



Intensification du mélange et des transferts thermiques par la vorticité

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

*LTN - Laboratoire de Thermocinétique de Nantes
CNRS UMR 6607*

Journée SFT «  changeurs thermiques et multi-fonctionnels » 16 Mars 2011

Plan de l'exposé

I. Écoulement turbulent en présence de vorticité

II. Intensification du mélange par la vorticité

III. Intensification des transferts par la vorticité

III.1 Transferts thermiques

III.2 Critères d'intensification des transferts

III.3 Critères d'efficacité énergétique

Conclusions et perspectives

Plan de l'exposé

I. Écoulement turbulent en présence de vorticité

II. Intensification du mélange par la vorticité

III. Intensification des transferts par la vorticité

III.1 Transferts thermiques

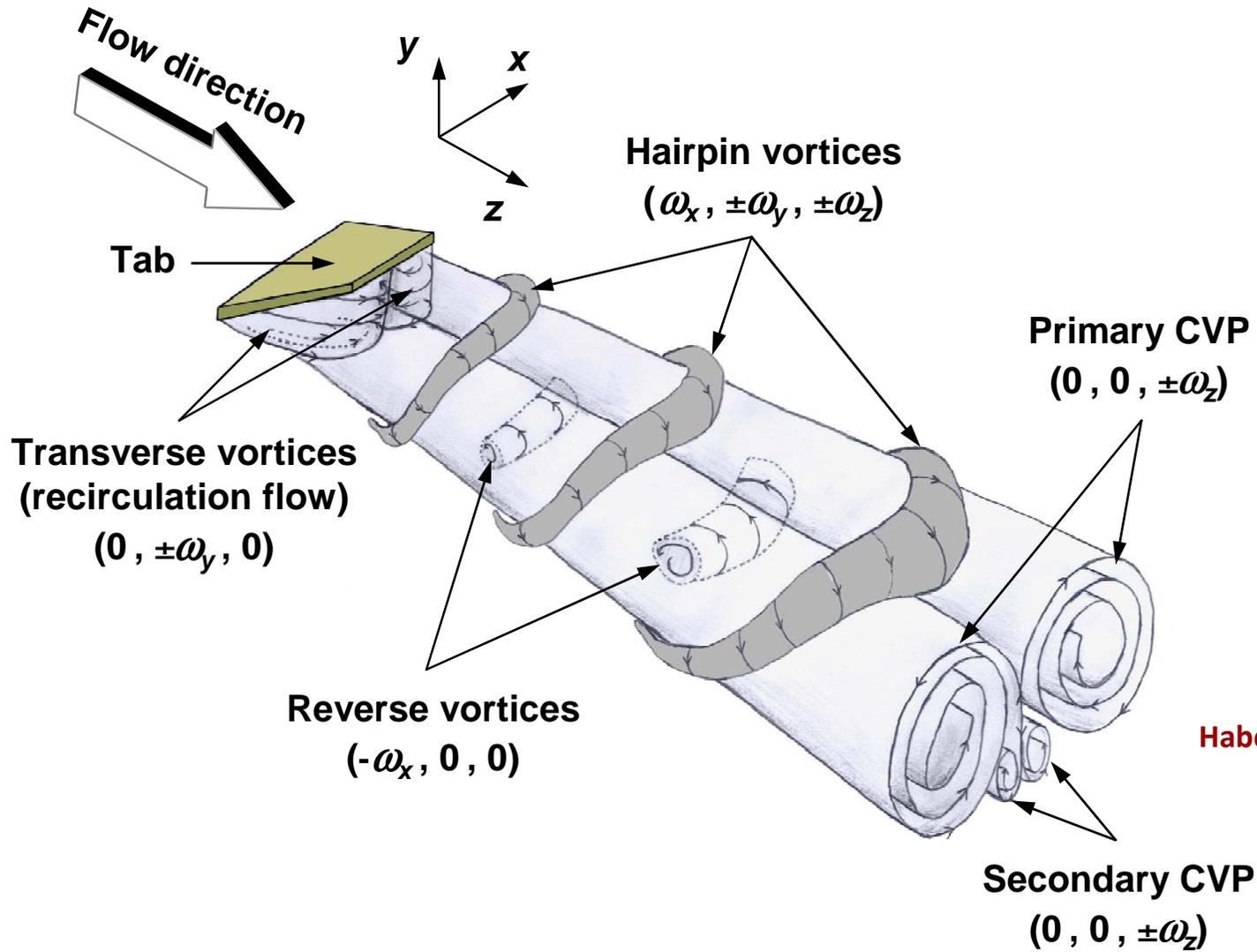
III.2 Critères d'intensification

III.3 Critères d'efficacité énergétique

Conclusions et perspectives

I. Écoulement turbulent en présence de vorticité

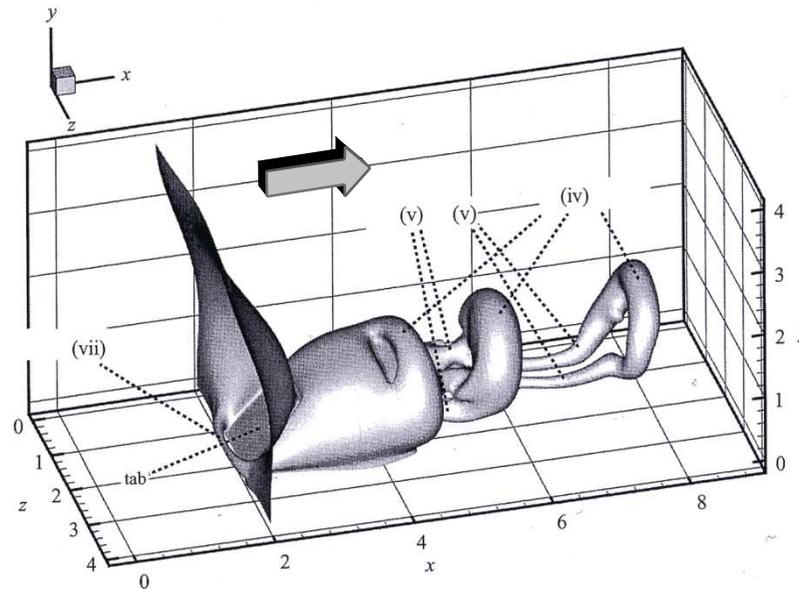
 coulement en aval d'un générateur de vorticité



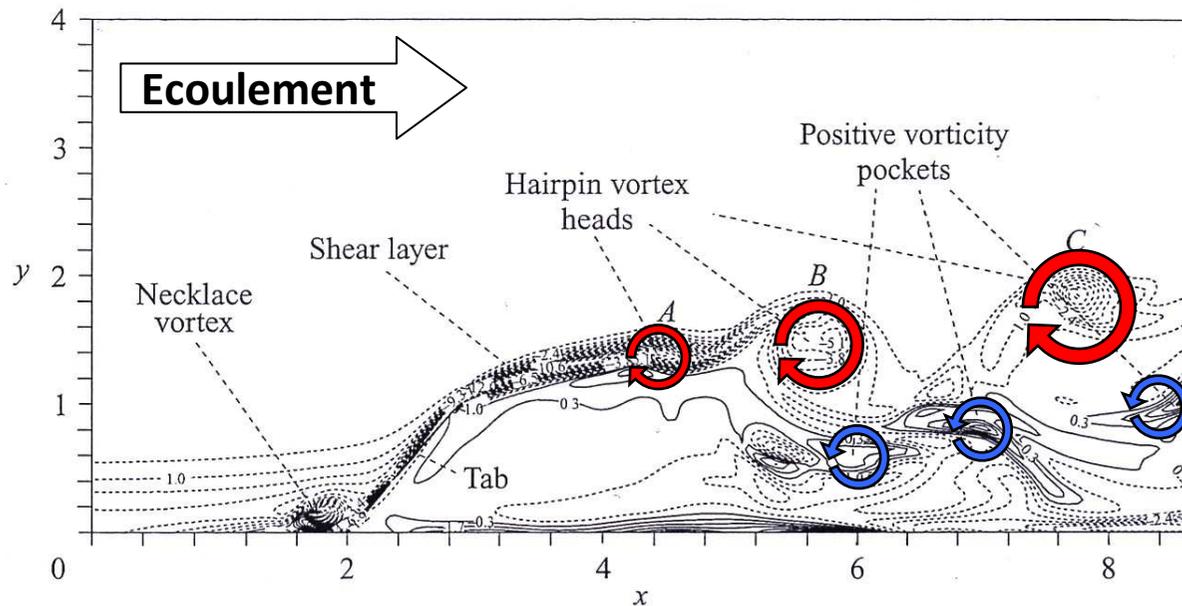
Habchi *et al.*, JoT (2010)

I. Écoulement turbulent en présence de vorticité

Hairpins et structures inverses

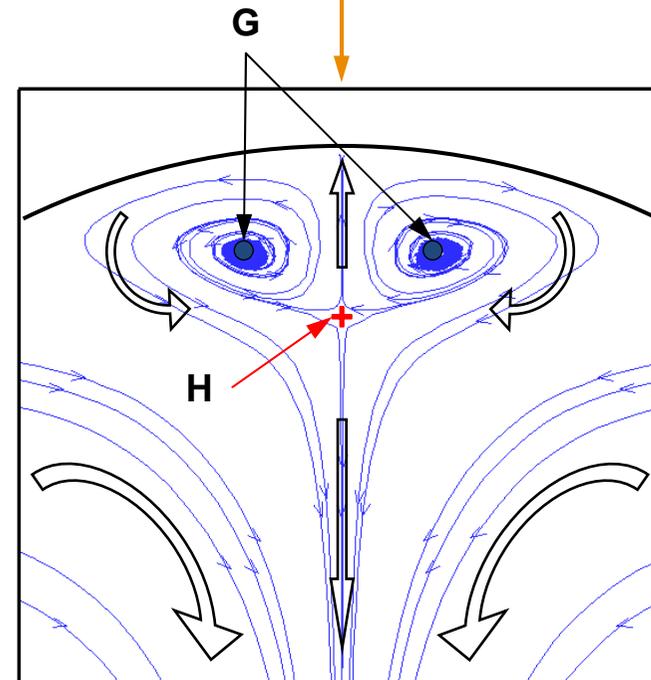
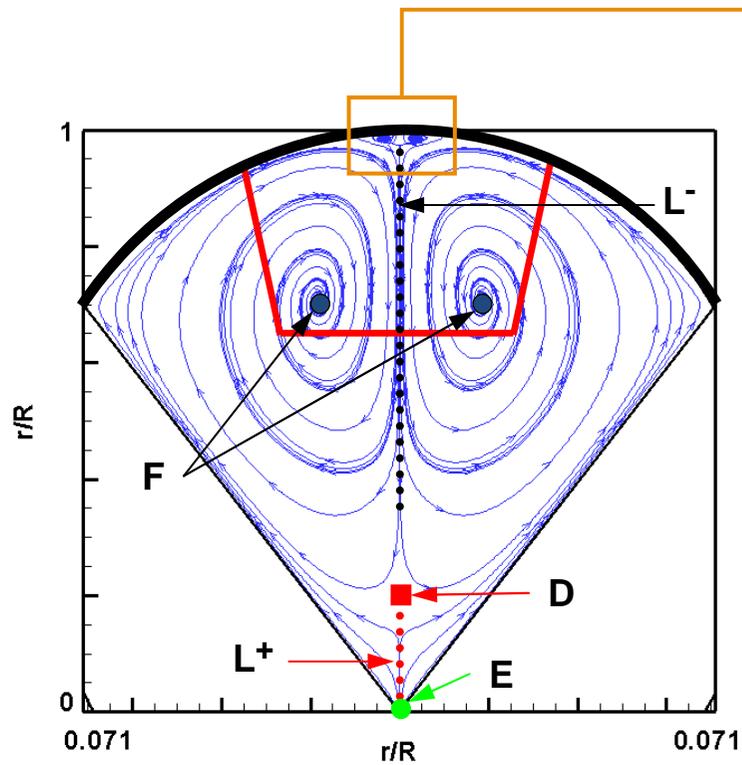
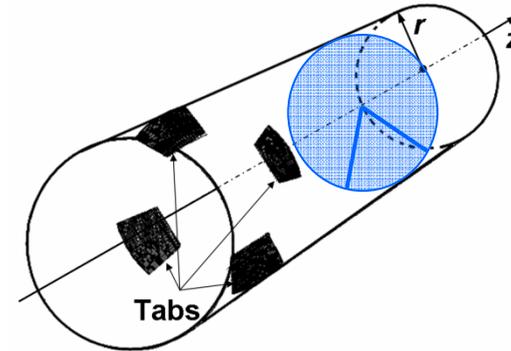
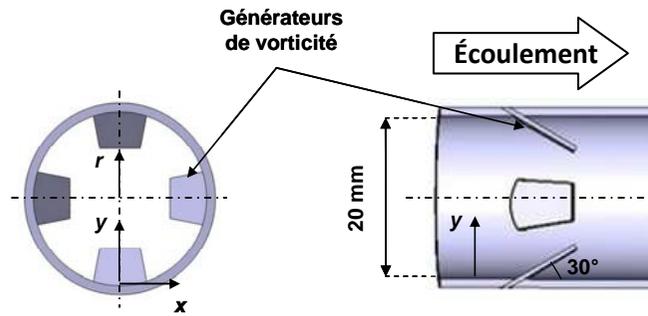


Dong et Meng, JFM (2004)
Yang et al., EF (2001)



I. Écoulement turbulent en présence de vorticité

Paire de Tourbillons Contrarotatifs (PTC)



Plan de l'exposé

I. Écoulement turbulent en présence de vorticité

II. Intensification du mélange par la vorticité

III. Intensification des transferts par la vorticité

III.1 Transferts thermiques

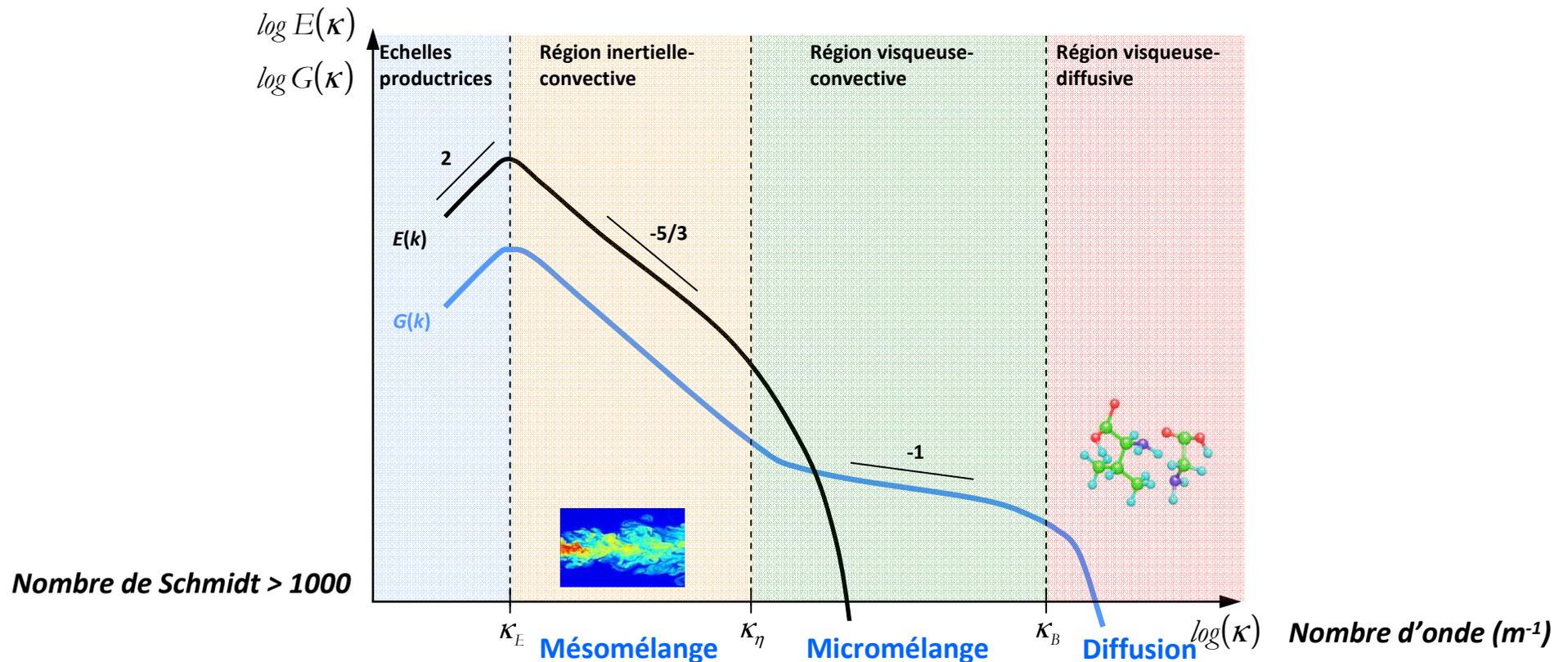
III.2 Critères d'intensification

III.3 Critères d'efficacité énergétique

Conclusions et perspectives

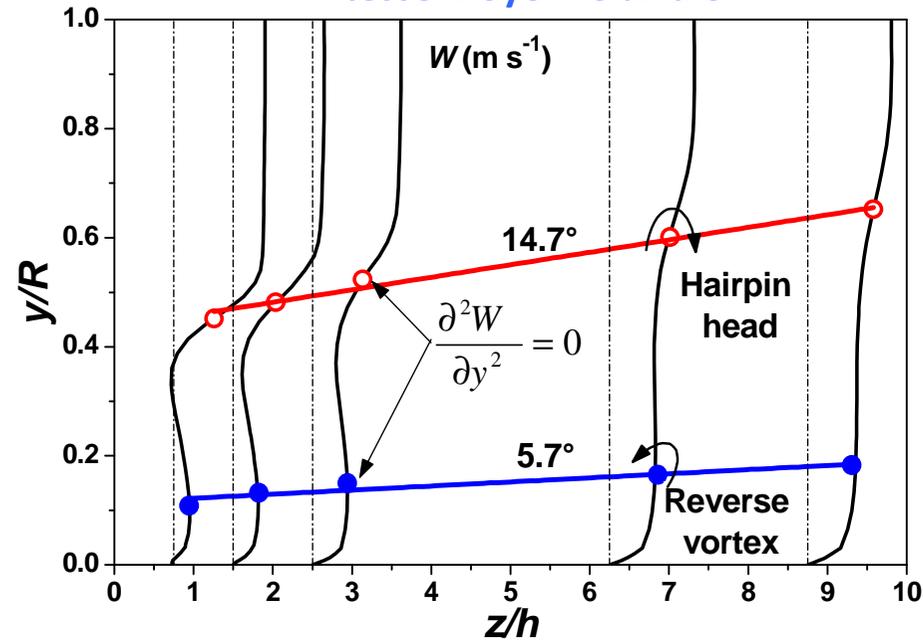
Échelles de mélange

- **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

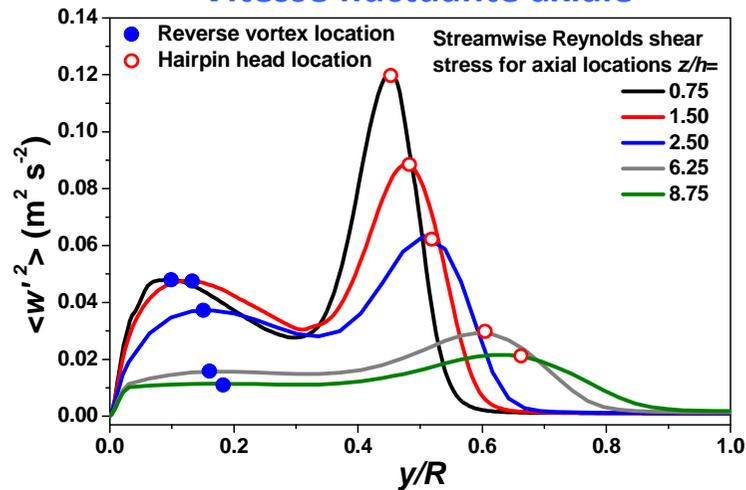


Méso et micromélange par les structures cohérentes

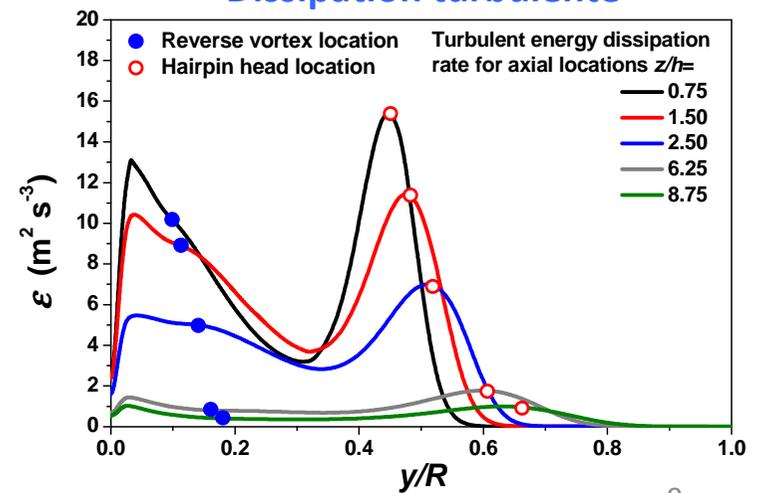
Vitesse moyenne axiale



Vitesse fluctuante axiale

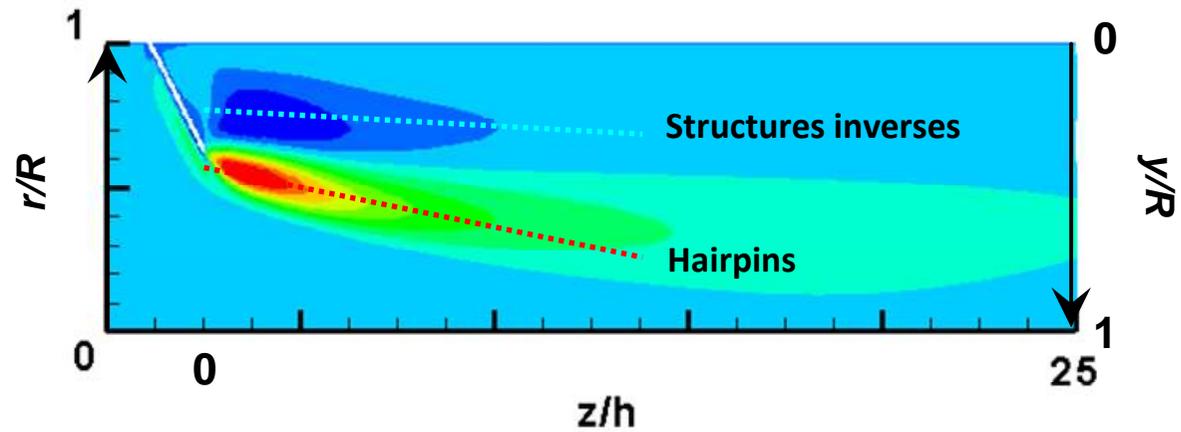
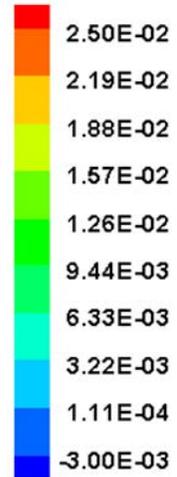


Dissipation turbulente

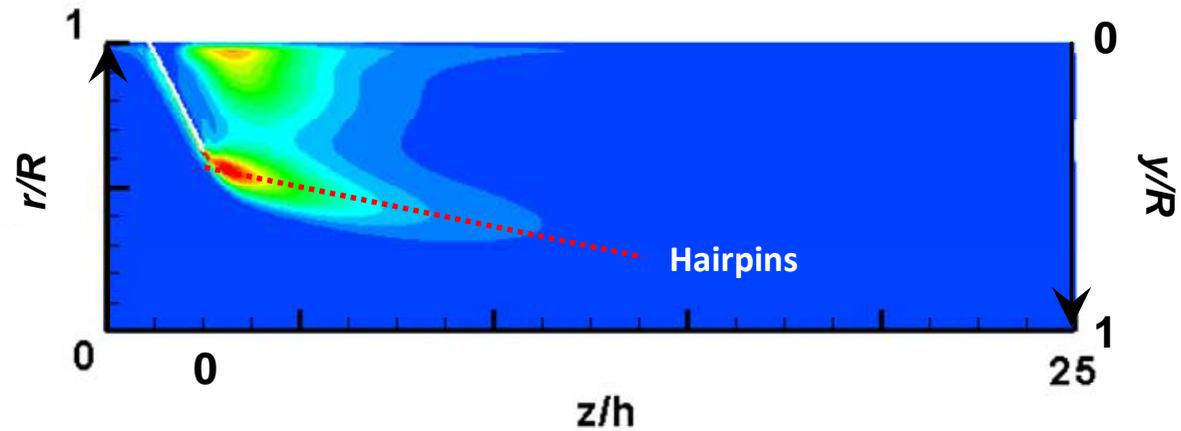
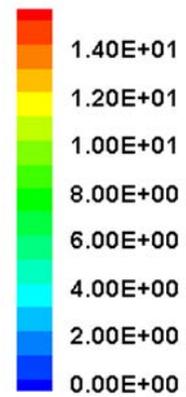


Méso et micromélange par les structures cohérentes

$$\langle v' w' \rangle \quad (\text{m}^2 \text{s}^{-2})$$



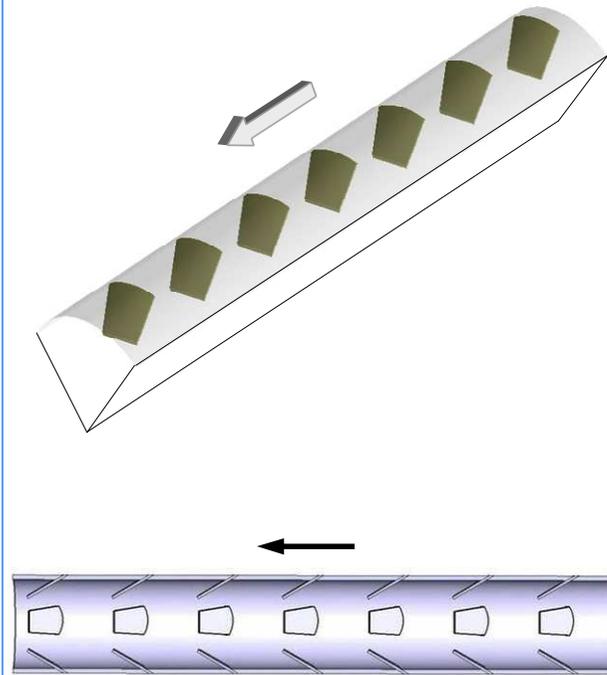
$$\varepsilon \quad (\text{m}^2 \text{s}^{-3})$$



Trois géométries étudiées

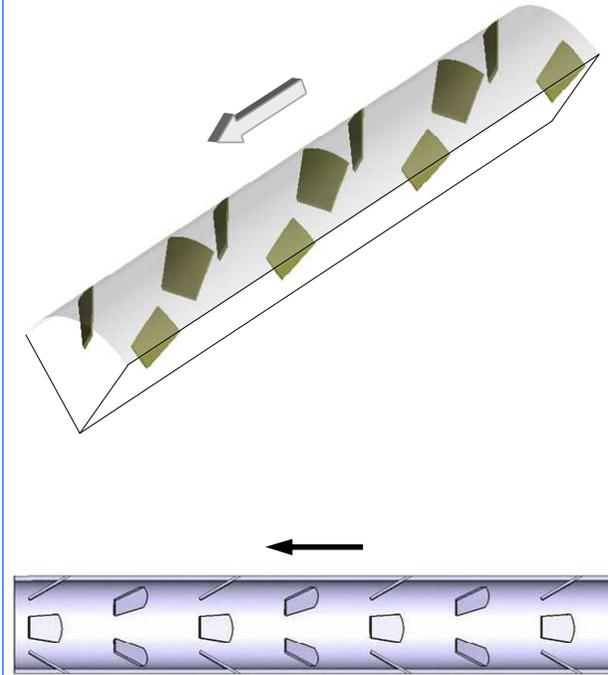
Alignées

Rangées alignées sens direct



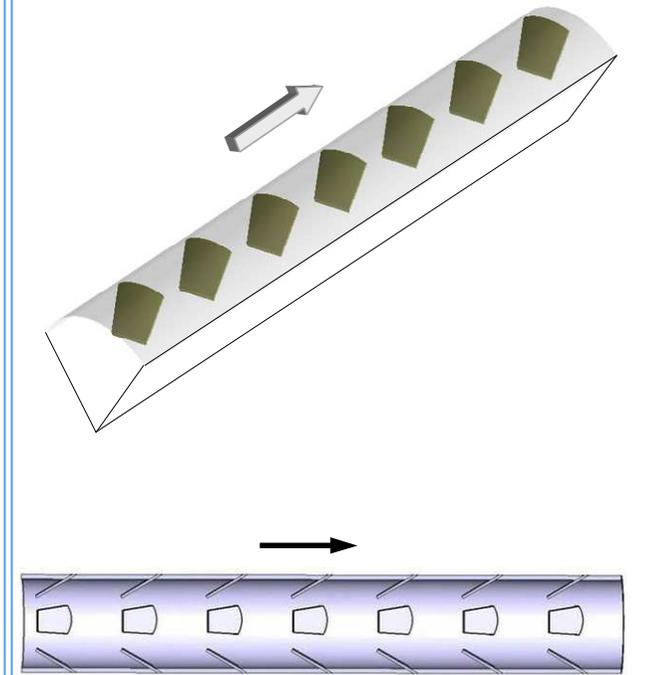
Alternées

Rangées décalées sens direct



Inversées

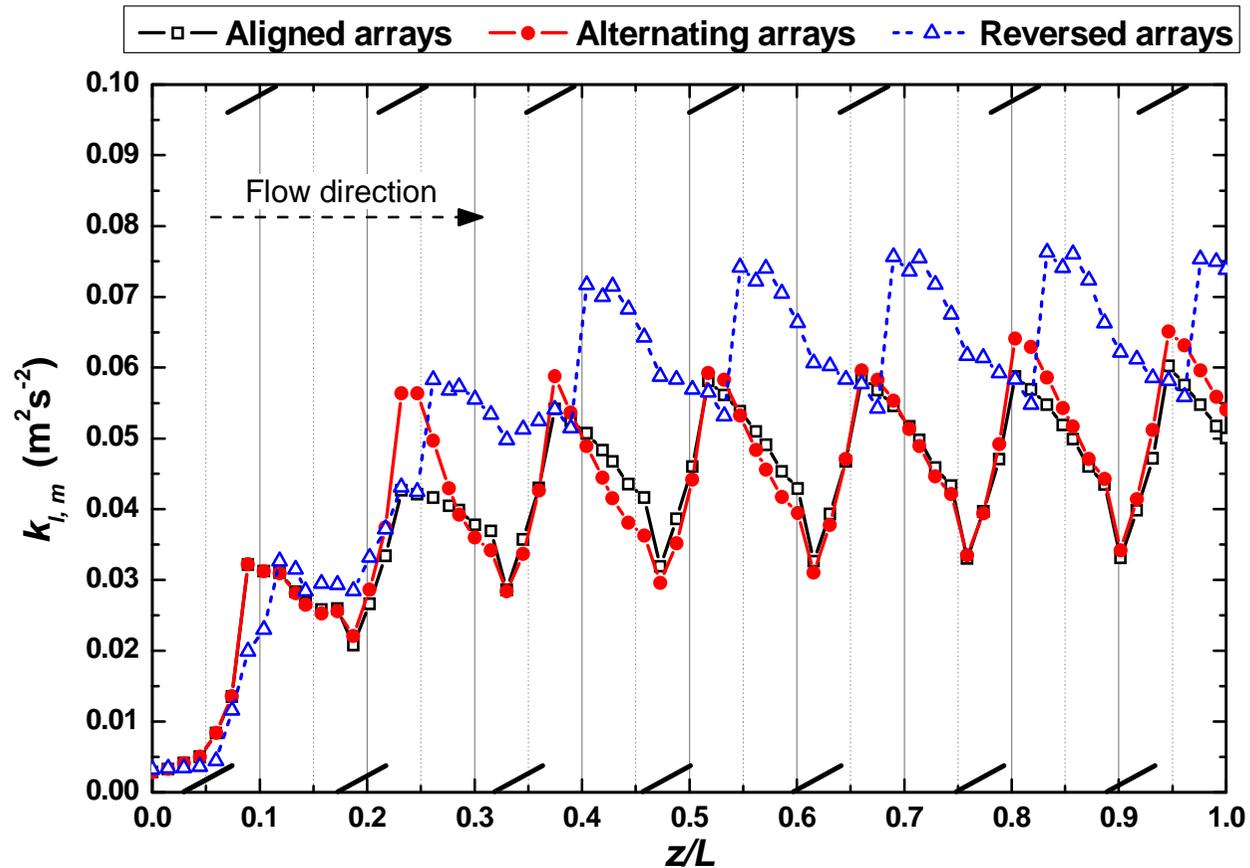
Rangées alignées sens inverse



- Modèle de turbulence : RSM **Launder *et al.*, JFM (1975)**
- Conditions aux limites thermiques : paroi à température imposée $T_w = 360$ K
- Quatre nombres de Reynolds de 7500 à 15000

Méso mélange (contrôlé par la TKE)

k : TKE moyennée sur la section



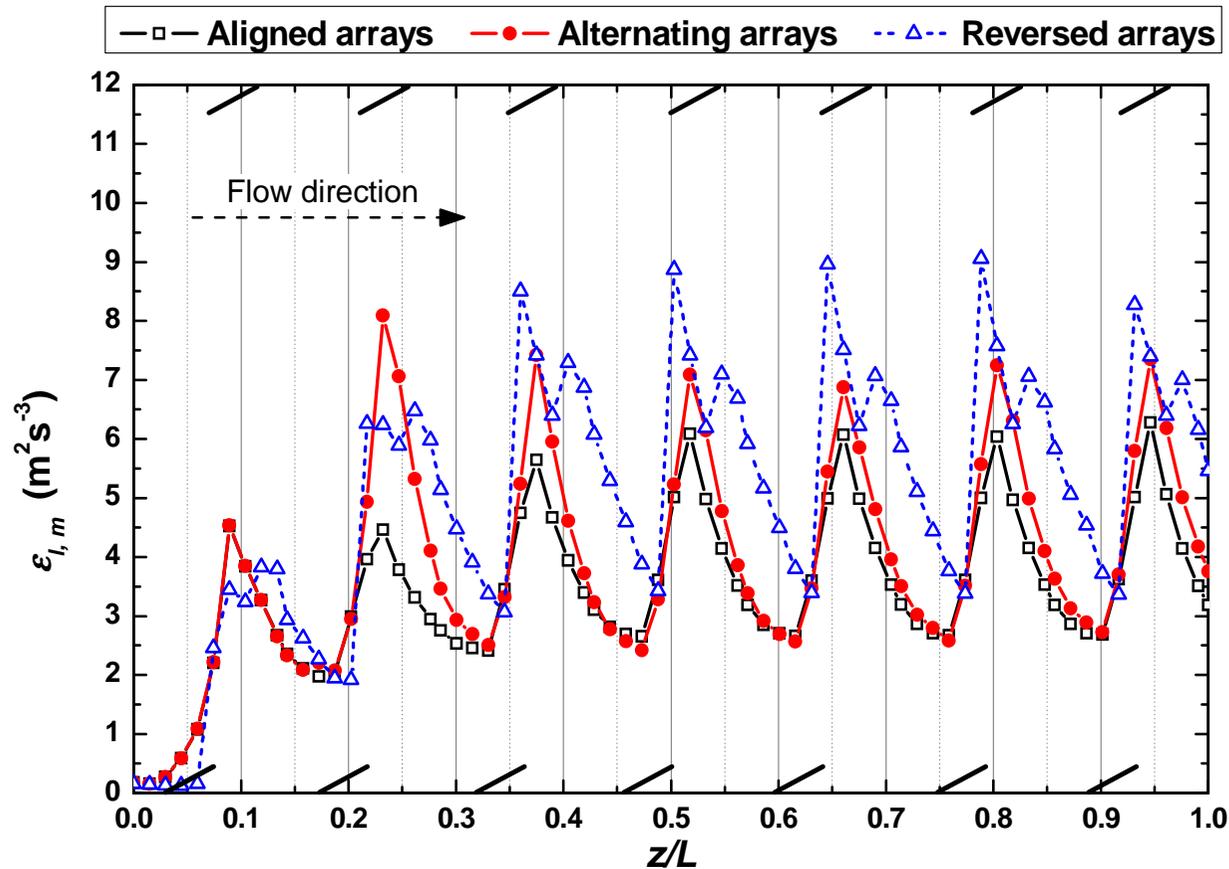
Intensification de la turbulence par rapport aux rangées alignées

+ 8% pour rangées alternées

+ 27% pour rangées inversées

Micromélange (contrôlé par ε)

ε : taux de dissipation de la TKE moyennée sur la section



Intensification de la turbulence par rapport aux rangées alignées

+ 33% pour rangées alternées

+ 49% pour rangées inversées

Plan de l'exposé

I. Écoulement turbulent en présence de vorticité

II. Intensification du mélange par la vorticité

III. Intensification des transferts par la vorticité

III.1 Transferts thermiques

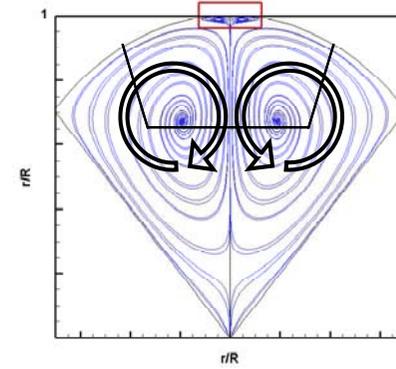
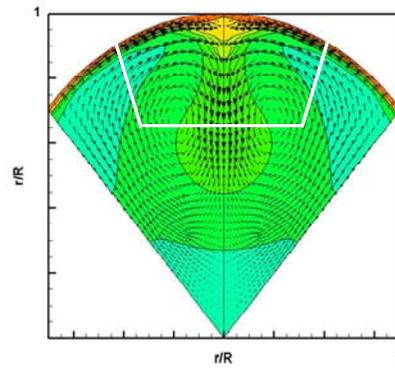
III.2 Critères d'intensification

III.3 Critères d'efficacité énergétique

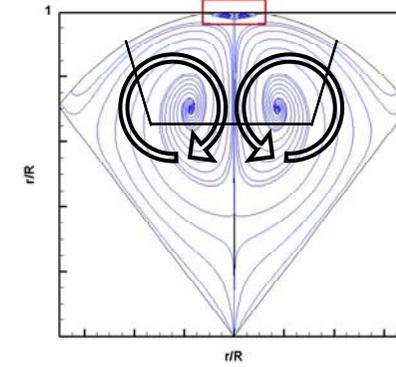
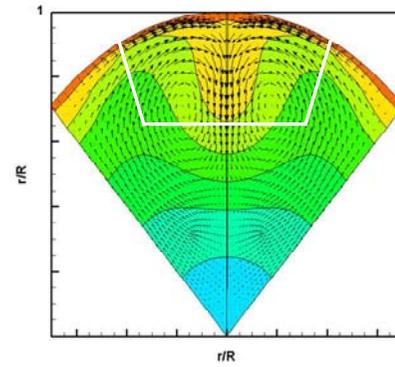
Conclusions et perspectives

Champs de température

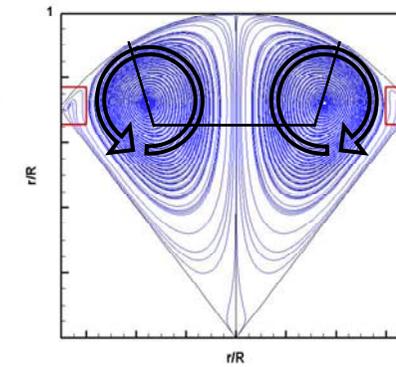
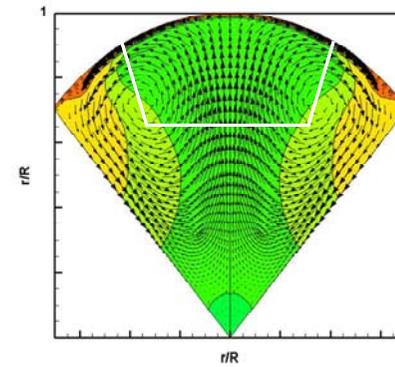
Rangées alignées →



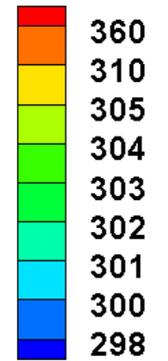
Rangées alternées →



Rangées inversées →



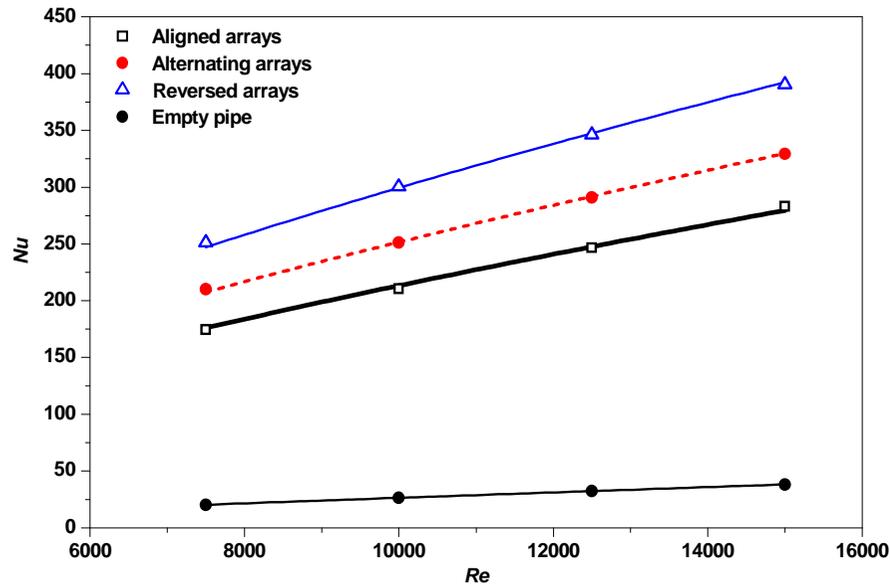
T (K)



Performances thermiques globales

Nombre de Nusselt

$$Nu = \frac{\dot{m} c_p}{\pi L \lambda} \frac{T_{b,outlet} - T_{b,inlet}}{T_w - T_{mean}}$$

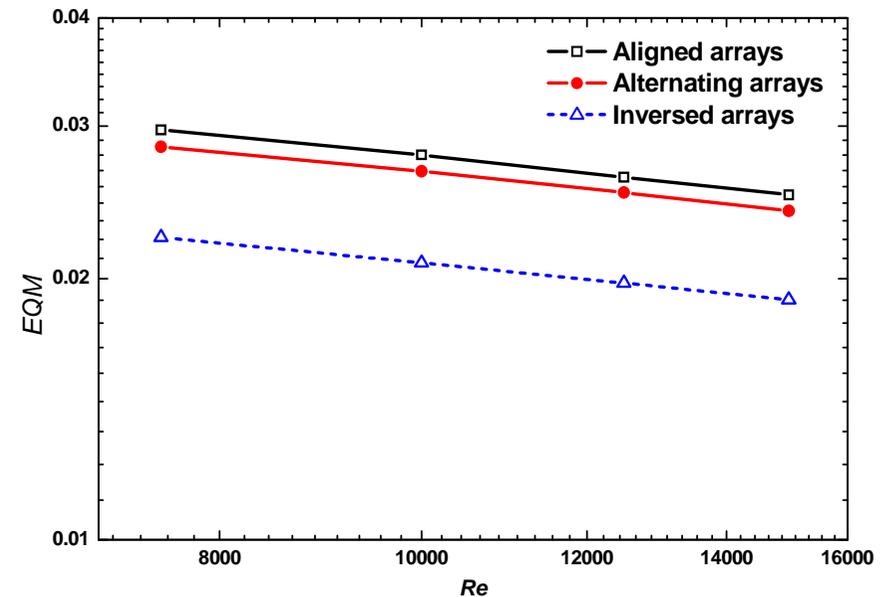


Gnielinski, ICE (1976)

→ Nombre de Nusselt dans un tube droit circulaire

Écart Quadratique Moyen

$$EQM = \frac{\sigma(T)}{\bar{T}}$$



Intensification des transferts par rapport aux rangées alignées

+ 18% pour rangées alternées

+ 41% pour rangées inversées

Plan de l'exposé

I. Écoulement turbulent en présence de vorticité

II. Intensification du mélange par la vorticité

III. Intensification des transferts par la vorticité

III.1 Transferts thermiques

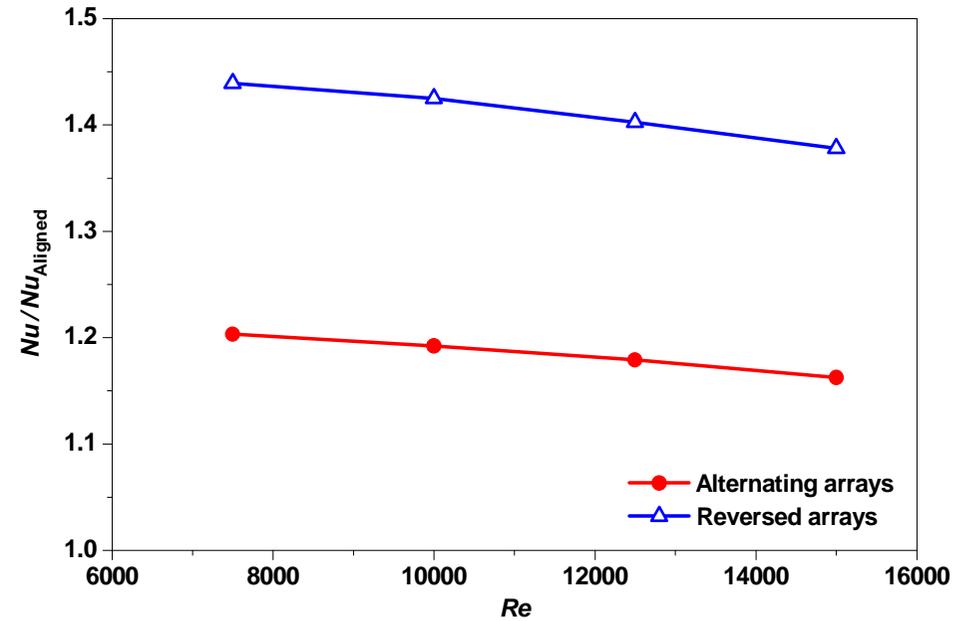
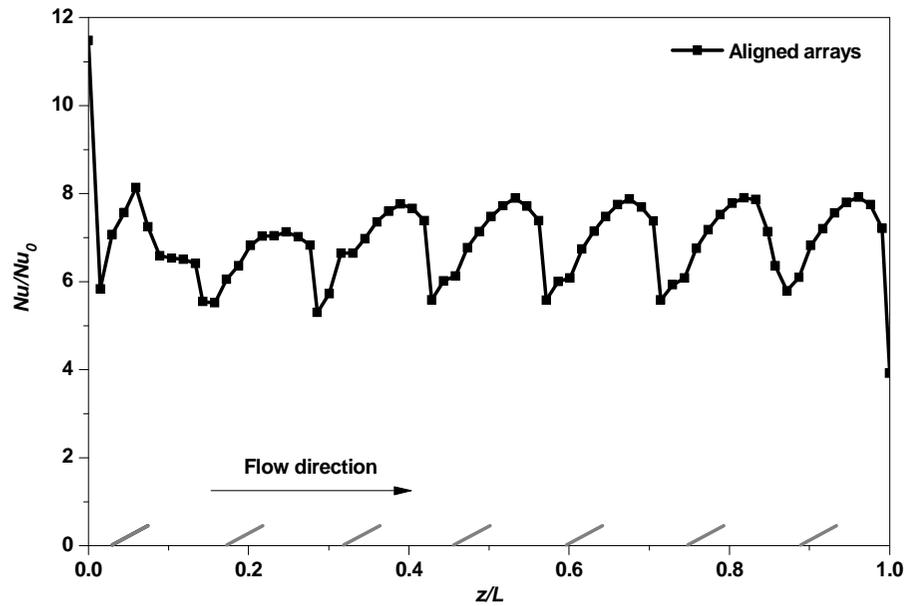
III.2 Critères d'intensification

III.3 Critères d'efficacité énergétique

Conclusions et perspectives

Critères d'intensification

Rapport des nombres de Nusselt: $Nu/Nu_{référence}$



Intensification des rangées alternées et inversées par rapport aux rangées alignées

Critères d'intensification

Champ de synergie

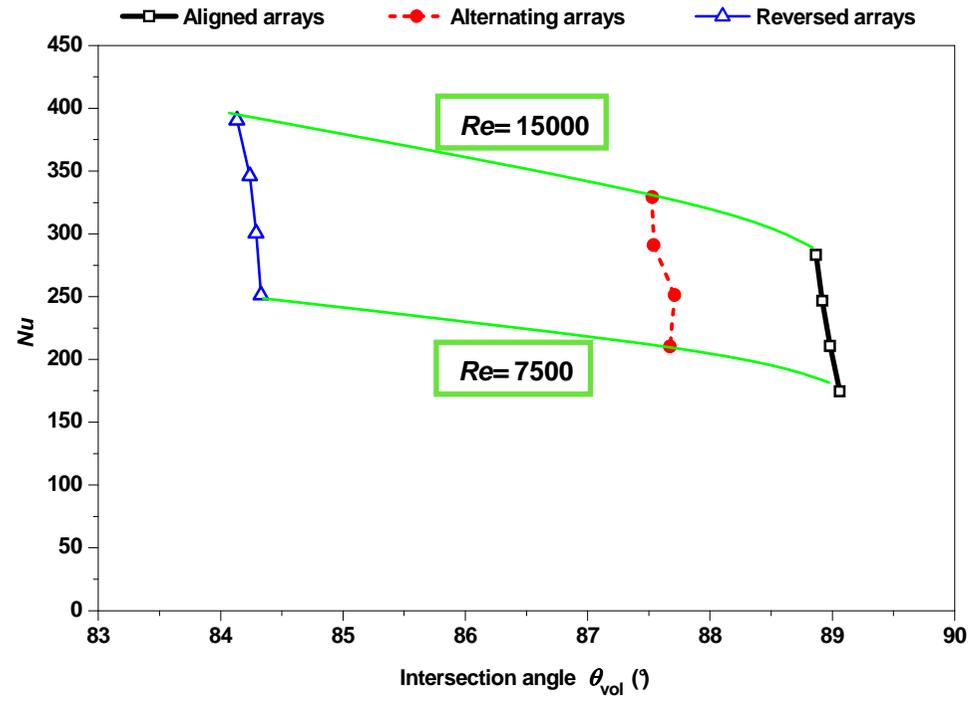
Guo et al., IJHMT
(1998, 2005)

$$\rho c_p \vec{U} \cdot \vec{\nabla} T = \lambda \nabla^2 T$$

$$\rho c_p \iiint_{Vol} (\vec{U} \cdot \vec{\nabla} T) dx dy dz = \Phi \propto Nu$$

$$\vec{U} \cdot \vec{\nabla} T = |\vec{U}| |\vec{\nabla} T| \cos(\theta)$$

$$\theta = \arccos \left(\frac{U \frac{\partial T}{\partial x} + V \frac{\partial T}{\partial y} + W \frac{\partial T}{\partial z}}{\sqrt{U^2 + V^2 + W^2} \sqrt{\left(\frac{\partial T}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial T}{\partial y}\right)^2 + \left(\frac{\partial T}{\partial z}\right)^2}} \right)$$



Classement des géométries par l'angle d'intersection

Plan de l'exposé

I. Écoulement turbulent en présence de vorticité

II. Intensification du mélange par la vorticité

III. Intensification des transferts par la vorticité

III.1 Transferts thermiques

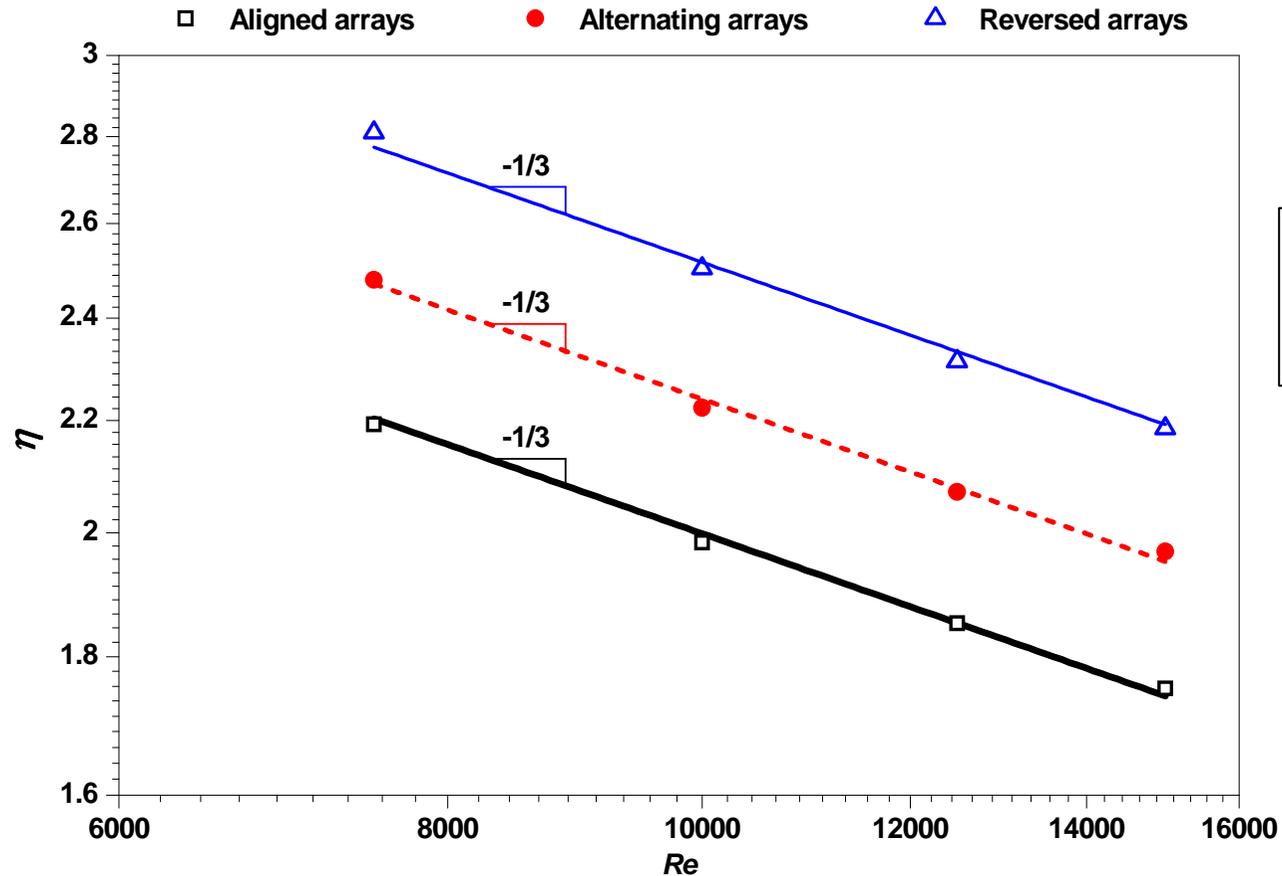
III.2 Critères d'intensification

III.3 Critères d'efficacité énergétique

Conclusions et perspectives

Critères d'efficacité énergétique

Facteur de Colburn



$$\eta = \frac{h}{h_0} = \left(\frac{Nu}{Nu_0} \right) \left(\frac{f}{f_0} \right)^{-1/3}$$

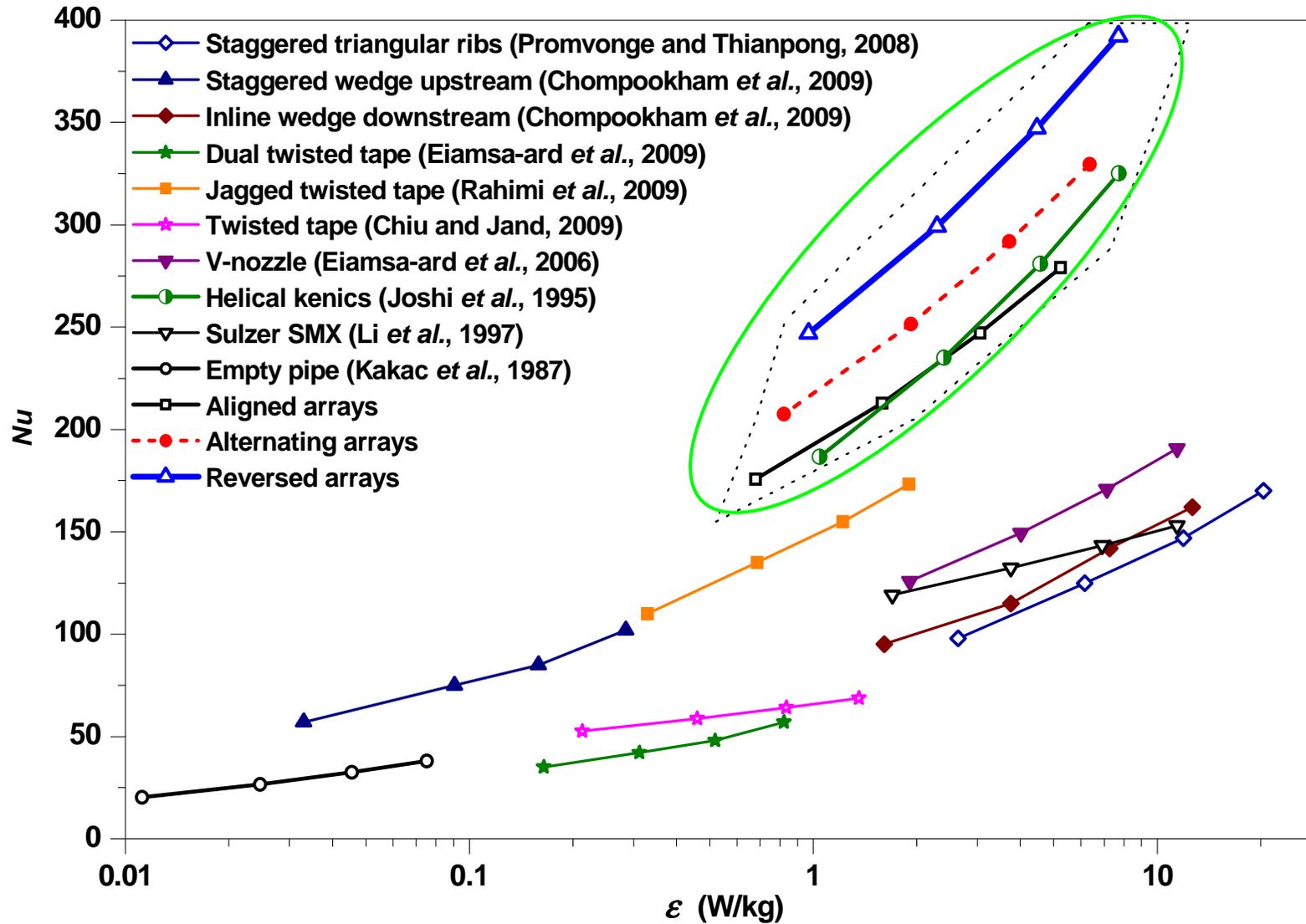
Intensification des transferts par rapport aux rangées alignées

+ 12% pour rangées alternées

+ 25% pour rangées inversées

Critères d'efficacité énergétique

Diagramme d'efficacité



Critères d'efficacité énergétique

Production d'entropie : caractérise les dissipations mécaniques et thermiques

Kock et Herwing, IJHMT (2004),
IJHFF (2005)

$$\dot{S} = \underbrace{\dot{S}_{\bar{V}} + \dot{S}_{V'}}_{\dot{S}_{viscous}} + \underbrace{\dot{S}_{\bar{T}} + \dot{S}_{T'}}_{\dot{S}_{thermal}}$$

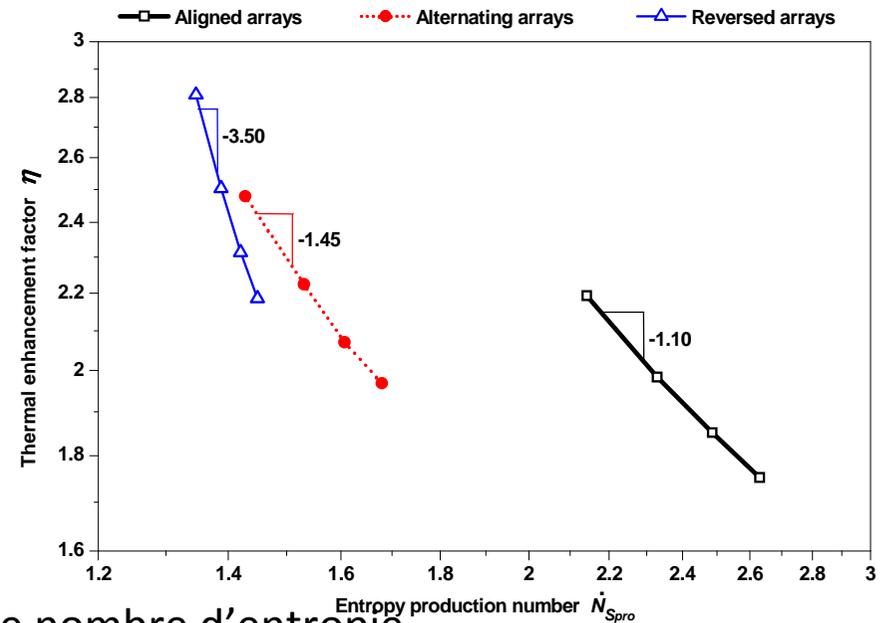
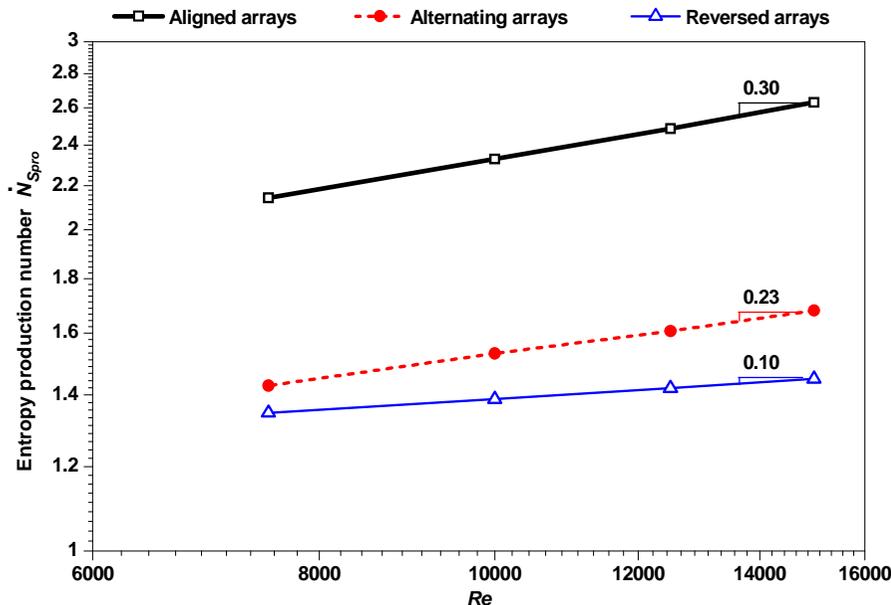


$$\dot{S}_{pro} = \iiint_V \dot{S} dx dy dz$$



$$N_{\dot{S}_{pro}} = \frac{\dot{S}_{pro} T_w}{Q_w}$$

Hesselgreaves,
IJHMT (2000)



Classement des géométries par le nombre d'entropie
Intensification des transferts par rapport aux rangées alignées

- 33-36% pour rangées alternées
- 37-45% pour rangées inversées

Plan de l'exposé

I. Écoulement turbulent en présence de vorticité

II. Intensification du mélange par la vorticité

III. Intensification des transferts par la vorticité

III.1 Transferts thermiques

III.2 Critères d'intensification

III.3 Critères d'efficacité énergétique

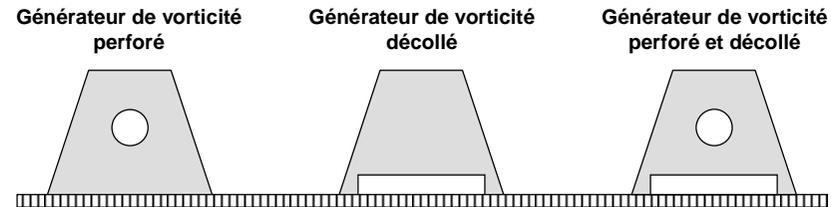
Conclusions et perspectives

Conclusions

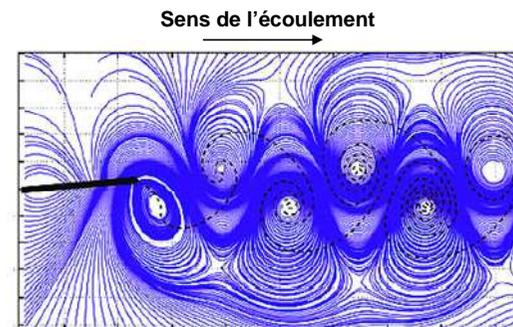
- **Étude et compréhension**
 - **des structures d'un écoulement turbulent en présence de vorticité**
 - **de leurs contributions aux phénomènes de transferts**
- **Intensification par la vorticité**
 - **du mélange**
 - **des transferts thermiques**

Perspectives

- Formes de perturbateurs combinant
 - le principe du jet
 - la génération de vorticité

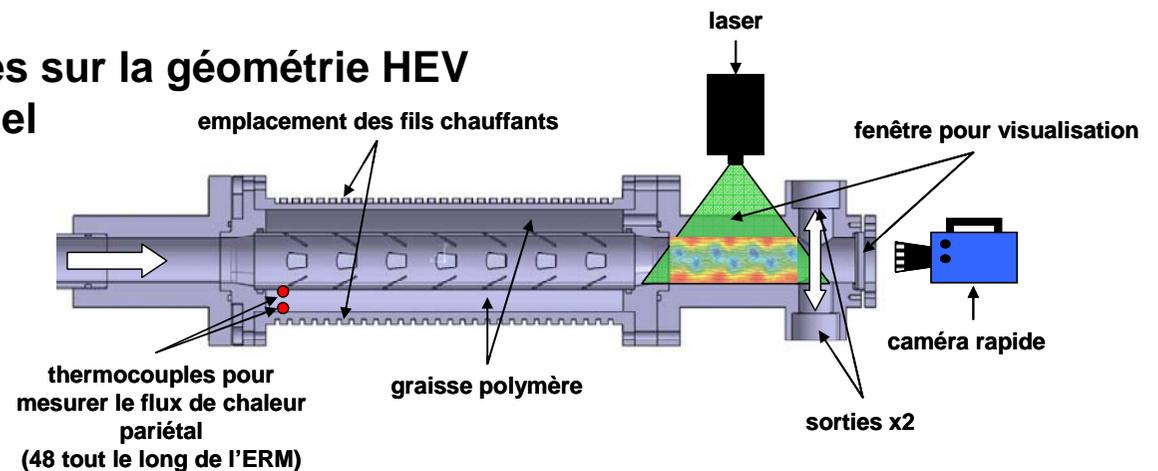


- Perturbateurs flexibles
 - PIE VORFLEX



Alben, JCP (2009)

-  tudes thermiques expérimentales sur la géométrie HEV
 - banc d'essai opérationnel





**Merci
de votre attention**

Thierry LEMENAND, Charbel HABCHI, Dominique DELLA VALLE, Hassan PEERHOSSAINI

*LTN - Laboratoire de Thermocinétique de Nantes
CNRS UMR 6607*