

Mélange chaotique laminaire en écoulement tridimensionnel

II. Écoulements ouverts

Philippe CARRIÈRE

En collaboration avec :

Florence RAYNAL

Equipe Microfluidique

Laboratoire de Mécanique des Fluides et d'Acoustique

UMR CNRS 5509 – Université de Lyon

Ecole Centrale de Lyon – Université Lyon I – INSA Lyon

Projet Extrapolis (Programme Énergie CNRS)

LTN (Nantes), LGC (Toulouse), GreTH (Grenoble), CORIA (Rouen)



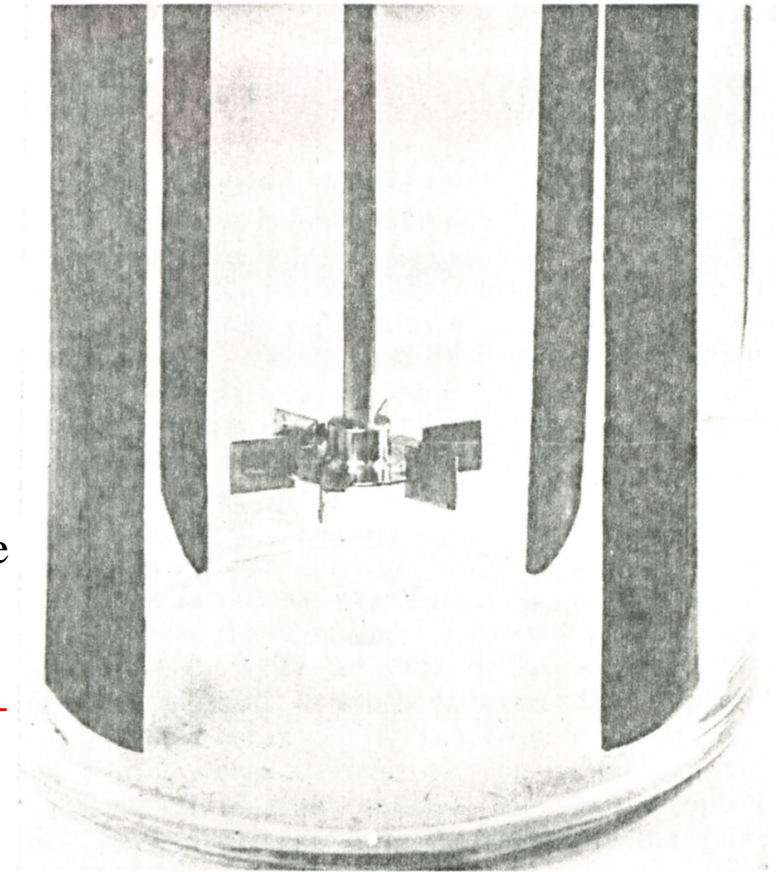
Pourquoi se poser le problème des écoulements ouverts ?

Système classique dans l'industrie chimique : cuve agitée.

- Prototype à échelle de laboratoire
(production $\approx$ quelques kilogrammes/heure).
- Extrapolation à échelle industrielle
(production $\approx$ quelques tonnes/heure).

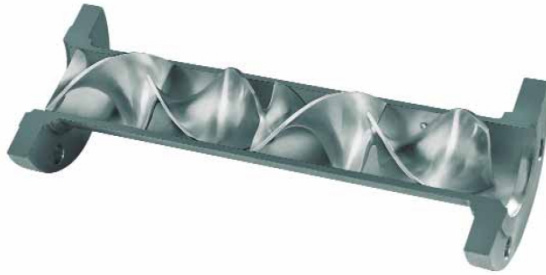
Problèmes d'extrapolation :

- L'agitation est-elle aussi efficace dans les deux cas (Nombre de Reynolds différents) ?
- Performance de l'échange thermique pour des réactions exothermiques ?
 - Puissance calorifique à évacuer $\nearrow \sim$ volume.
 - Puissance calorifique évacuée par les parois $\nearrow \sim$ surface d'échange.



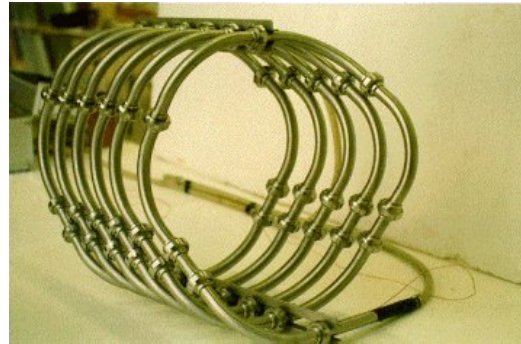
from Metzner & Otto, AIChE, 1965

Mélangeurs chaotiques ouverts



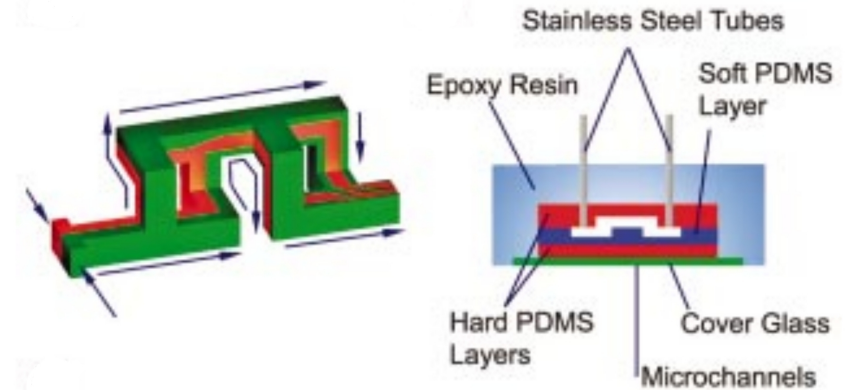
Static Mixer Kenics

Armeniades *et al.*, *US patent* 3/286/992, 1966
Chemineer, Inc. (Robbins & Myers)



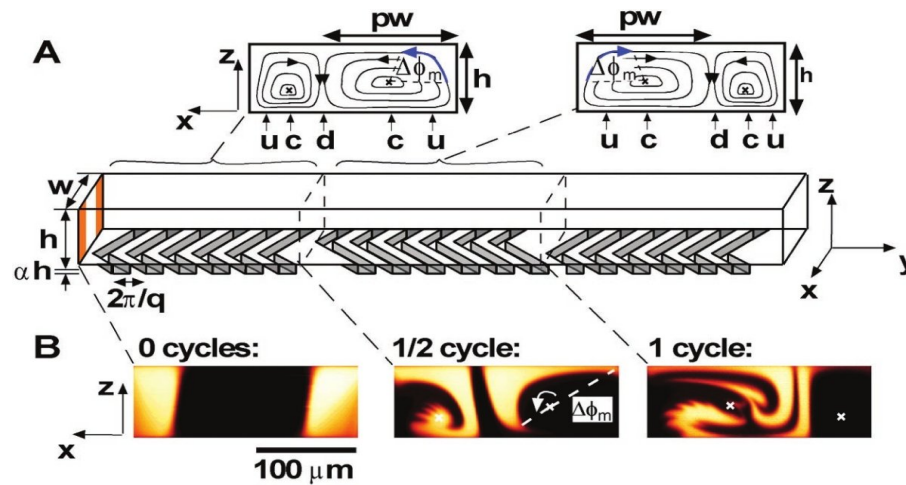
Twisted Pipes Heat Exchanger

Jones *et al.*, *J. Fluid Mech.*, **209**, 1989
Castelain *et al.*, *Int. J. Heat Mass Transfer*, **43**, 2000



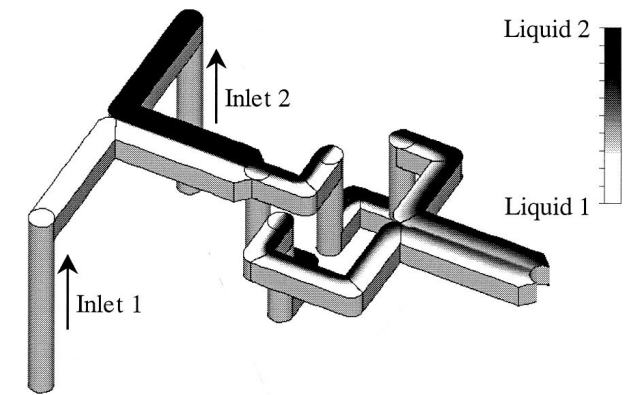
Chen & Meiners Mixer

Chen & Meiners, *Appl. Phys. Lett.*, **83**, 2004



Staggered Herringbone Mixer

Stroock *et al.*, *Science*, **295**, 2002



Multi-level laminating mixer

Gray *et al.*, *Sens. Actuators, A* **77**, 1999

Principe (mélangeurs à séparateur de flux)



Transformation du “boulanger” appliquée au carré unité après deux itérations

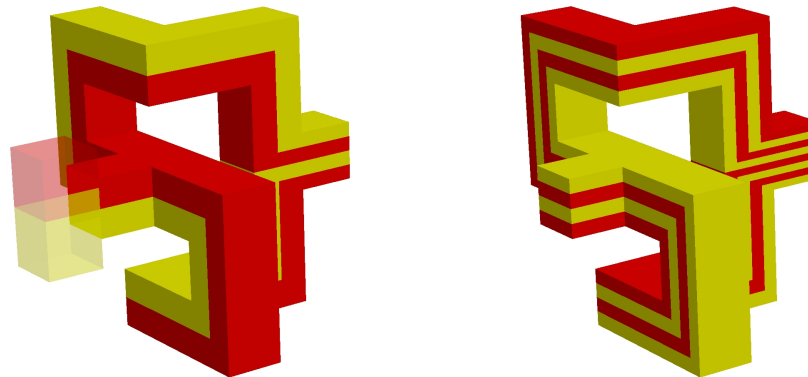


Schéma de principe du mélangeur statique

Ph. Carrière, *Phys. Fluids*, **19**, 2007 ; voir aussi Gray *et al.*, *Sens. Actuators*, **A 77**, 1999

Entrée du système $\longrightarrow$ échelle de ségrégation : $\ell_0 = h$ (diamètre caractéristique du conduit).

Après passage dans n éléments : $\ell_n = h/2^n$.

“Portée” du phénomène de diffusion : $O(\ell_n RS_c)$ (cf cas unidirectionnel).

Lorsque $\ell_n RS_c = O(h)$, la diffusion agit sur une distance axiale comparable à la distance transversale.

—→ n_m (nombre “d’éléments” nécessaire pour que la diffusion agisse rapidement) tel que $2^{n_m} = O(RS_c)$, soit

$$n_m = \frac{1}{\ln 2} O(\ln RS_c).$$

“Longueur de mélange” :

$$L_m = K h n_m, \quad K \text{ ne dépendant que du système considéré}$$

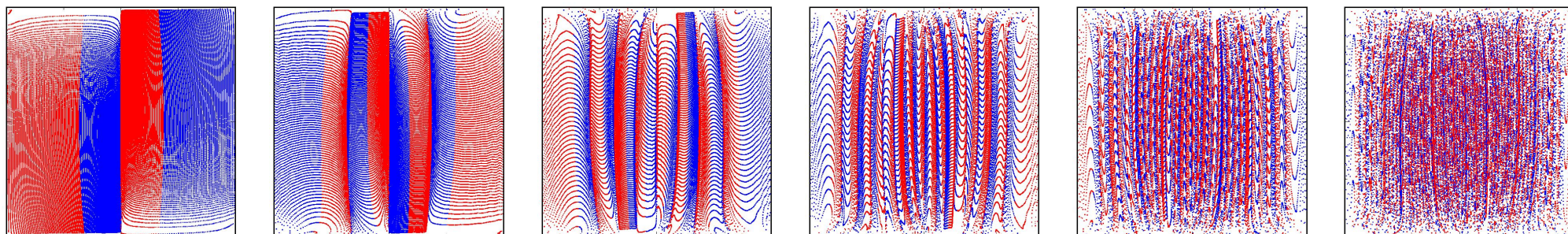
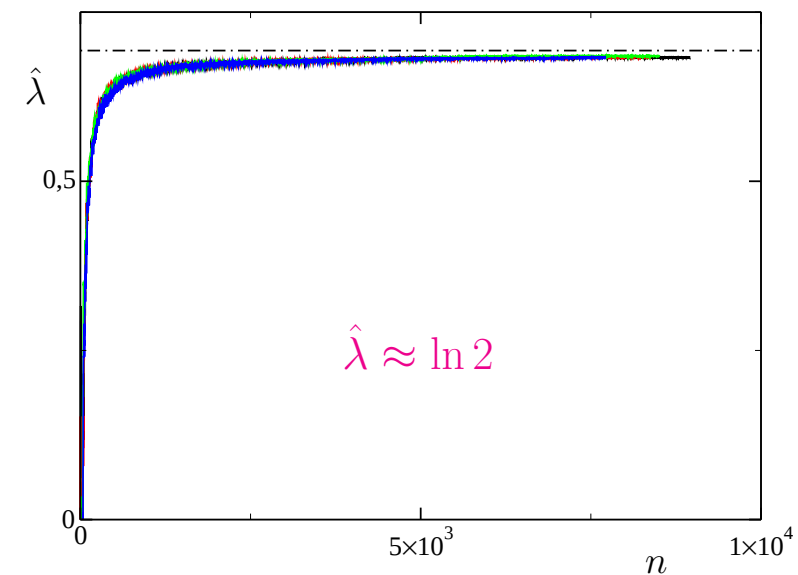
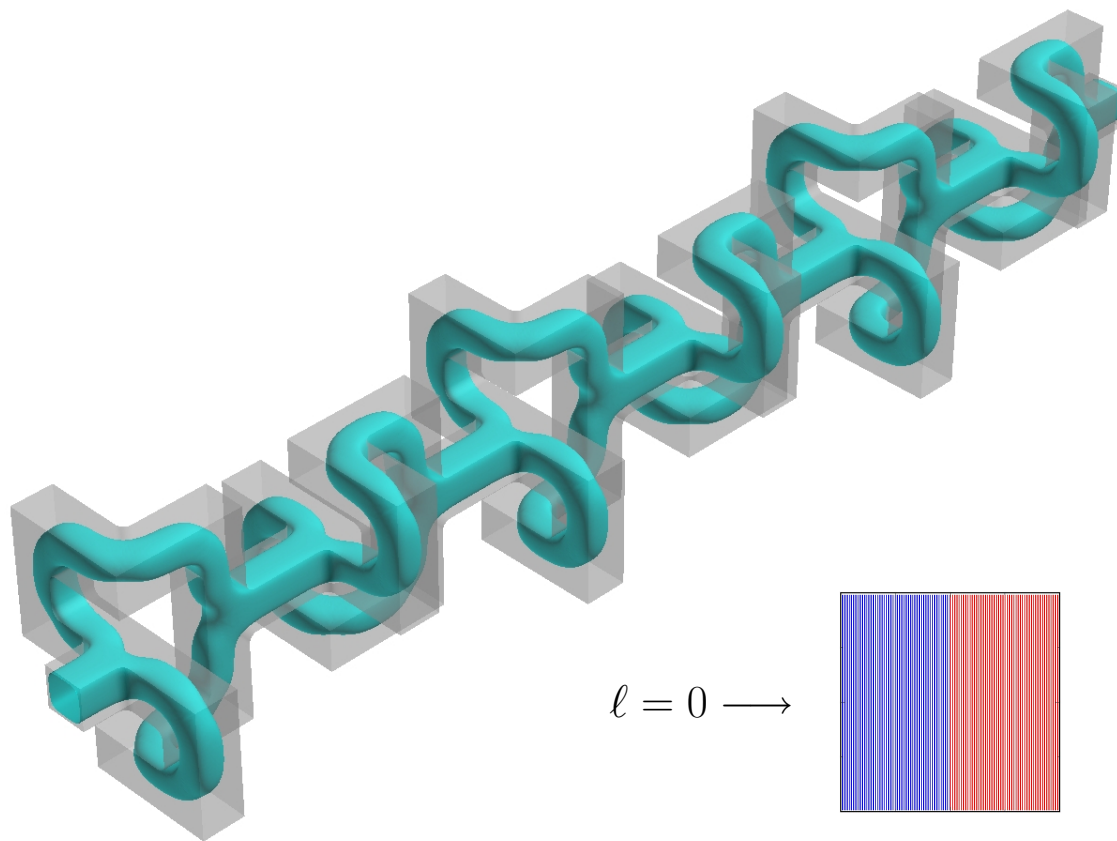
soit

$$\frac{L_m}{h} = \frac{1}{K \ln 2} O(\ln RS_c).$$

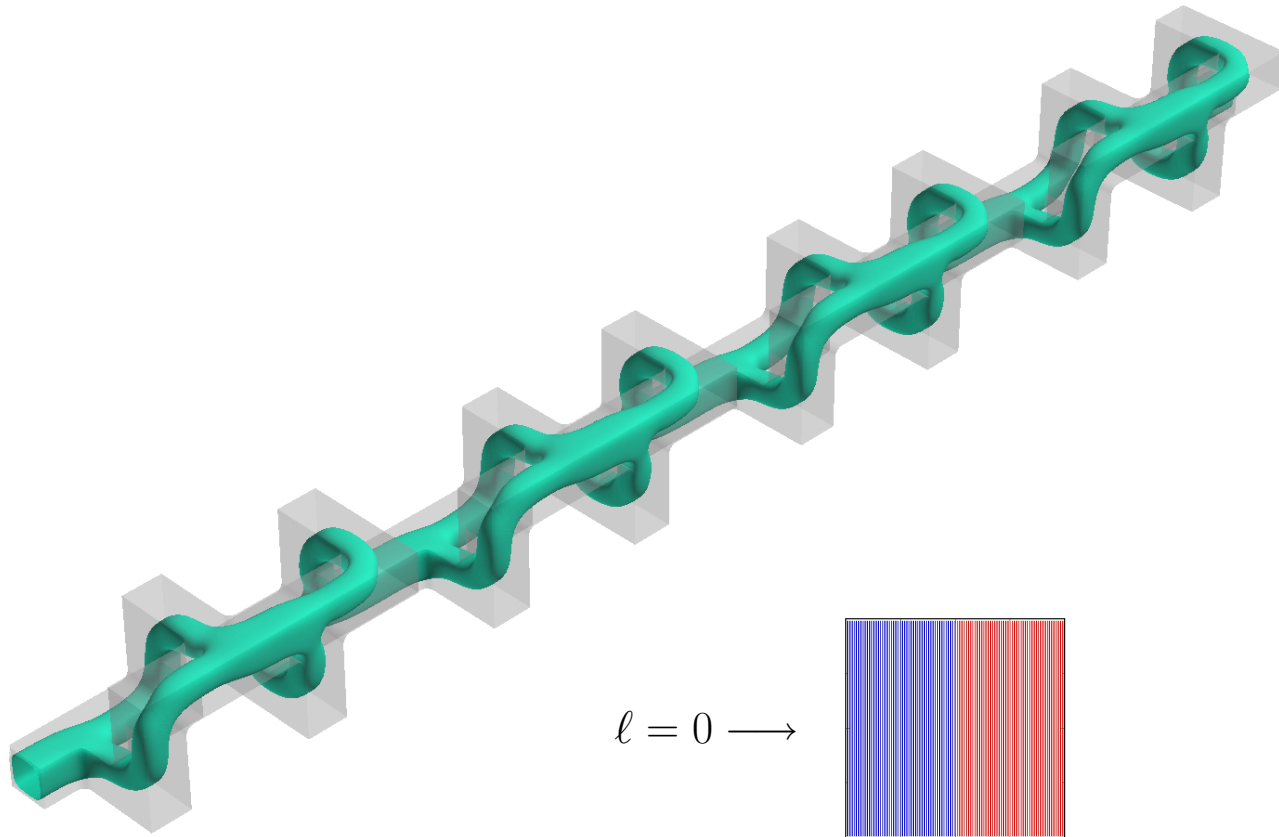
Plus généralement :

$$\frac{L_m}{h} = \frac{1}{\lambda} O(\ln RS_c) \quad (\lambda \equiv \text{exposant de Lyapunov})$$

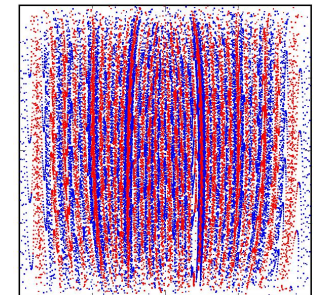
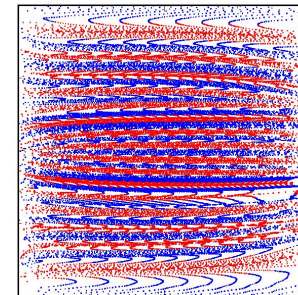
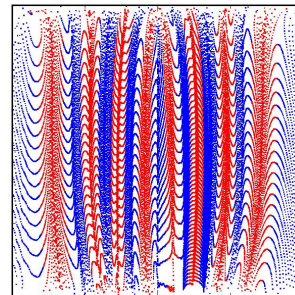
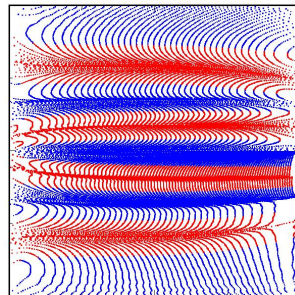
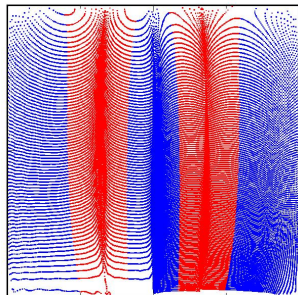
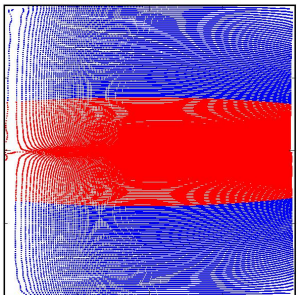
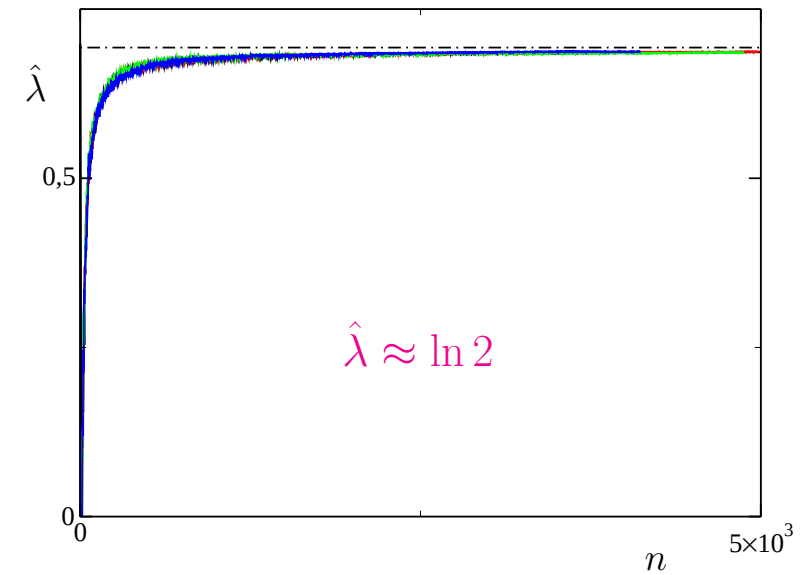
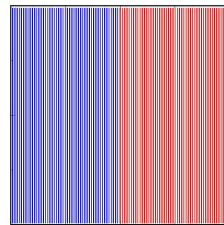
Mélangeur type Gray et al. (Stokes flow)



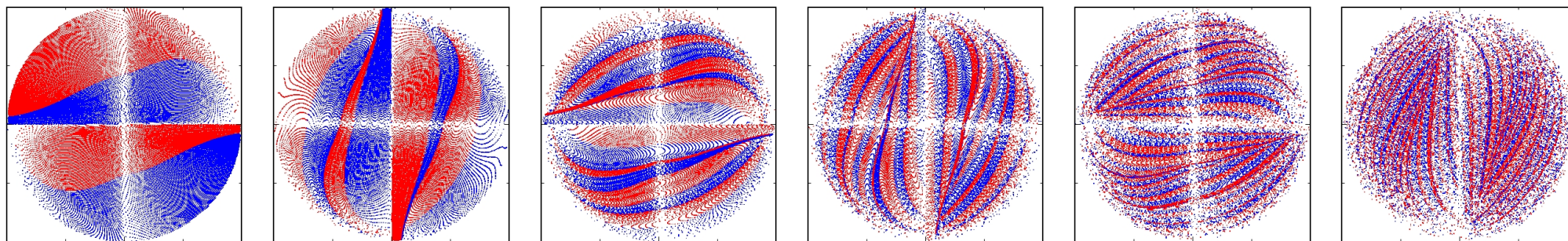
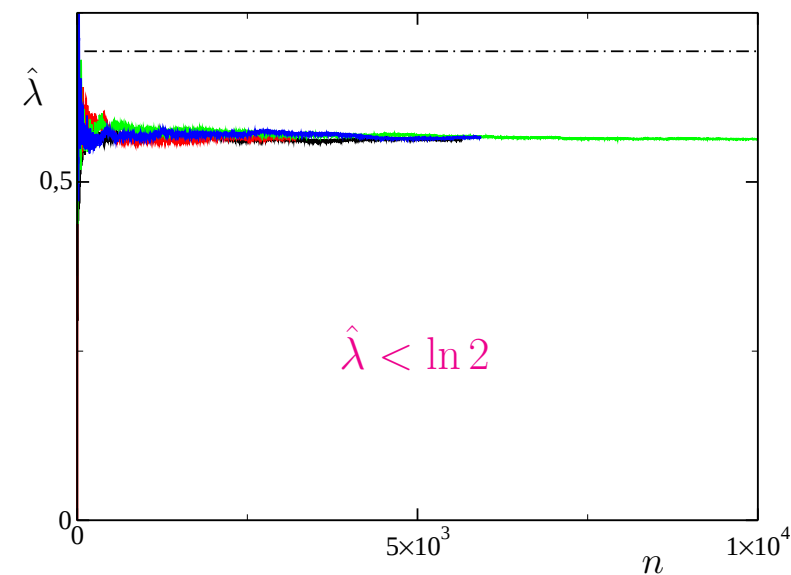
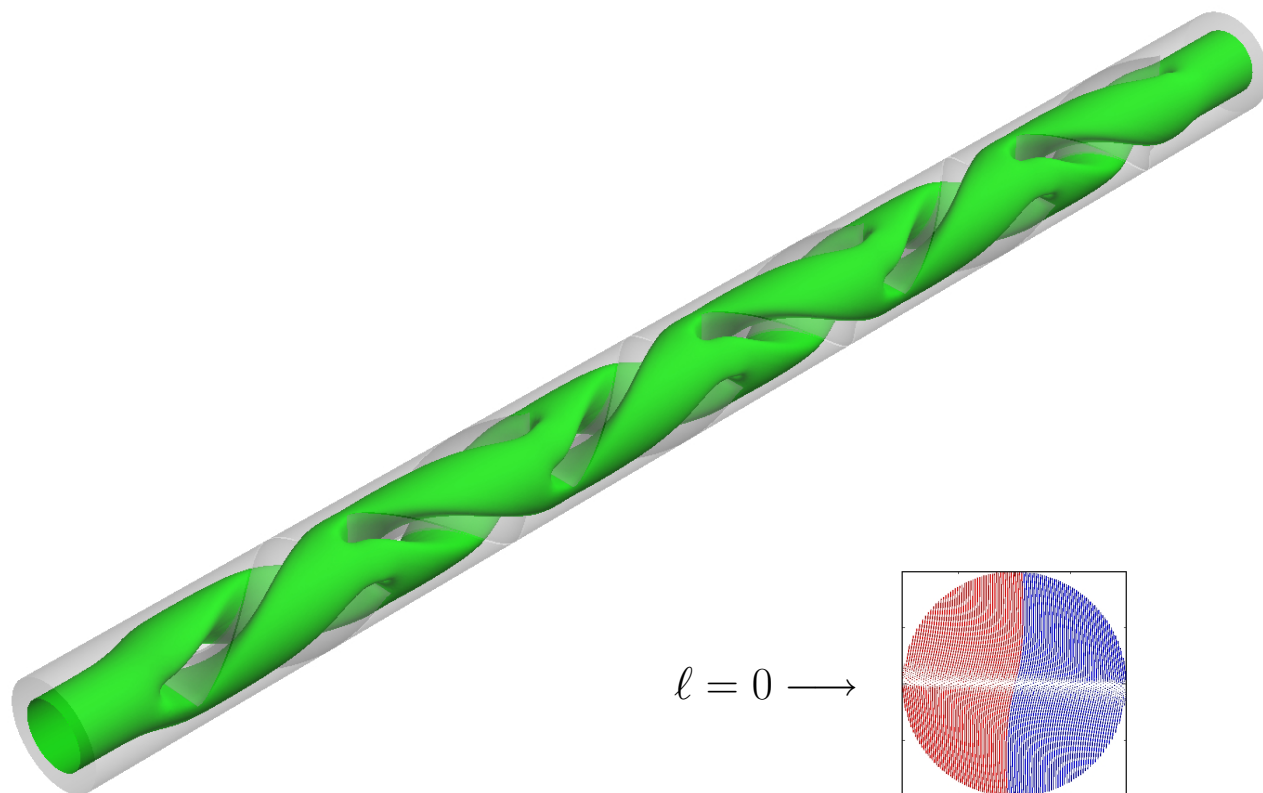
Mélangeur type Chen & Meiners (Stokes flow)



$\ell = 0 \longrightarrow$



Mélangeur Kenics (Stokes flow)



Comparaisons possibles avec l'étude de Olivier Byrde (LMF–EPF Lausanne)

(Byrde & Sawley, *Chem. Eng. Sciences*, **72**; *Computers Fluids*, **28**, 1999).

Performances des mélangeurs

En première analyse, les systèmes types *Gray et al.* ou *Chen & Meiners* sont plus performants que le Kenics.

Mais :

- Le **coût énergétique** (perte de charge) de chaque système est à prendre en compte.

En terme de “résistivité hydraulique” (adimensionnée et par longueur “linéaire”) :

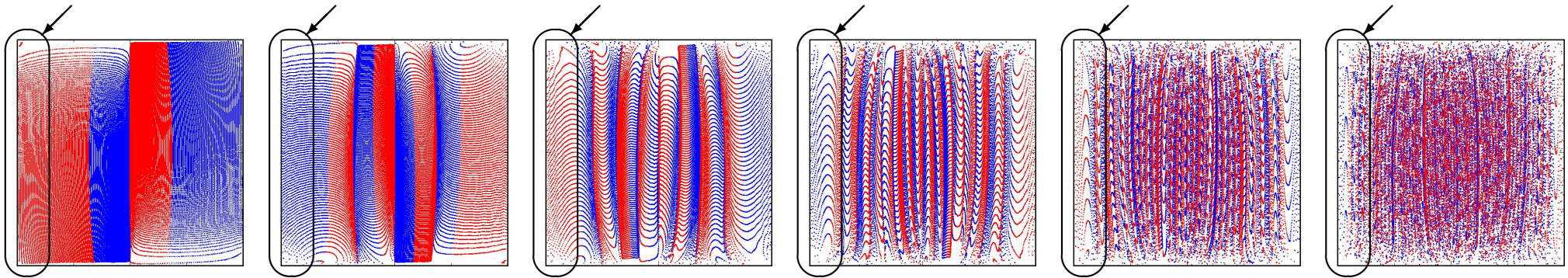
- . Poiseuille cylindrique : $\zeta = 8\pi$.
- . Poiseuille section carrée : $\zeta \approx 28.5$.
- . Mélangeur type *Gray et al.* : $\zeta \approx 36.4$.
- . Mélangeur type *Chen & Meiners* : $\zeta \approx 29.2$.
- . Mélangeur Kenics : $\zeta \approx 84$.

Mais il faut également tenir compte de la “longueur linéaire” nécessaire pour chaque mélangeur, typiquement :

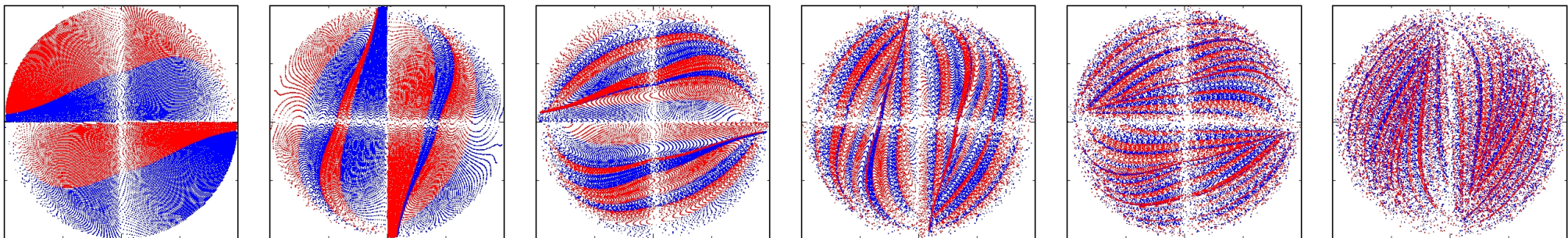
- . Kenics : $L/h = 2$ (1.5 dans le cas étudié par Byrde et al.).
- . *Gray et al.* : $L/h = 5$ (susceptible de pouvoir être diminué)
- . *Chen & Meiners* : $L/h = 4$ (susceptible de pouvoir être diminué)

- Se pose le problème du mélange à proximité des parois.

. Visible qualitativement sur les “lâchers de particules marquées” :

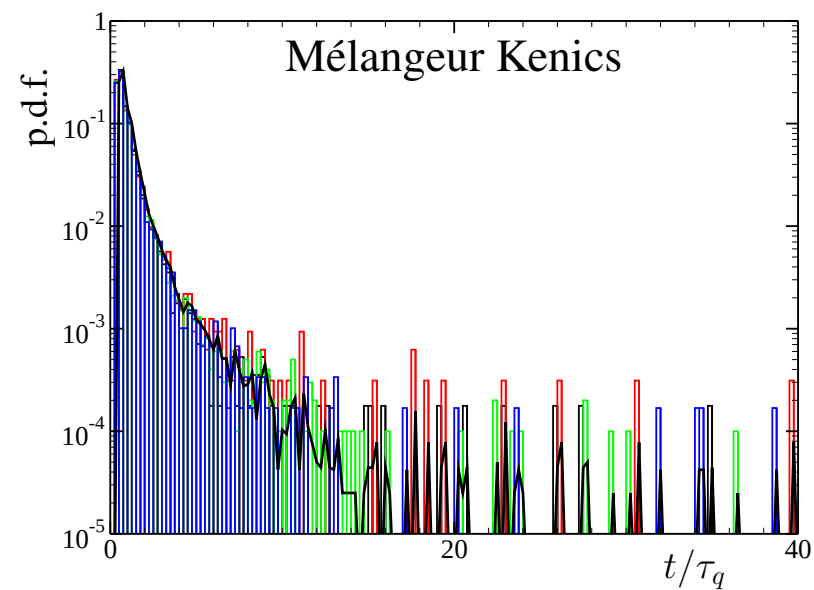
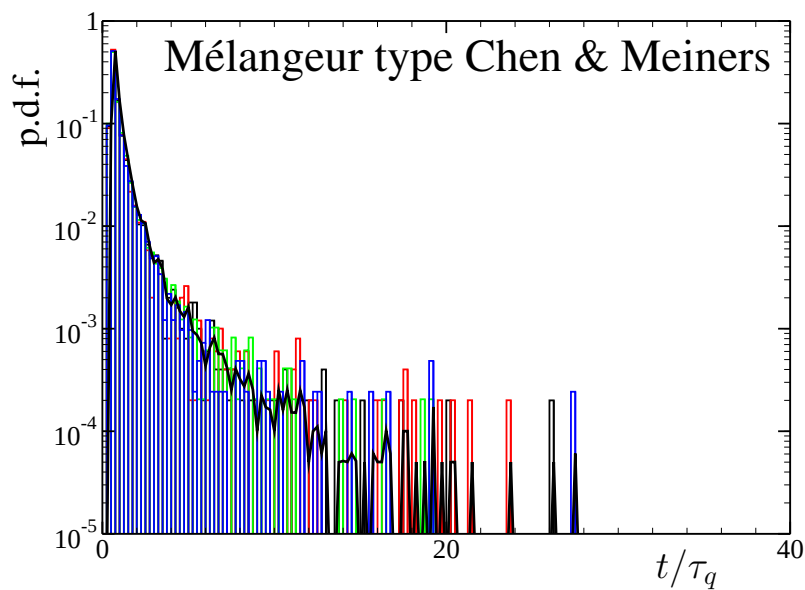
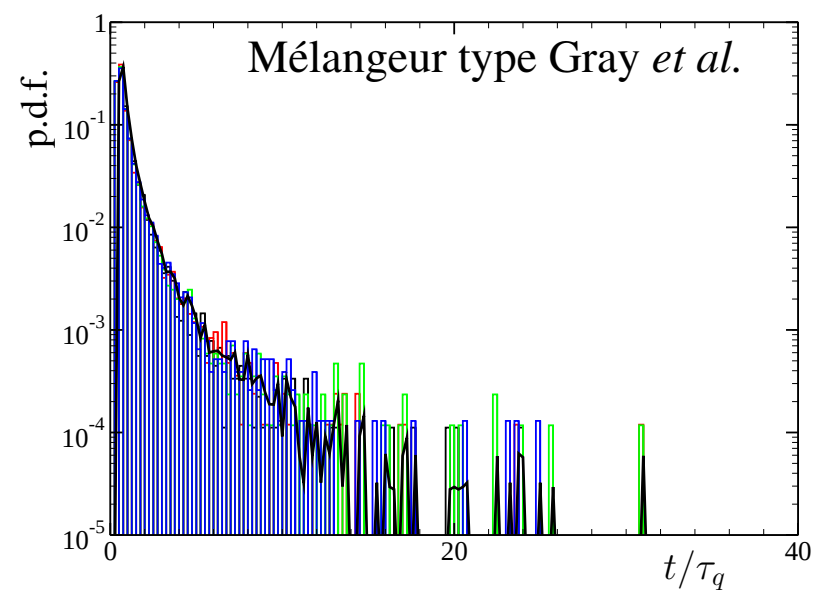
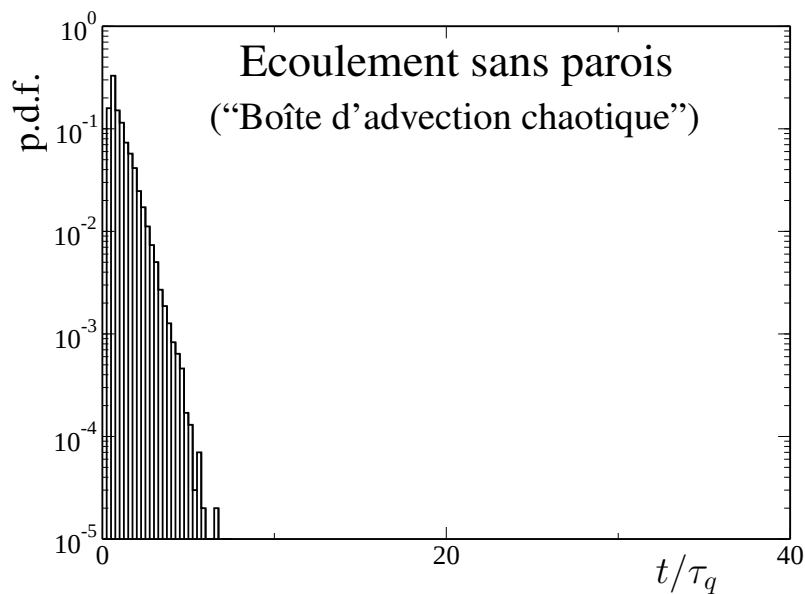


. Moins apparent dans le cas du Kenics :

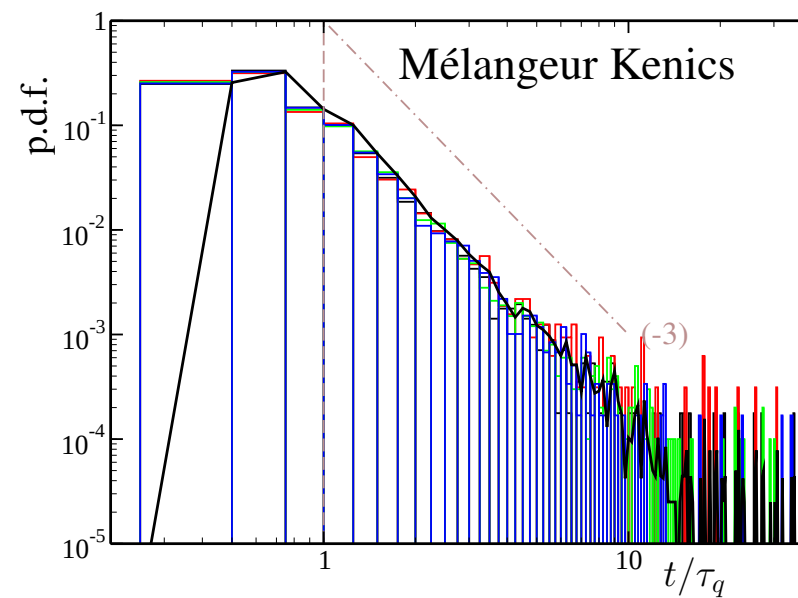
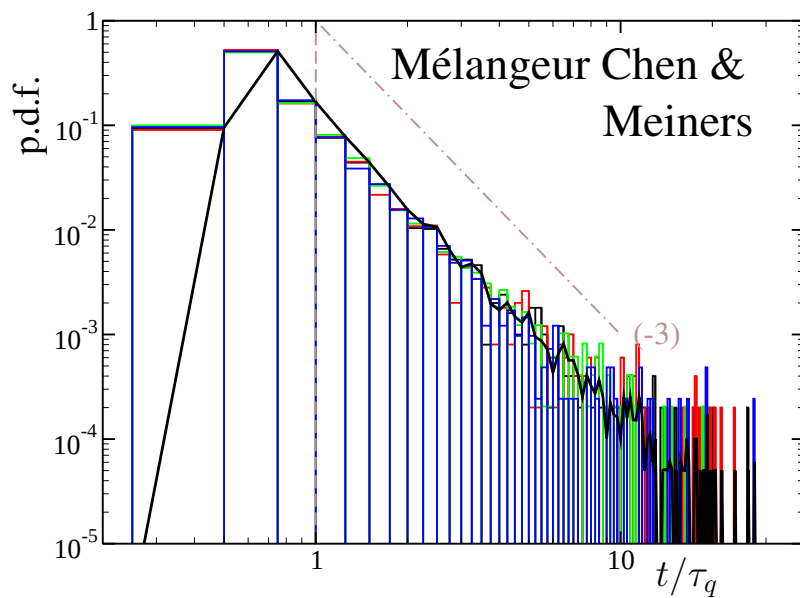
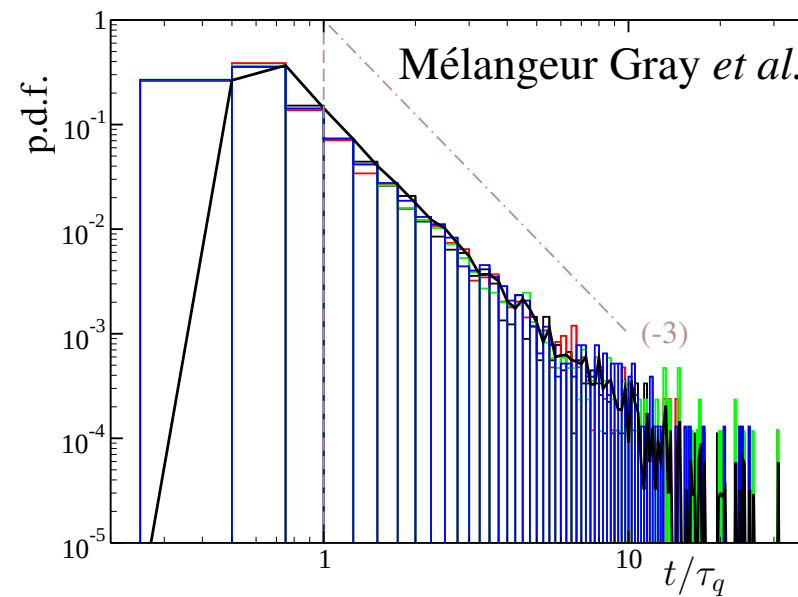
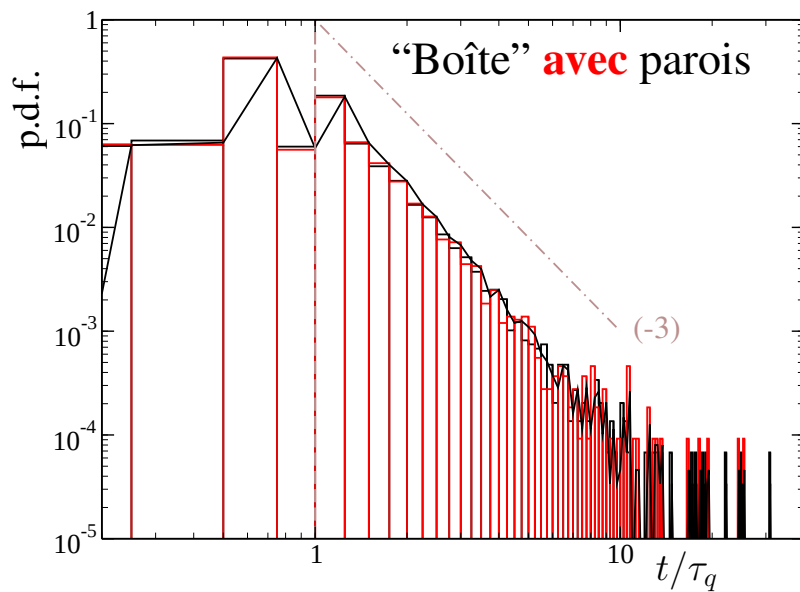


—→ *Meilleure brisure de symétrie en section circulaire*

. Visible quantitativement sur les temps de résidence :



. et sous une autre forme :



Il reste beaucoup à faire !

- Comportement des mélangeurs avec l'augmentation du nombre de Reynolds.

- L'étude précédente ne concerne qu'un mélange non diffusif.

Que se passe-t-il en présence de diffusion ?

Les caractérisations précédentes sont-elles suffisamment informatives ?

- L'analogie thermique/mélange d'espèce a ses limites :

- . Le nombre de Prandtl est généralement bien inférieur au nombre de Schmidt.

- . L'échange thermique est très sensible au comportement près des parois.

- . L'échange thermique implique également le fluide caloporteur.