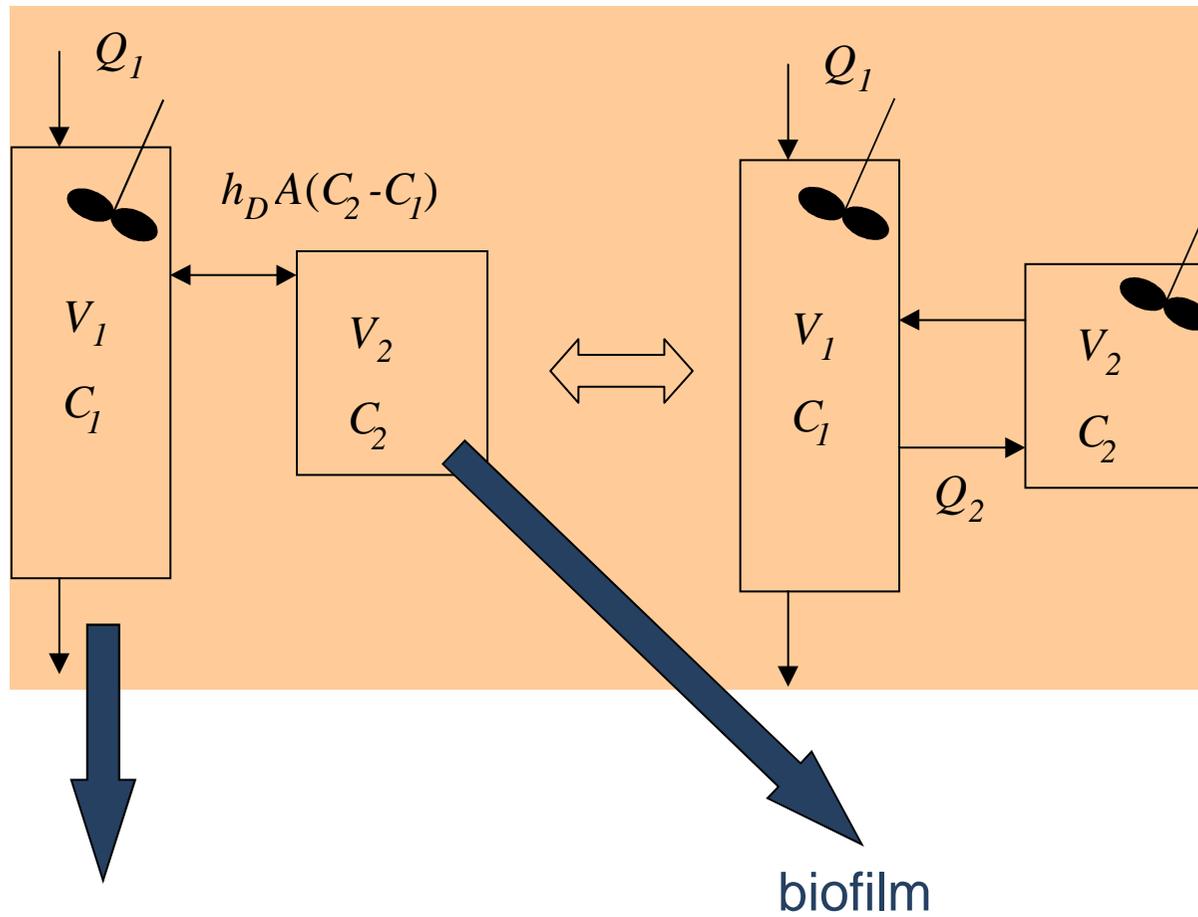
- développer un modèle simple utilisable dans un modélisation biocinétique du réacteur
- un modèle unique pour toutes les conditions opératoires

Observations expérimentales

- bon mélange
- zone morte \Leftrightarrow biofilm

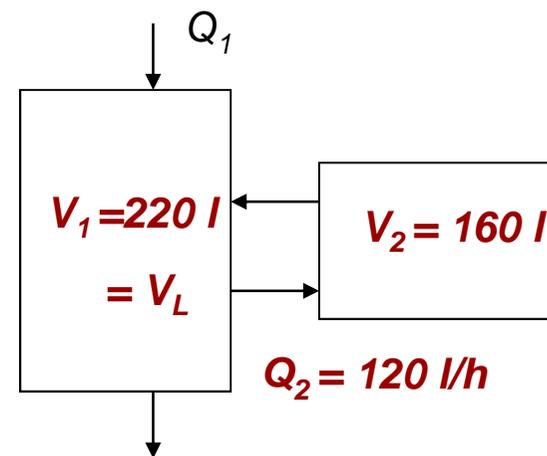
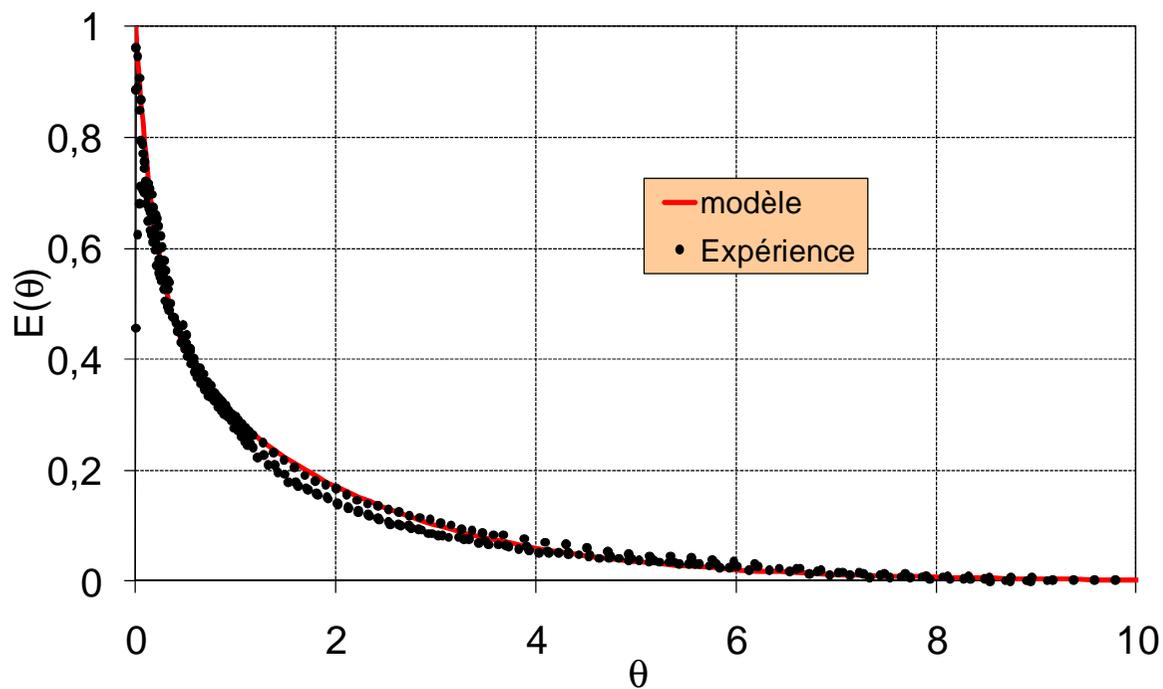
\Rightarrow deux réacteurs interconnectés





liquide « disponible »

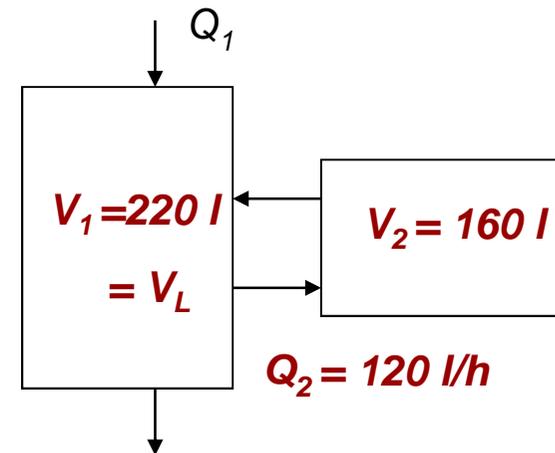
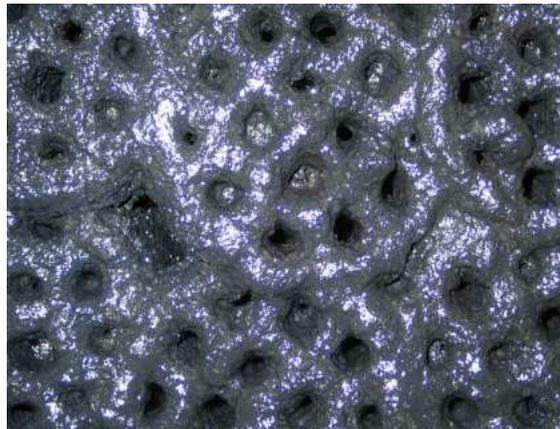
biofilm



Colmatage du réacteur

⇒ Estimation du volume de liquide « disponible »

- volume de biomasse (ouverture du réacteur): $V_L = 230$ l
- vidange du liquide réacteur: $V_L = 221$ l
- remplissage du réacteur: $V_L = 220$ l

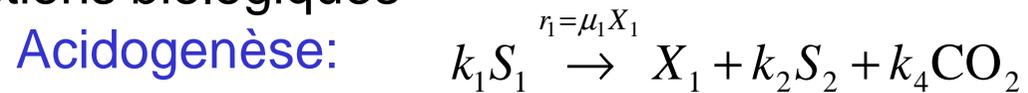


Objectif

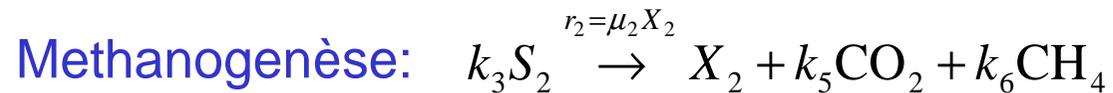
- modèle biocinétique du lit fixe anaérobie tenant compte de l'hydrodynamique du réacteur

Formalisme: modèle AMOCO (bernard et al., 2001)

- réactions biologiques



$S_1: DCO, S_2: AGV$

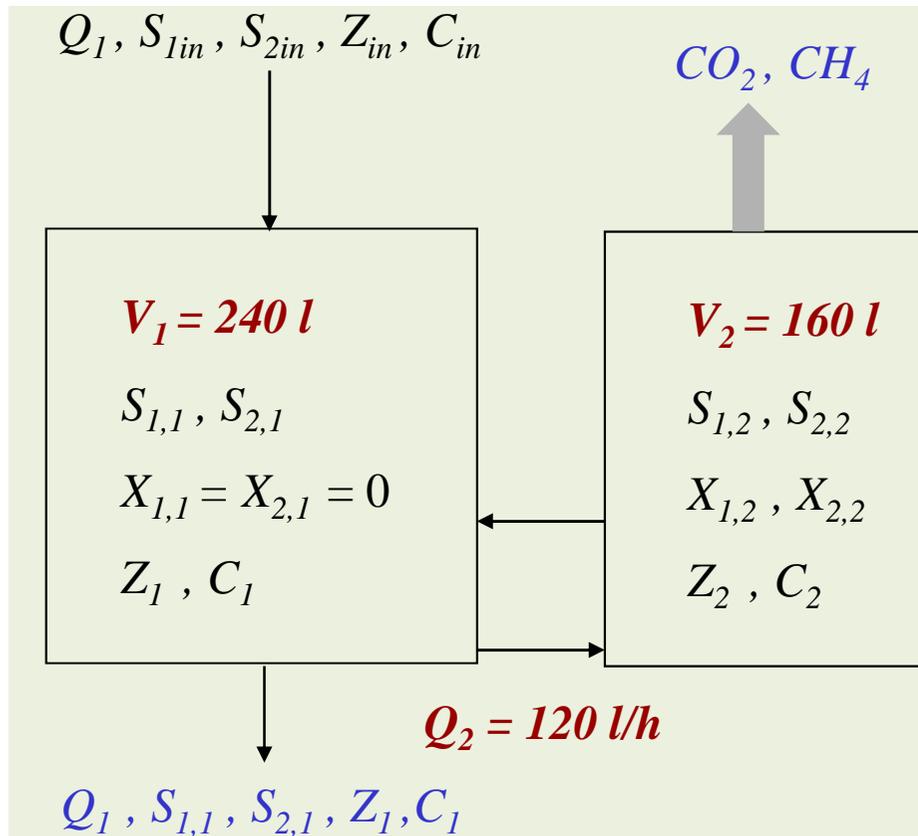


- équilibre chimique

Carbone inorganique: C

Alcalinité totale: K

- production de gaz: CO_2, CH_4



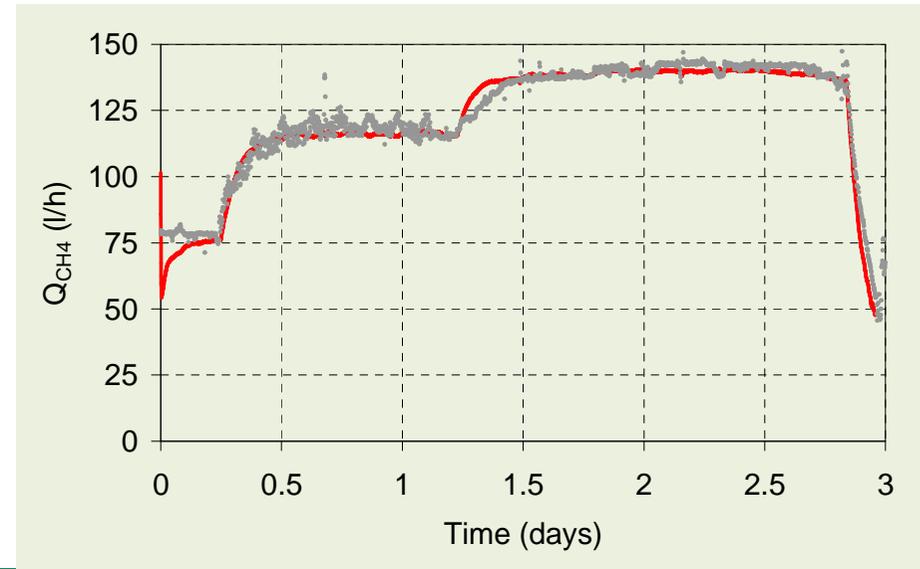
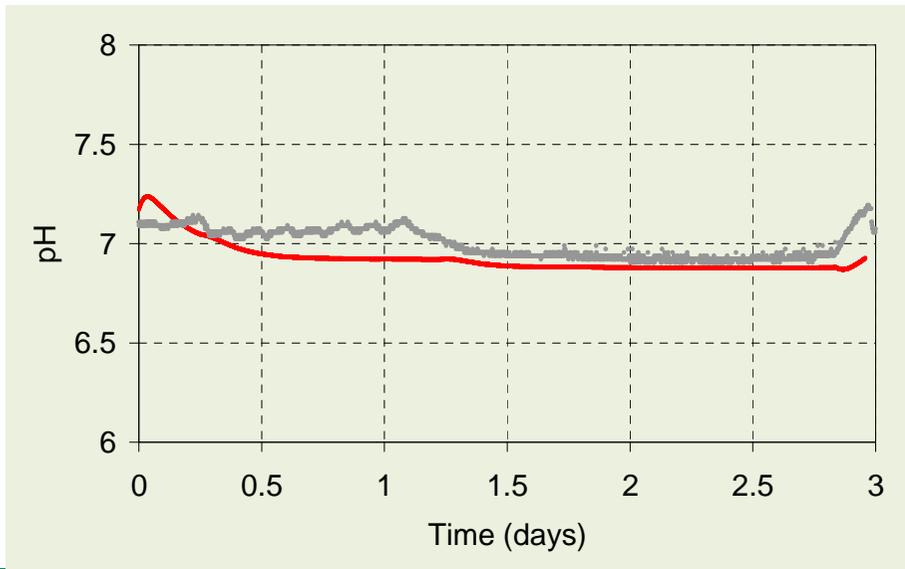
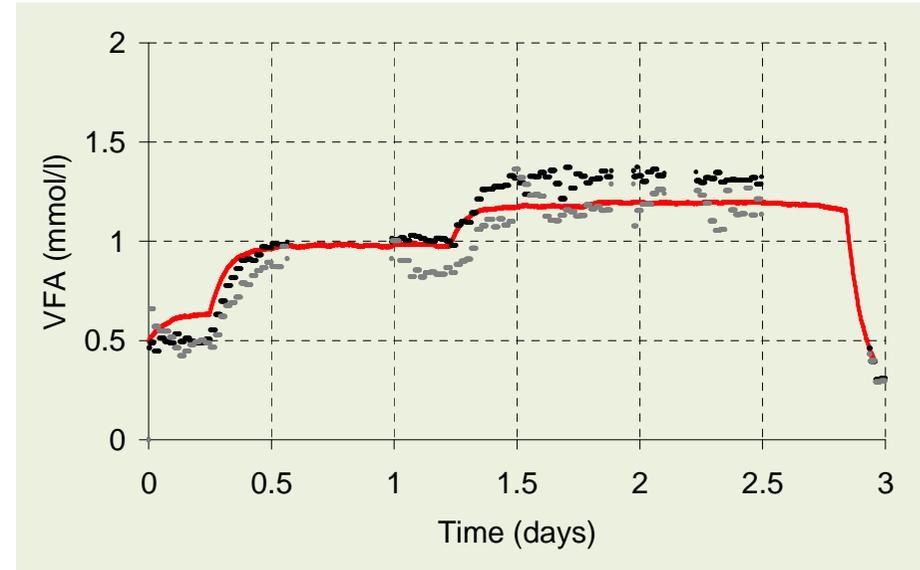
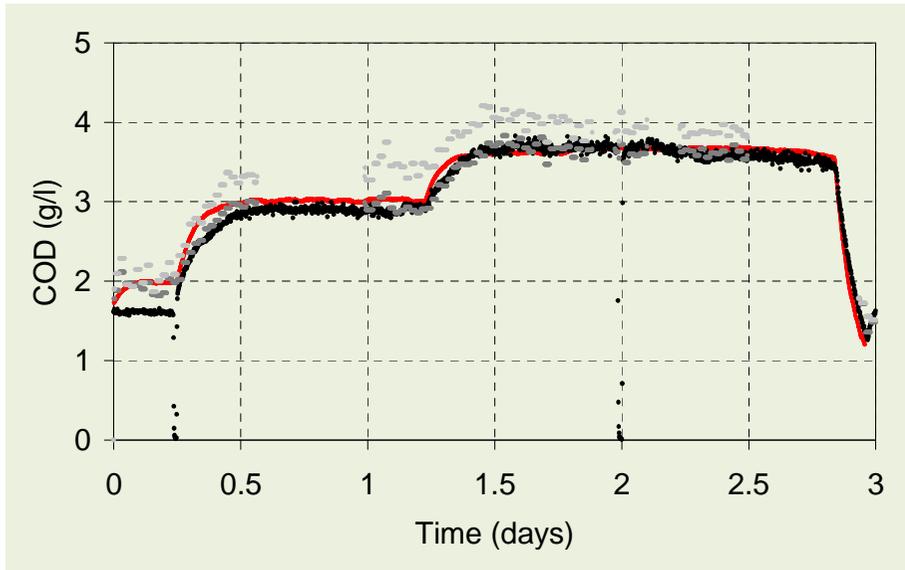
Condition de mélange:

- hydrodynamique prise en compte

Les paramètres du modèle

- paramètres cinétiques \approx AMOCO

- X_1 et X_2 de l'ordre du 100 g/l



Etude hydrodynamique expérimentale

- bon mélange dans le lit fixe (présence du biogaz)
- pas d'influence de la recirculation et de la pompe mélange
=> intérêt dans le cas d'application industrielle

Modélisation du mélange liquide

- 2 réacteurs interconnectés (liquide + biofilm)
- 3 paramètres hydrodynamiques: V_1 , V_2 , Q_2

Modèle biocinétique du réacteur

- intérêt de la prise en compte du mélange

1- Modélisation du mélange et des cinétiques biologiques d'un lit fixe anaérobie

2- Utilisation de l'hydrodynamique pour faciliter le démarrage d'un lit fluidisé anaérobie

Contexte

Démarrage: opération longue et délicate

(Henze et al. 1983; Weiland et al. 1991; Puñal et al.; Nicolella et al. 2000...)

Objectifs

Utiliser les conditions hydrodynamiques



Impact de l'abrasion

Impact du TSH

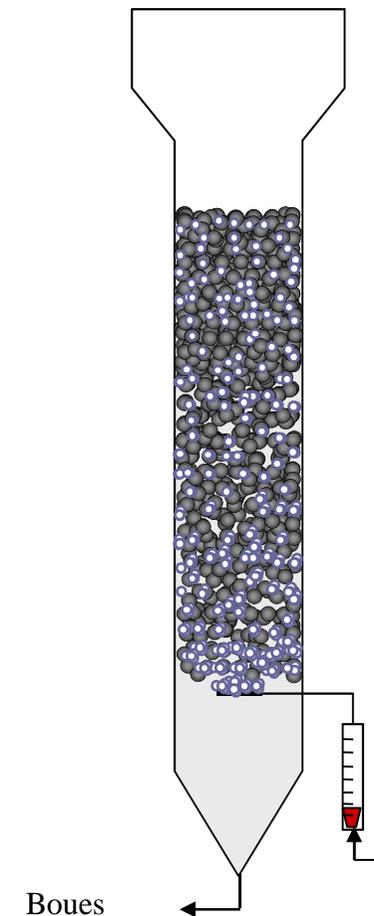
sur la formation du biofilm et le démarrage

Doctorat R. Cresson (2002-2006)

Lit Turbulé Inverse

- Réacteur triphasique
 - Fluidisation par le gaz
 - Support de faible densité

- ↗ Bon mélange
- ↗ Contrôle de la hauteur du lit
- ↗ Décanteur intégré : récupération des solides sédimentés
- ↗ Fortes contraintes hydrodynamiques (évite la sur-accumulation de biomasse)



Effet de l'abrasion sur le démarrage

?

Impact de l'hydrodynamique sur la formation du biofilm

Démarrage 2 LTI : 2 Vitesses de recirculation du biogaz testées

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

Ajustement des contraintes hydrodynamiques appliquées

?

Contrôle actif de l'accumulation de la biomasse sur le support

Biofilm installé dans les deux systèmes

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

Conditions de démarrage

Inoculation massive, mode discontinu : 24h

Alimentation en continu

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

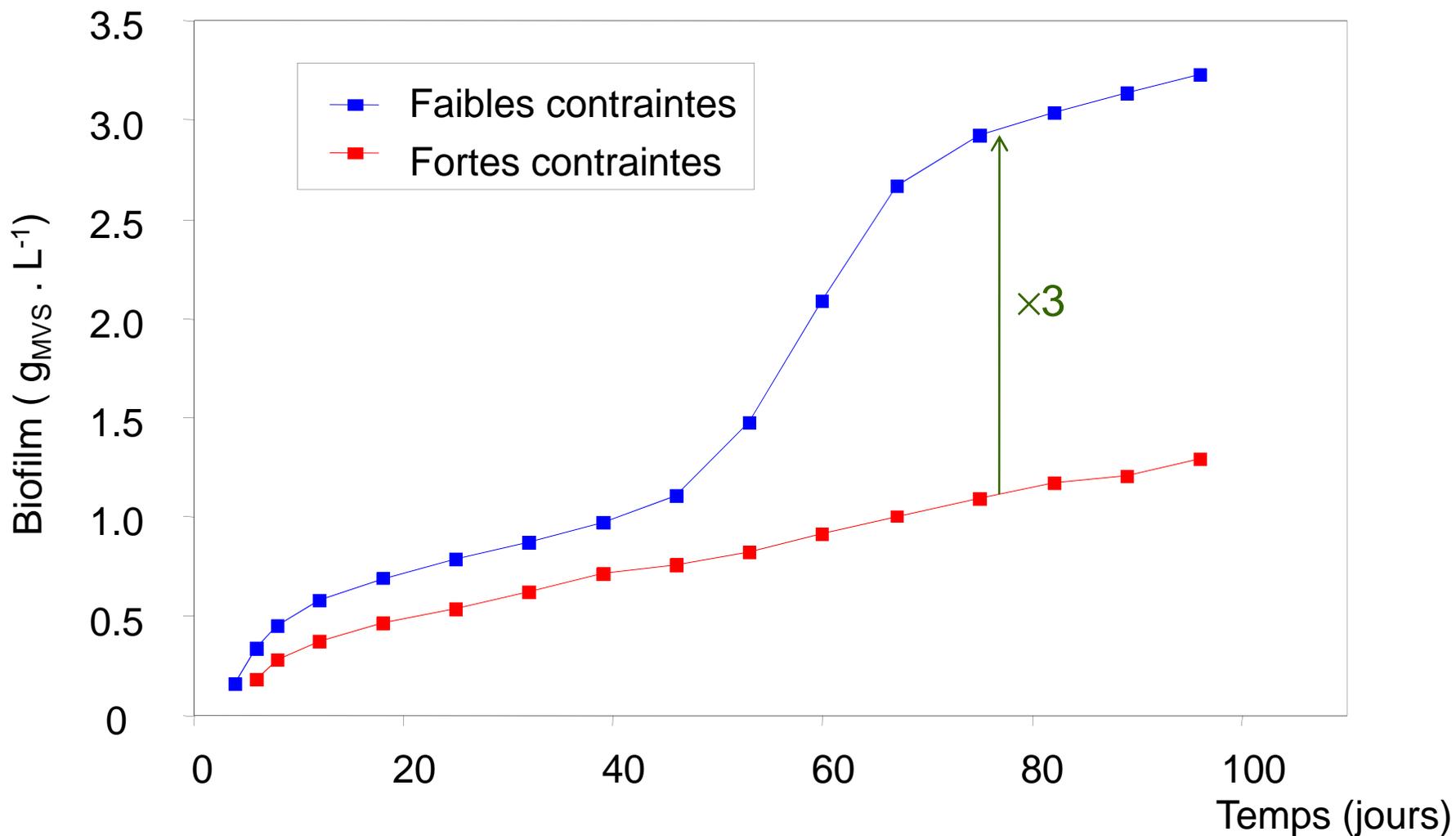
Montée en charge

Par paliers avec un taux d'épuration seuil fixé à 80%

Réacteur **fortes contraintes** : 0,5 à 6 gDCO.L⁻¹.j⁻¹ en **72 jours**

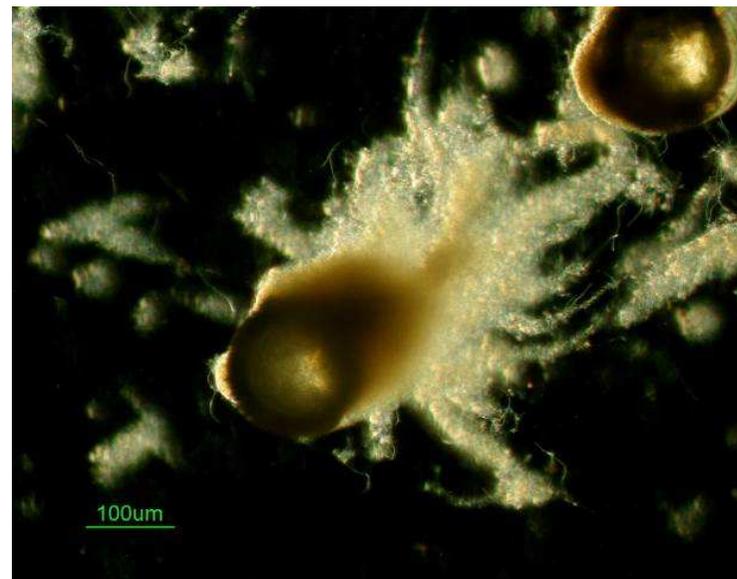
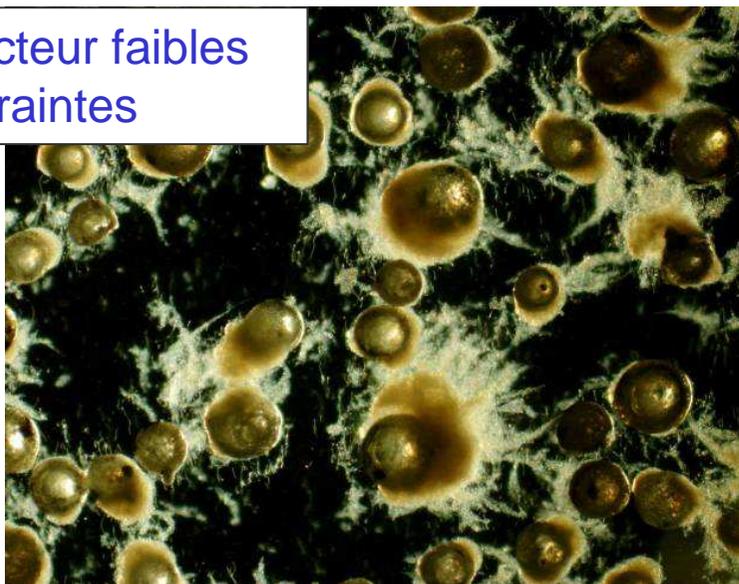
Réacteur **faibles contraintes** : 0,5 à 6 gDCO.L⁻¹.j⁻¹ en **64 jours**

Développement du biofilm

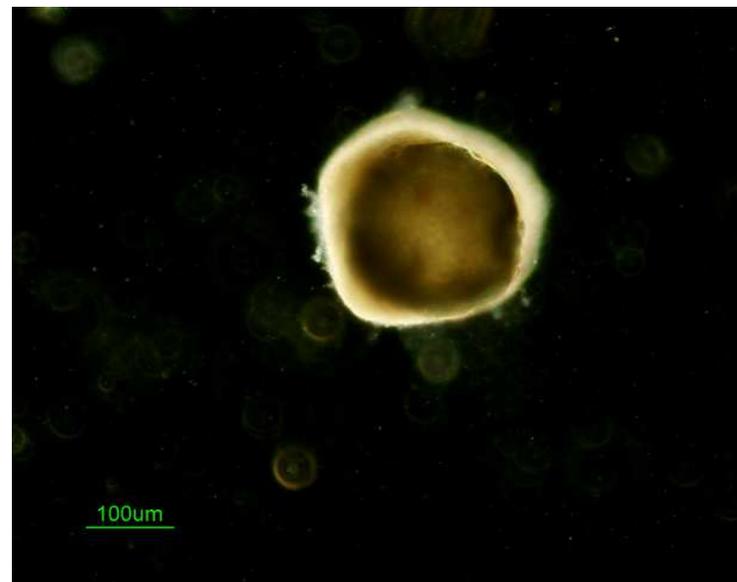
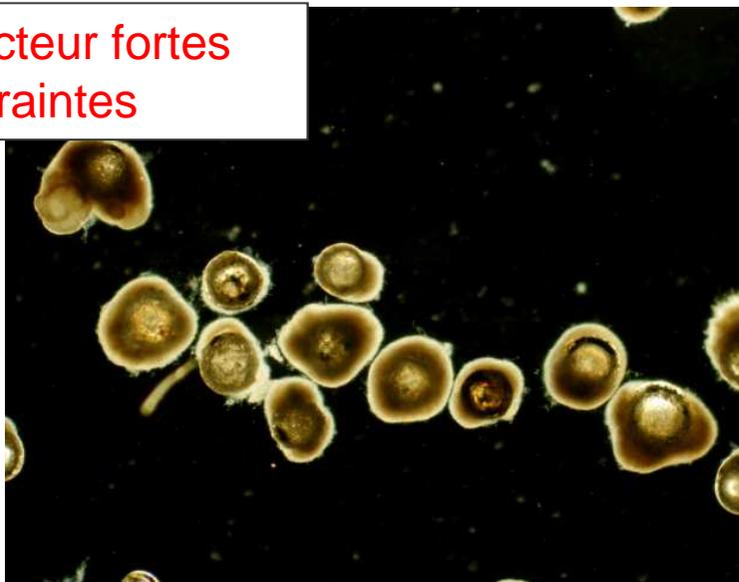


Abrasion et démarrage des réacteurs de méthanisation

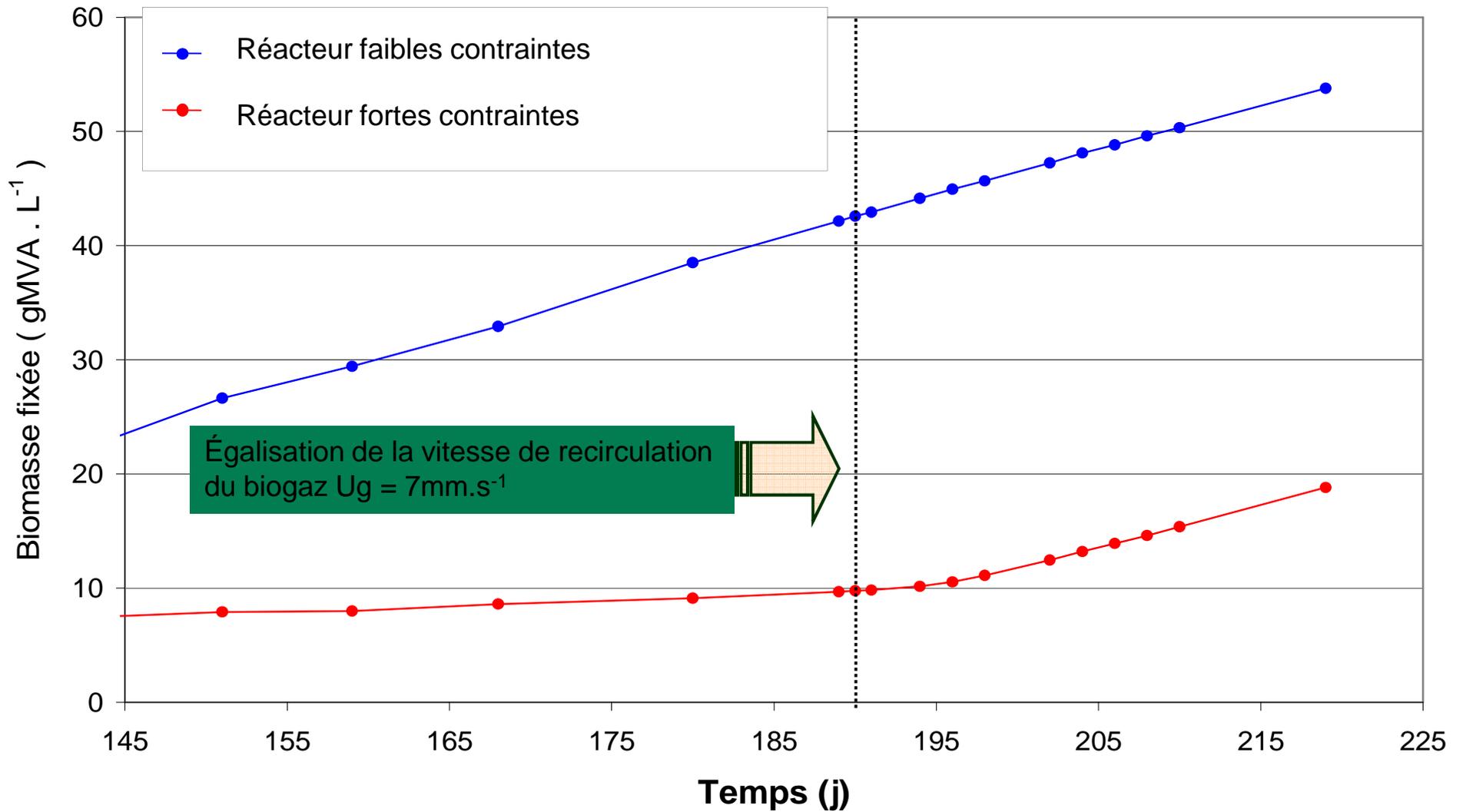
Réacteur faibles
contraintes



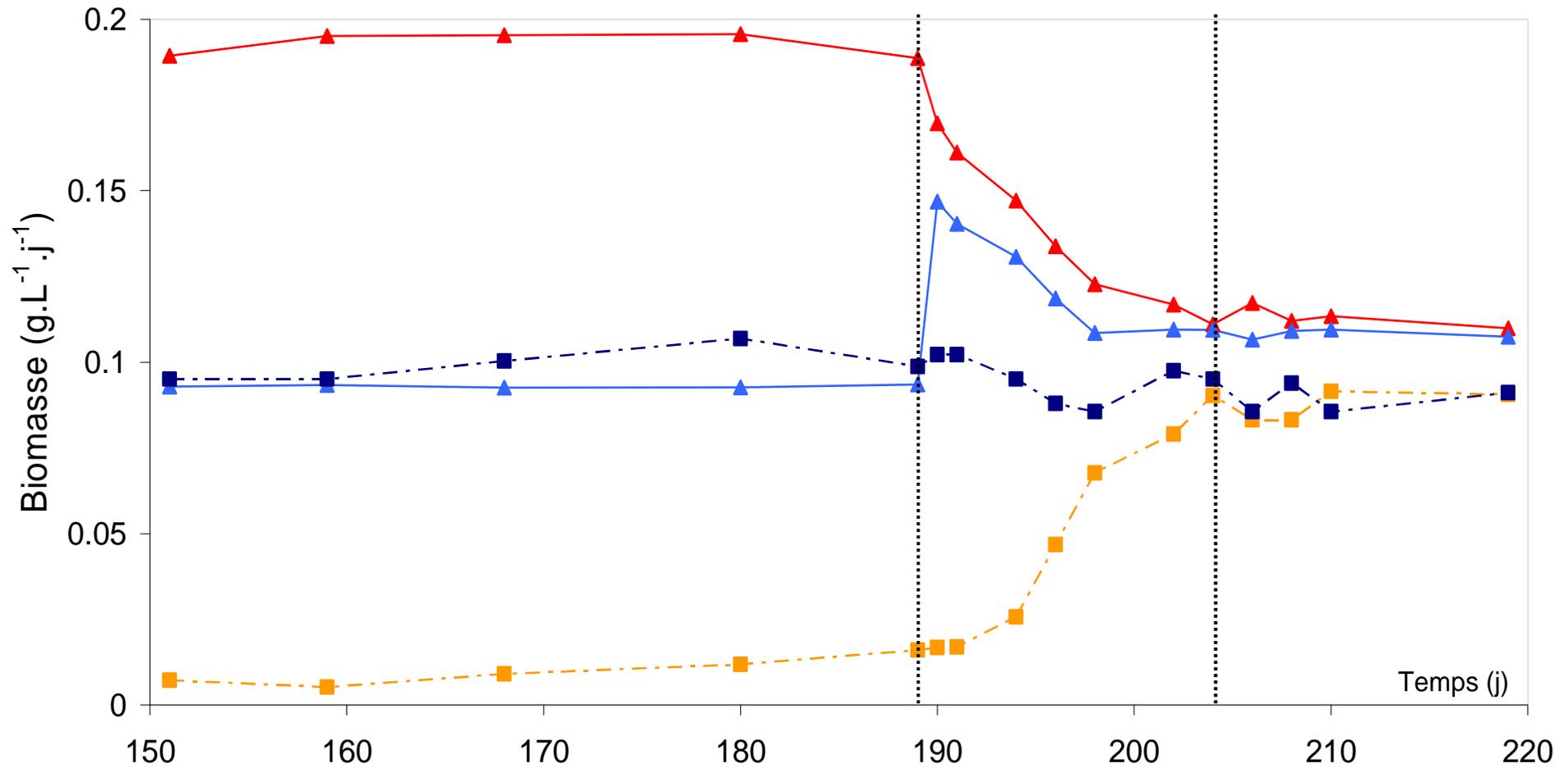
Réacteur fortes
contraintes



Variation de la vitesse de gaz



Égalisation de la vitesse de gaz à 7 mm.s^{-1}



Faibles contraintes hydrodynamiques :

- ⇒ Démarrage plus rapide, croissance du biofilm plus importante

Fortes contraintes :

- ⇒ Activités spécifiques du biofilm élevées :
3,5 g DCO dégradée / g Biofilm vs 1.8 g DCO dégradée / g Biofilm

Problématique du démarrage des réacteurs de digestion anaérobie :

Minimiser les contraintes hydrodynamiques

Égalisation des vitesses de gaz

- ⇒ Augmentation de la vitesse ⇒ pas de détachement massif du biofilm
- ⇒ Diminution de la vitesse ⇒ augmentation de la vitesse de croissance

A Ug égales les taux de détachement et accumulation sont équivalents

Une fois le biofilm installé :

Variation de la vitesse de gaz ⇒ régulation de l'épaisseur du biofilm

Deux compartiments distincts

Liquide



Temps de séjour de la
biomasse
planctonique

=

Temps de Séjour
Hydraulique (TSH)

≠

Biofilm



Temps de séjour de la
biomasse attachée

Conditions de démarrage

-Montée en charge de type exponentielle de 0 à $20g_{DCO}.L^{-1}.j^{-1}$ en 30 jours

2 stratégies:

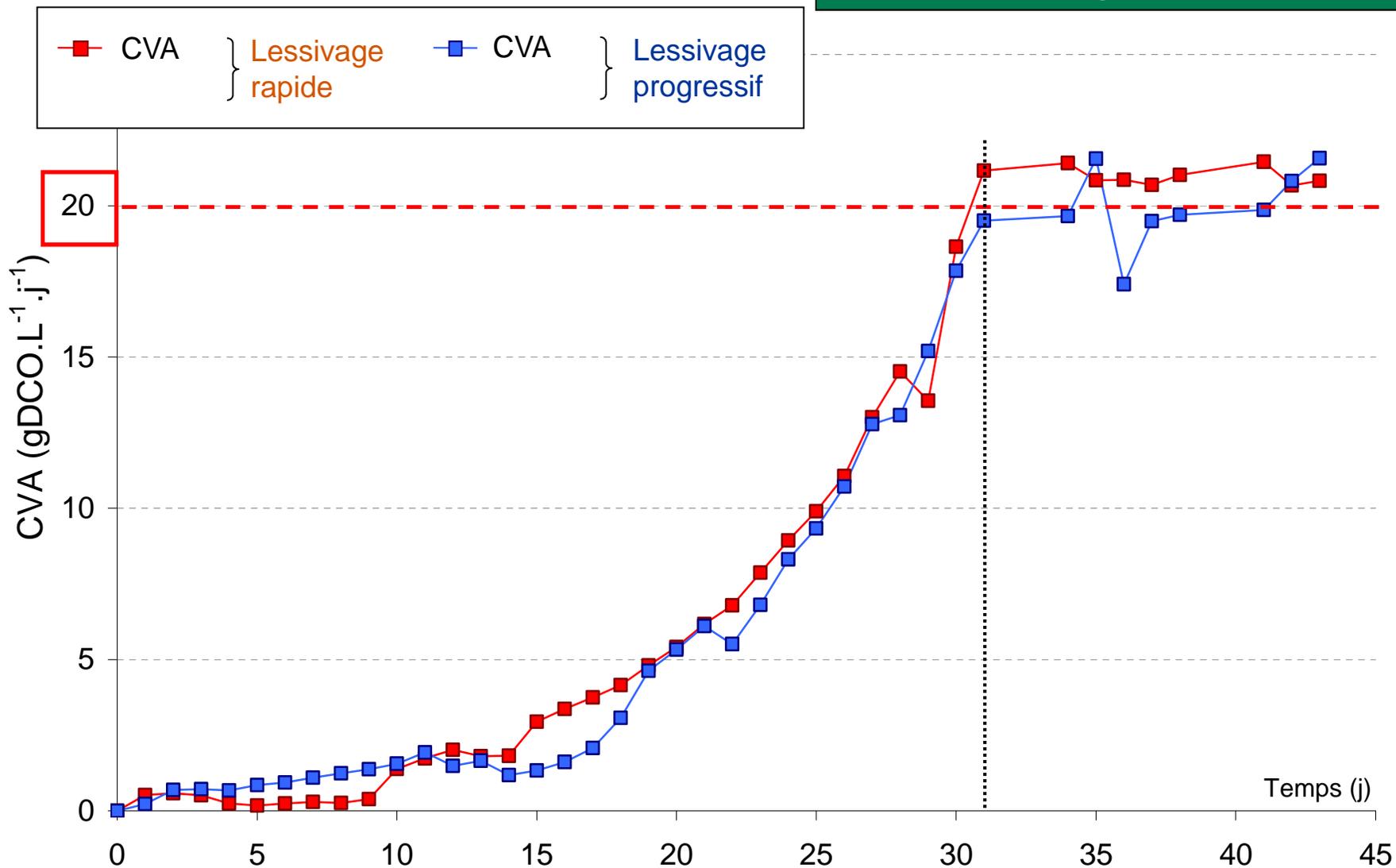
Lessivage rapide des microorganismes

- ⇒ TSH constant et court (1j)
- ⇒ Augmentation de la charge par augmentation de la concentration en entrée

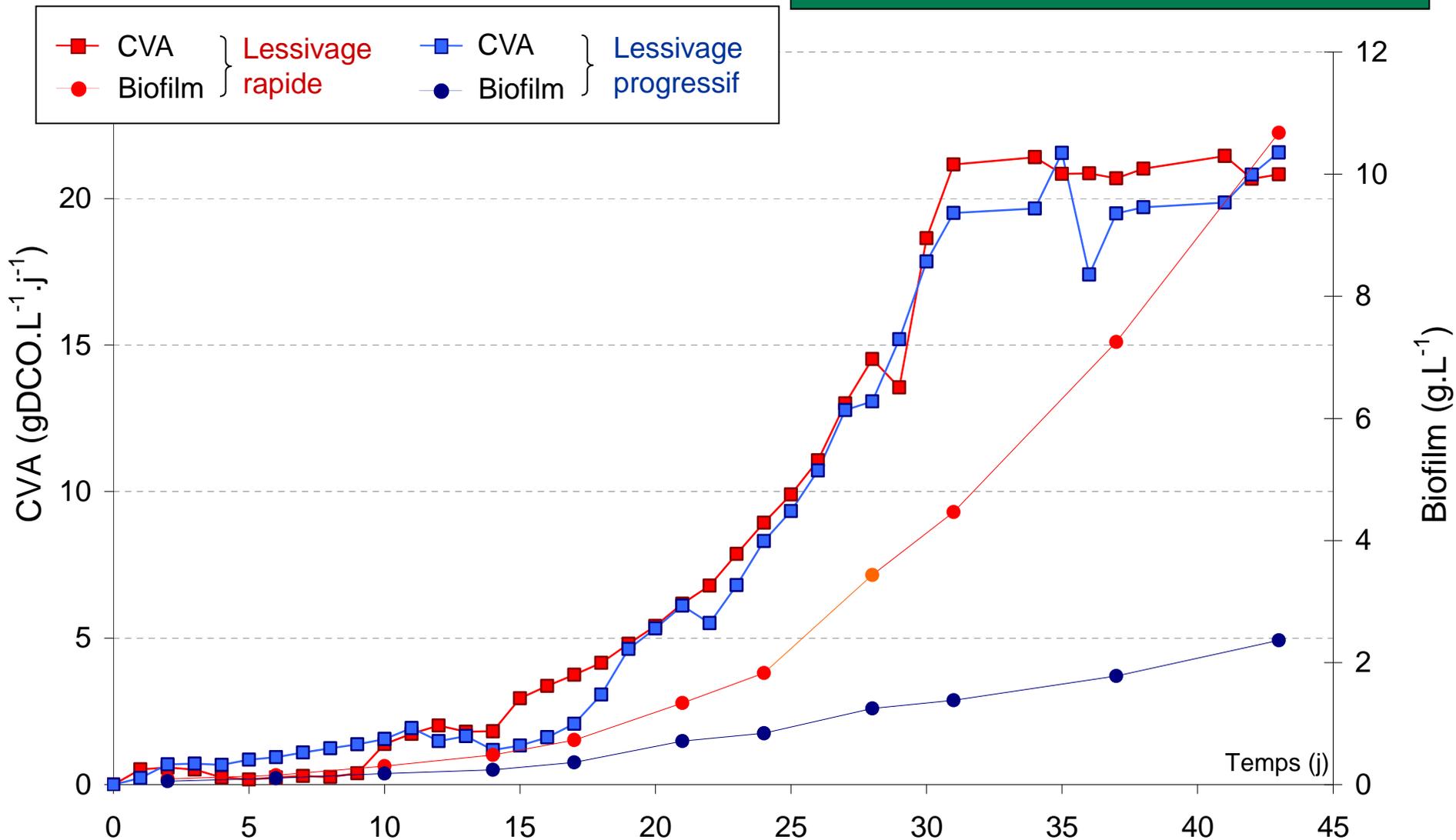
Lessivage progressif des microorganismes

- ⇒ TSH variable(40j ⇒ 1j)
- ⇒ Augmentation de la charge par diminution du débit d'alimentation

Augmentation de la CVA



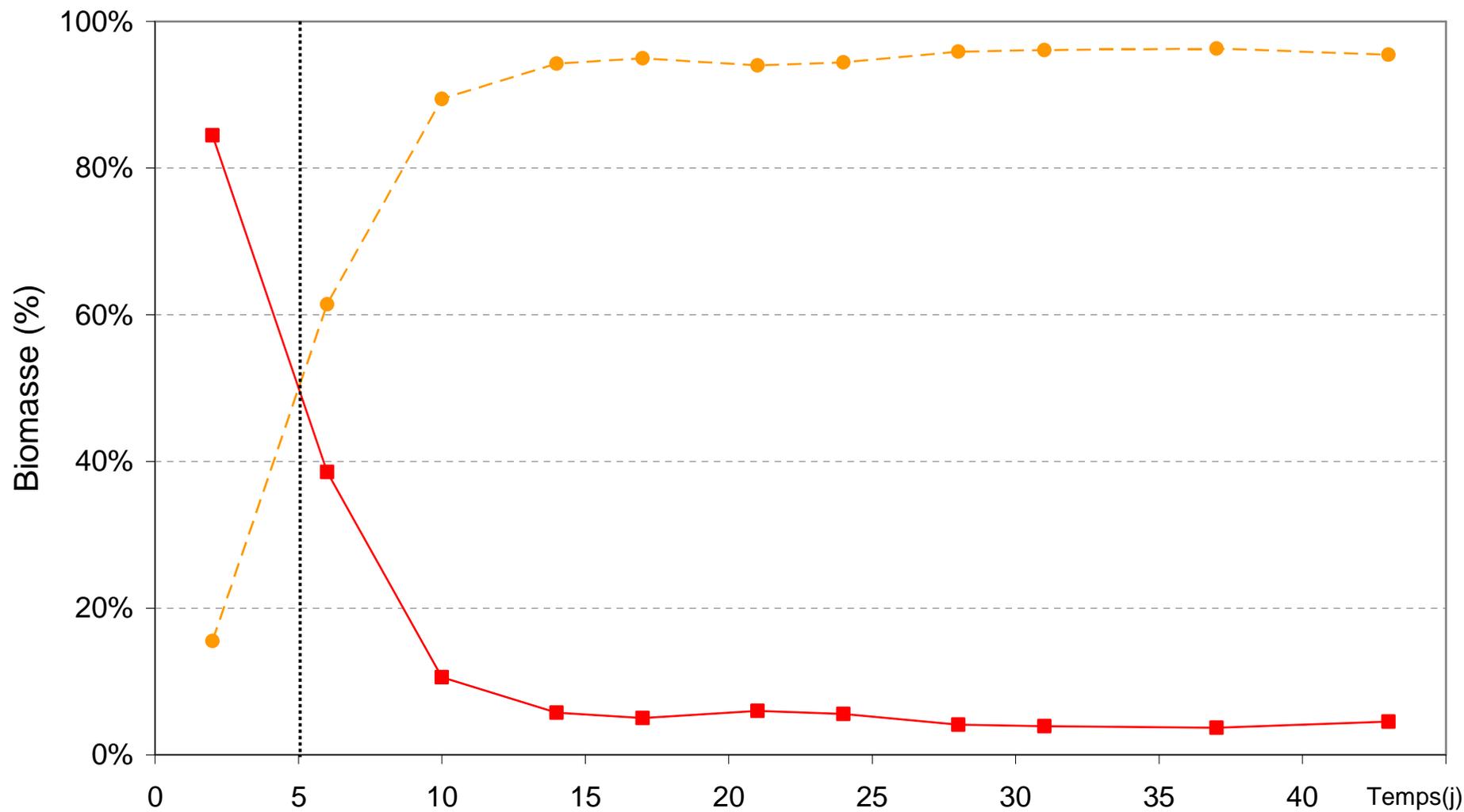
Croissance du biofilm



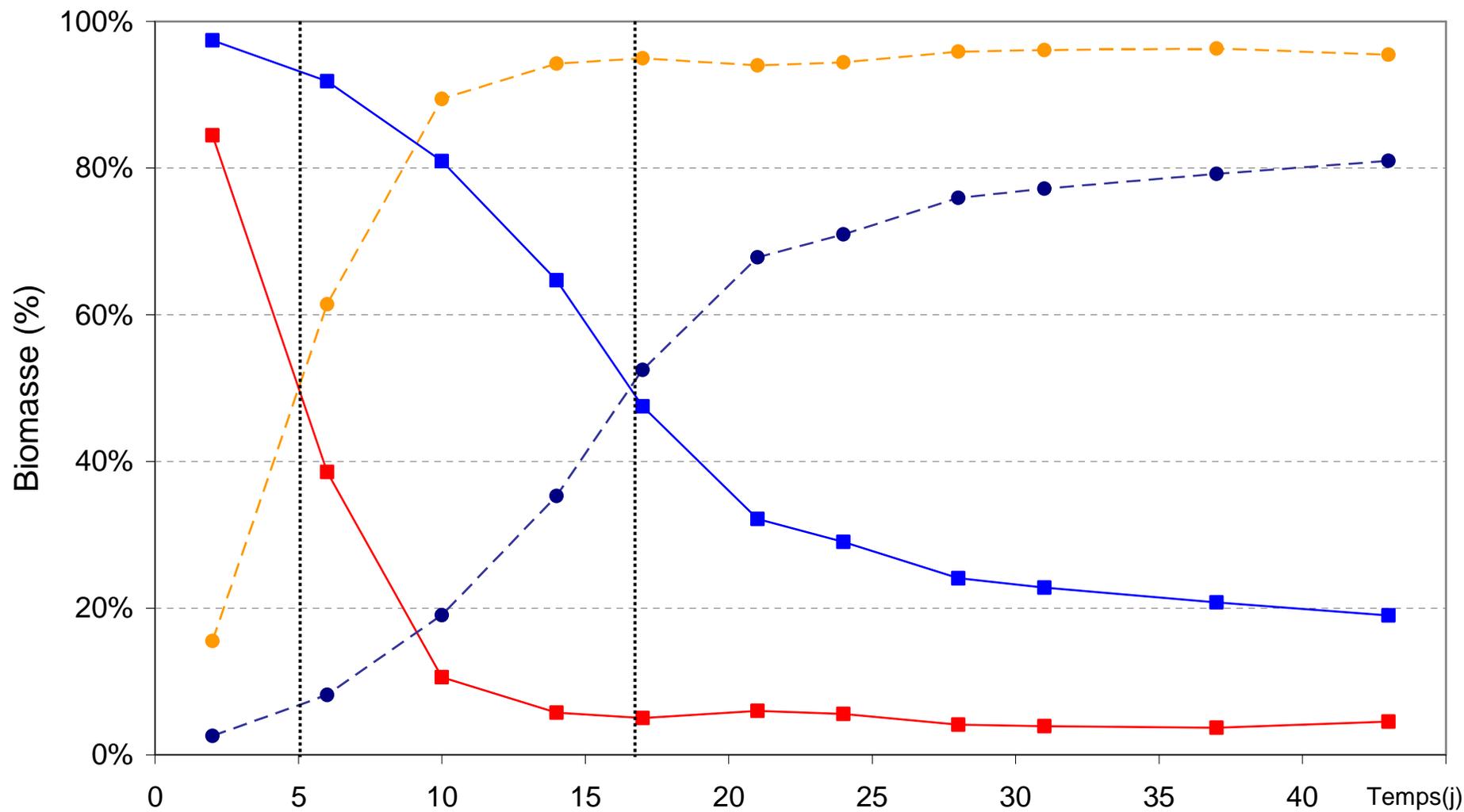
Biomasse libre vs biomasse fixée

■ Biomasse libre
● Biomasse fixée

} Lessivage rapide



TSH et démarrage des réacteurs de méthanisation



Performances épuratoires

- Objectif atteint avec les deux stratégies
- **Lessivage rapide : meilleures performances**
 - ⇒ + 17% DCO éliminée, + 19% de méthane produit
- Production et accumulation d'AGV
 - Conversion éthanol / AGV : **7 % lessivage rapide** vs **13% lessivage progressif**
 - ⇒ Lessivage progressif : forte accumulation d'AGV à la fin de la montée en charge (2,5g.L⁻¹ vs 0,3 g.L⁻¹ lessivage rapide)

Formation du biofilm

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

TSH court ⇒ Favorise le développement du biofilm

Stratégie lessivage rapide validée sur un lit fixe de 1m³

Conclusions

Hydrodynamique

Étape clef pour la mise en œuvre et l'**optimisation des bioprocédés de traitement** des effluents liquides

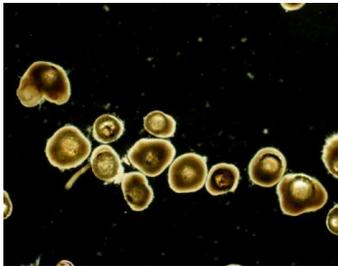
Réacteurs à lit fixe

Pb de colmatage => **pb de macromélange** => performance de dégradation

Réacteurs à lit mobile

Hydrodynamique (abrasion, TSH): paramètre opératoire pour optimiser la phase de démarrage de réacteurs anaérobies

HYDRODYNAMIQUE ET MÉLANGE DANS LES BIORÉACTEURS



RENAUD ESCUDIÉ
LBE – INRA, NARBONNE

