



Mesure du Mélange Local et Global dans des Écoulements Complexes par une Méthode de Sonde Chimique

Thierry LEMENAND, Akram GHANEM,
Dominique DELLA VALLE, Hassan PEERHOSSAINI

LTN - Laboratoire de Thermocinétique de Nantes CNRS UMR 6607

Mesure du Mélange dans des Écoulements Complexes

- ↪ Méthode de Sonde Chimique
- ↪ Modèles de Micromélange
- ↪ Procédure Adaptative mise au point

- ↪ Caractérisation du Micromélange
- ↪ Caractérisation du Mélange Global

Introduction

Objet d'étude

Échangeur-Réacteur Multifonctionnel

Phénomènes physiques

Intensification des Transferts

de masse

de chaleur

Démarche scientifique

Méthodes Passives d'Intensification

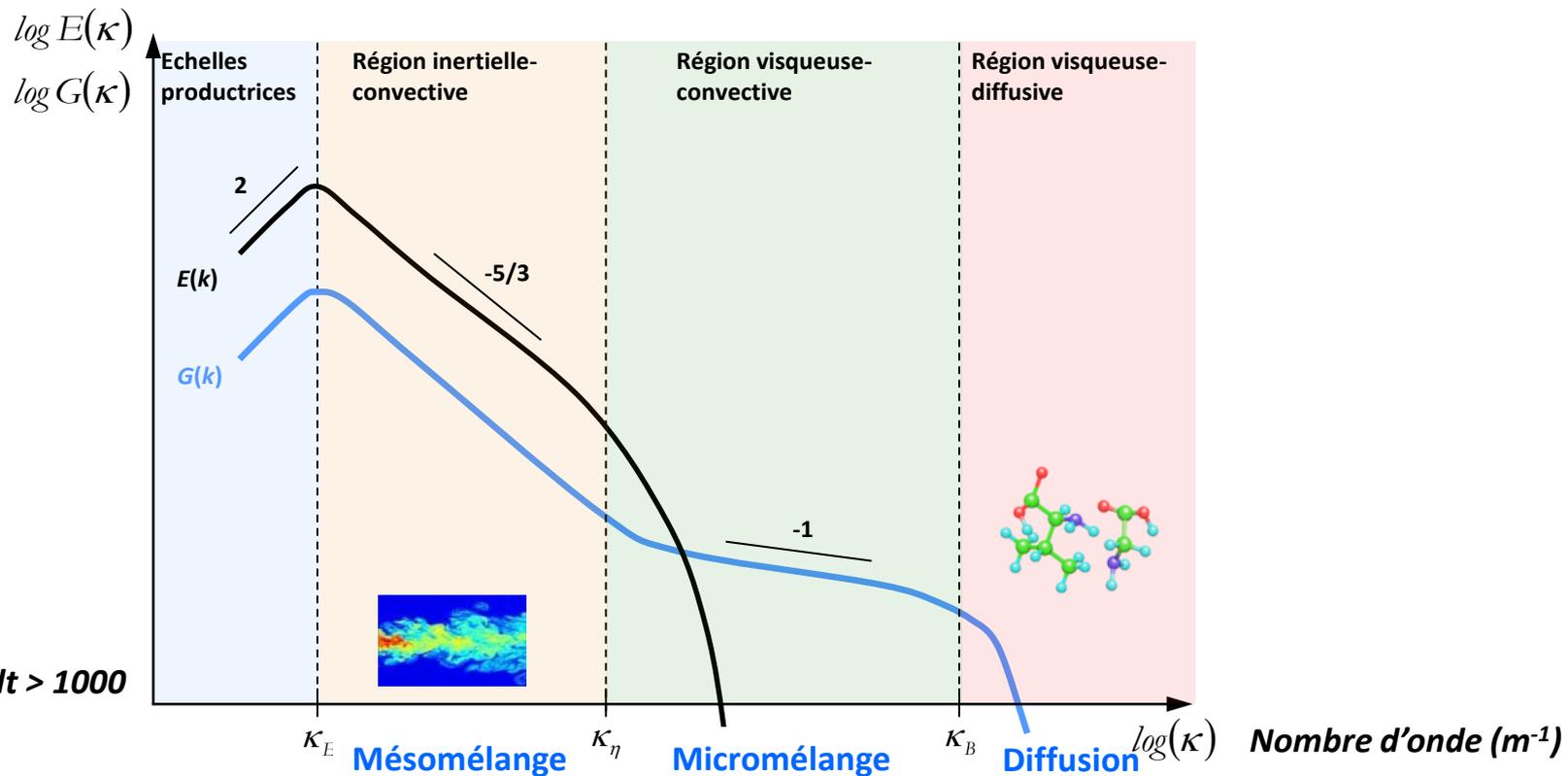
Écoulements Secondaires

Injectés dans l'écoulement
⇒ **générateurs de vorticité**

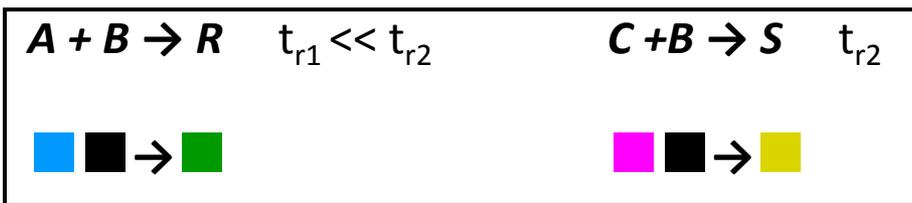
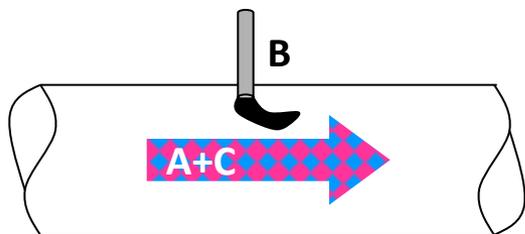
Internes   l'écoulement
⇒ **forme des parois**

Échelles de Mélange

- **Macromélange** : Advection par le champ moyen
- **Mésomélange** : Advection par les fluctuations de vitesse et les structures cohérentes de turbulence
- **Micromélange** : Jusqu'à l'échelle moléculaire, décisif pour la sélectivité des réactions chimiques

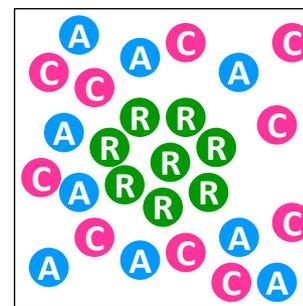
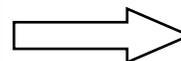
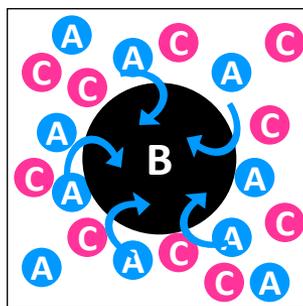
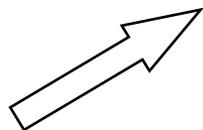
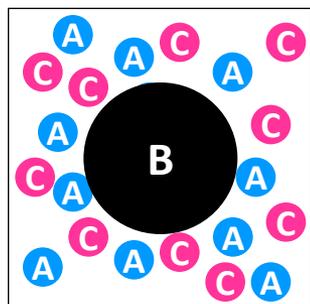


Méthode de la Sonde Chimique



Injection d'un réactif B dans un mélange A+C

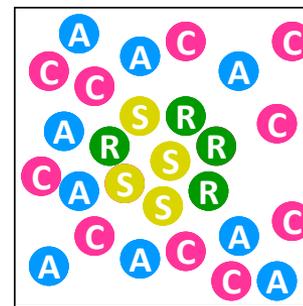
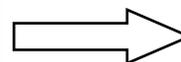
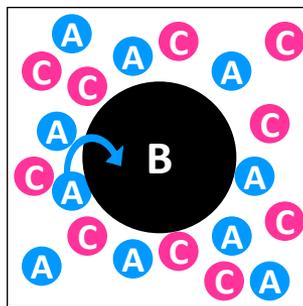
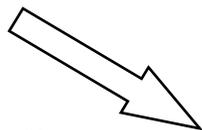
Micromélange rapide



$X_S = 0$

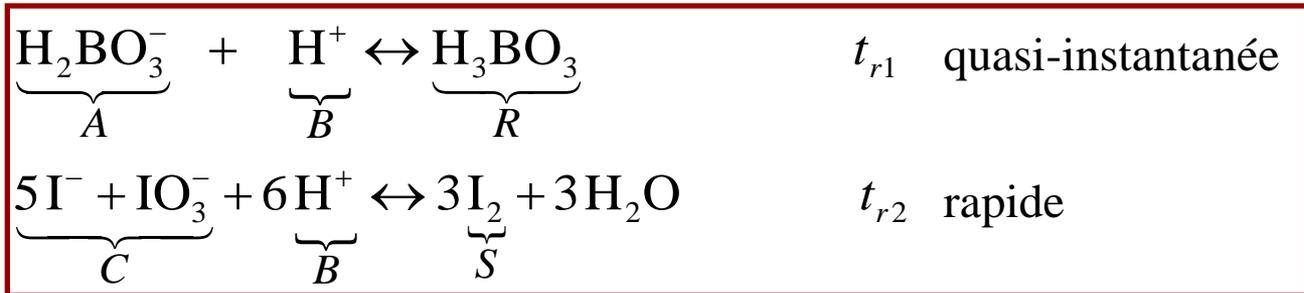
$$X_S = \frac{\text{Quantité de } B \text{ transformé en } S}{\text{Quantité initiale de } B}$$

Micromélange lent



X_S signature du micromélange

Système Iodure-Iodate - Indice de Ségrégation X_s



Fournier, Falk & Villermaux, CES (1996)
Guichardon & Falk, CES (2000)



$$X_s = 2 \frac{[\text{I}_2] + [\text{I}_3^-]}{[\text{H}^+]_0} \left(1 + \frac{Q_p}{Q_{\text{H}^+}} \right) \left(1 + \frac{[\text{H}_2\text{BO}_3^-]_0}{6[\text{IO}_3^-]_0} \right)$$

Loi de Beer - Lambert $\rightarrow [\text{I}_3^-] = \frac{A}{\xi l}$ → Mesure par spectrométrie

Bilan stœchiométrique $\rightarrow [\text{I}_2]^2 - \left(\frac{3}{5}[\text{I}^-]_0 - \frac{8}{5}[\text{I}_3^-] \right) [\text{I}_2] + \frac{3}{5} \frac{[\text{I}_3^-]}{K_B} = 0$

Modèles de Micromélange

Systeme
réactionnel

Spectrométrie

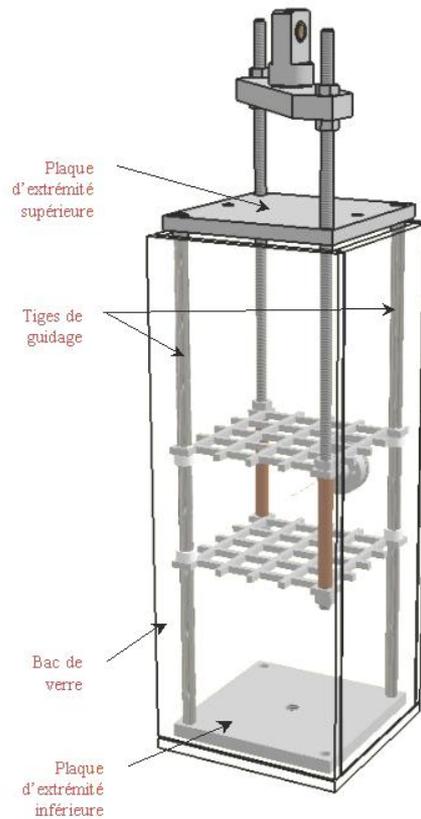
Relatif aux concentrations
Qualitatif

Indice de ségrégation
 X_s

Modèle

Absolu
Quantitatif ?

t_m
 ε



Turbulence de Grille

Modèles de Micromélange

Stochastiques

- **Modèle CD**

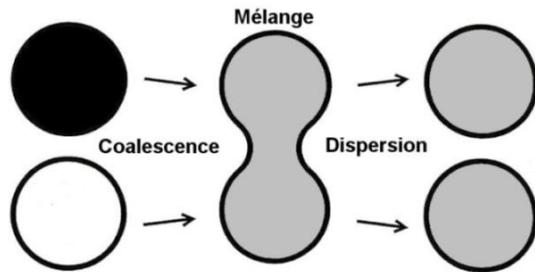
Coalescence-Dispersion

(Curl, 1963)

- **Modèle CDOP**

Coalescence-Dispersion Paires Ordonnées

(Norris & Pope, 1990)



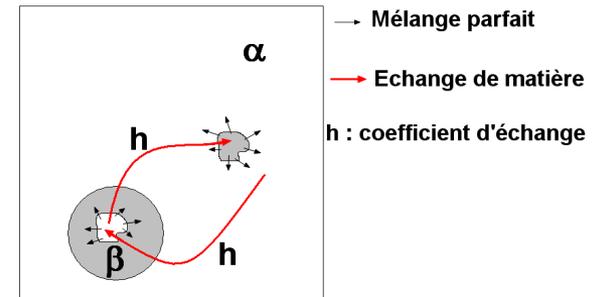
Discretisation en N_p particules

Déterministes

- **Modèle IEM**

Interaction par Échange avec la Moyenne

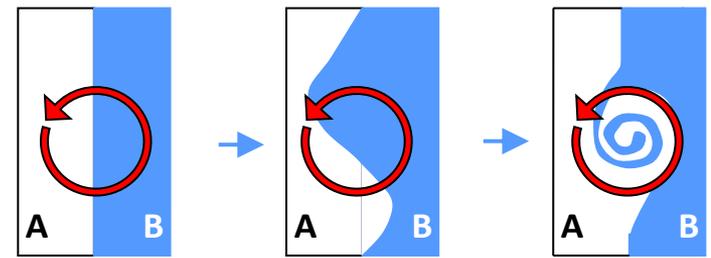
(Villermaux *et al.*, 1972)



- **Modèle EDD**

Engouffrement-Déformation-Diffusion

(Bałdyga & Bourne, 1989)



Engouffrement

Déformation

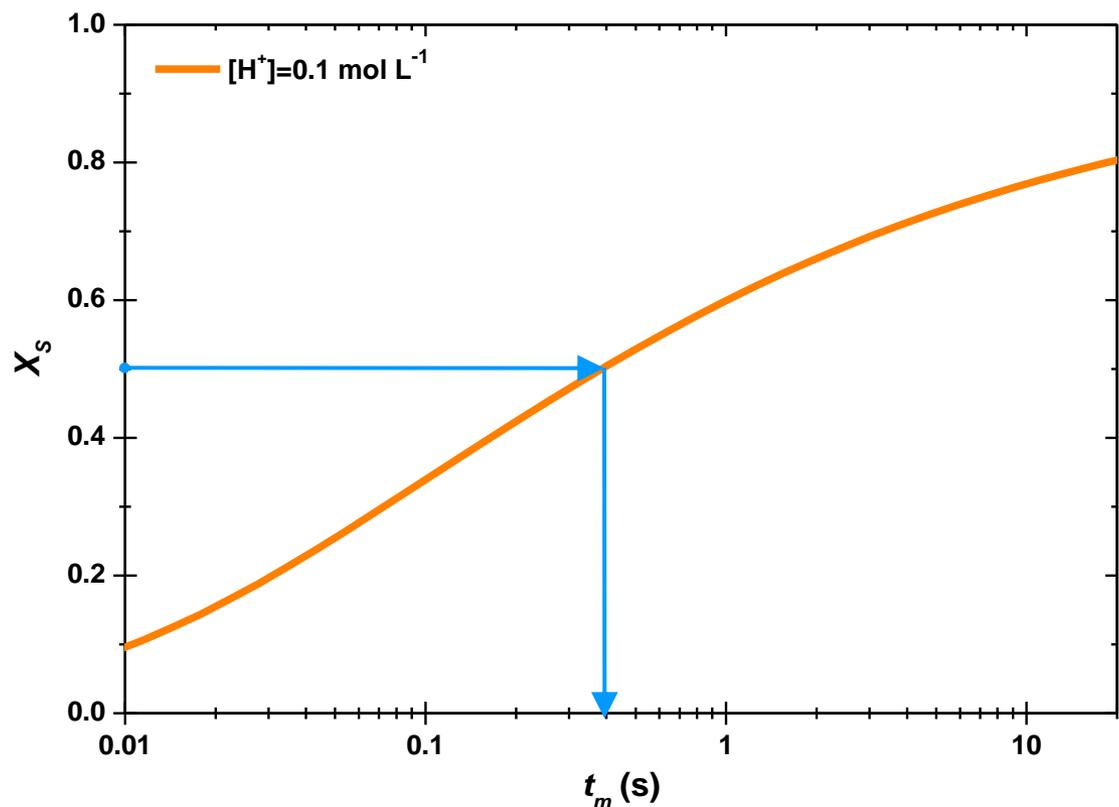
Durandal, Thèse LTN (2007)

Modèle d'Engouffrement : $X_s \rightarrow t_m$ temps de micromélange

$$\frac{dV}{dt} = EV_0 \quad \text{avec le taux d'engouffrement} \quad E = \frac{1}{t_m} = 0.058 \left(\frac{\varepsilon}{\nu} \right)^{\frac{1}{2}}$$

$$\frac{dc_i}{dt} = E(\langle c_i \rangle - c_i) + R_i \quad (9 \text{ équations non linéaires pour la méthode iodure - iodate})$$

Courbe d'étalonnage : $X_s = f(t_m)$



Données :

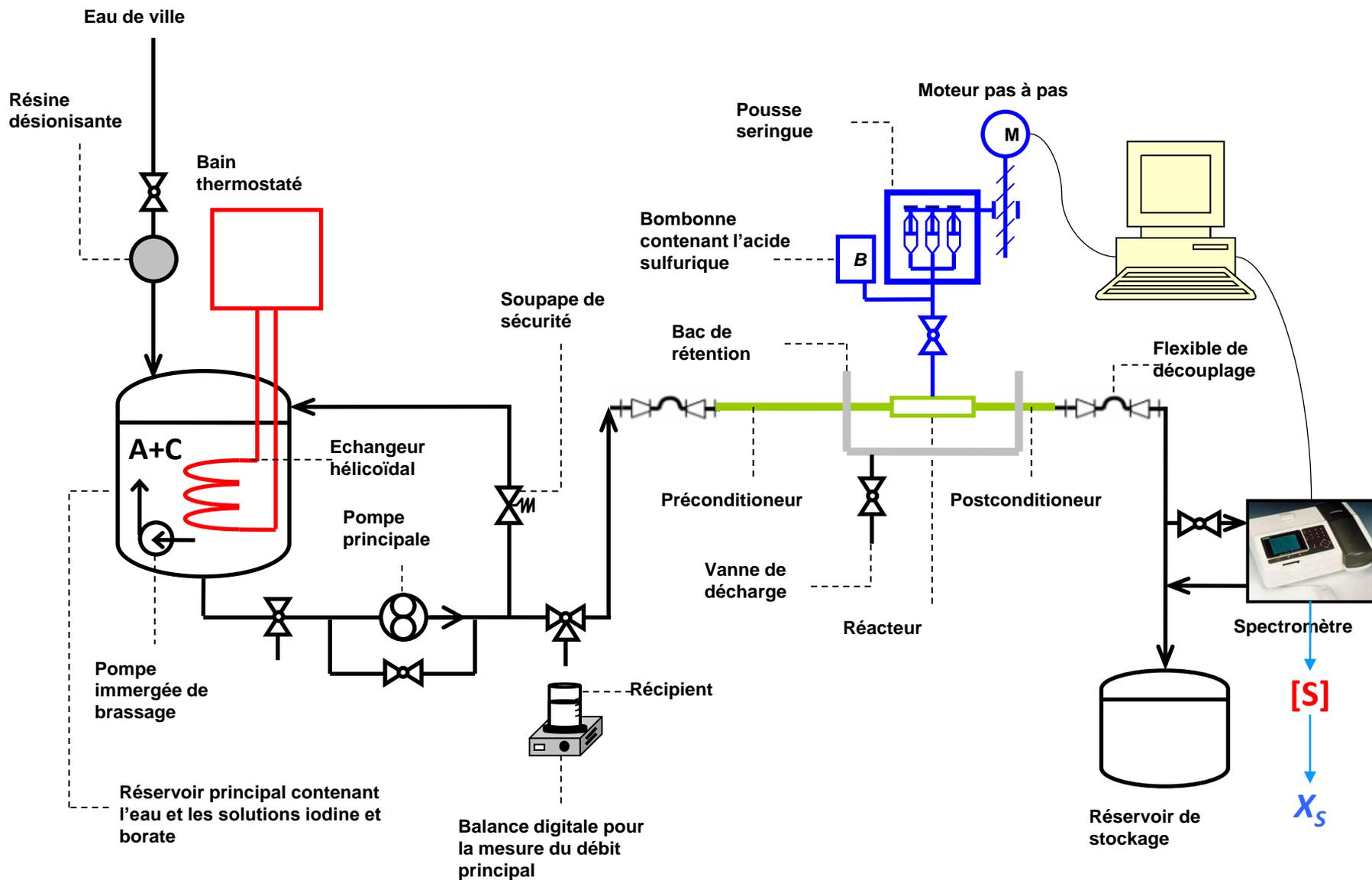
$$[KI]_0 = 0.01165 \text{ mol L}^{-1}$$

$$[KIO_3]_0 = 0.00233 \text{ mol L}^{-1}$$

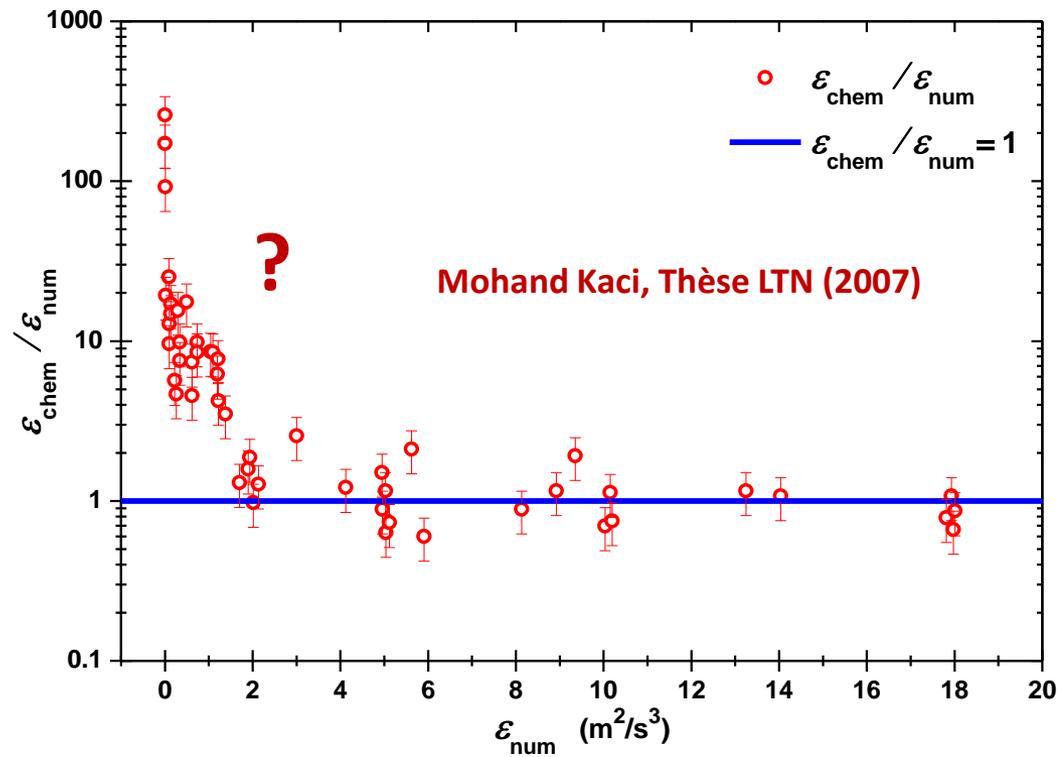
$$[NaOH]_0 = [H_3BO_3]_0 = 0.001512 \text{ mol L}^{-1}$$

$$Q_o/Q_i = 3000$$

Plateforme Expérimentale de Sonde Chimique



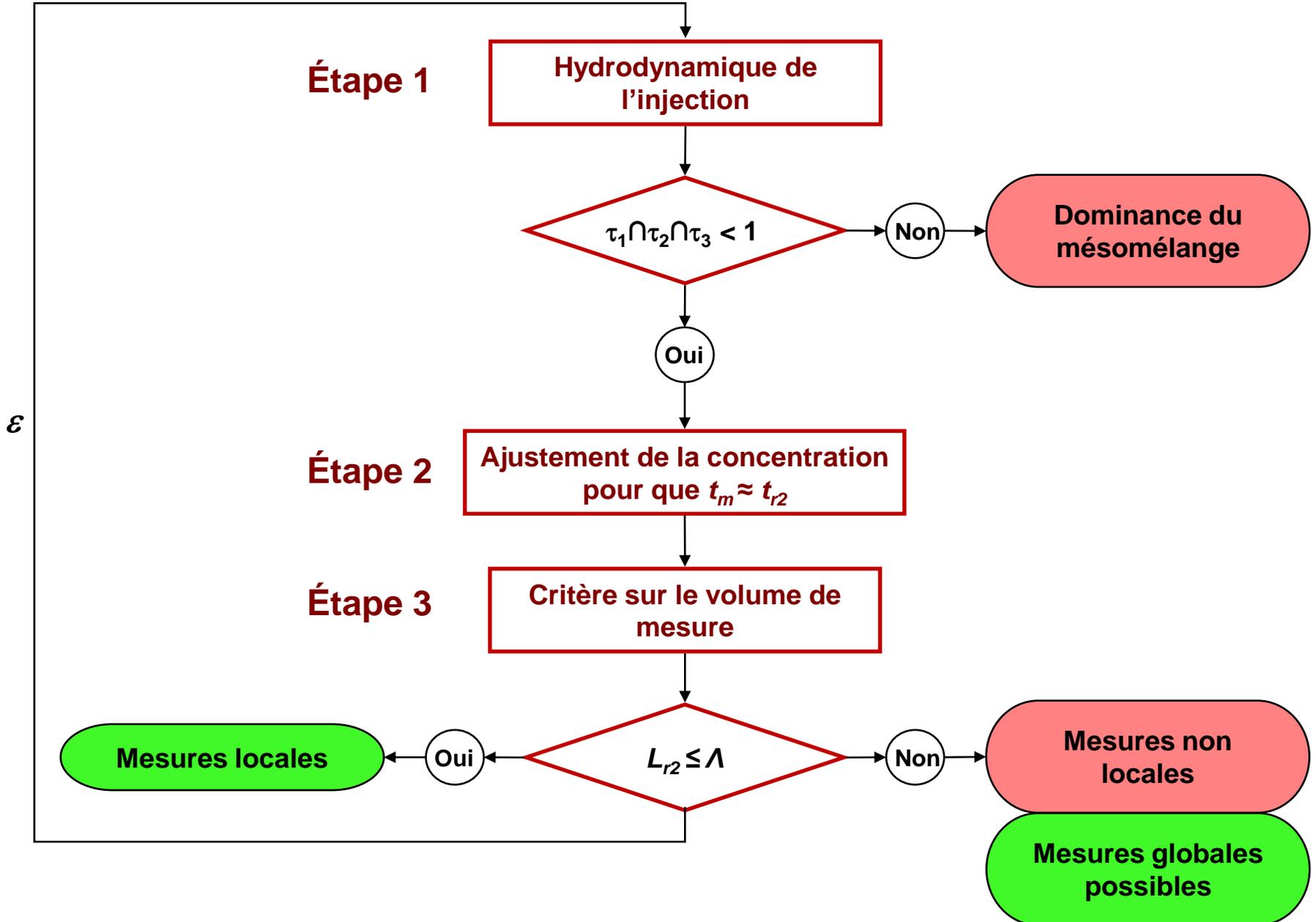
Limites et Validité de la Sonde Chimique



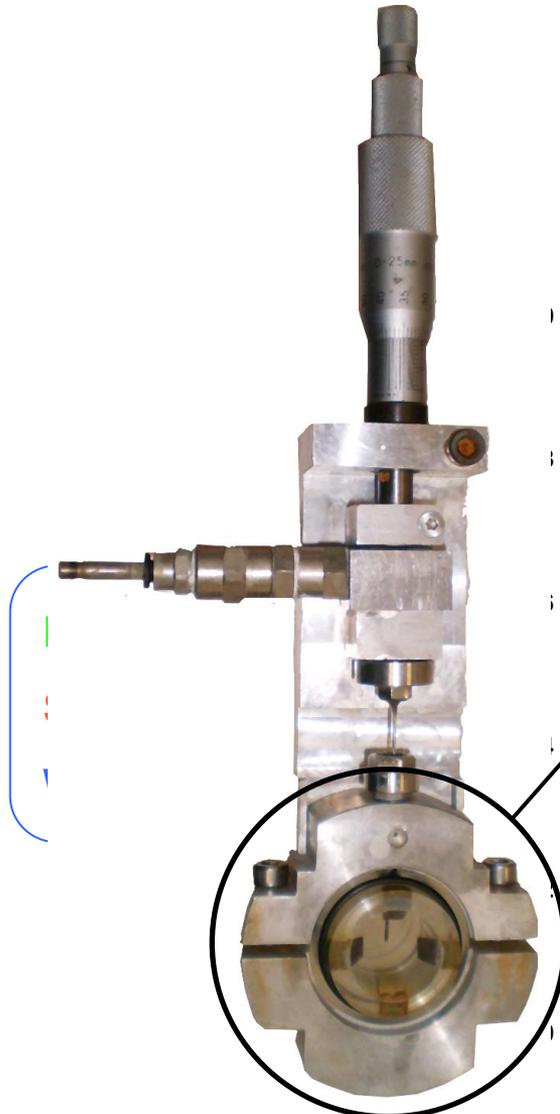
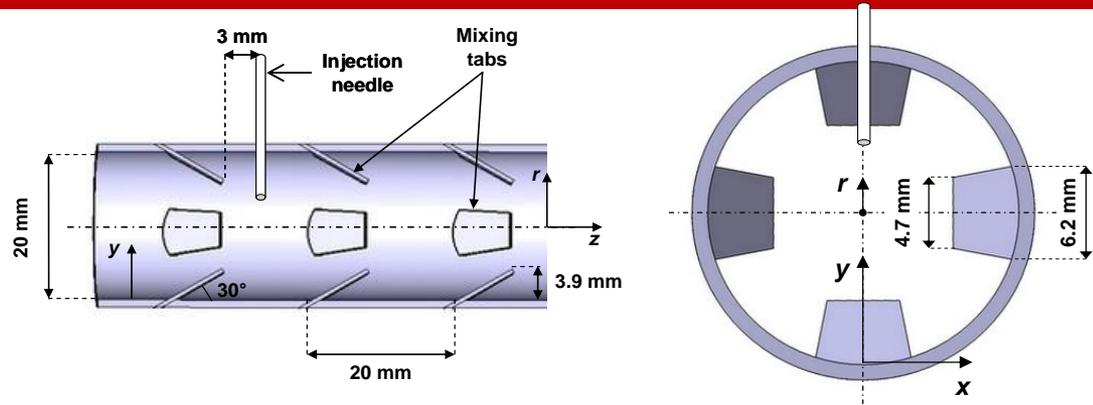
Paramètres influents :

- l'hydrodynamique d'injection ?
- la cinétique de la deuxième réaction ?
- le volume de mesure ?

Procédure Adaptative

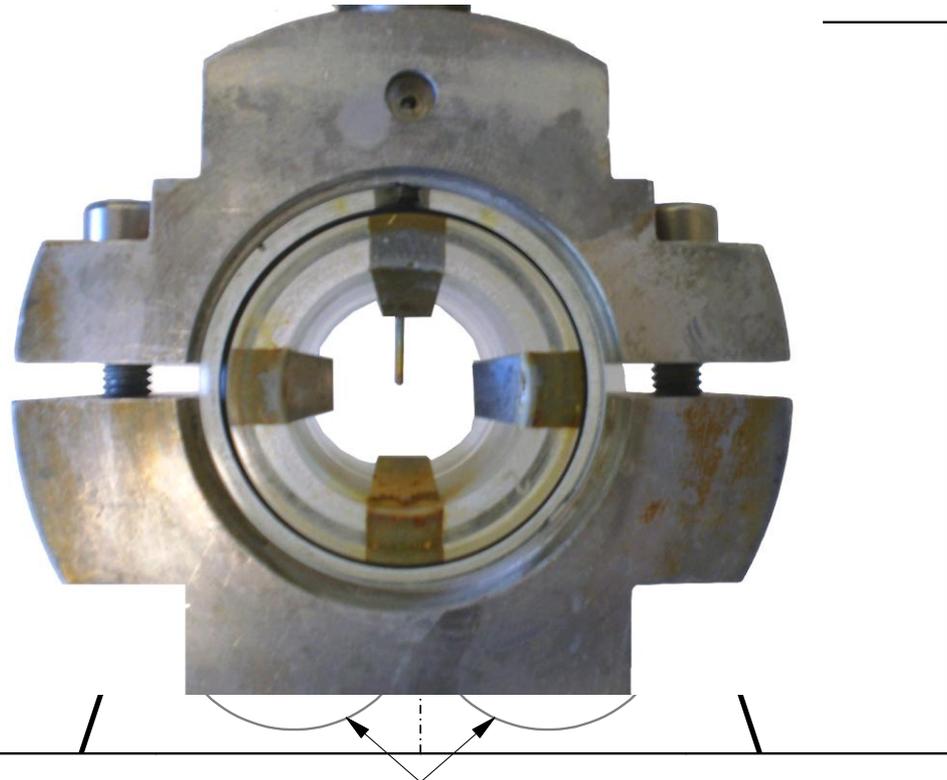


Caractérisation du Micromélange



B y
S y
W y

Géné
de vo



Paire de tourbillons contrarotatifs

Caractérisation du Micromélange

Point **S** (couche de cisaillement)

⇒ Amélioration significative de la précision

Point **B** (centre)



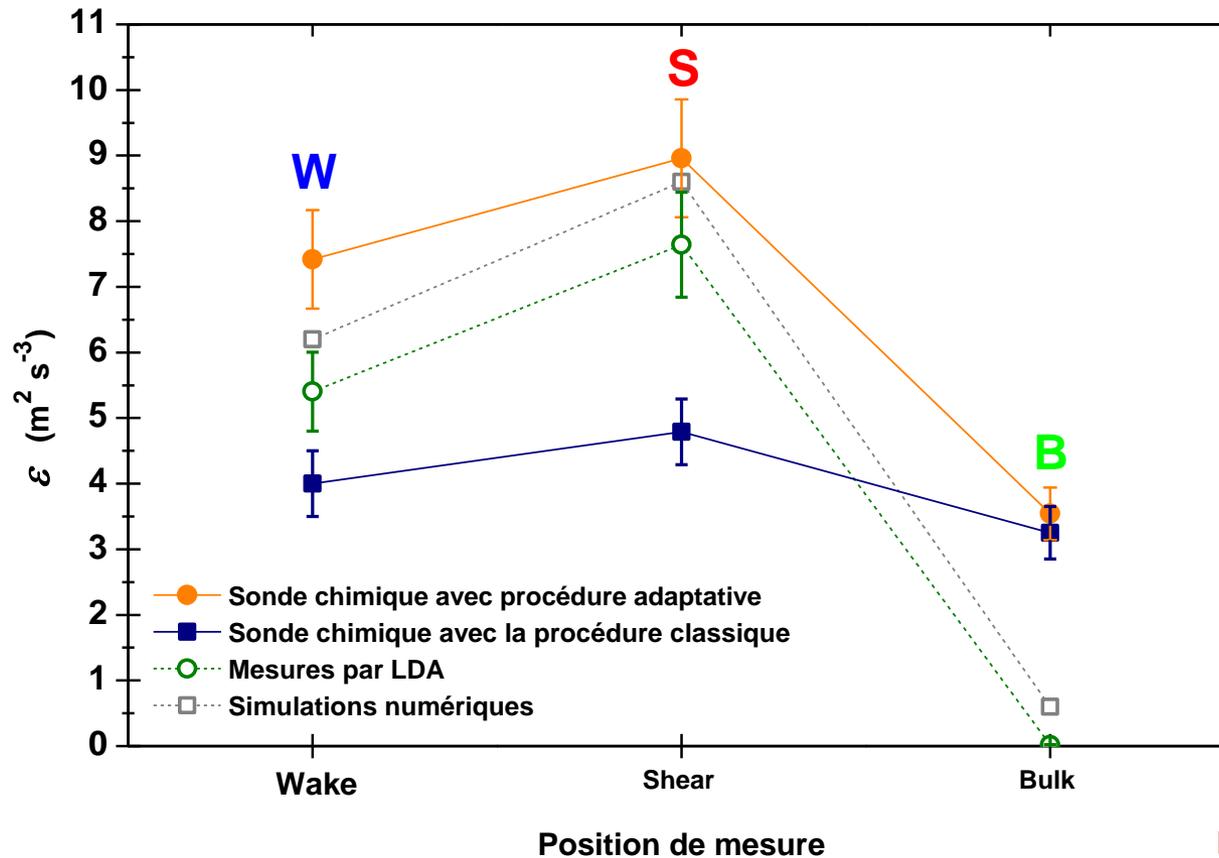
⇒ Mesures non locales

Point **W** (zone de sillage)



⇒ Hors domaine de validité

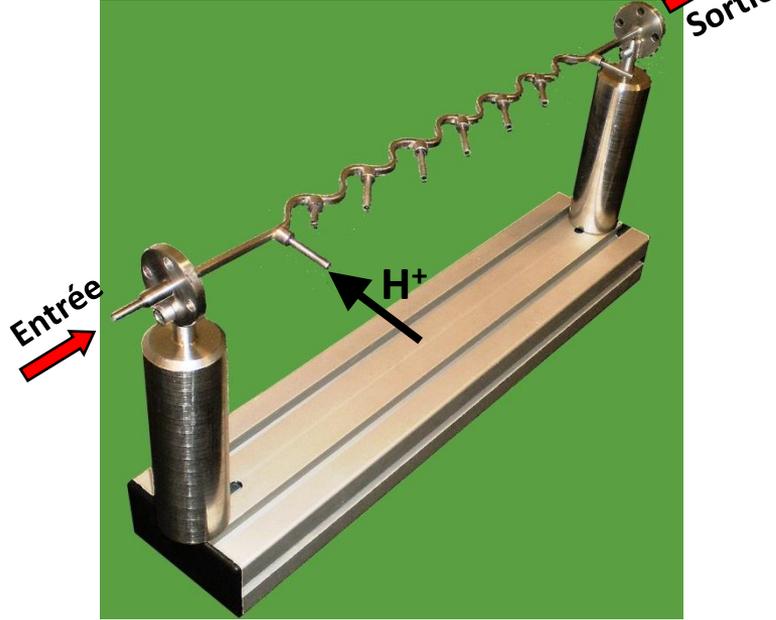
Toutes les méthodes peuvent être mises en question



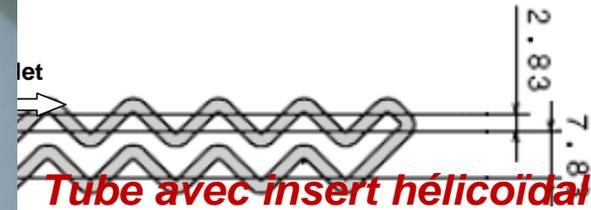
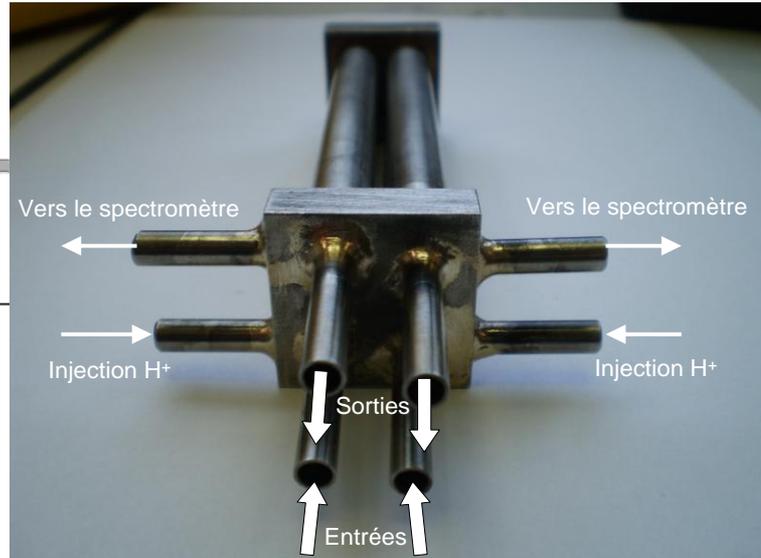
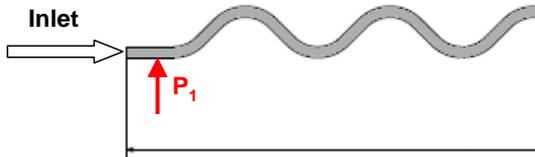
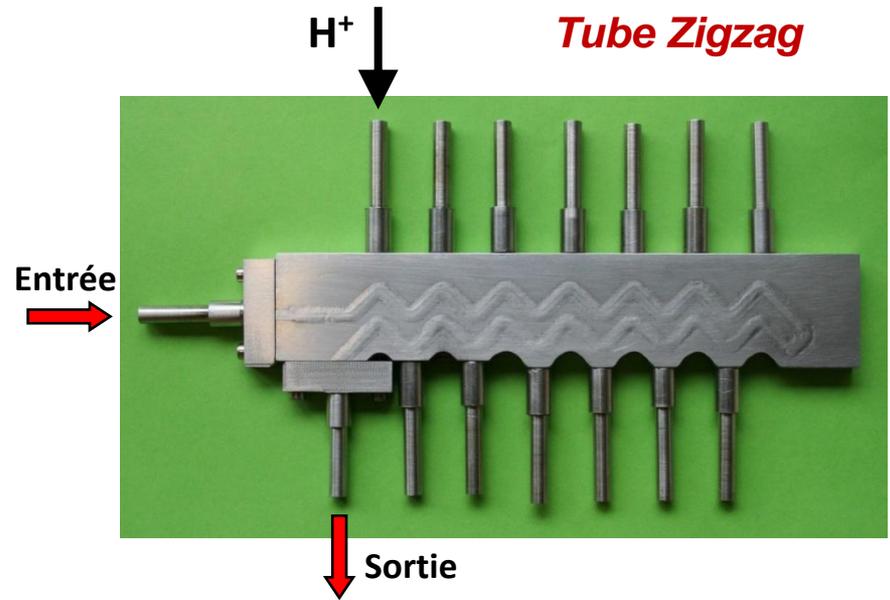
Habchi *et al.*, CES (2011)

Caractérisation du Mélange Global

Tube ondulé (Wavy)



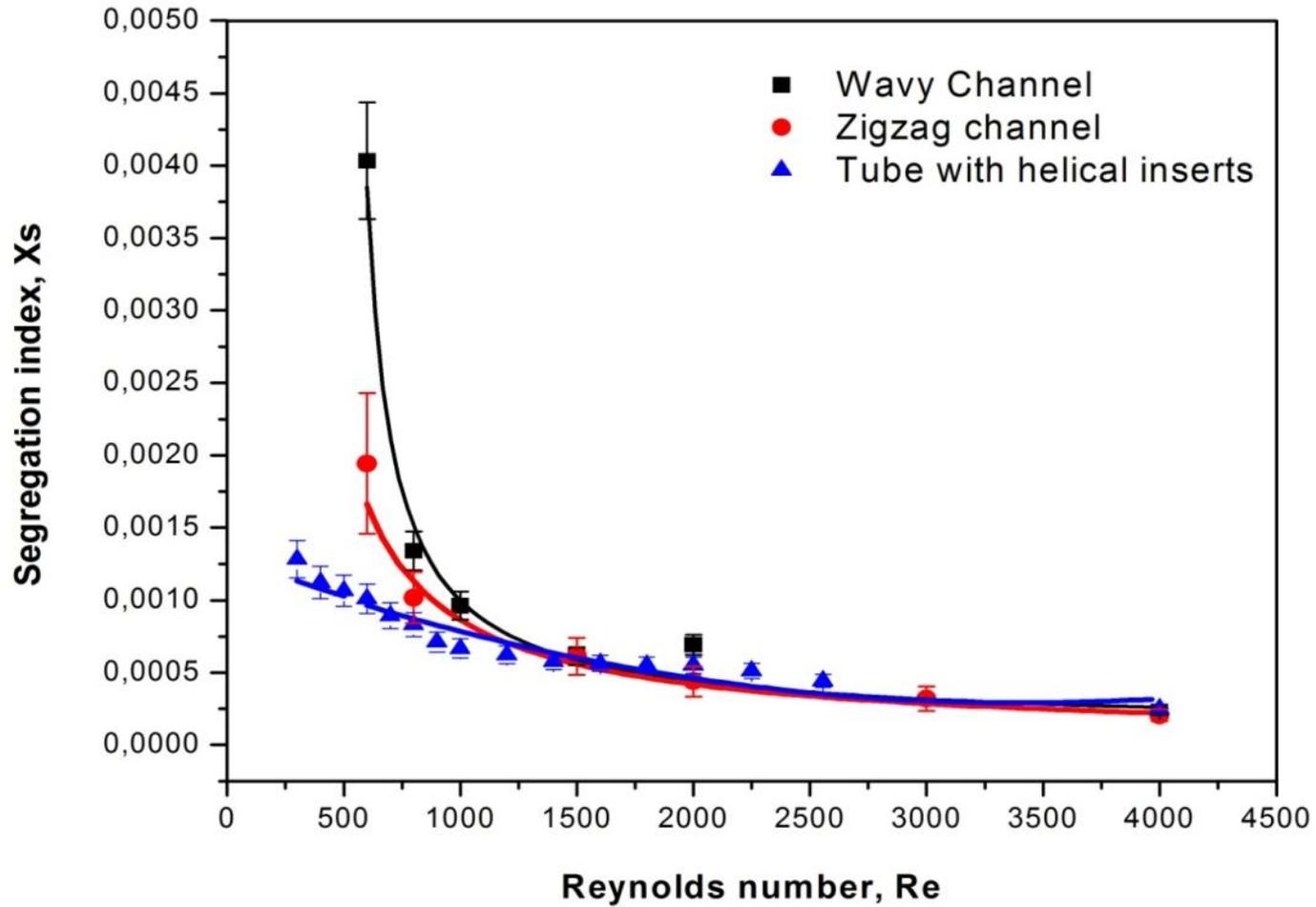
Tube Zigzag



Tube avec insert hélicoïdal

Caractérisation du Mélange Global

Procédure adaptative



- **Méthode de la Sonde Chimique**
 - **Analyse des limites de la procédure classique**
 - **Détermination d'un domaine de validité**
 - **Proposition d'une procédure adaptative pour**
 - **améliorer la précision des mesures**
 - **alerter sur le non respect des hypothèses**
 - **effectuer des mesures locales et/ou mesures globales**

**Merci
de votre attention**

Étape 1 : Critère de validité : étude hydrodynamique de l'injection

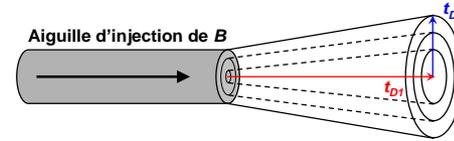
Batchelor, Cambridge (1953)
 Corrsin, AIChE J (1964)
 Baldyga *et al.*, CES (1997)

Mésomélange

dispersion turbulente
 du filament d'injection

réduction des agrégats injectés
 par la cascade turbulente

dispersion axiale



dispersion radiale

$$t_{D1} = \frac{Q_i}{W D_t}$$

$$t_{D2} = \frac{d^2}{4 D_t}$$

$$t_C = 2 \left(\frac{\Lambda^2}{\varepsilon} \right)^{1/3}$$

$$\tau_1 = \frac{t_{D1}}{t_m}$$

$$\tau_2 = \frac{t_{D2}}{t_m}$$

$$\tau_3 = \frac{t_C}{t_m}$$

$$\left. \begin{aligned} \tau_1 &= 0.145 \pi \frac{d^2}{\phi \nu^{1/2}} \frac{\varepsilon^{3/2}}{k^2} \\ \tau_2 &= 0.145 \frac{d^2}{\nu^{1/2}} \frac{\varepsilon^{3/2}}{k^2} \\ \tau_3 &= 0.073 \frac{d^{2/3}}{\phi^{1/3} \nu^{1/2}} \varepsilon^{1/6} \end{aligned} \right\}$$

avec $\phi = W / W_i$

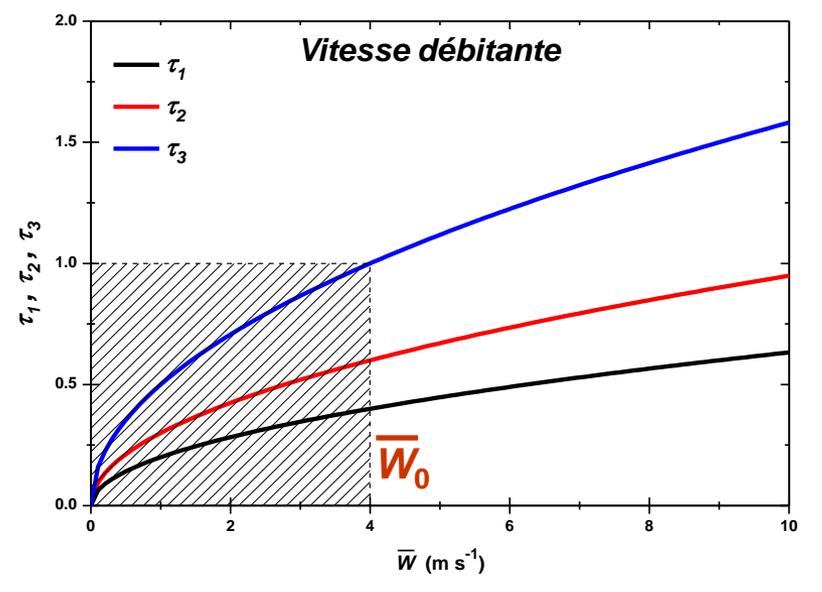
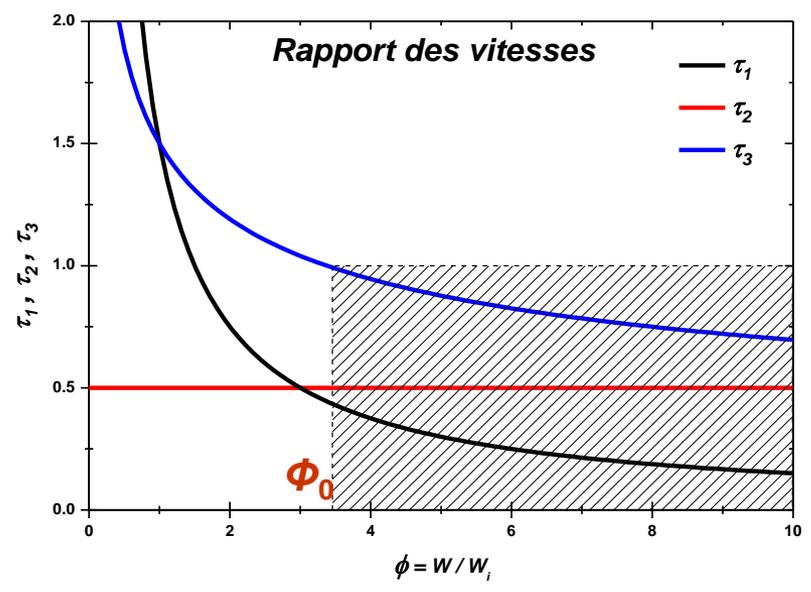
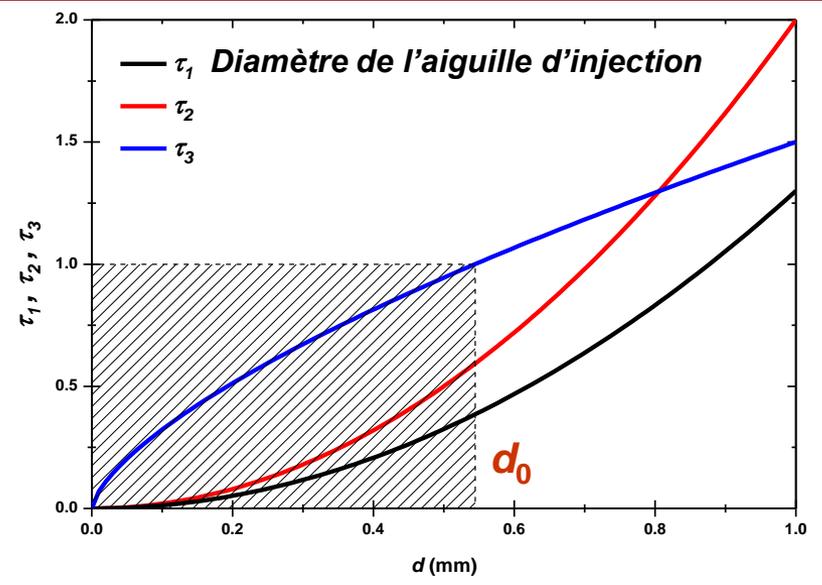
Étape 1 : Domaine de validité

3 paramètres

d → diamètre de l'aiguille d'injection

ϕ → rapport des vitesses

\bar{W} → vitesse débitante

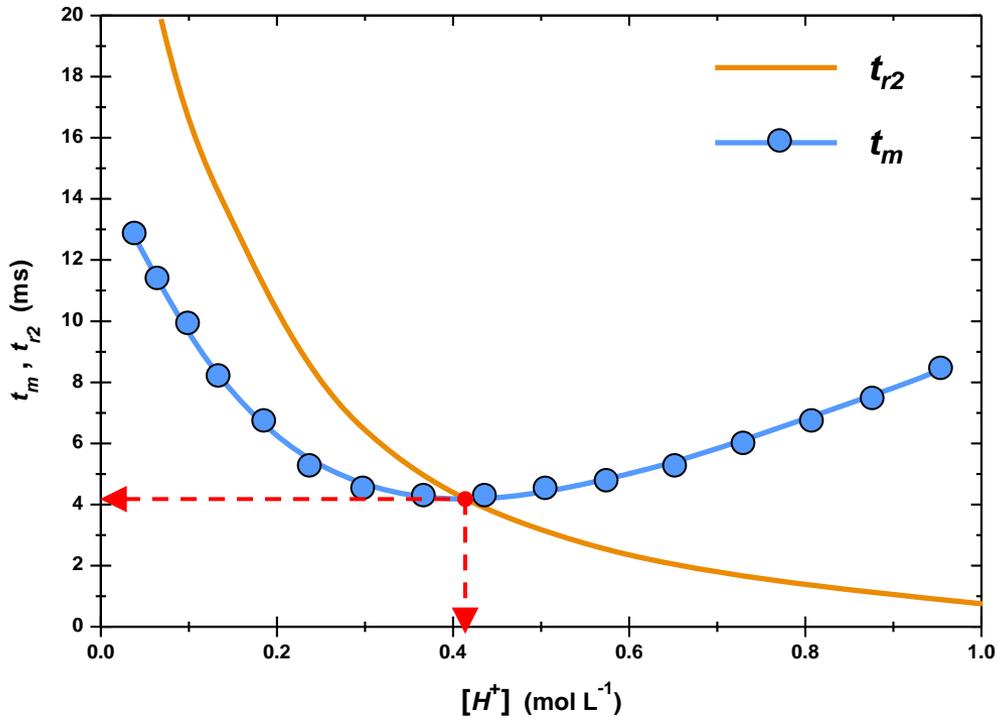


Étape 2 : Précision et sensibilité de la mesure : ajustement de la concentration

$t_m \ll t_{r2}$ → les réactifs sont homogénéisés rapidement
la seconde réaction n'a pas le « temps » de former l'iode ($X_s = 0$)

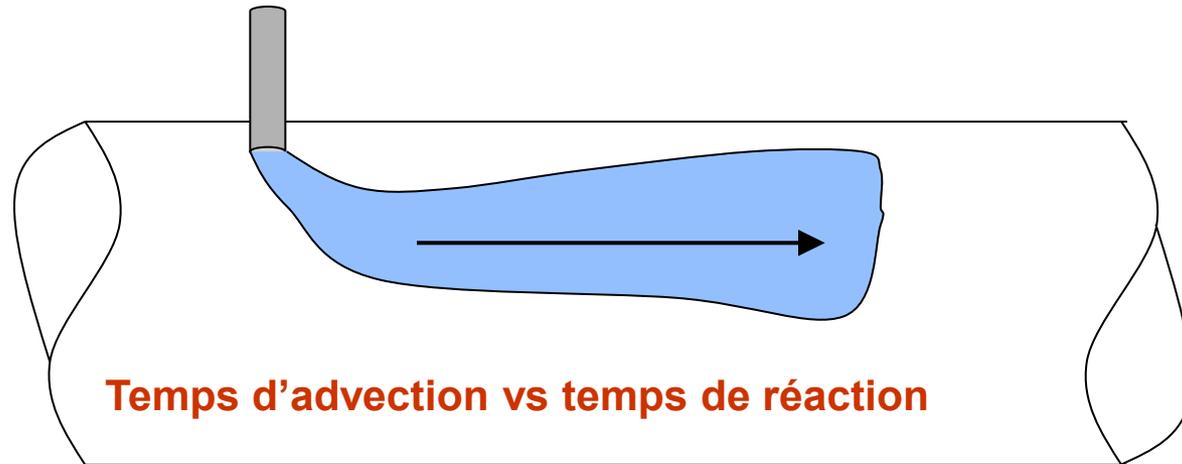
$t_m \gg t_{r2}$ → la sélectivité est régie par la cinétique de la seconde réaction
l'effet de l'écoulement sur X_s est faible

$t_m \approx t_{r2}$ → la meilleure sensibilité possible



$$t_{r2} = \frac{\text{Min}\left(\frac{3}{5}[\text{I}^-], 3[\text{IO}_3^-], \frac{1}{2}[\text{H}^+]\right)}{K_2 [\text{I}^-]^2 [\text{H}^+]^2 [\text{IO}_3^-]}$$

Étape 3 : Volume de mesure



$$L_{r2} \text{ longueur de mesure : } L_{r2} \approx W t_{r2}$$

Mesure locale



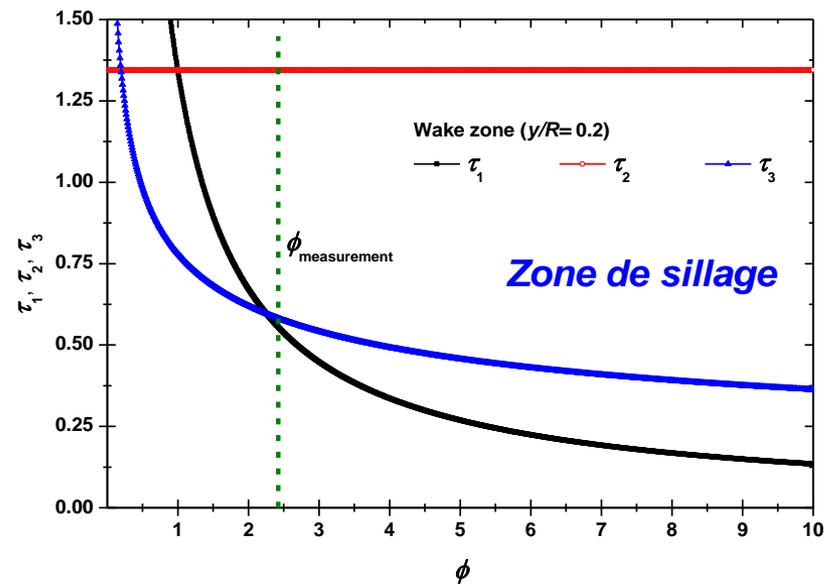
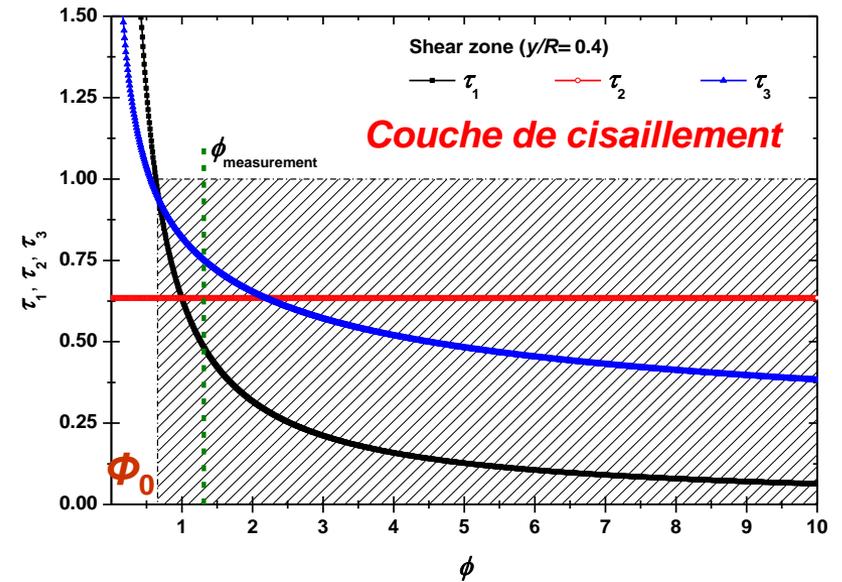
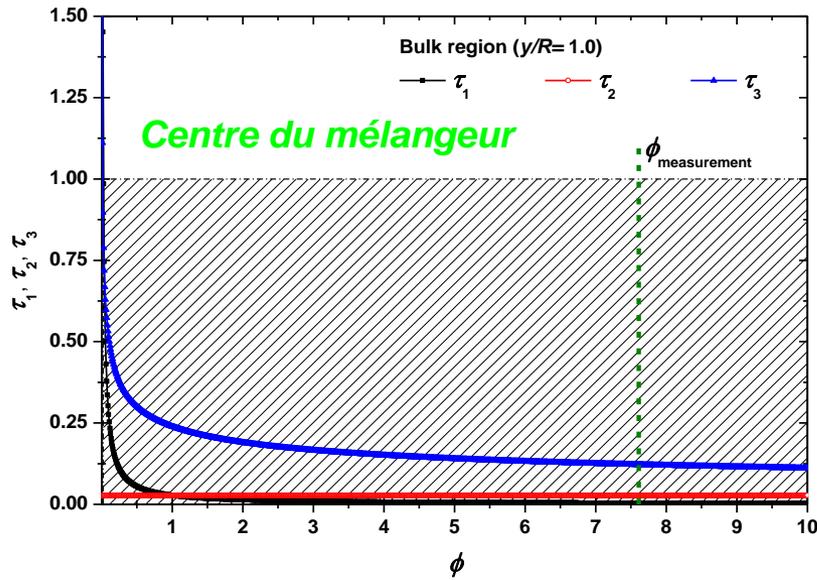
$$\left| \begin{array}{l} L_{r2} \leq \Lambda \\ \varepsilon = A \frac{u^3}{\Lambda} \end{array} \right.$$

Mesure globale



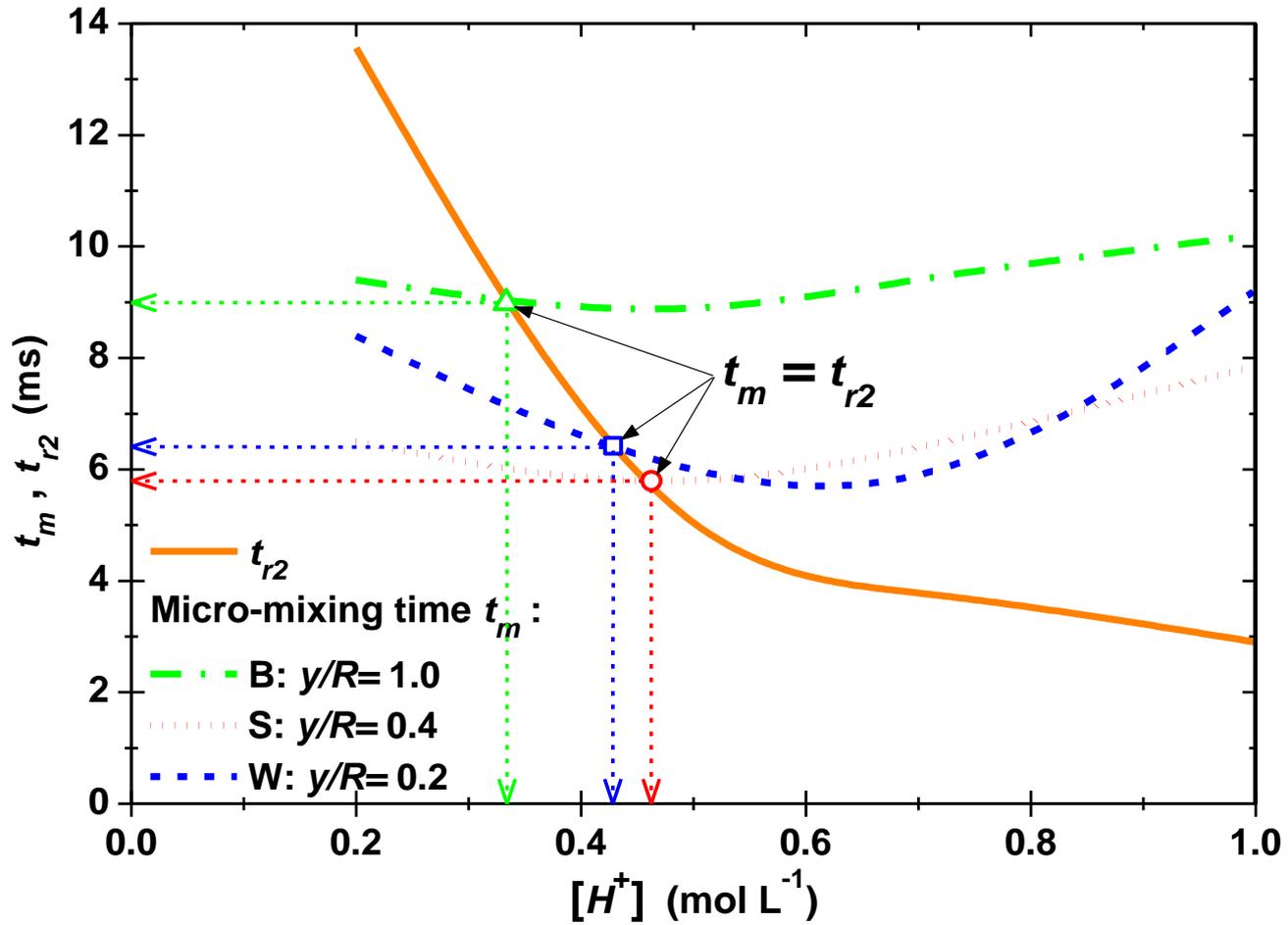
$$\left| \begin{array}{l} L_{r2} = \text{longueur du réacteur} \\ t_{r2} = \text{temps de séjour} \end{array} \right.$$

Étape 1 : Hydrodynamique de l'injection - HEV - Re= 12500 - d= 0,6 mm



Étape 2 : Ajustement de la concentration

Réactifs	H ₃ BO ₃	NaOH	KIO ₃	KI ⁻	H ⁺
Concentrations (10 ⁻³ mol.L ⁻¹)	1,512	1,512	2,33	11,65	<i>variable</i>



Étape 3 : Volume de mesure - Résultats

Point **B** (centre du mélangeur) $L_{r2} \approx 14.77 \text{ cm} \gg \Lambda \approx 1.10 \text{ cm}$

Mesures non locales

Point **S** (couche de cisaillement) $L_{r2} \approx 0.62 \text{ mm}$ et $\Lambda \approx 0.46 \text{ cm}$

Amélioration significative de précision

Point **W** (zone de sillage) hors domaine de validité

Toutes les méthodes peuvent être mise en question

