

Journée Thermodynamique et Procédés Biologiques

Transferts en milieux complexes

J. Morchain

(Transfert Interface Mélange)



LABORATOIRE D'INGÉNIERIE
DES SYSTÈMES BIOLOGIQUES
ET DES PROCÉDÉS



Laboratoire d'Ingénierie des Systèmes Biologiques et des Procédés

DIRECTION: N D Lindley / P Monsan / P Guiraud

UMR INRA/INSA N°792

Microbiologie et Chaîne Alimentaire
Caractérisation et Elaboration des Produits
Issus de l'Agriculture

UMR CNRS/INSA N°5504

Institut Sciences de l'Ingénierie et des Systèmes
Institut Sciences Biologiques
Institut Ecologie et Environnement



Transferts en milieu complexe

Transfert gaz-liquide dans un fermenteur : fluide Non-newtonien, extrapolation aération

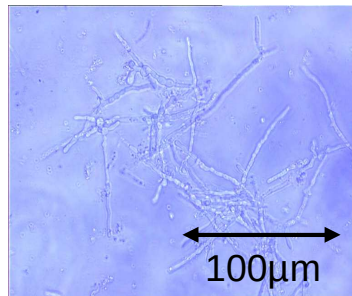
Thèse Jean-Christophe Gabelle, INSA-IFPEN

Transfert liquide-cellule: Assimilation du substrat dans un écoulement turbulent

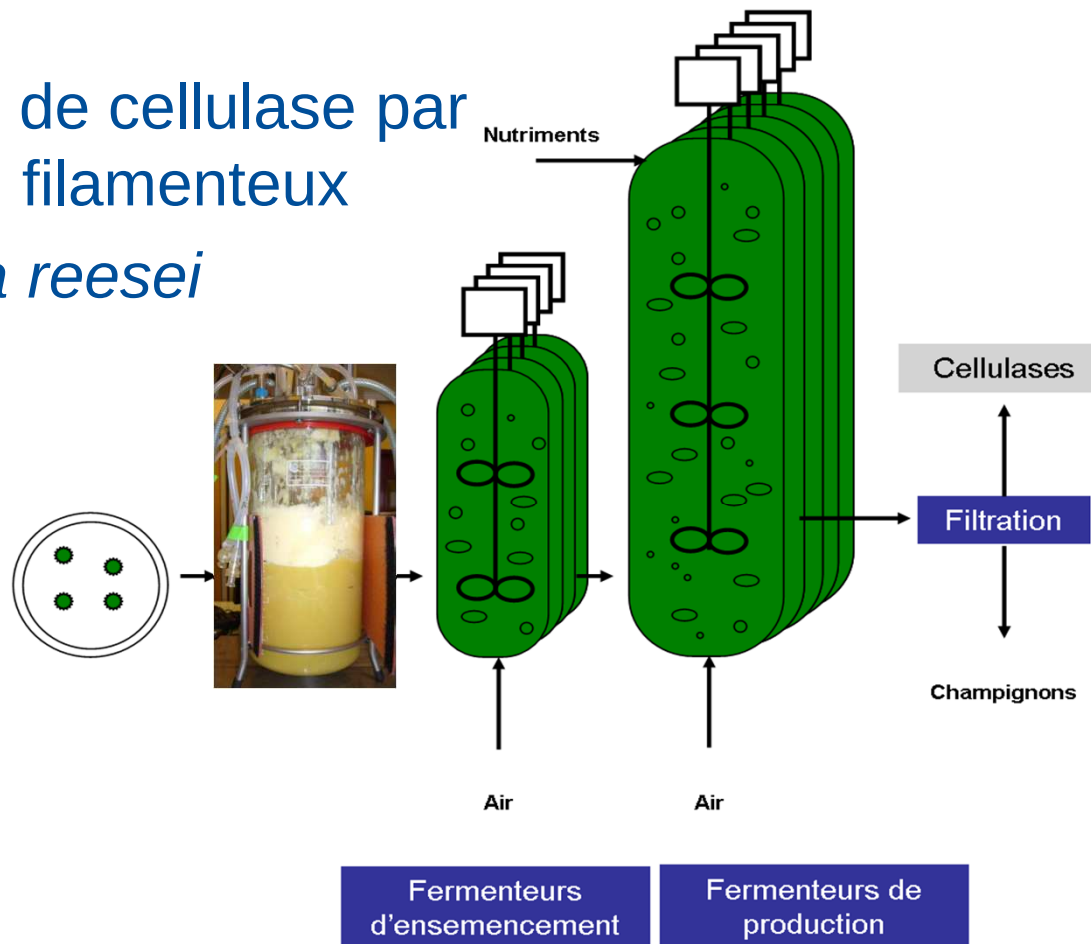
Thèse Marion Linkès, INSA-IMFT

- Production de cellulase par champignon filamenteux

Trichoderma reesei



T. reesei



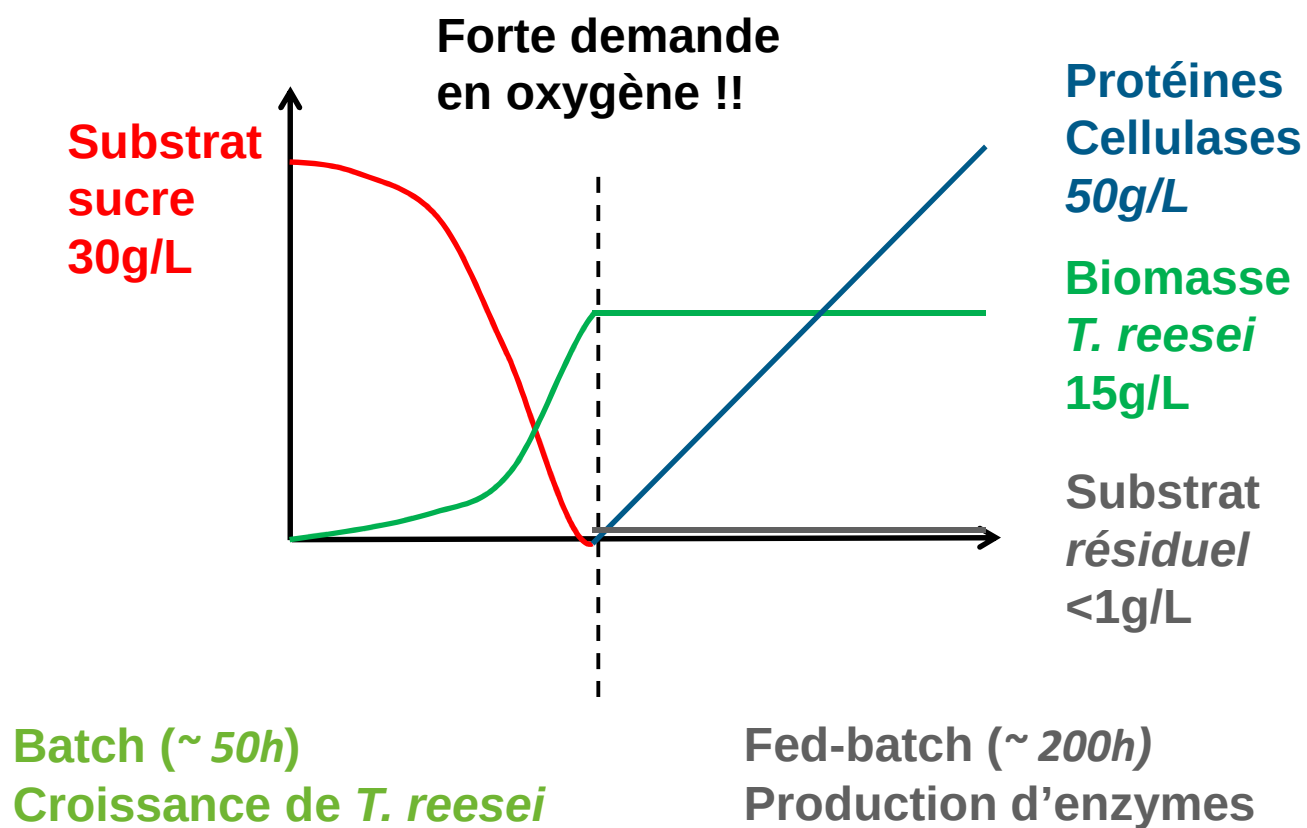
4000m³
de réacteurs



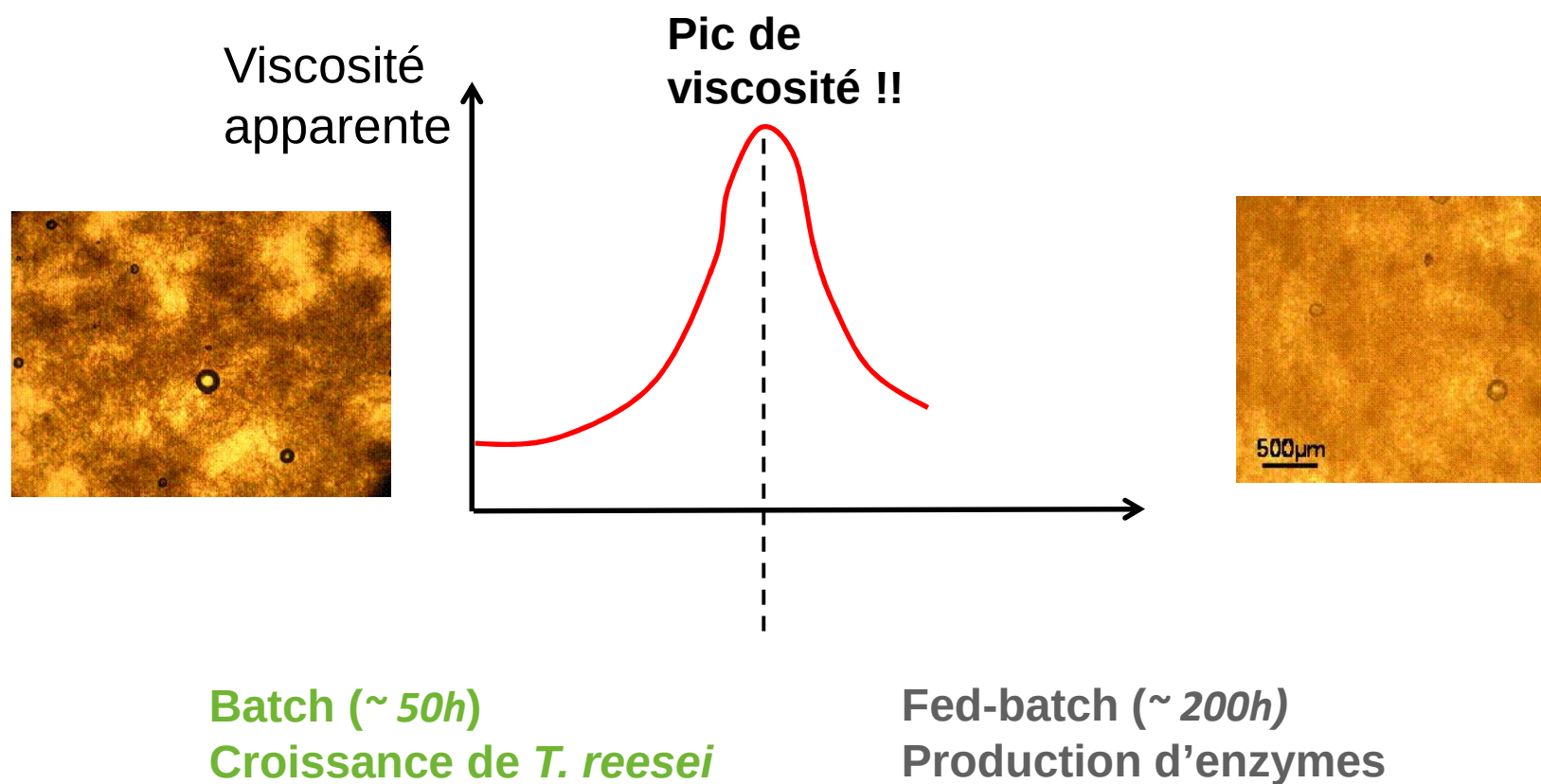
Source logen Corporation

Croissance *T. reesei* et production d'enzymes

Cf. thèse Etienne Jourdir



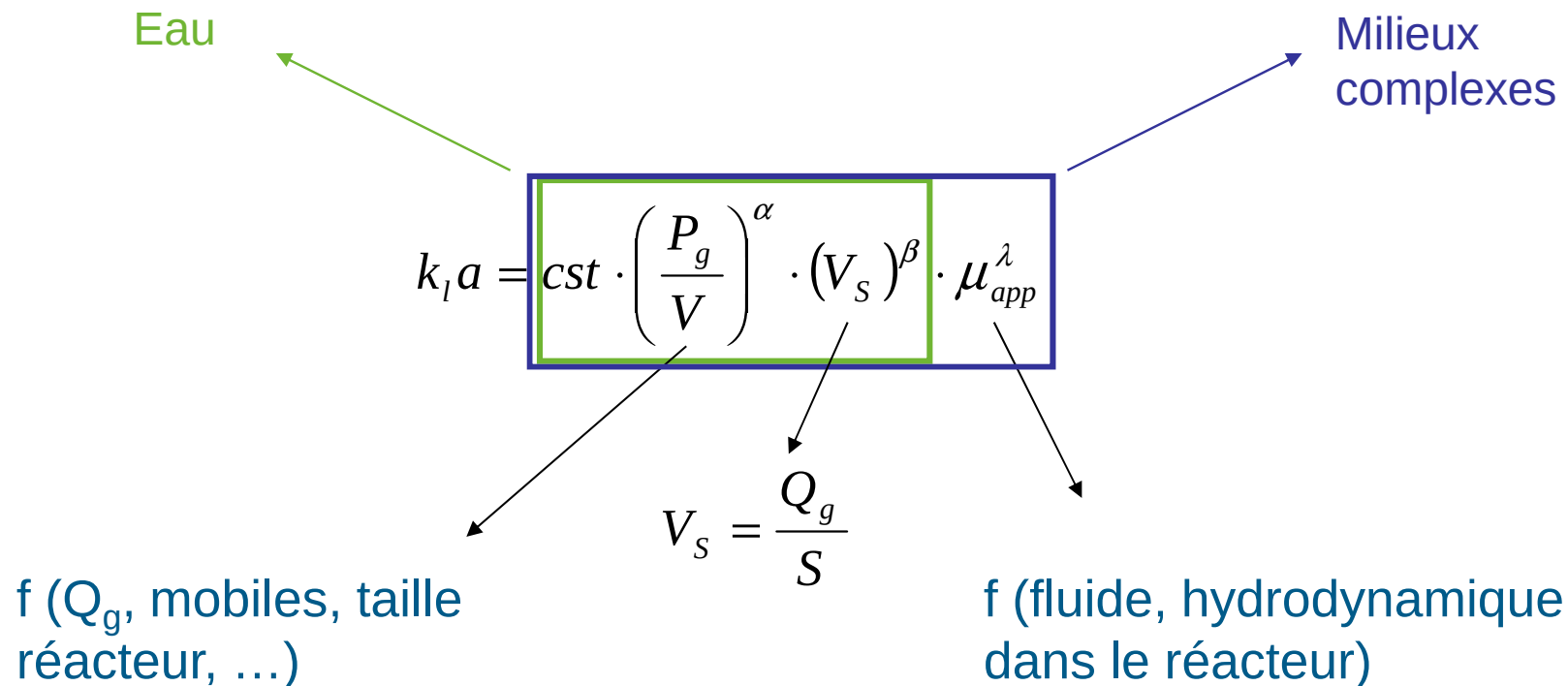
Croissance *T. reesei* et production d'enzymes



Transfert & Mélange Étude globale

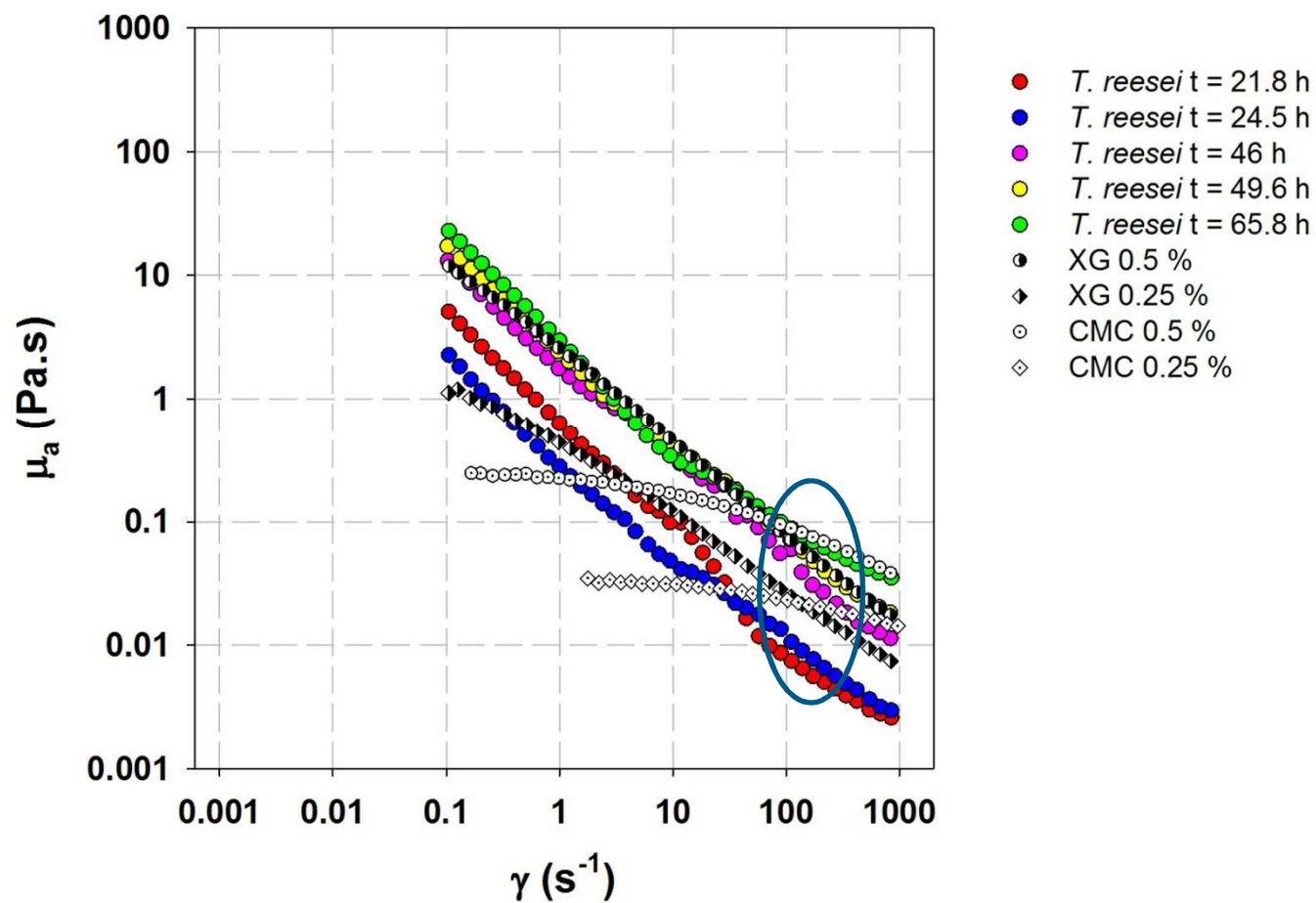


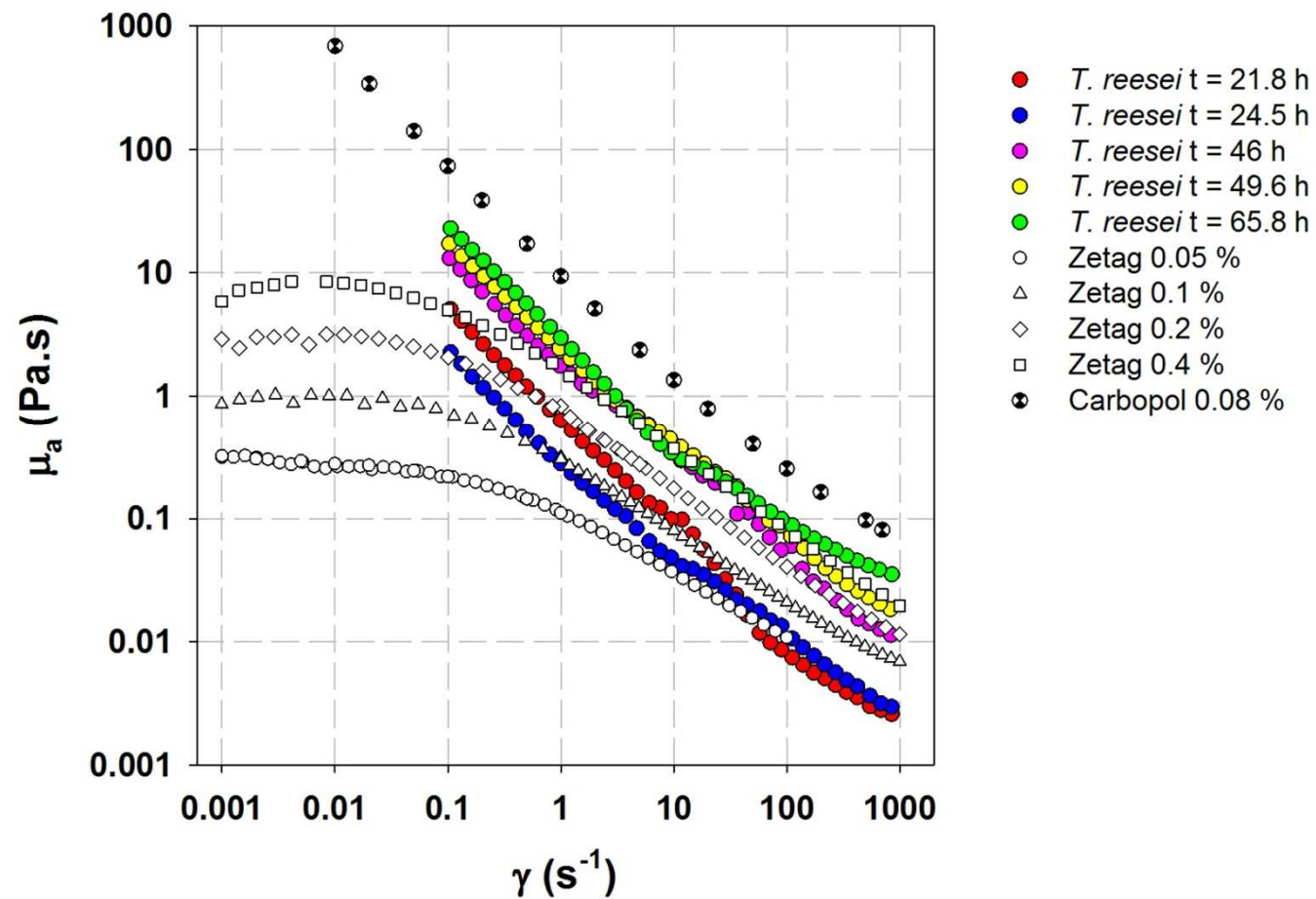
Transfert en milieux complexes



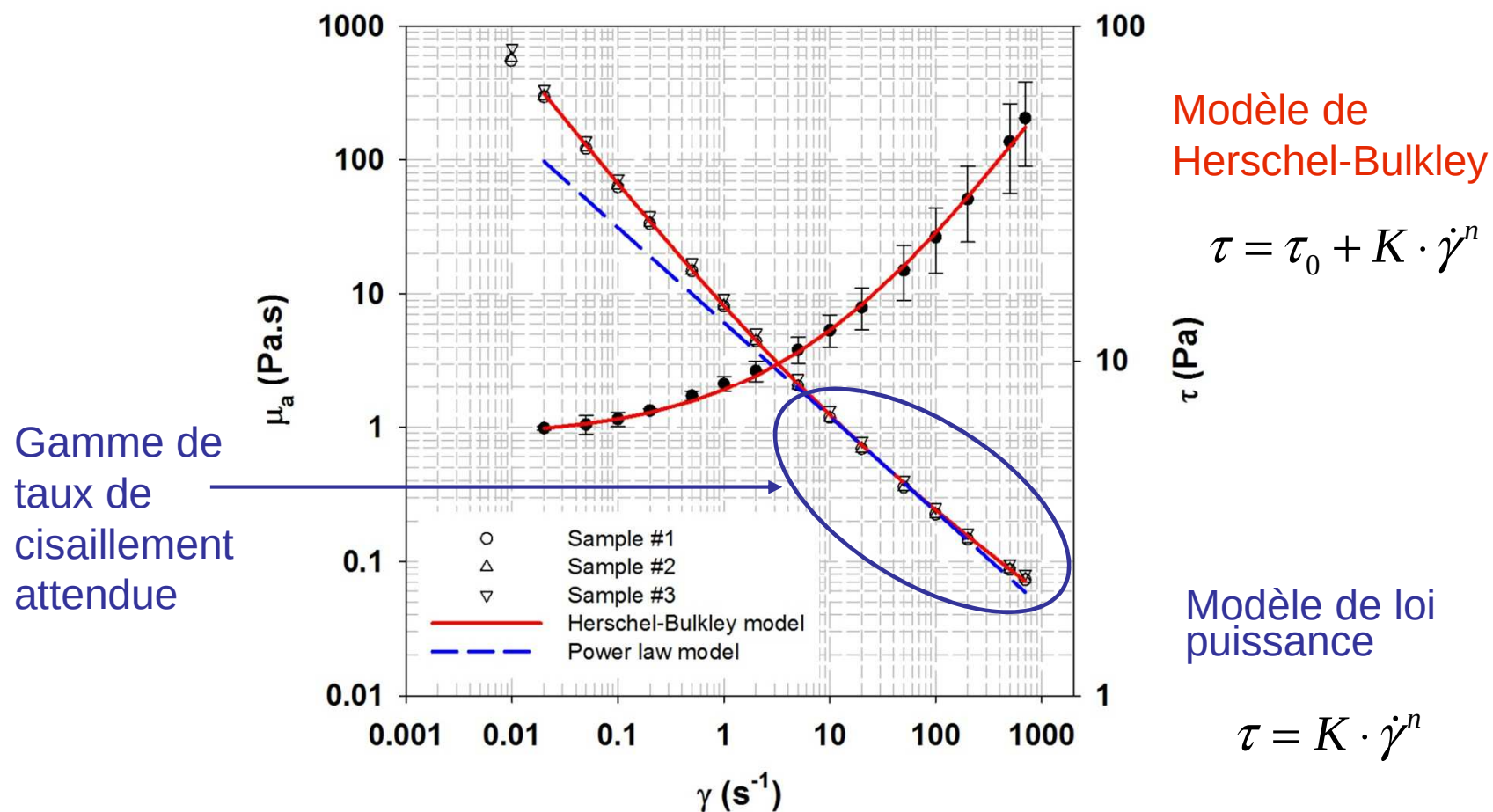
- Plusieurs milieux ? Plusieurs tailles ? Effet mobile ?
- Quel type de corrélation ?

- Effet de la rhéologie et du changement d'échelle sur :
 - Transfert de matière
 - Mélange
- Corrélations pour prédire les grandeurs clés du mélange et du transfert de matière G/L
 - Puissance dissipée
 - Temps de mélange
 - $k_L a$ et rétention gazeuse





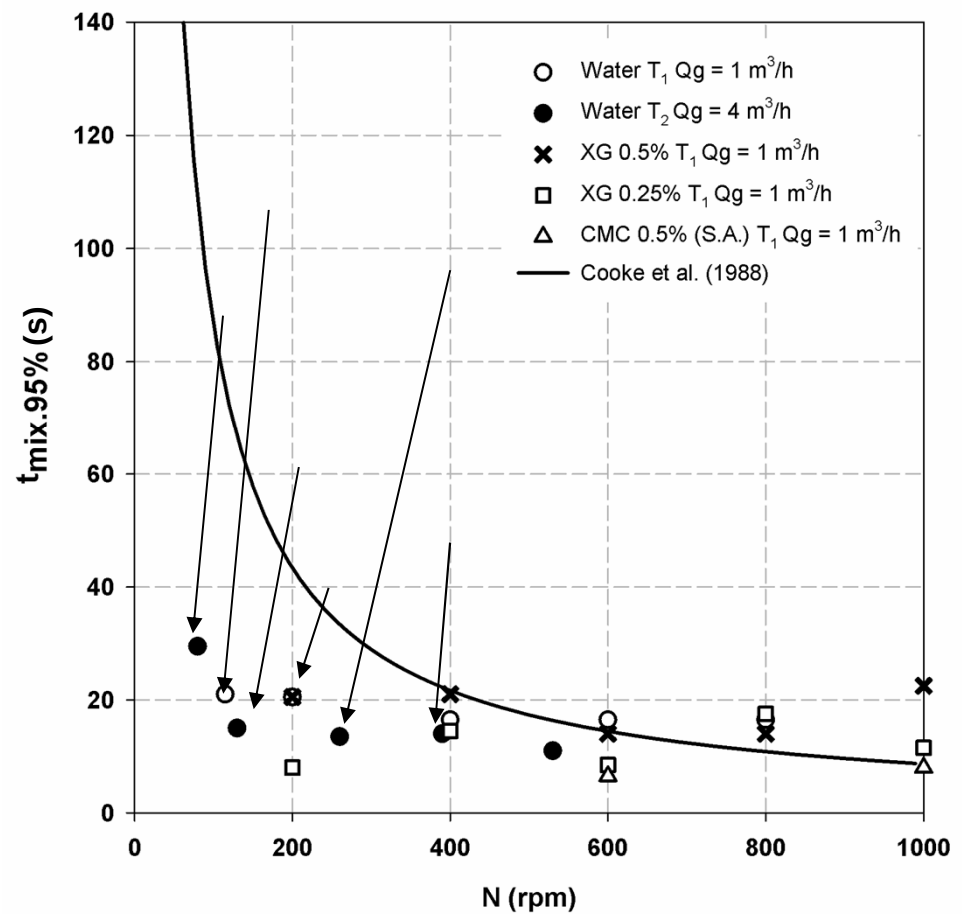
Modèles rhéologique : ex. du Carbopol



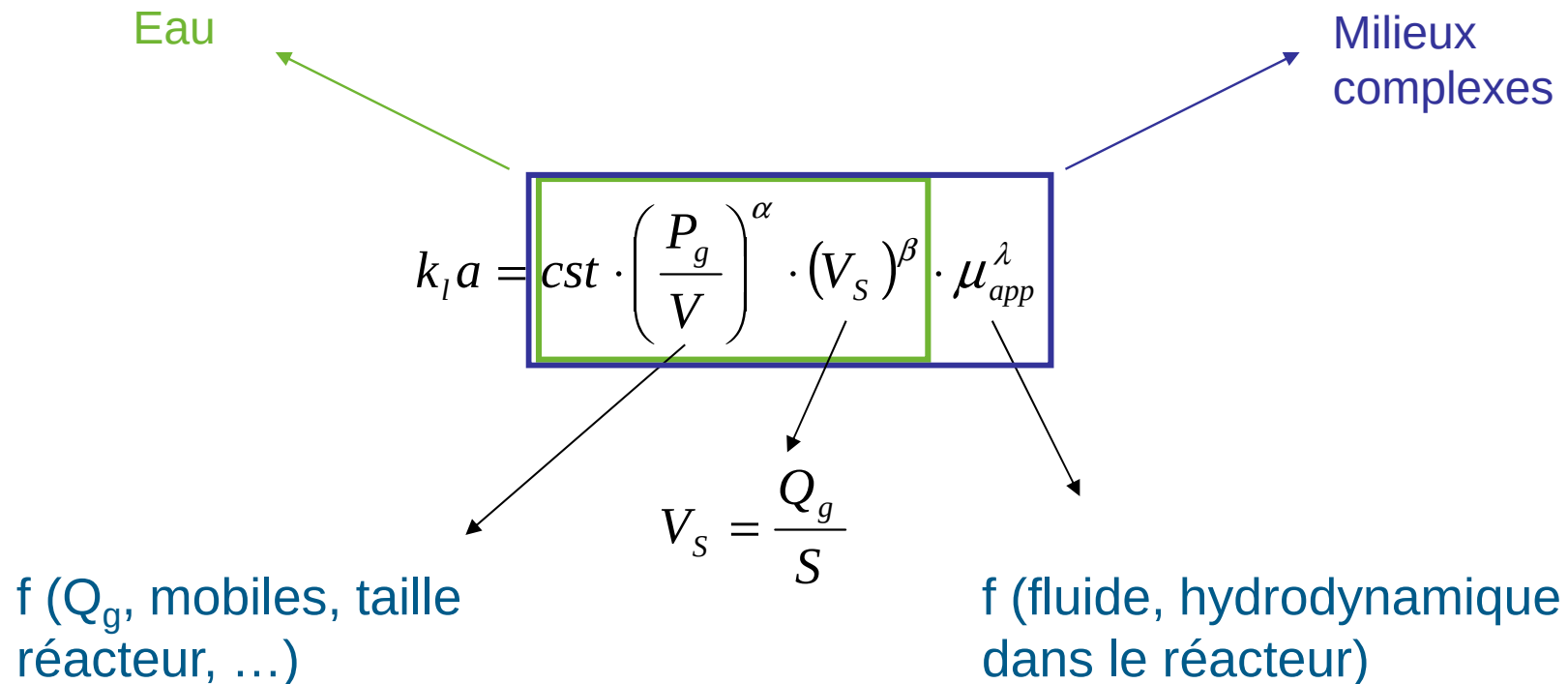
- Milieux modèles
 - XG, CMC, XG+fibres
- Maquettes 40 / 340 L
 - Puissance dissipée
 - Temps de mélange (vidéo + analyse)
 - Transfert global, $k_L a$
 - Rétention, ε_G
 - Types de mobiles



- Sans aération:
 - on retrouve les données de Cooke et al. (1987);
 - zones mortes à faibles vitesses (milieux visqueux).
- Avec aération:
 - à faible vitesse c'est le gaz qui mélange;
 - à forte vitesse le $t_{\text{mélange}}$ ↗



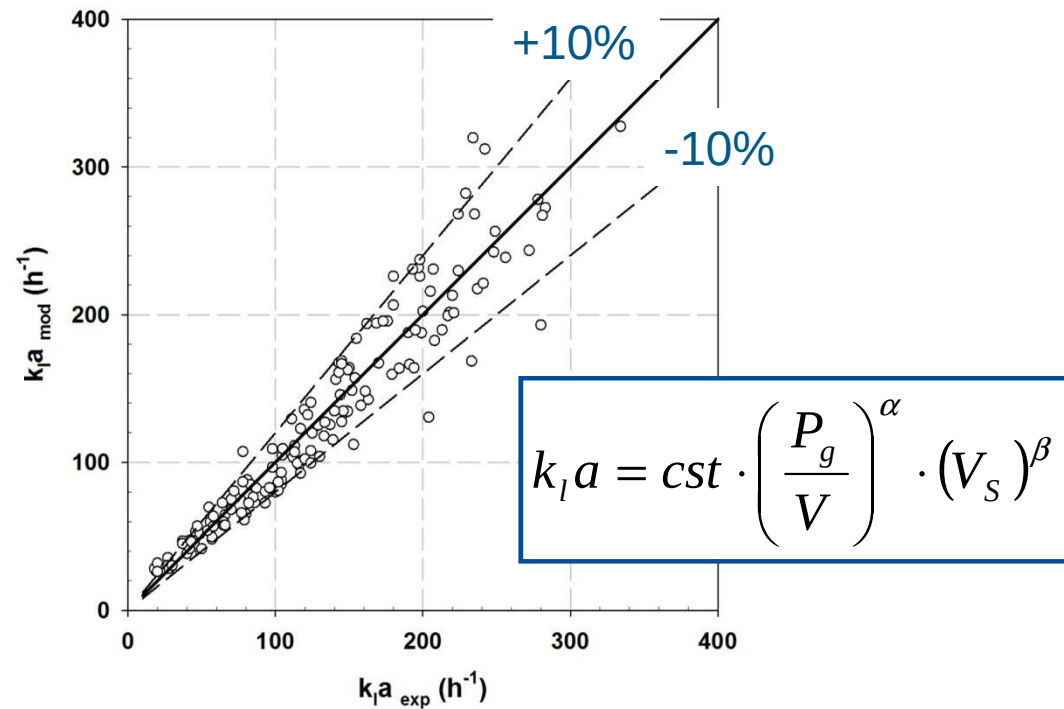
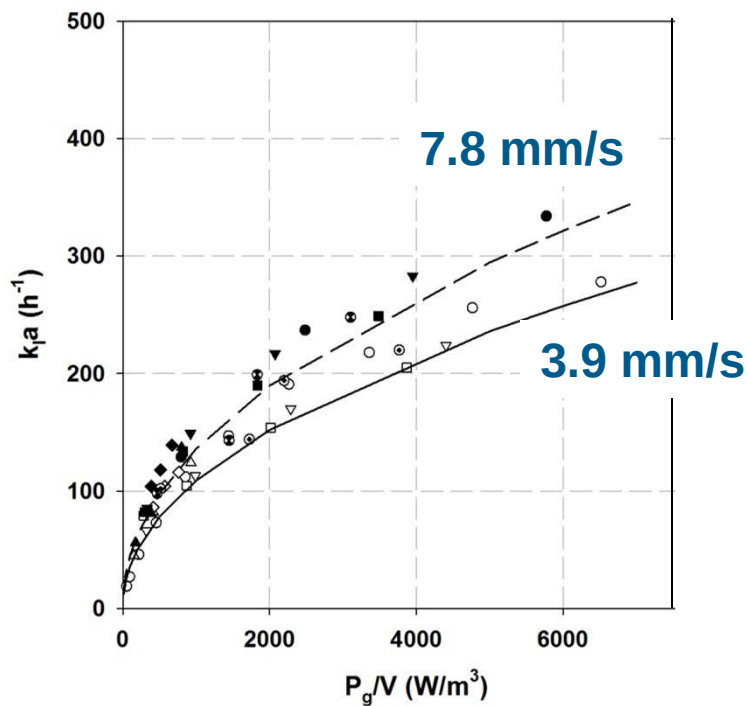
Transfert en milieux complexes



- Plusieurs milieux ? Plusieurs tailles ? Effet mobile ?
- Quel type de corrélation ?

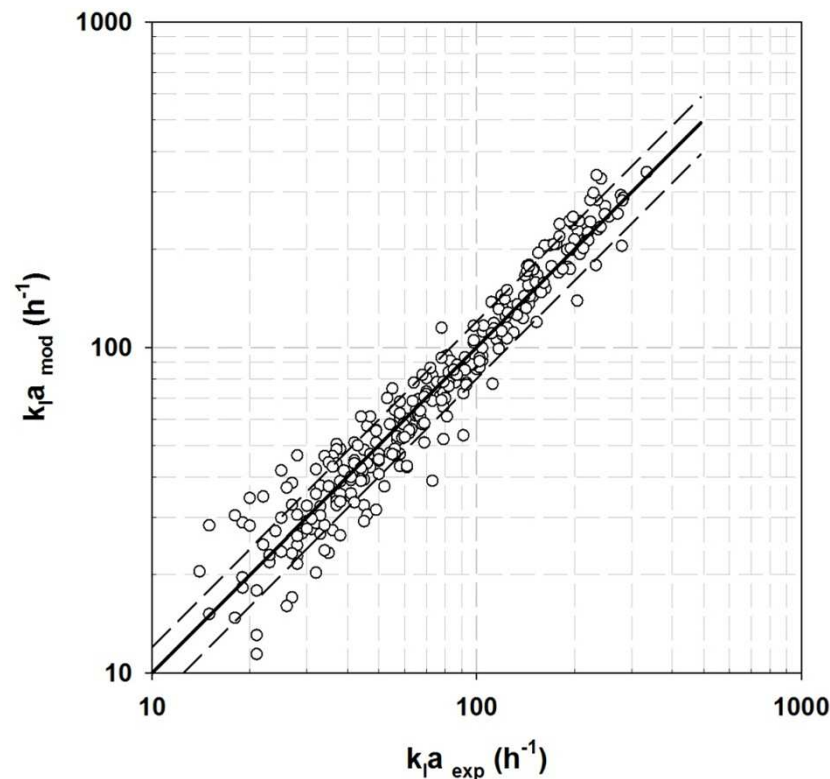
Mesure du k_La : validation en eau

- Corrélation sur ~ 300 points expérimentaux
- k_La est indépendant du type de mobile d'agitation
- $\alpha = 0,48$ et $\beta = 0,32$, Vs jusqu'à 63 mm/s et 6500 W/m³



Mesure du k_La en milieux complexes

- $K_La \downarrow$ quand $\mu \uparrow$
- Pas d'effet du mobile : k_La dépend de V_s et P/V



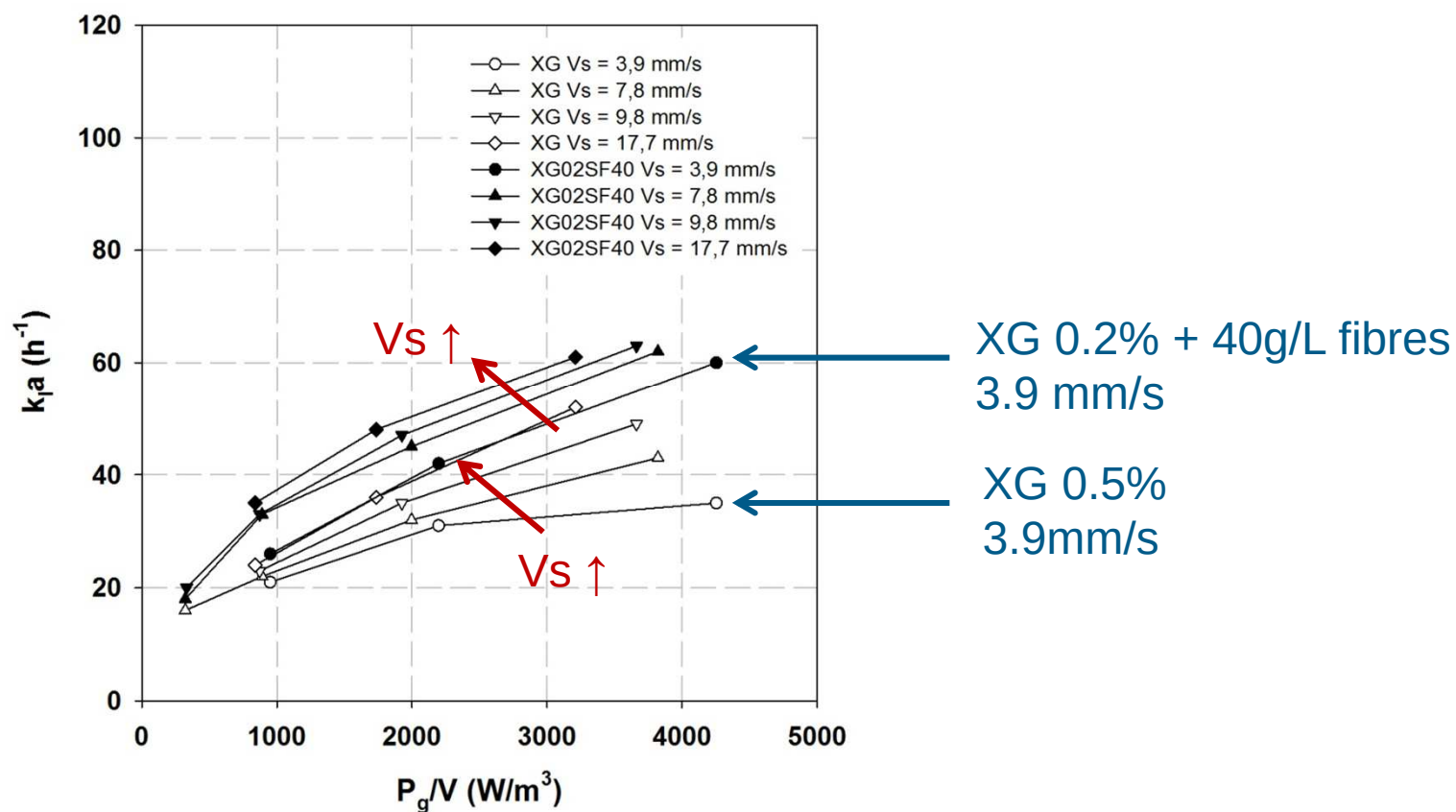
$$k_La = cst \cdot \left(\frac{P_g}{V} \right)^\alpha (V_s)^\beta \cdot (\mu_{app})^\lambda$$

$\lambda = -0,35$; 15% erreur

Accord avec la littérature

Mesure du kla en milieux hétérogènes

- A iso rhéologie $kla_{\text{homogène}} < kla_{\text{hétérogène}}$



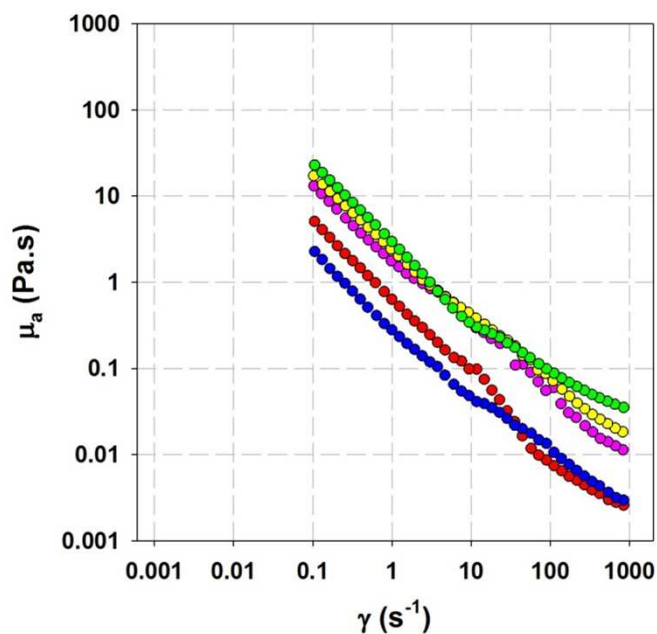
Conclusion sur l'analyse globale

- Temps de mélange
 - Les lois empiriques établies en monophasique + eau peuvent être utilisées.
- Puissance dissipée
 - La diminution de puissance en présence de gaz dépend du débit, de la taille du réacteur, du mobile.
 - ⇒ Corrélation P_g/P_0
- Transfert de matière g/l
 - ↓ kla en milieux complexes // eau;
 - ↓ kla en fonction de la taille du réacteur;
 - À même rhéologie $kla_{\text{homogène}} < kla_{\text{hétérogène}}$
 - ⇒ Corrélation $k_L a$ milieux complexes, plusieurs tailles



**Suivi d'une culture
de *T. reesei***

Modèle de prédiction des paramètres rhéologique



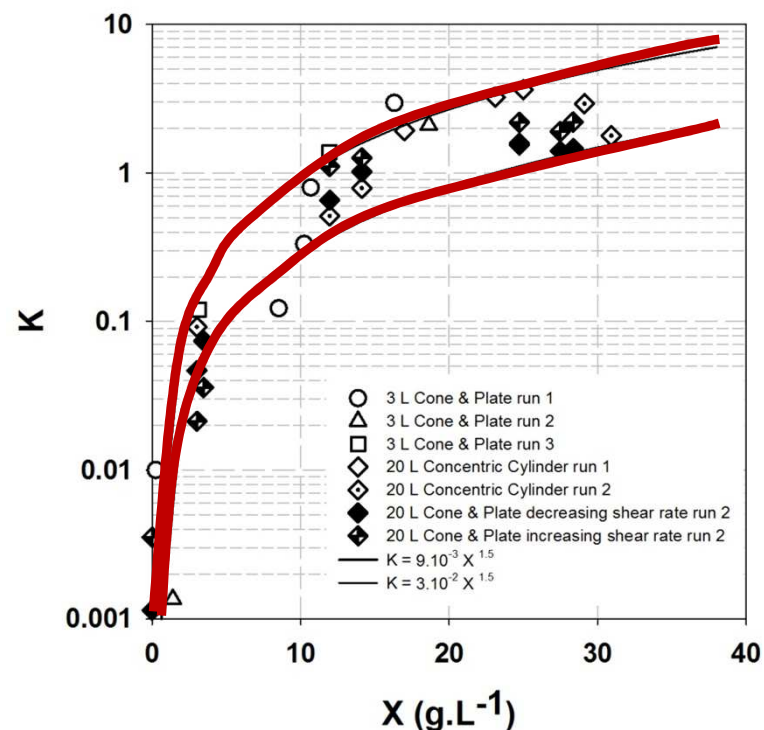
• *T. reesei* t = 21.8 h
 • *T. reesei* t = 24.5 h
 • *T. reesei* t = 46 h
 • *T. reesei* t = 49.6 h
 • *T. reesei* t = 65.8 h

+ autres données

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

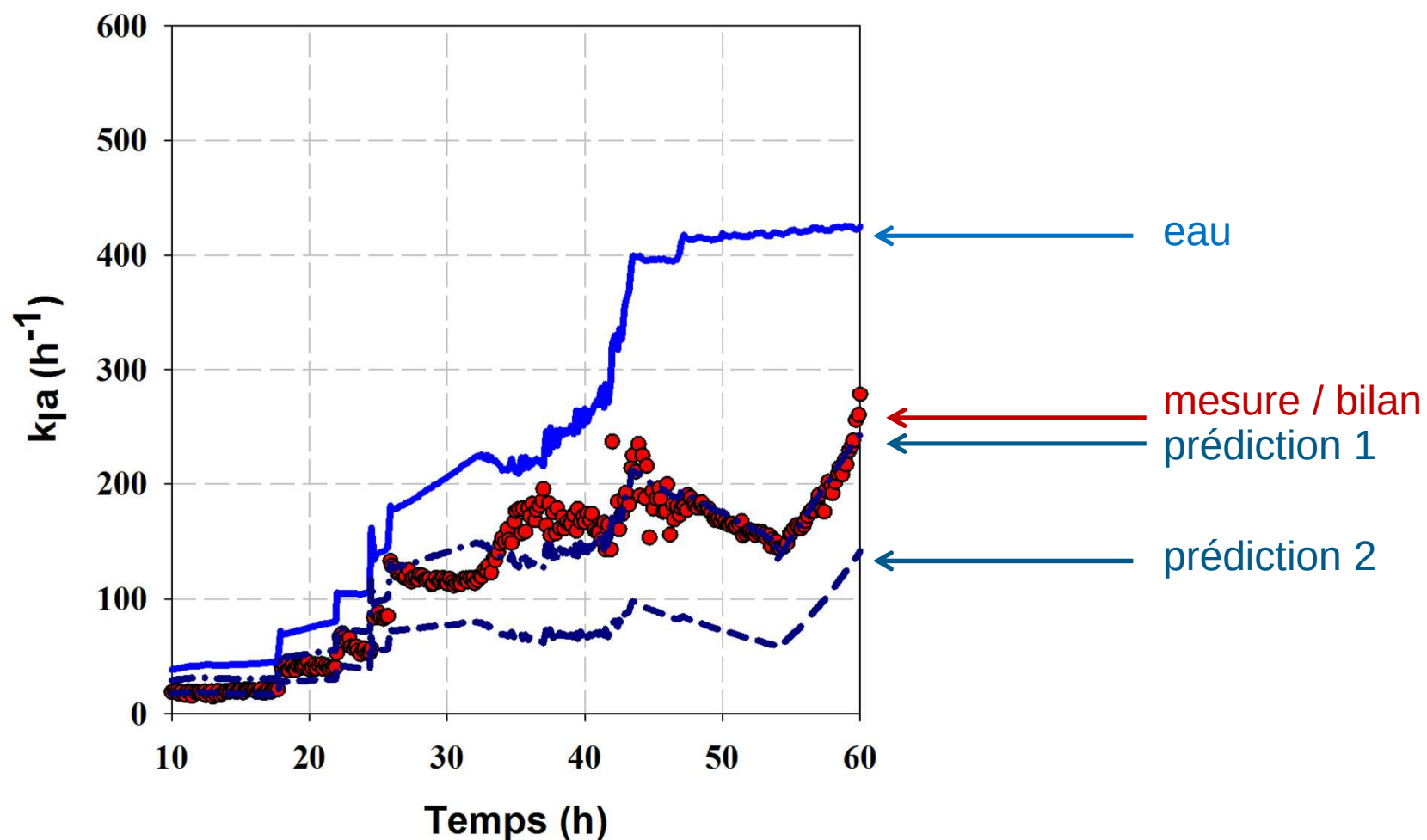
$$n = 0.4 \pm 0.1$$

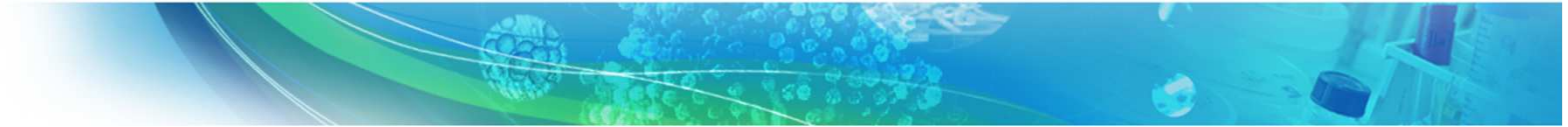
$$3.10^{-2} X^{1.5} < K < 9.10^{-3} X^{1.5}$$



Transfert g/l et prédiction en ligne

Fermenteur 20L, coll. E. Jourdi F. Ben Chaabane





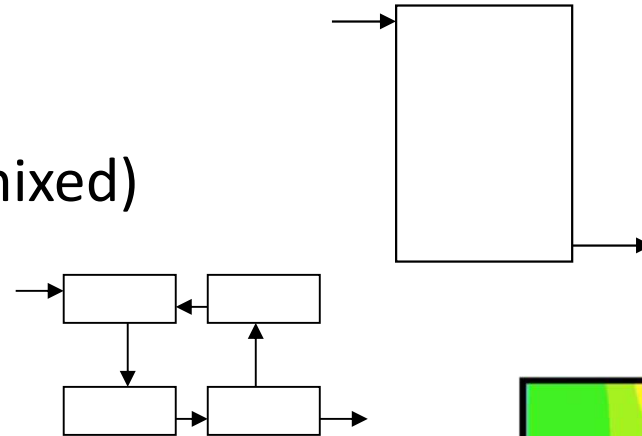
Transfert liquide-cellule: Assimilation du substrat dans un écoulement
turbulent
Thèse Marion Linkès, INSA-IMFT

Hydrodynamics Modelling

- Reactor Engineering

Ideal reactor^[9] (perfectly mixed)

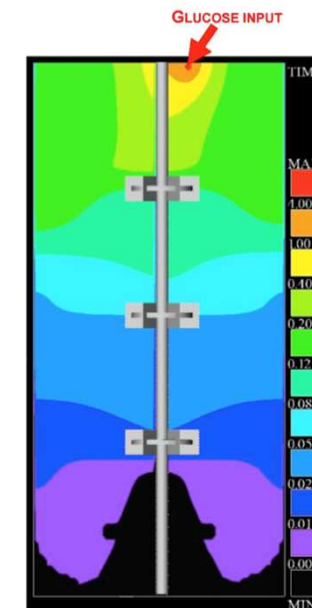
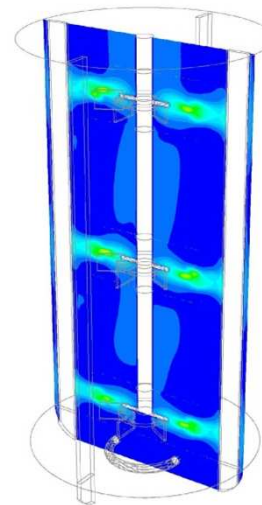
Compartment network^[10]



- Fluid Mechanics

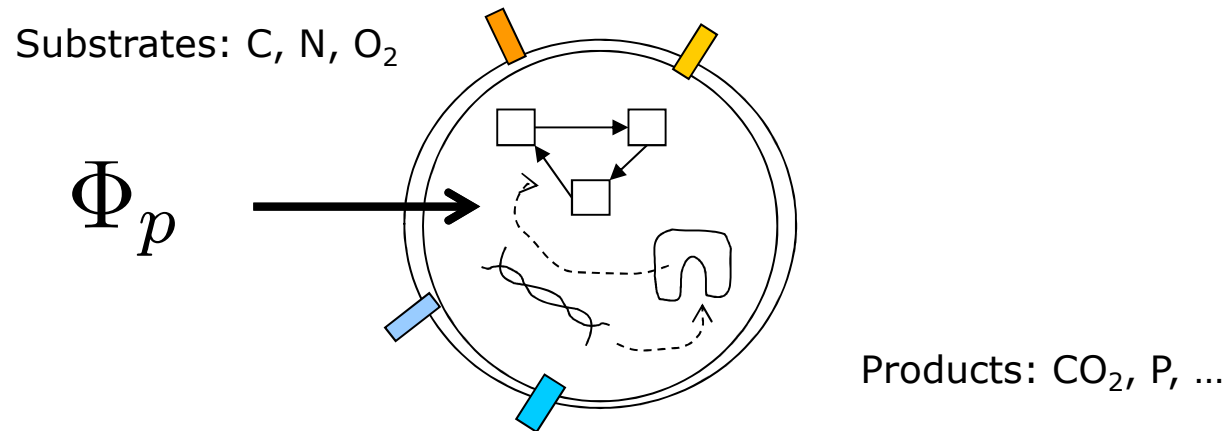
RANS^[11]

LES^[12]



[9] Villiermaux, 1995; [10] Delvigne et al., 2005; [11] Schmalzriedt et al., 2003; [12] Delafosse et al., 2008; [13] Lapin et al., 2006.

Bioreactions Modelling



Substrate
concentration S

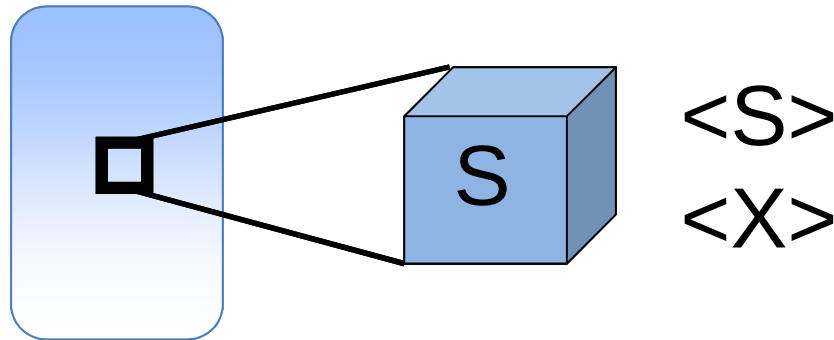
Microorganisms
concentration X

Determination of the specific uptake rate
assimilated by one microorganism: Φ_p

Coupling Hydrodynamics & Bioreaction

via substrate consumption

$$\frac{\partial S}{\partial t} + \mathbf{u} \nabla S - \mathcal{D}_{S,f} \Delta S = -\Phi(S)X$$



Monod^[14] equation

$$\Phi(S) = \Phi_{max} \frac{S}{k_S + S}$$

k_S the affinity constant for the substrate

Φ_{max} the maximum uptake rate

- Model obtained from a perfectly mixed reactor
- Macroscopic model applied at each scale

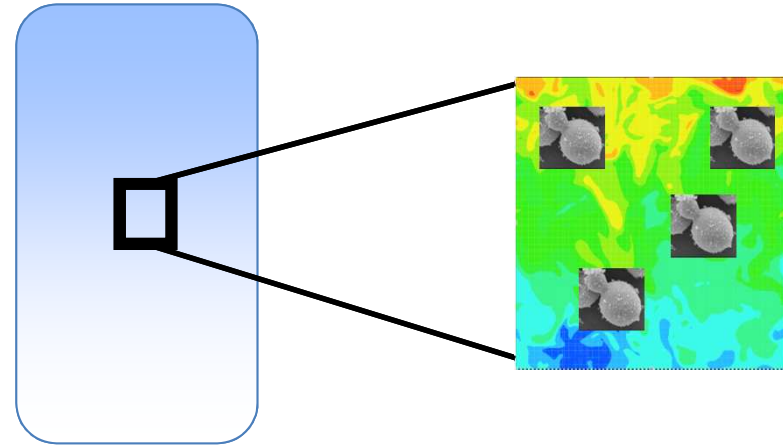
[14] Monod, 1949

Coupling Hydrodynamics & Bioreaction

Is it so simple?

- Usual approach:

$$\Phi(S) = \Phi(\langle S \rangle)$$

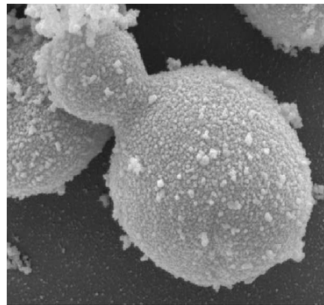


- Micro-mixing effect

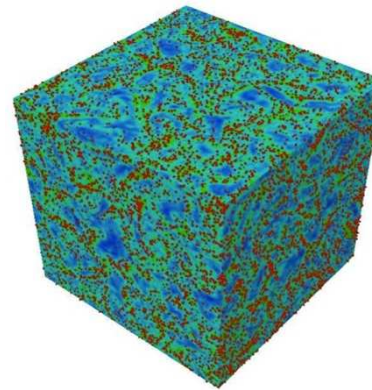
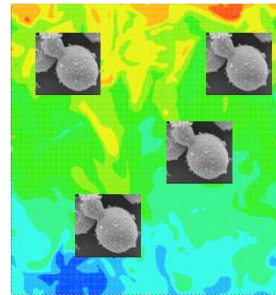
- Assimilation = individual events at the cell scale: $\Phi_p(S_p)$

- Resulting as a macroscopic term in the mesh cell
$$\Phi(S) = \sum_{p=1}^{N_p} \Phi_p(S_p)$$

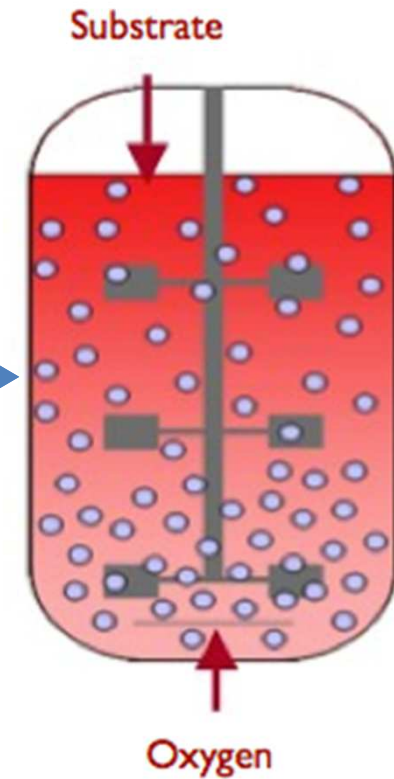
Methodology



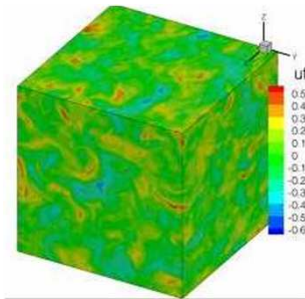
Transfer model
Monod



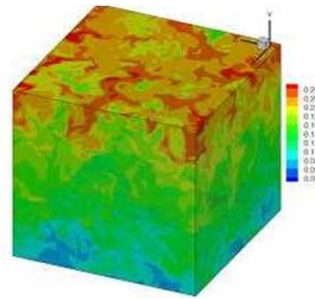
DNS + DPS
meso



Statistics



Velocity field



Substrate
concentration field

- Volume Averaged concentration (at the box scale)
- Fluctuating concentration s'

$$S = \langle S \rangle + s'$$

- S = Local instantaneous substrate concentration

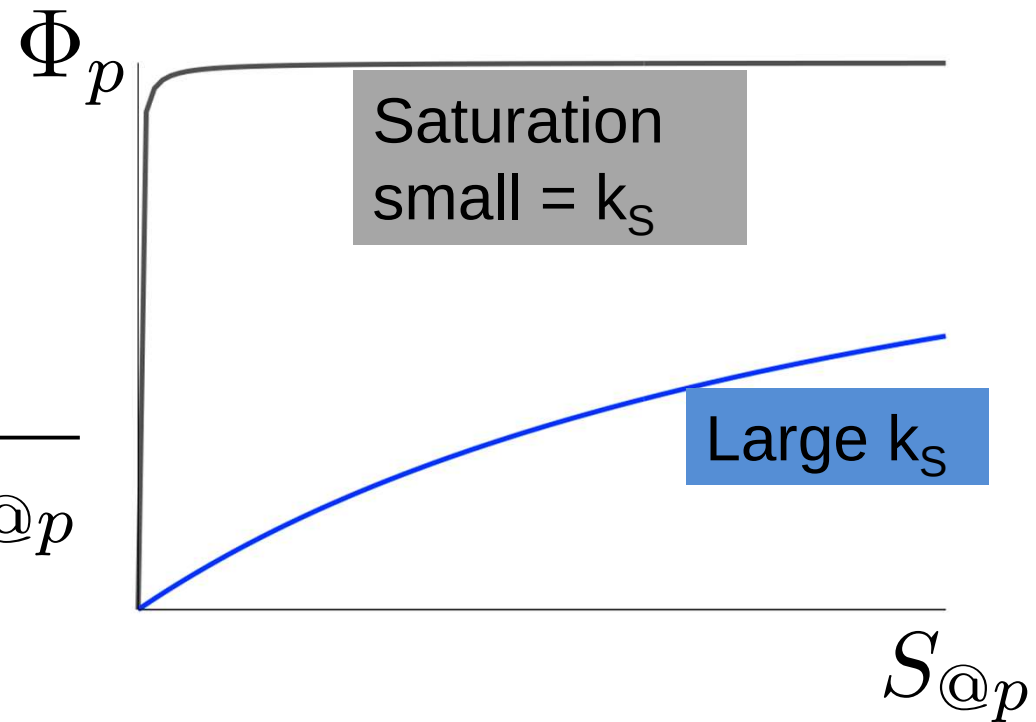
Local substrate concentration seen by microorganisms:

$$S_{@p} = \langle S \rangle + s'_{@p}$$

Substrate uptake rate modelling

- Uptake rate for one microorganism:

$$\Phi_p = \Phi_{max} \frac{S_{@p}}{k_S + S_{@p}}$$



Biological effect: k_S

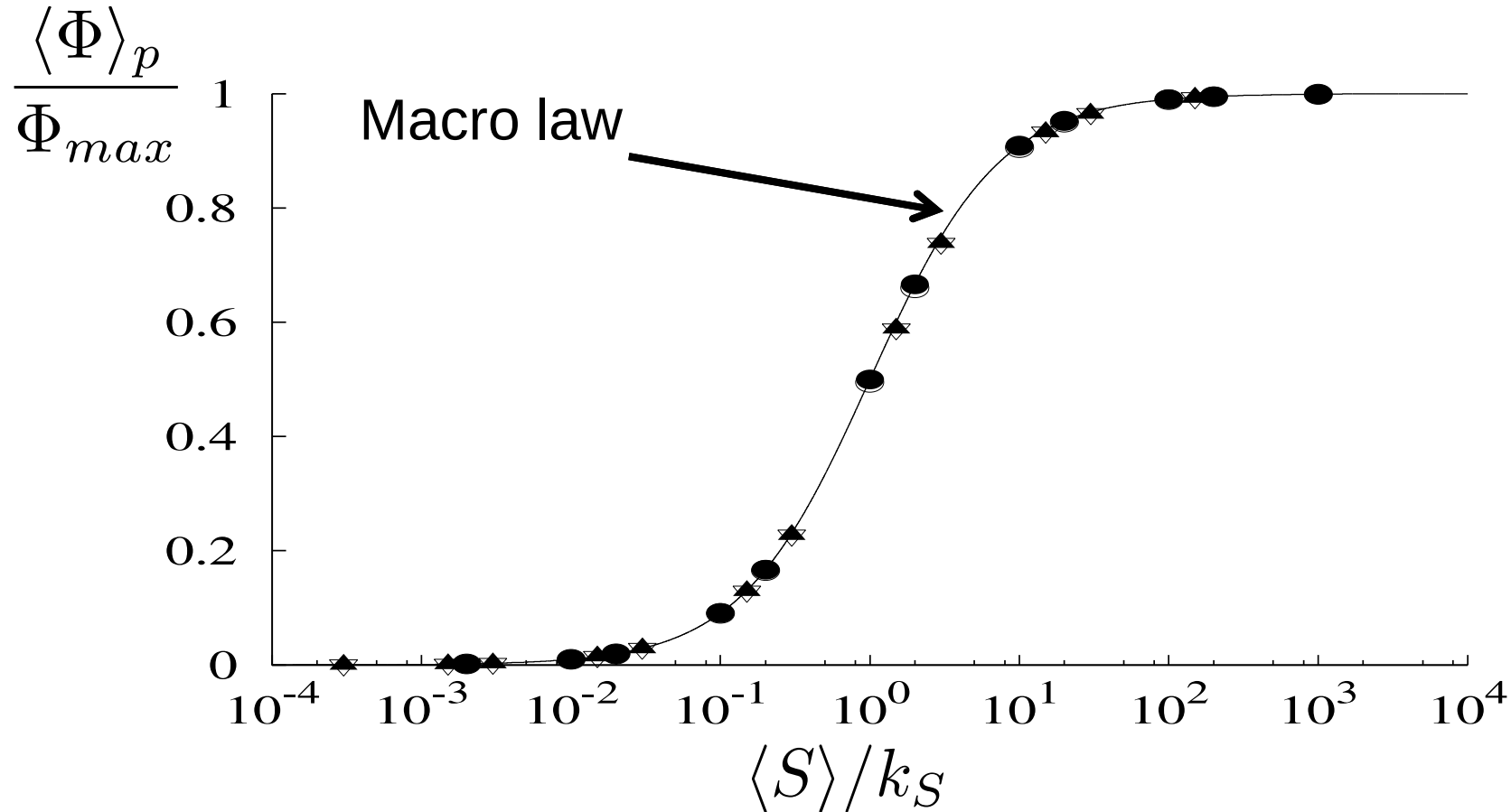
Hydrodynamics effect: $\langle S \rangle$, $\langle s'^2 \rangle$, ζ

Averaged uptake rate $\langle \Phi \rangle_p$

- Averaging over the population $\langle \cdot \rangle_p$
- With respect to the ratio $\langle S \rangle / k_S$
 - High affinity for the substrate: $\langle S \rangle / k_S \gg 1$
 - Low affinity for the substrate: $\langle S \rangle / k_S \ll 1$
- Comparison with the macroscopic law:

$$\Phi(\langle S \rangle) = \Phi_{max} \frac{\langle S \rangle}{k_S + \langle S \rangle}$$

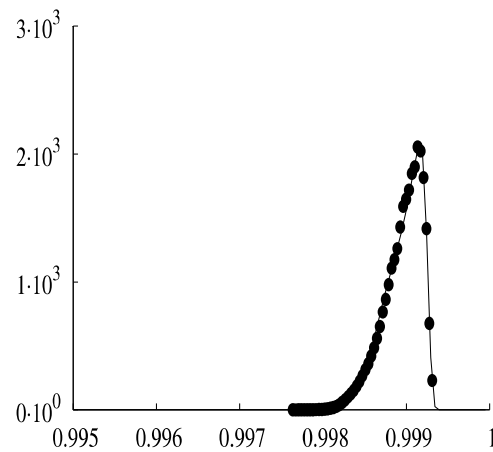
Averaged uptake rate $\langle \Phi \rangle_p / \Phi_{max}$



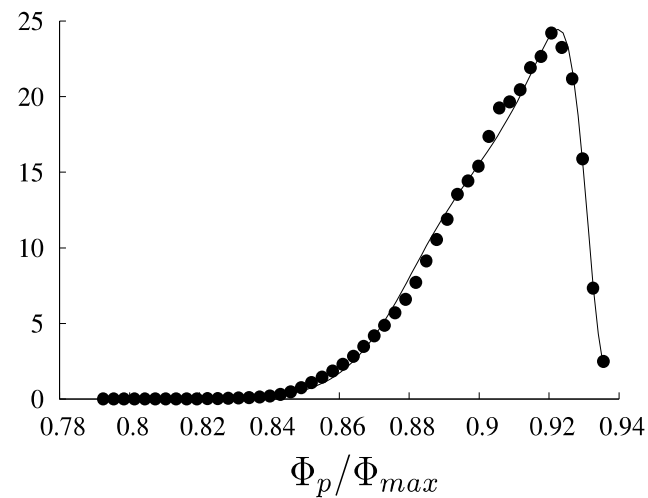
No effect of micromixing on assimilation rate?

Model assessment

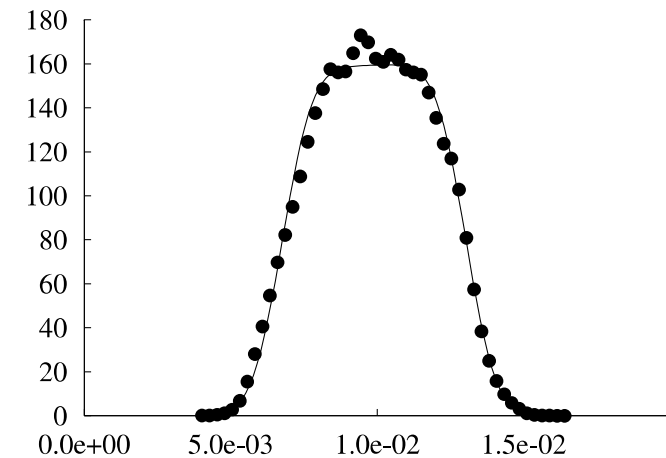
$$P(S) \rightarrow P(\Phi_p)$$



$$\langle S \rangle / k_S = 1000$$



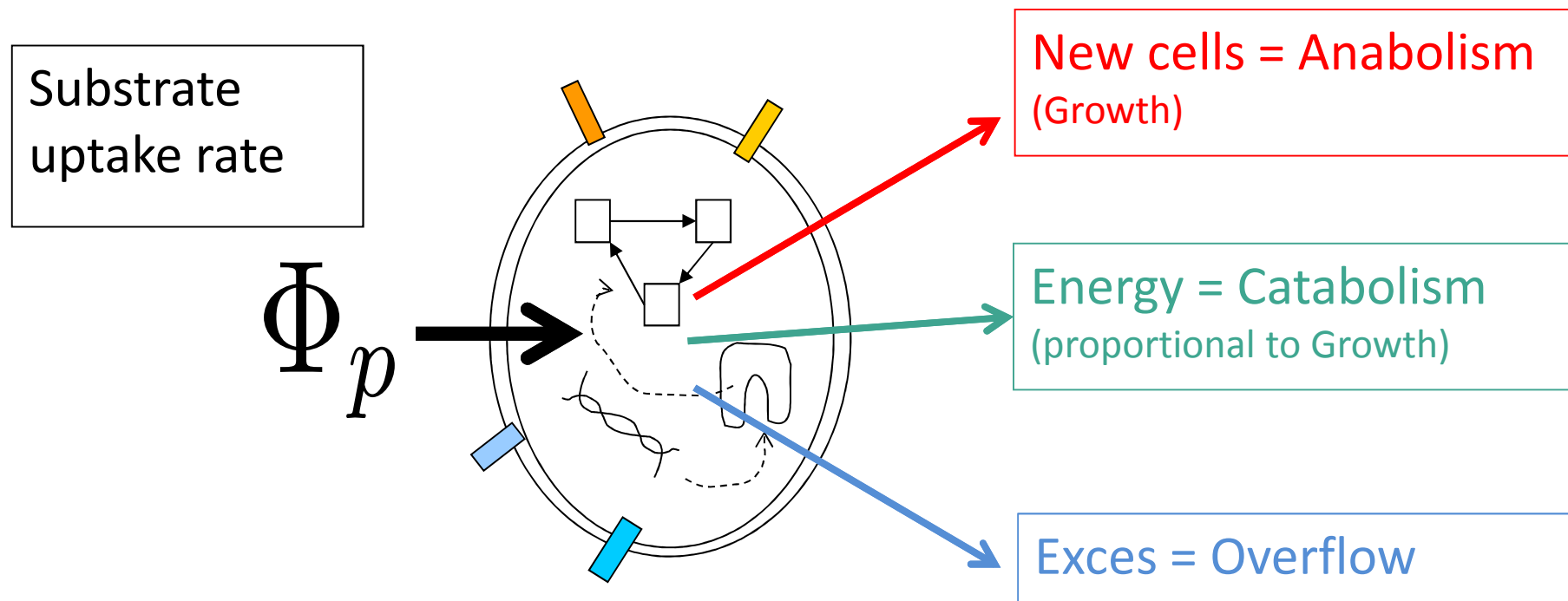
$$\langle S \rangle / k_S = 10$$



$$\langle S \rangle / k_S = 0.01$$

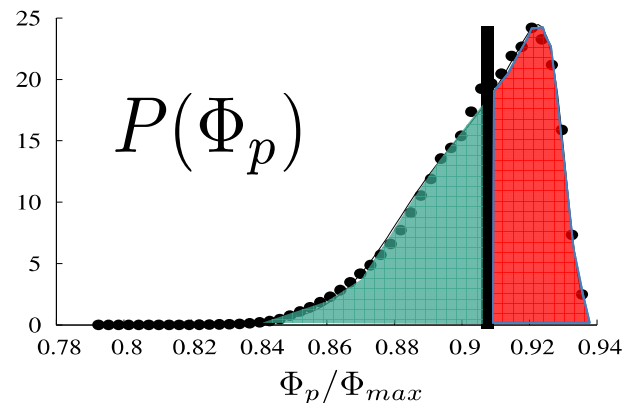
Effect of assimilation on bioreaction

- Metabolic model adapted from Xu et al., 1999



Effect of assimilation on bioreaction

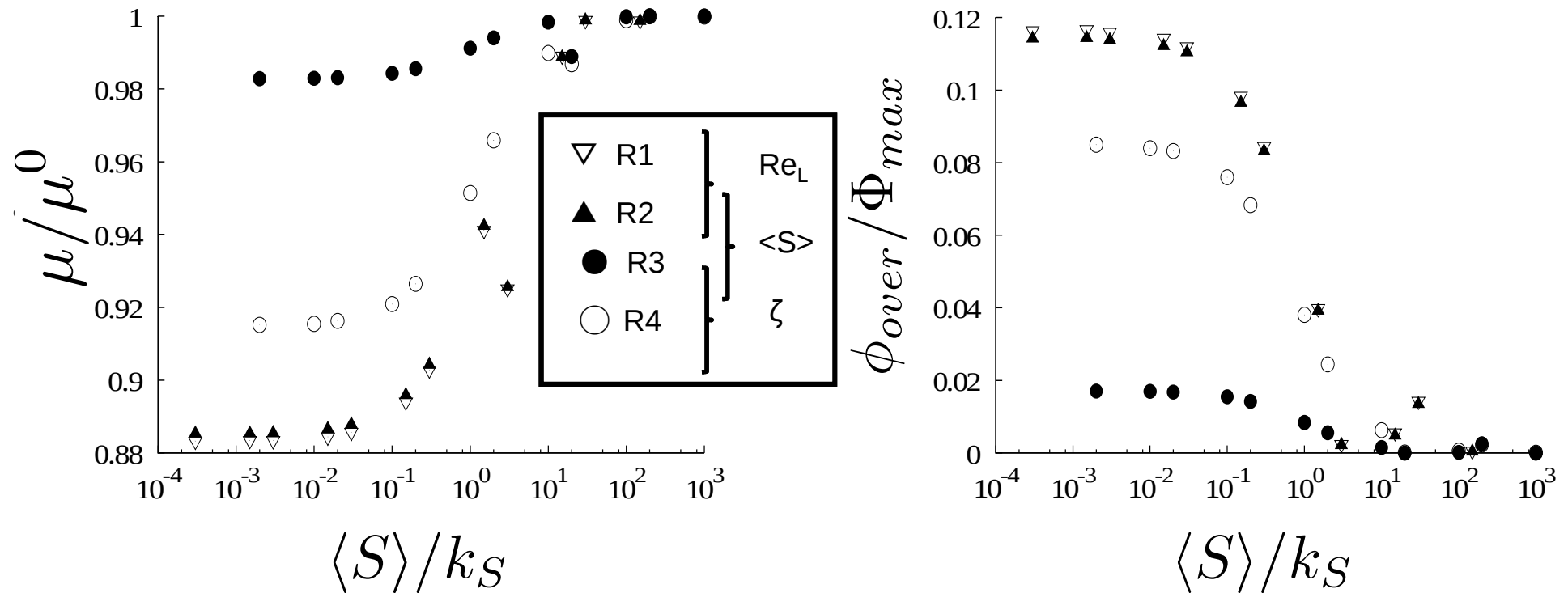
- Growth is a slow process: $\Phi_p = \Phi(\langle S \rangle)$
All cells at equilibrium with $\bar{S} = \langle S \rangle$ $\mu = \mu(\bar{S})$
- Balanced growth: $\mu = \mu^0$ $\phi_{over} = 0$
- Unbalanced growth: $P(S)$, $P(\Phi_p)$



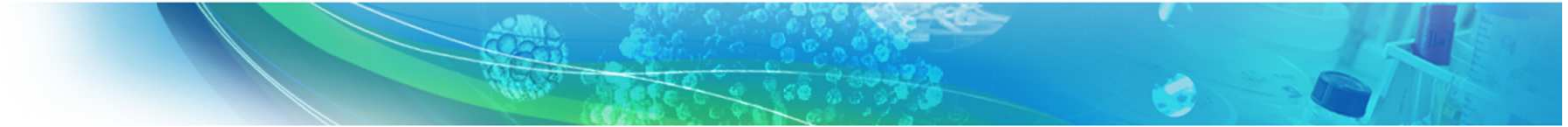
$\Phi_p < \Phi \langle S \rangle \rightarrow$ Limitation

$\Phi_p > \Phi \langle S \rangle \rightarrow$ Overflow

Biomass Growth & Overflow



Prediction of decreased biomass growth
Prediction of by-products formation



Merci de votre attention

Merci à
SFGP
GDR CNRS Ingénierie des Biosystèmes

Institut National des Sciences Appliquées
L'équipe Transfert Interface Mélange
Arnaud Cockx, assistant professor
Alain Liné, Philippe Schmitz, professor

Institut de Mécanique des Fluides
Pascal Fede, assistant professor
Olivier Simonin, professor

Dr Jean-Christophe Gabelle, INSA-IFP Energies Nouvelles

5.09.2012

Dr Marion Linkès, INSA-IMFT, PRES Université de Toulouse

6.12.2012



•Conférences internationales

- Gabelle et al. (2010), Mixing XXII June 20–25, 2010 Victoria, CANADA.
- Gabelle et al. (2012), Mixing XXIII June 17-22, Mayan Riviera, Mexico
- Gabelle et al. (2012), CHISA 20th August 25-29, Prague, Czech Republic
- Gabelle et al. (2012), Mixing 14, Sept 10-13, Warsaw, Poland

•Articles de revue

- Morchain et al. (2009) AIChE, vol 55, n°11, 2973-298 4
- Gabelle et al. (2011), CJChE, Vol. 89, I. 5, p1139–1153.
- Gabelle et al. (2012), Chemical Engineering Science, Vol. 75, p408-417.
- Linkès et al. (2012), Chemical Engineering Science, Vol. 81, p 8-19.
- Morchain et al. (2012) AIChE, in press.
- Gabelle et al. (2012), AIChE, in press.