

Journée Thématique de la Société Française de Thermique

*Journée d'échanges Université-Industrie
sur les Piles à Combustible et les Systèmes Pile à Combustibles*

4-5 Avril 2006

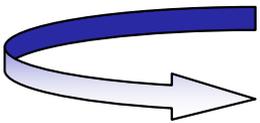
**Mini-échangeur de chaleur
pour le refroidissement
des plaques bipolaires de PEMFC**

B. Auvity, Y. Lasbet, C. Castelain & H. Peerhossaini

Laboratoire de Thermocinétique de Nantes (CNRS-UMR 6607)
Ecole Polytechnique de l'Université de Nantes

Pourquoi et comment refroidir un stack PEMFC?

Pourquoi? Si l'eau est produite sous forme de vapeur, théoriquement $E = 1,25V$

 Due aux irréversibilités, la pile délivre $V_c < E$

Puissance thermique dégagée par la pile : $P_{th} = n.I.(1,25 - V_c)$
 $= P_e.(1,25/V_c - 1)$ avec
 $V_c \sim 0,65V$

Autant de Watts thermique et électrique produits

Comment? Dépend de la puissance électrique délivrée par le stack :

- pour $P_e < 100W$, refroidissement par convection naturelle autour de la pile et par les flux de gaz internes.

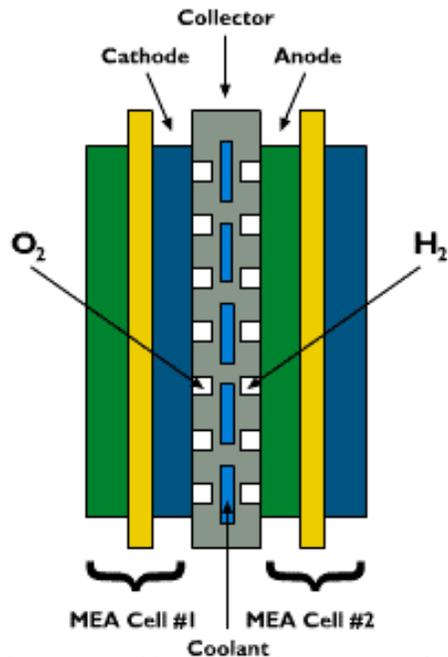
- pour $100W < P_e < 2-3kW$, nécessité d'un refroidissement additionnel par circulation forcée d'air de part et d'autre des plaques bipolaires

- pour $P_e > 5 kW$, refroidissement par eau indispensable

(possibilité de valoriser l'énergie thermique – système de cogénération)

Etat de l'art pour le refroidissement des stacks de puissance supérieure à 5 kW

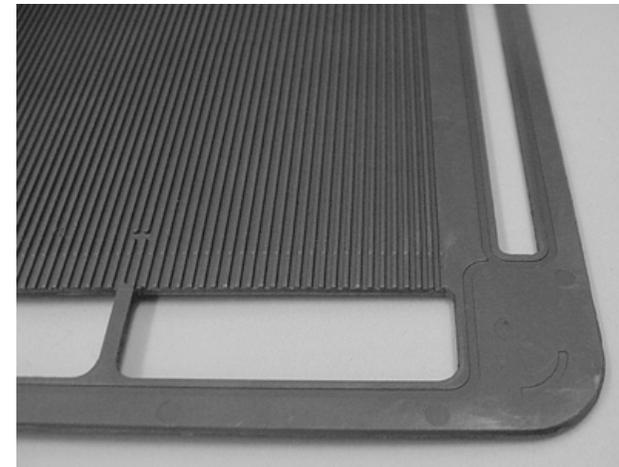
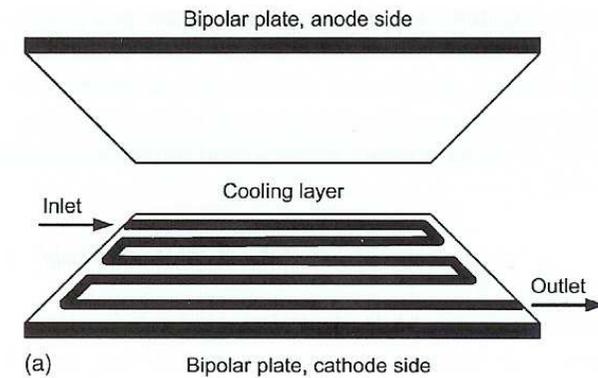
circuit de refroidissement intégré dans les plaques bipolaires de PEMFC



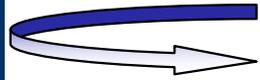
deux cellules élémentaires d'un stack de pile PEMFC séparées par une plaque bipolaire avec dispositif de refroidissement.

serpentin

Réseau de canaux droits



Revue bibliographique des études antérieures ou en cours



Une seule référence bibliographique à notre connaissance

S.M. Senn & D. Poulikakos – ETH Swiss Federal Institute of Technology Zurich

Journal of Power Sources, 130 (2004), 178-191

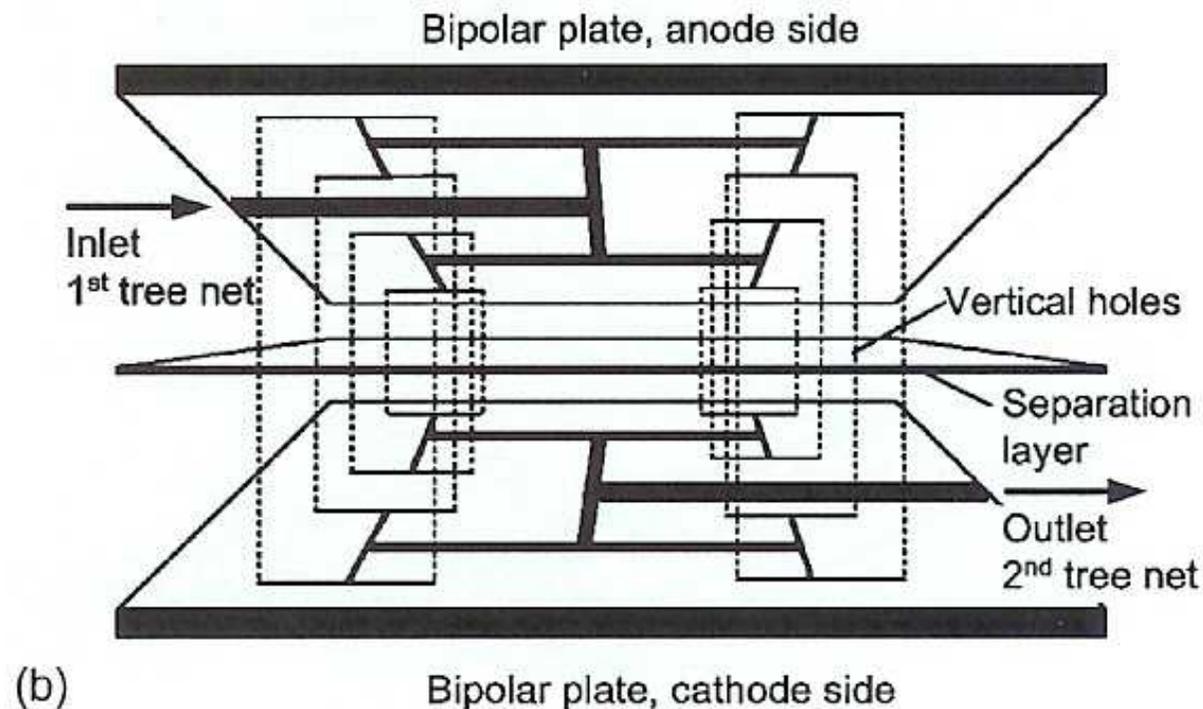


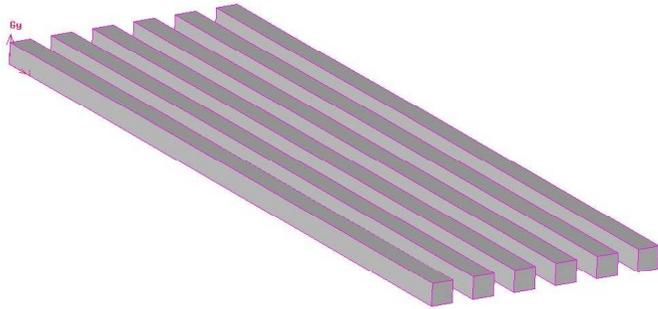
Schéma d'un réseau fractal d'après Senn&Poulikakos

Cahier des charges pour un échangeur thermique à insérer dans les plaques bipolaires

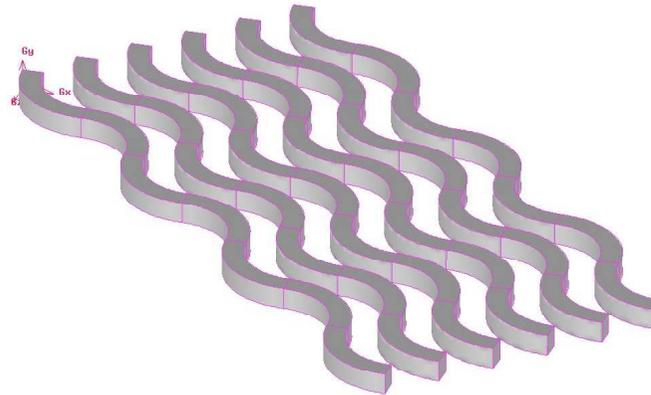
Au-delà d'une grande capacité d'échanges thermiques (intensification des transferts),
il faut :

- 1** - Assurer une bonne **homogénéité de température** sur la surface de la membrane
- 2** - Minimiser **l'épaisseur de l'échangeur** (résistivité électrique)
- 3** - Minimiser la **perte de charge** le long de l'échangeur
(efficacité globale du système pile)
- 4** - Travailler dans un régime d'écoulement **laminaire** – $Re \sim 200$.
- 5** - S'assurer d'une **réalisation relativement aisée** de l'échangeur
(coût et temps d'usinage)

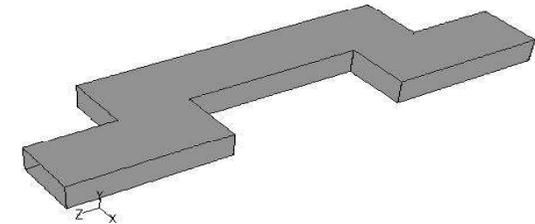
Géométries alternatives envisagées



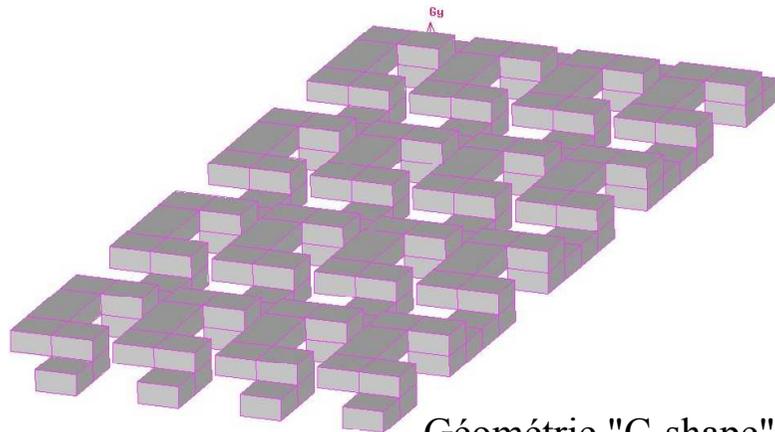
Géométrie "tube droit"



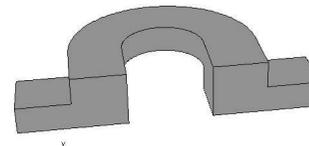
Géométrie "zig-zag 2D"



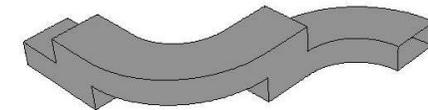
Géométrie "C-shape 2D"



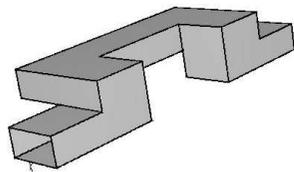
Géométrie "C-shape"



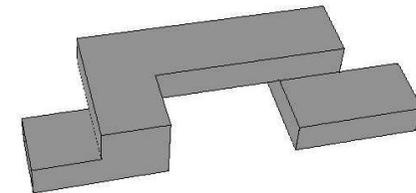
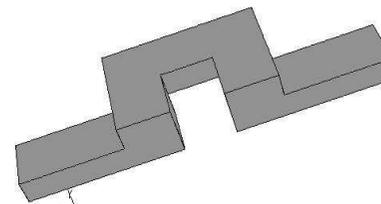
Géométrie "U-shape"



Géométrie "zig-zag 3D"



Géométrie "C-shape compact"



Géométrie "L-shape"

Présentation du calcul numérique

-Résolution des **équations de Navier-Stokes** et de l'**énergie** à l'aide du solveur généraliste Fluent en régime d'écoulement laminaire pour un **mono-canal**

Problème **thermique**

-Conditions de flux aux parois imposées

$$\phi = 10\,000 \text{ W/m}^2$$

-Evaluation du nombre de Nusselt local:

$$Nu = \frac{\phi}{T_m - T_p} \cdot \frac{D_h}{\lambda}$$

avec T_m , température de mélange

T_p , température de paroi

λ , conductivité thermique du fluide

D_h , diamètre hydraulique

Problème **hydrodynamique**

-Conditions en entrée : écoulement hydrodynamiquement établi avec

$$Re = 200$$

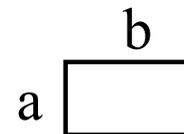
-Evaluation du coefficient de frottement:

$$f = -\left(\frac{dp}{ds}\right) \cdot \frac{D_h}{\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot U_m^2}$$

avec s , abscisse curviligne

$$U_m, \text{ vitesse débitante : } U_m = \frac{1}{A_c} \cdot \iint_{A_c} u \cdot dA_c$$

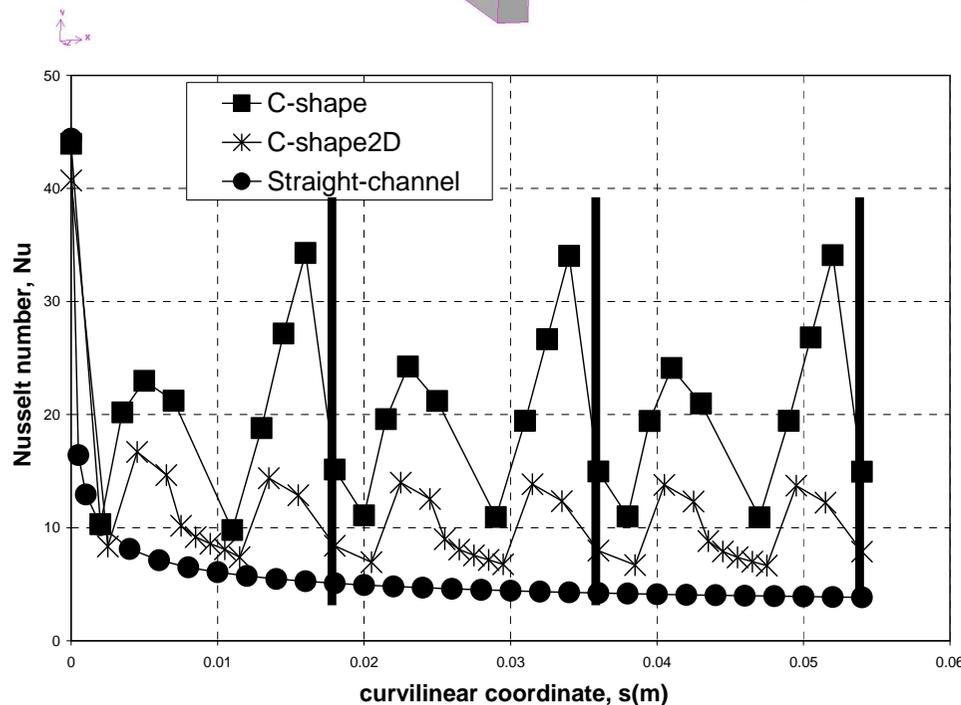
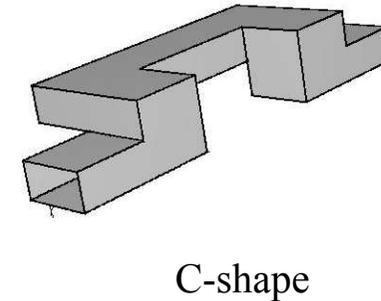
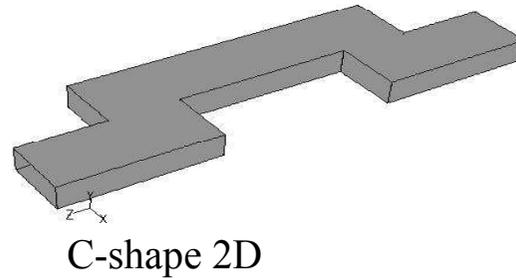
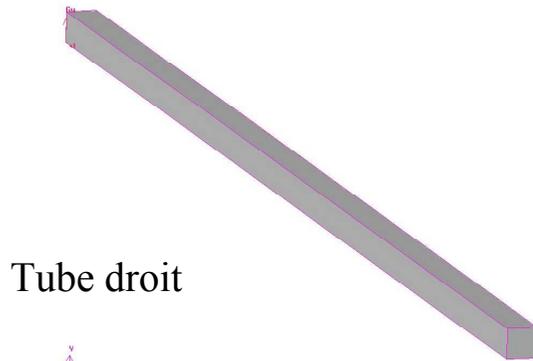
-Pour toutes les géométries considérées, même diamètre hydraulique : $D_h = 1,33 \text{ mm}$



$$a = 1 \text{ mm}; b = 2 \text{ mm}$$

Résultats thermiques

Comparaison des performances thermiques du tube droit, du "C-shape-2D" et du "C-shape"

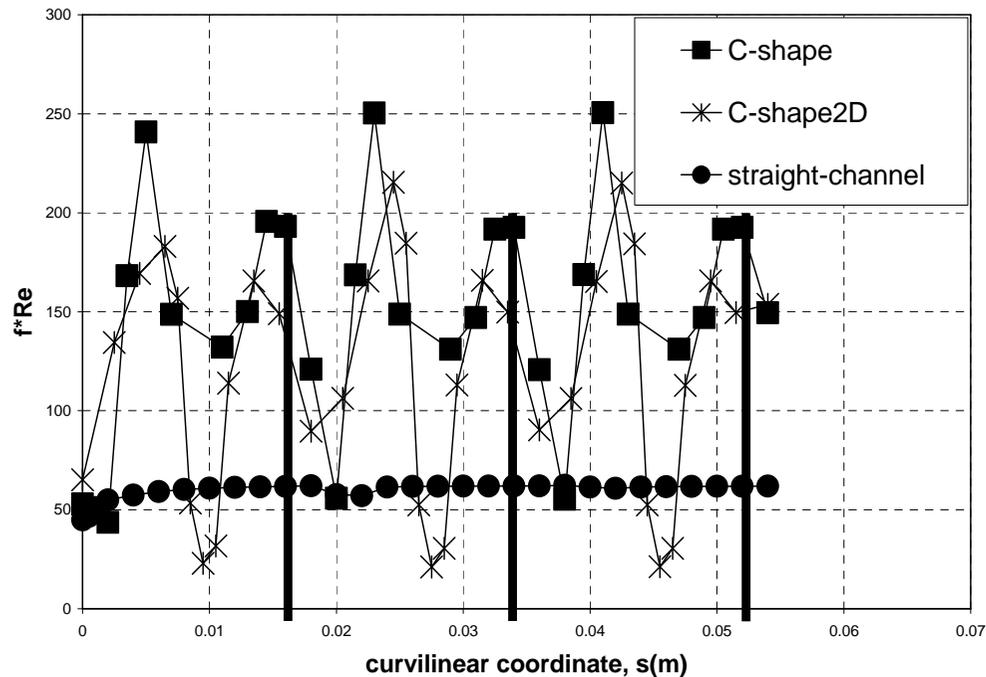


Evolution de Nu en fonction de s

- Grande intensification des transferts avec le "C-shape"
- La perturbation élémentaire en est responsable
- La signature thermique est périodique comme la géométrie.

Résultats hydrodynamiques

Comparaison des pertes de charges du tube droit, du C-shape 2D et du "C-shape"



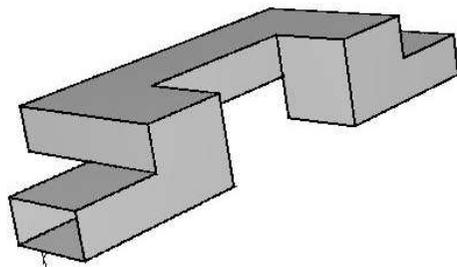
Evolution de $f \cdot Re$ en fonction de s

- Tube droit : validation du code
- La perte de charge la plus forte est obtenue pour le "C-shape"

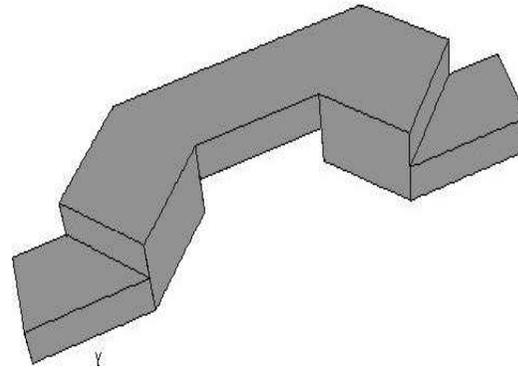


Résultats encourageants et pertinents dans un objectif de refroidissement des Piles à Combustible

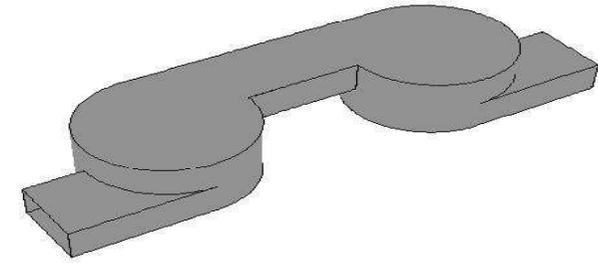
Géométries 3D retenues



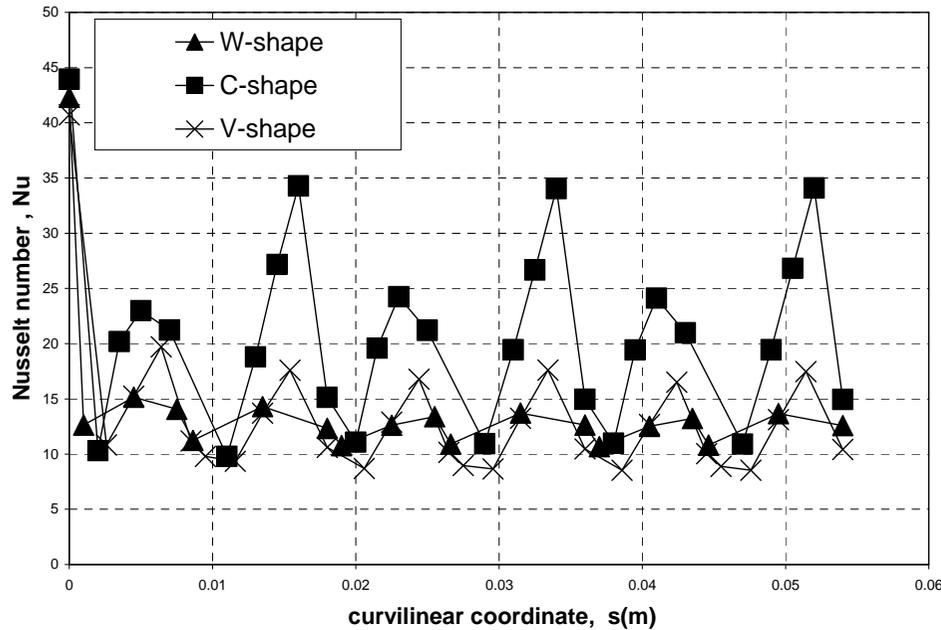
C-shape



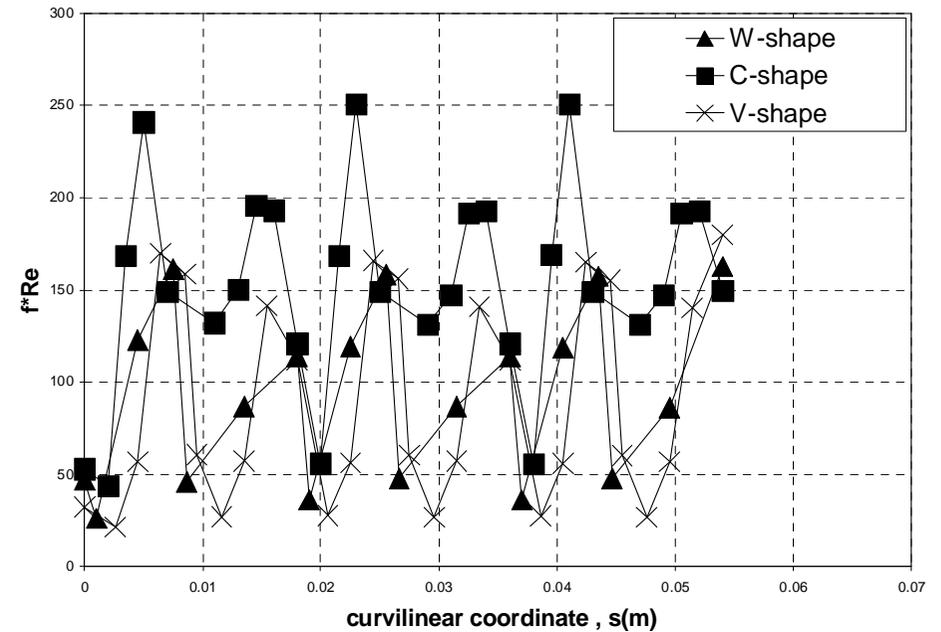
V-shape



W-shape



Evolution de Nu en fonction de s



Evolution de $Po = f \cdot Re$ en fonction de s

Classification des géométries

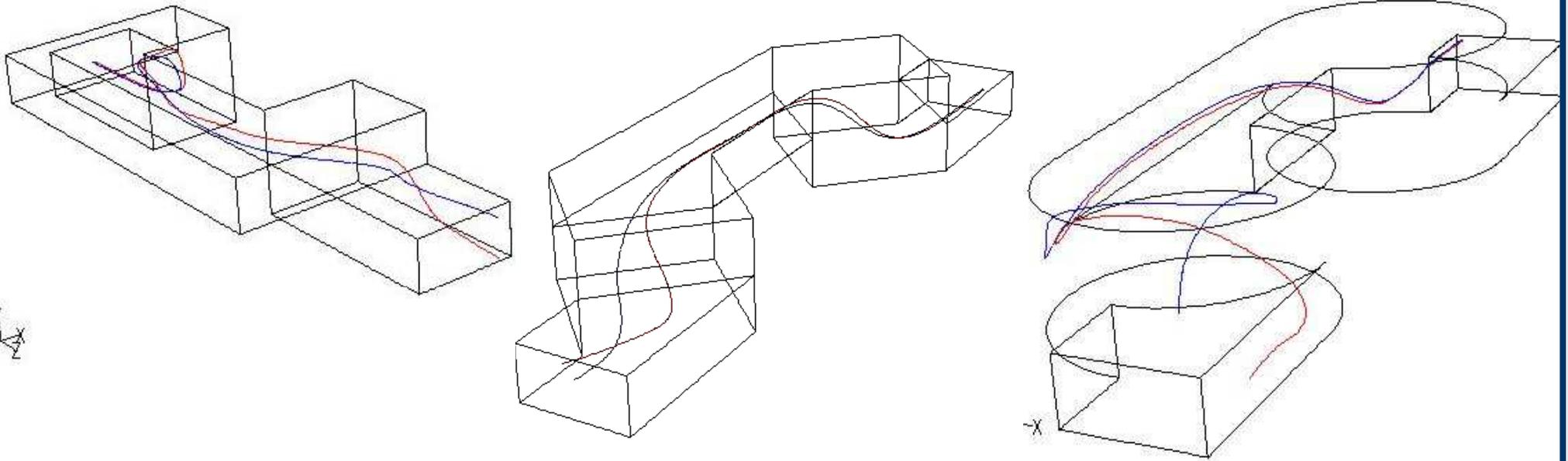
	Nusselt, Nu	Poiseuille, $Po = f.Re$	Po/Nu
Straight channel	3.0	62	20.7
C-Shape2D	11.0	126	11.5
C-shape	20.0	160	8
W-shape	13.0	93	7.2
V-shape	13.1	89	6.8

Comparaison du nombre de Nusselt moyen, du nombre de Poiseuille et du rapport Po/Nu pour les géométries retenues

Mise en évidence du chaos dans les géométries 3D

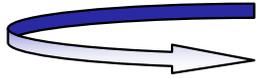
Un système peut être qualifié de chaotique si une des trois conditions suivantes est remplie:

- sensibilité aux conditions initiales (calcul de l'exposant de Lyapunov),
- production de mécanisme cinématique d'étirement et de repliement
- production d'intersections homocline ou hétérocline .



Trajectoires de deux particules initialement proche dans les géométries C-Shape, V-Shape et W-shape

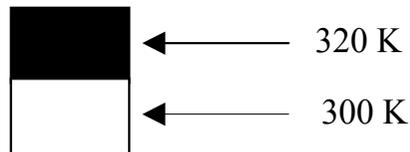
Mélange thermique



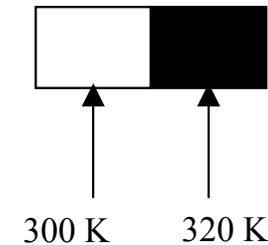
Motivation : Quantifier l'homogénéité en température dans les canaux.

Procédure numérique employée : - résolution des **équations de NS** et de l'**énergie**
- conditions aux limites : parois **adiabatiques**
- deux conditions d'entrée dans le canal:

Injection horizontale



Injection verticale



Caractérisation de l'homogénéité par le **calcul du degré de mélange** dans des sections droites de l'écoulement:

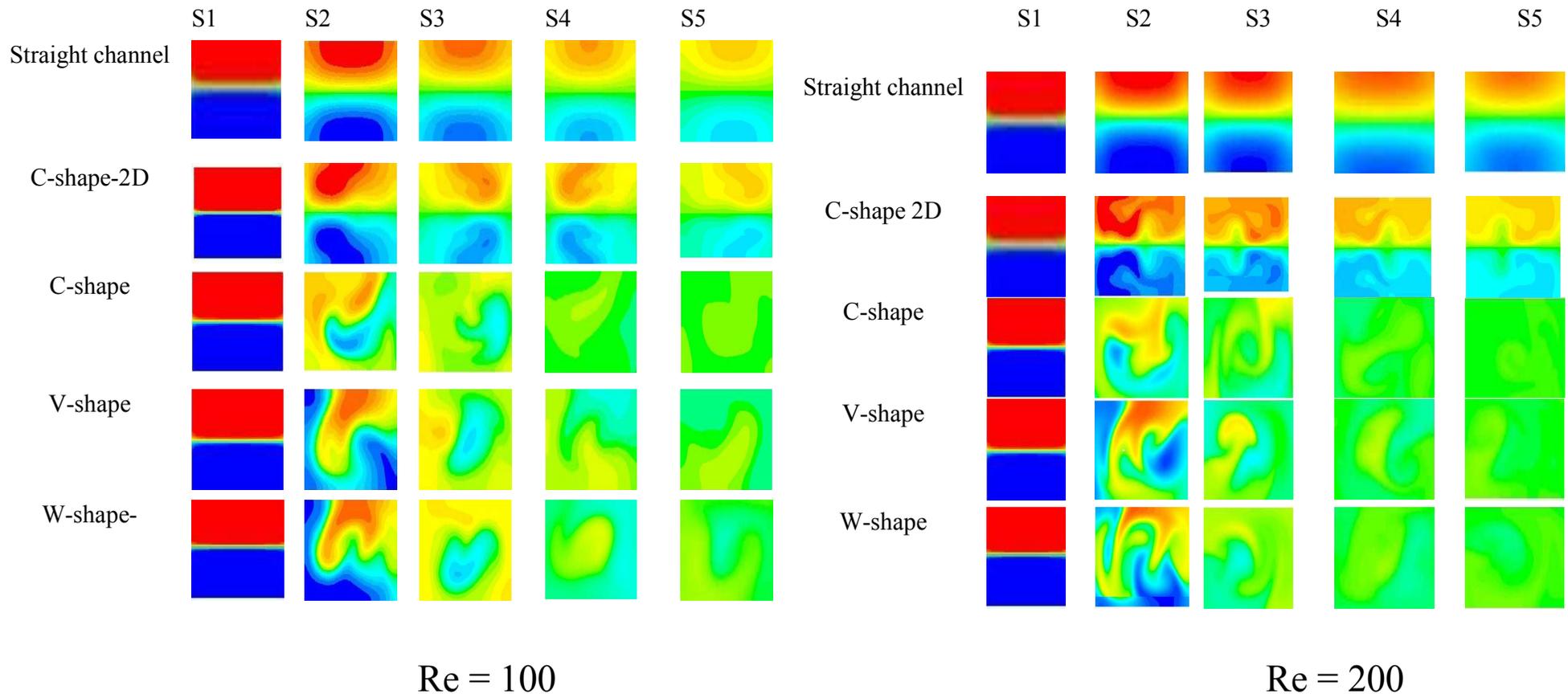
$$D = 1 - \left(\frac{\sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (T_i - 310.)^2}}{D_0} \right)$$

$D = 0$ à l'entrée du domaine de calcul

$D = 1$ homogénéité totale

Résultats qualitatifs du mélange thermique

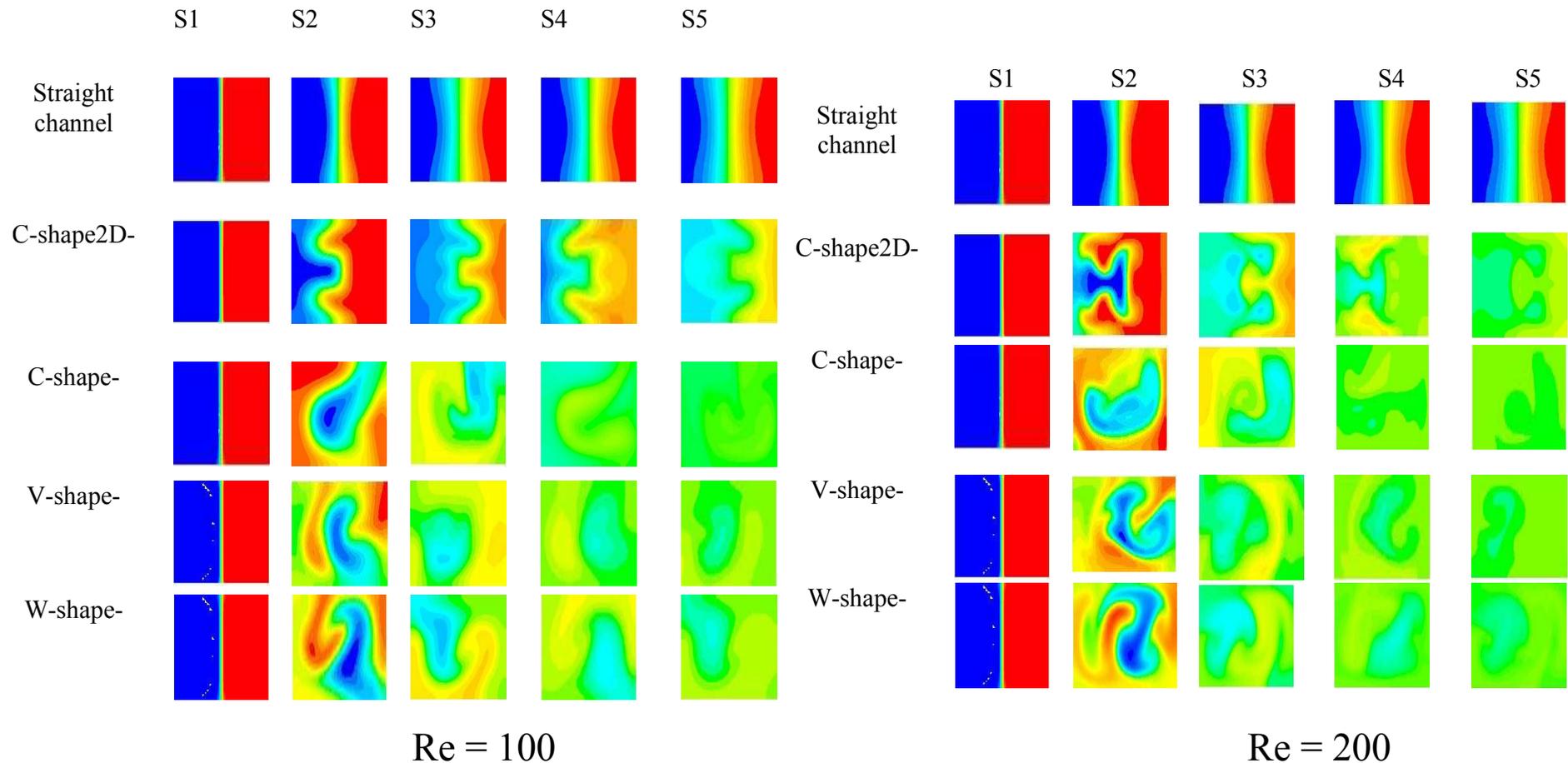
Injection horizontale



Comparaison du mélange pour les différentes géométries
à l'issue de chaque période
pour deux nombres de Reynolds

Résultats qualitatifs du mélange thermique

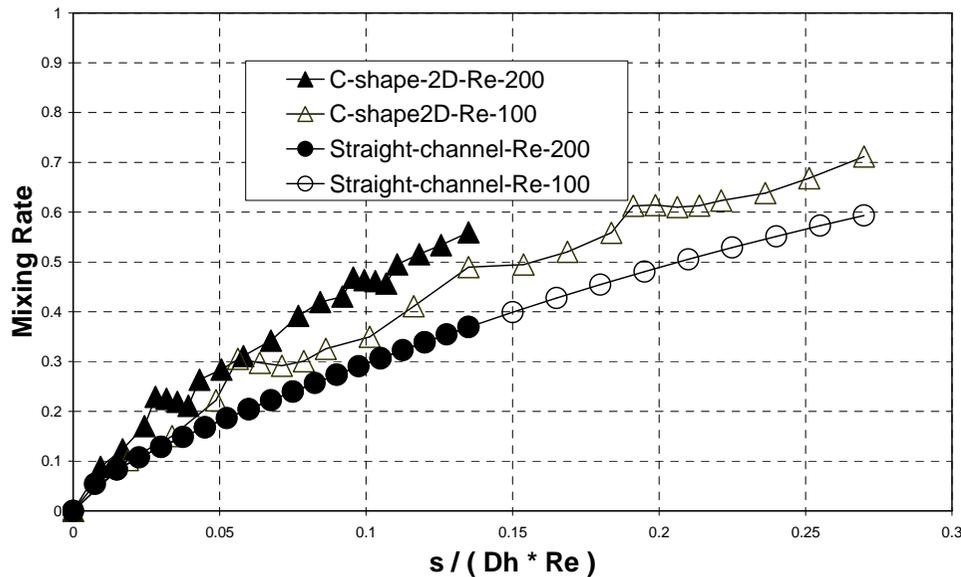
Injection verticale



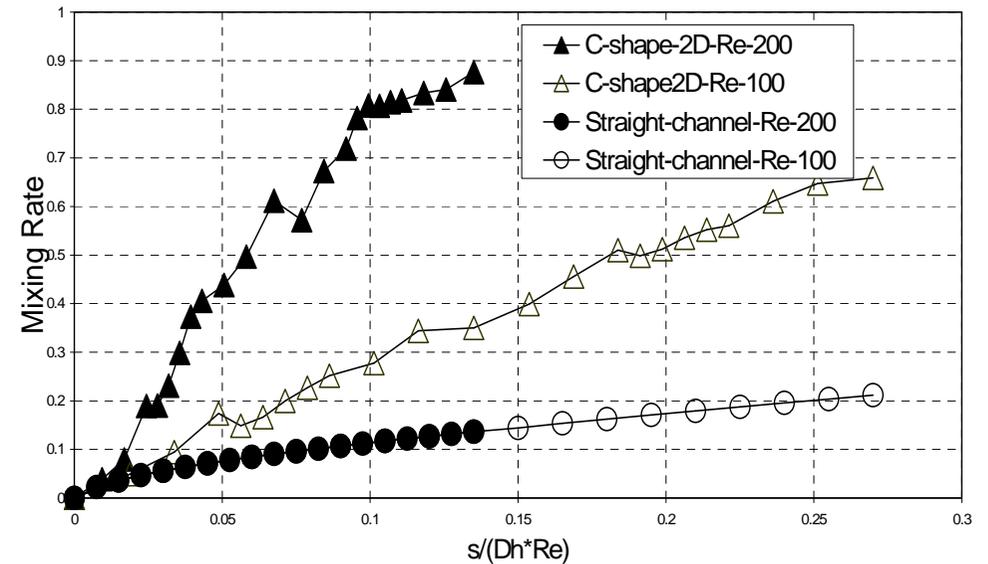
Comparaison du mélange pour les différentes géométries
à l'issue de chaque période
pour deux nombres de Reynolds

Résultats quantitatifs du mélange thermique

Comparaison injection horizontale-verticale



Injection horizontale

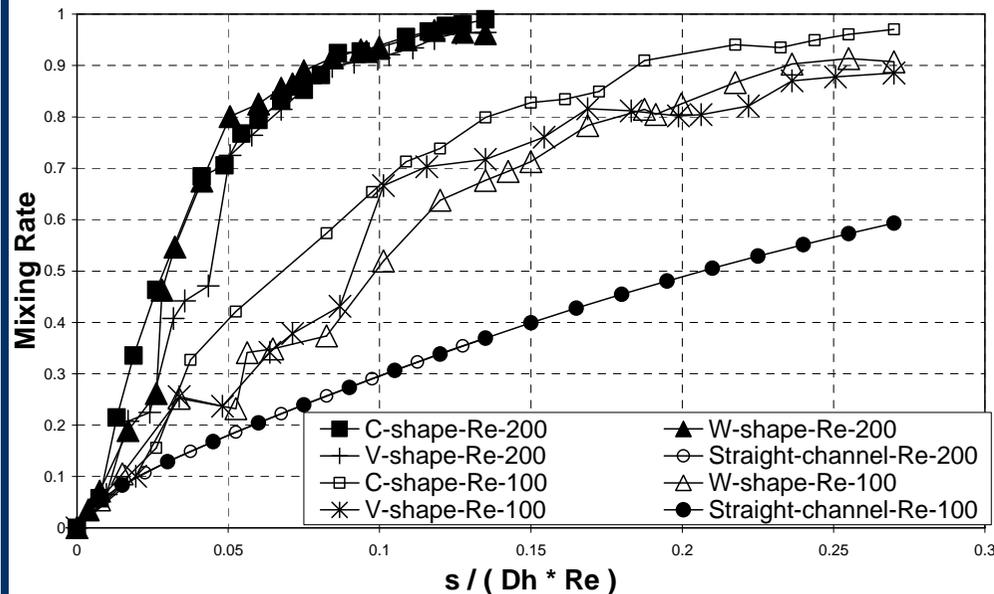


Injection verticale

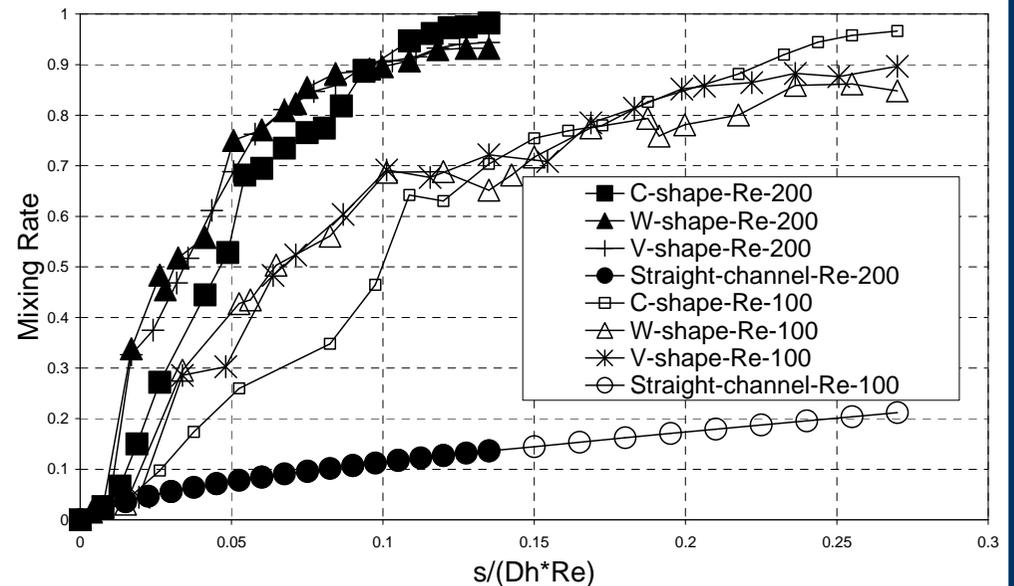
Evolution du degré de mélange en fonction du temps de séjour adimensionné, $s / (D_h * Re)$, pour le tube de droit et le C-shape 2D pour $Re = 100$ et $Re = 200$

Résultats quantitatifs du mélange thermique

Comparaison injection horizontale-verticale



Injection horizontale



Injection verticale

Evolution du degré de mélange en fonction du temps de séjour adimensionné, $s / (Dh * Re)$, pour les géométries 3D chaotiques pour $Re = 100$ et $Re = 200$

Conclusions et perspectives

– CONCLUSIONS :

- Des géométries de canaux 3D chaotiques présentant d'excellentes performances thermiques ainsi qu'une très bonne efficacité (compromis transfert de chaleur/ perte de charge) ont été identifiées.
- Elles permettent également d'assurer une très bonne homogénéité en température du fluide.

– TRAVAUX EN COURS :

- Caractérisation de l'efficacité avec un autre critère que Po/Nu
(production d'entropie d'origine thermique et d'origine mécanique,...)
- Calcul couplé conduction-convection
- Réalisation d'un prototype expérimental d'échangeur en approche "*hors pile*";

– PERSPECTIVES :

- Distribution de l'hydrogène coté anode (homogénéité, pb perte de charge/consommation)
- Distribution de l'air côté cathode (évacuation de l'eau produite)

Calcul couplé conduction-convection

