

# Étude de la convection mixte autour d'un cylindre vertical chauffant en écoulement transverse

Yannick Lecocq

UNIVERSITÉ



MFEI / I83 - Club-U Saturne

Thèse CIFRE :

Encadrement MFEE I83/LEA (Poitiers)



## Introduction

### 1. Étude bibliographique

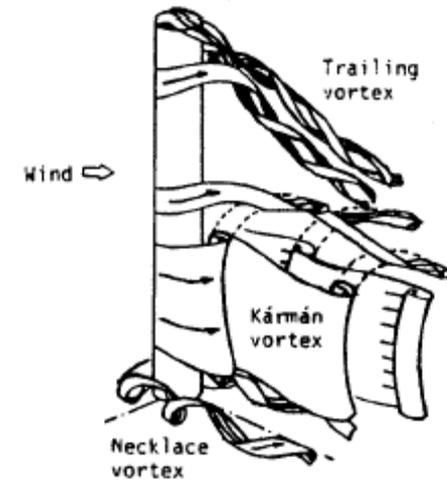
- Contexte
- Écoulements autour de cylindre
- Présentation des modèles de turbulence

### 2. Cas tests

- Convection forcée
- Convection naturelle
- Convection mixte

### 3. Application industrielle

## Conclusion et perspectives



1

# Étude bibliographique

Au sein du groupe I83 : thermohydraulique monophasique

- Développement des outils numériques *Code\_Saturne/Syrthes*

Domaine Aval du cycle – Équipe Entreposage

Objectifs :

- Développer et qualifier des approches simples permettant d'évaluer les performances thermiques des concepts d'entreposage de longue durée des déchets nucléaires
- Valider les modèles disponibles de convection naturelle et mixte dans une gamme de paramètres représentatifs du refroidissement des déchets

# Périmètre de l'étude Bibliographique

## Cylindre seul avec et sans thermique :

- Reynolds (différents régimes)
- Facteur de blocage
- Rapport d'aspect (hauteur/diamètre)
- Rayleigh, Froude (différents types de convection)

## Modèles de turbulence avec prise en compte de la thermique :

- Degré de modélisation ?
  - Gradient simple ou gradient généralisé
  - Modèles algébriques
  - Équations de transport

## Bas-Reynolds : $k-\omega$ SST

- Intégration des équations jusqu'à la paroi
- Test suivant  $y^+$  entre les modèles  $k-\omega$  et  $k-\varepsilon$
- Thermique : Gradient simple

## $R_{ij}-\varepsilon$ SSG à pondération elliptique

- Intégration des équations jusqu'à la paroi
- Reproduction de l'anisotropie en proche paroi
- Thermique : modèle algébrique des flux turbulents

# Présentation du modèle à pondération elliptique : EB-RSM (1/2)

Approche de Durbin (1993) : la relaxation elliptique

Reproduction des effets cinématiques

- Effet de blocage
- Écho de paroi

Reproduction des effets dynamiques

- Cisaillement moyen
- Amortissement visqueux
- Recouvrement des échelles

# Présentation du modèle à pondération elliptique (2/2)

Importance et rôle de la corrélation pression-déformation :

$$\Phi_{ij}^* = \underbrace{\frac{1}{\rho} p \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right)}_{\text{redistribution}} - \underbrace{\frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial x_k} \left( \overline{u_i p \delta_{jk}} + \overline{u_j p \delta_{ik}} \right)}_{\text{diffusion}}$$

$$f_{ij} - L^2 \nabla^2 f_{ij} = \Phi_{ij}^h, \text{ où } f_{ij} = (\Phi_{ij}^* - \varepsilon_{ij} + \varepsilon_{ij}^*) / k$$

13 équations  $(\overline{u_i u_j}, \varepsilon, f_{ij})$  : utilisation lourde et numériquement instable

*idée : remplacer le tenseur par un scalaire*

$$\alpha - L^2 \nabla^2 \alpha = 1 \text{ où } \alpha|_w = 0$$

$$\Phi_{ij}^* = (1 - \alpha^3) \Phi_{ij}^w + \alpha^3 \Phi_{ij}^h$$

$$\varepsilon_{ij} = (1 - \alpha^3) \frac{\overline{u_i u_j}}{k} \varepsilon + \alpha^3 \varepsilon \delta_{ij}$$

# Modèles des flux thermiques turbulents

$$\frac{\partial T}{\partial t} + U_i \frac{\partial T}{\partial x_i} = \kappa \frac{\partial^2 T}{\partial x_i^2} - \overline{\frac{\partial u_i \theta}{\partial x_i}}$$

Modèle à gradient simple, SGDH, par défaut dans *Code\_Saturne* :

$$\overline{u_i \theta} = -\frac{\mu_t}{\text{Pr}_t} \frac{\partial T}{\partial x_i}$$

Modèle à gradient généralisé, GGDH :

$$\overline{u_i \theta} = -C_s \overline{u_i u_j} \frac{\partial T}{\partial x_j}$$

Modèle algébrique, AFM :

$$\overline{u_i \theta} = -C_\theta \frac{k}{\varepsilon} \left( \overline{u_i u_j} \frac{\partial T}{\partial x_j} + \xi \overline{u_j \theta} \frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \eta \beta g_i \overline{\theta^2} \right) + (1 - \alpha^3) \left[ 1 + \frac{1}{2} \left( 1 + \frac{1}{\text{Pr}} \right) \right] \frac{\varepsilon}{k} \overline{u_k \theta n_i n_k}$$

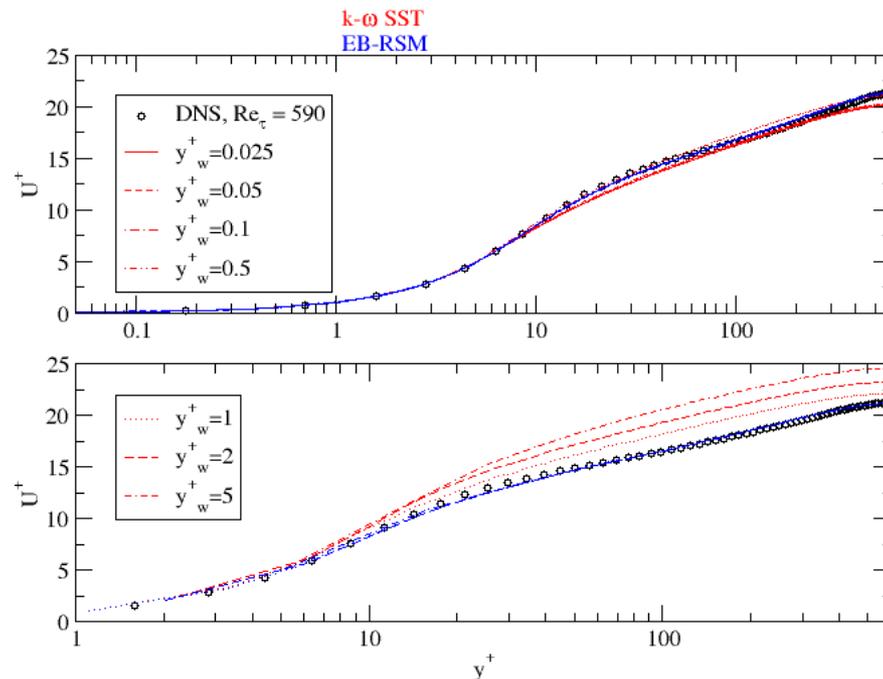
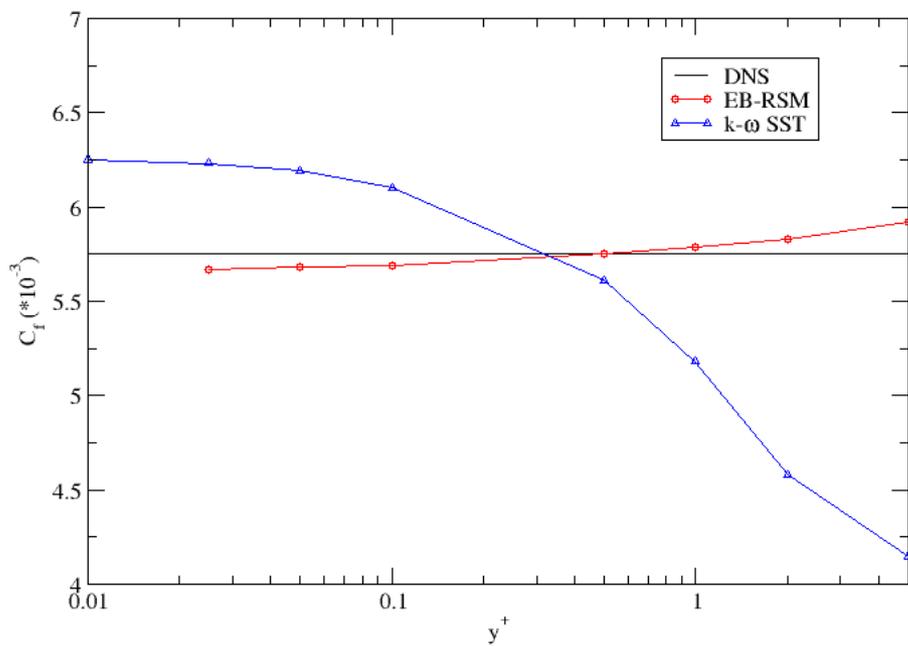
# 2

## Qualification des modèles $k-\omega$ SST et EB-RSM

### Étude de différents cas tests

# Sensibilité au maillage des modèles $k-\omega$ SST et EB-RSM

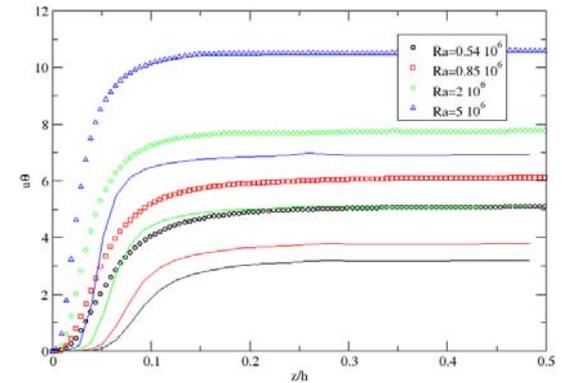
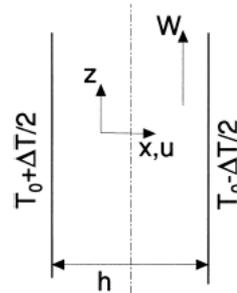
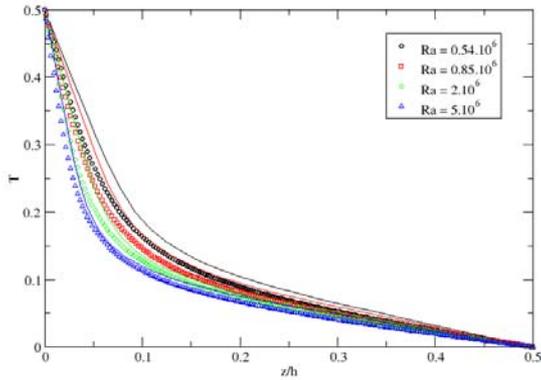
Evolution du coefficient de frottement en fonction raffinement pariétal



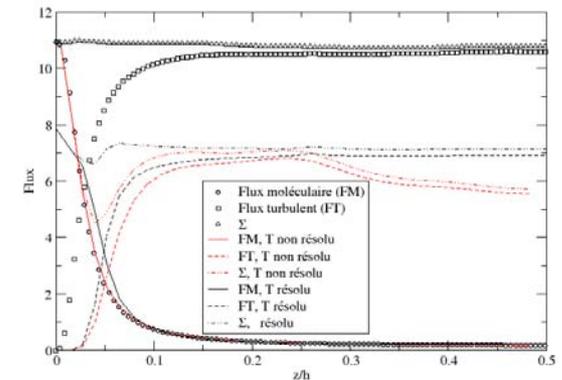
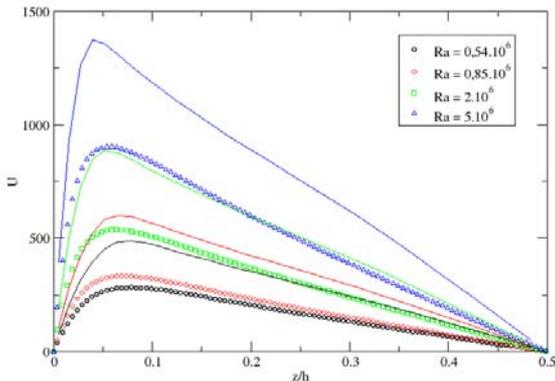
$$C_f = \frac{\tau_w}{\frac{1}{2} \rho_0 U_b^2}$$

Forte sensibilité au maillage pour le  $k-\omega$  SST

# Canal vertical en convection naturelle (DNS de Versteegh, 1998) : simulations avec le k- $\omega$ SST

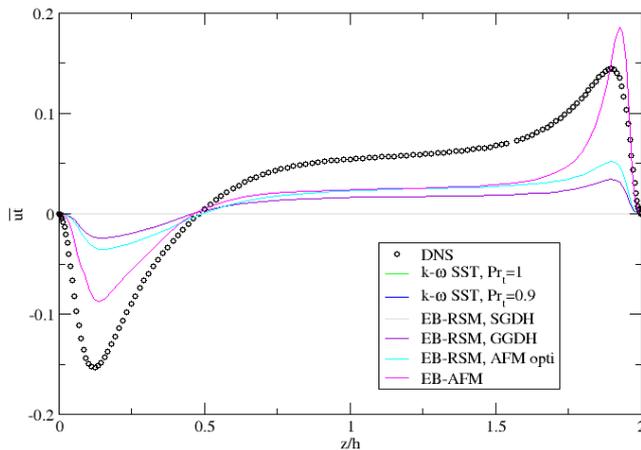
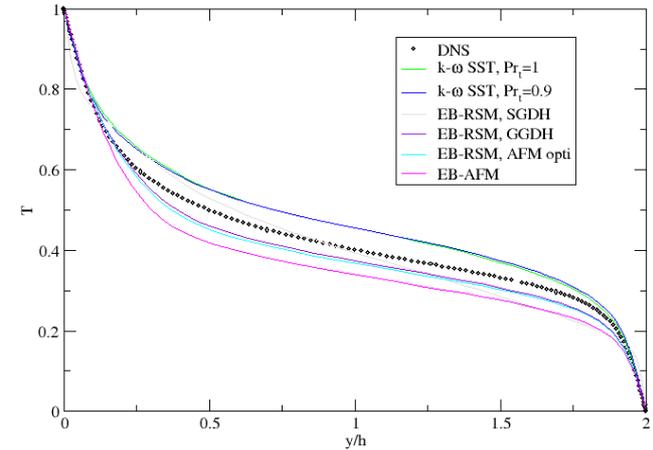
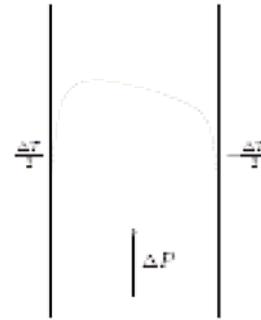
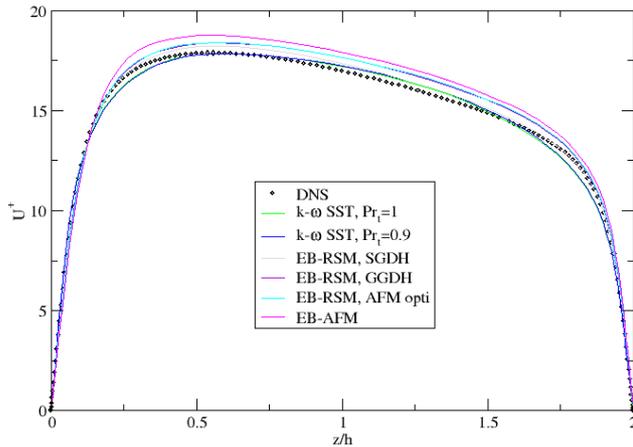


$$-\Phi_w = \underbrace{\frac{\partial T}{\partial z}}_{FM} - \underbrace{\overline{w\theta}}_{FT}$$

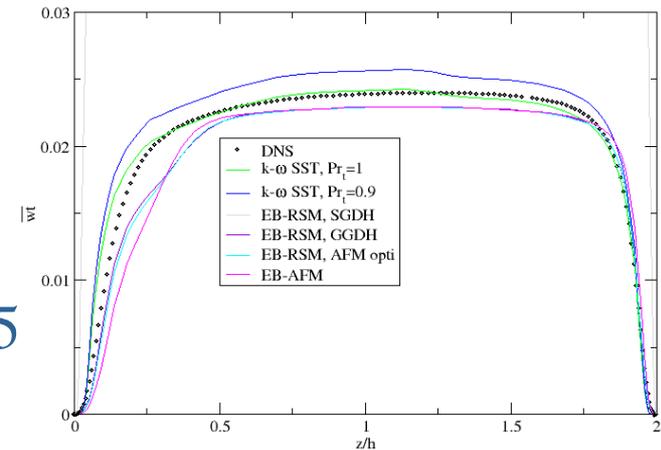


Le SST ne produit pas assez de turbulence ;  
Remarque : par rapport à la DNS, le flux total n'est pas conservé !

# Canal vertical en convection mixte (DNS de Kasagi, 1997) : simulations avec le k- $\omega$ SST et l'EB-RSM



Écoulement  
ascendant  
 $\langle Re_\tau \rangle = 150$ ,  
 $\Delta T = 1$ ,  
 $Gr = 9,6 \cdot 10^5$  et  
 $Ri = Gr/Re^2 = 0.05$



# 3

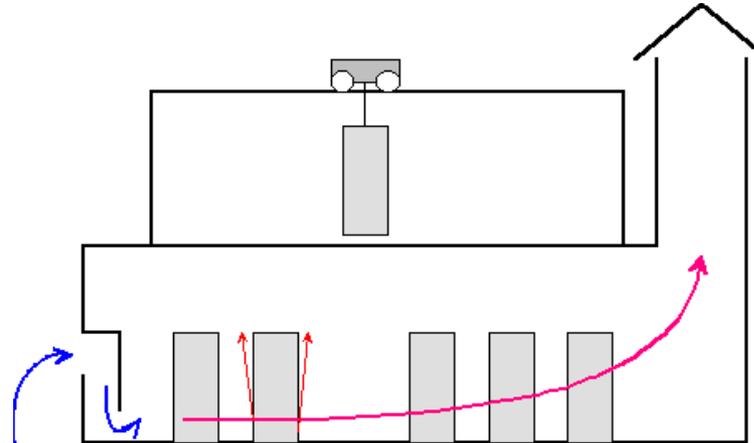
## Application industrielle

### Études thermoaérauliques pour l'entreposage

# Position du problème

Halls d'entreposage : principe du thermosiphon

Convection mixte : limite de validité des codes de calcul



Modélisation de l'écoulement autour d'un cylindre

- Qualification d'une méthodologie
- Choix d'un modèle de turbulence et d'un maillage

CEA (Grenoble) :  
maquette VALIDA

Pour différents couples  $(V, \Phi)$  :  
Températures

- fluide dans le panache
- solide sur le cylindre

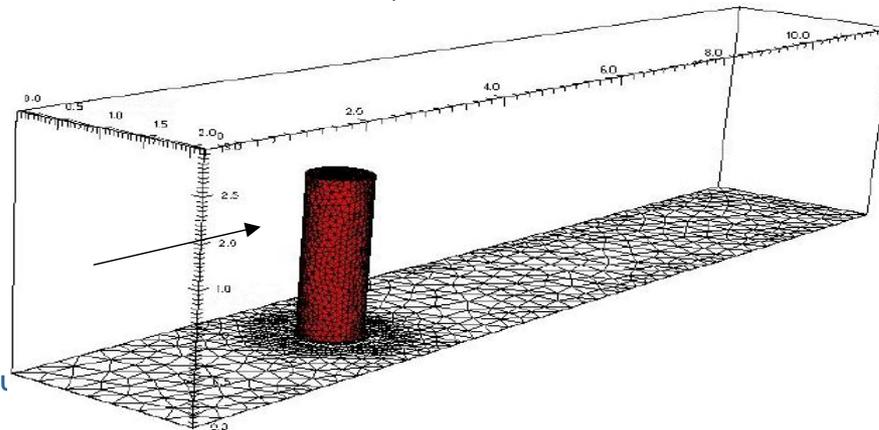
→ Banque de données  
expérimentale sur l'échange  
thermique

LEA (Poitiers)

Champ de vitesse en isotherme

- sur le couvercle
- proche sillage
- sillage lointain

→ Comparaison essai/calcul



# Mesures réalisées au CEA

PIV



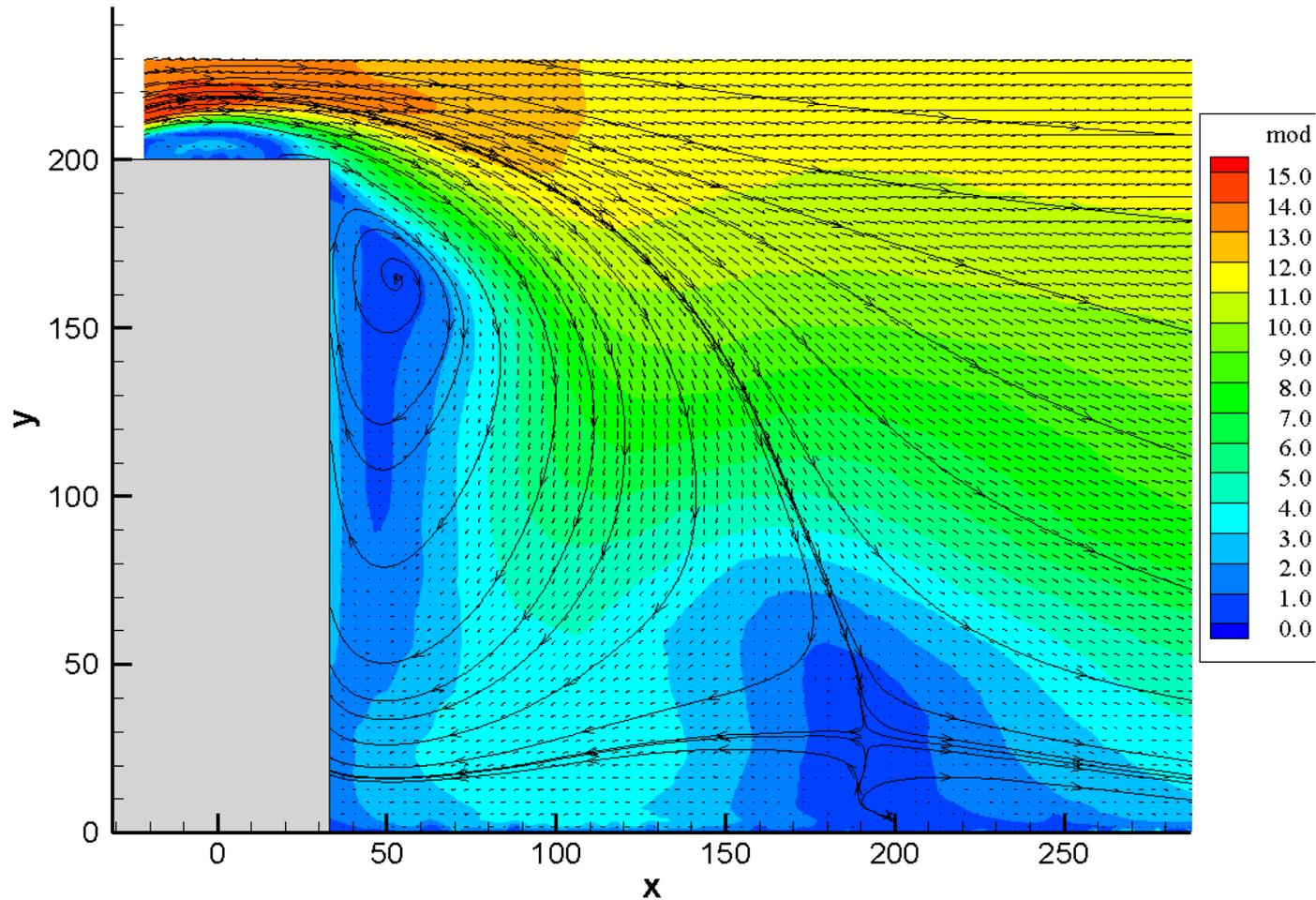
Air

LDV

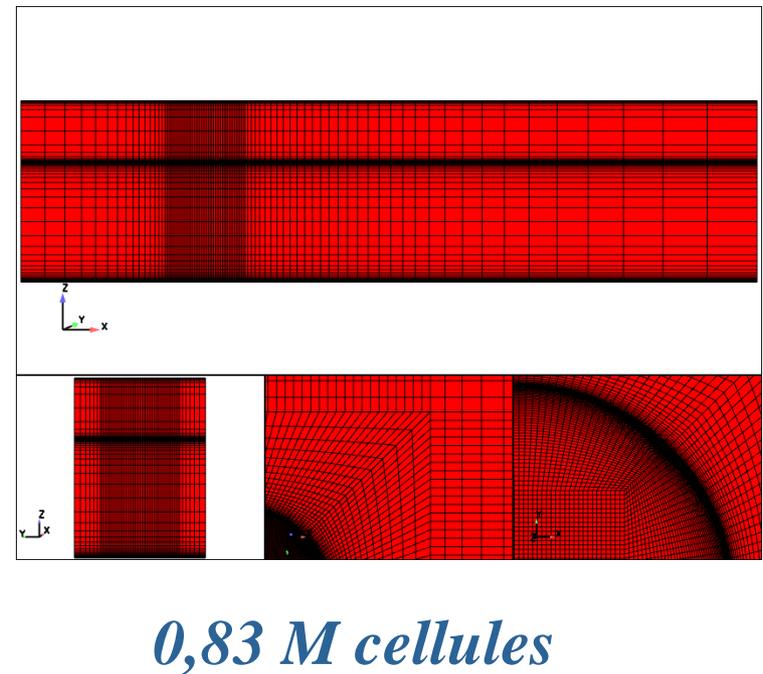
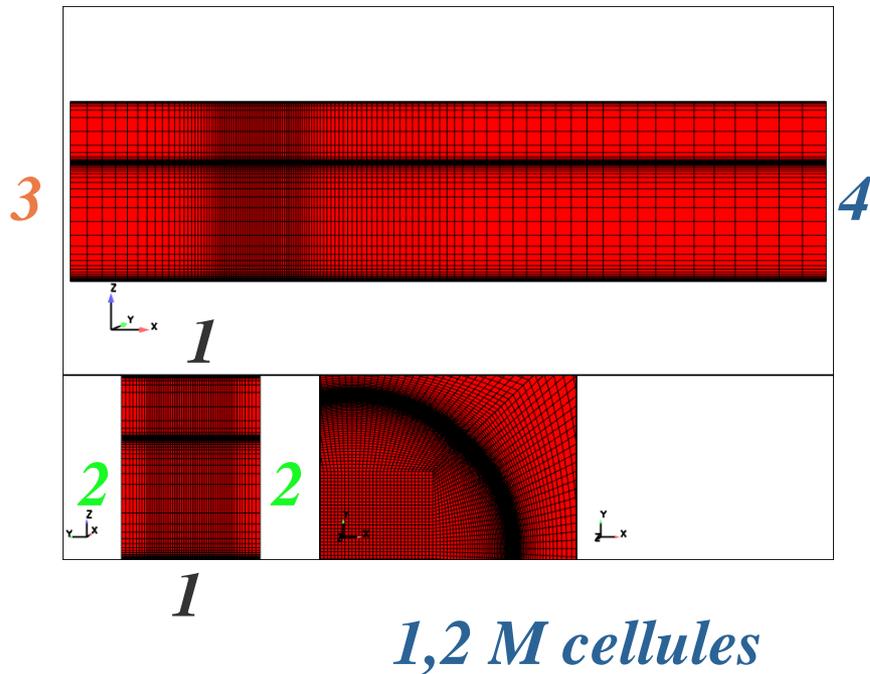


Grille mobile de capteurs  
de température

# Mesures réalisées au LEA



# Maillages du domaine fluide, $k-\omega$ SST



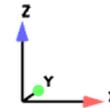
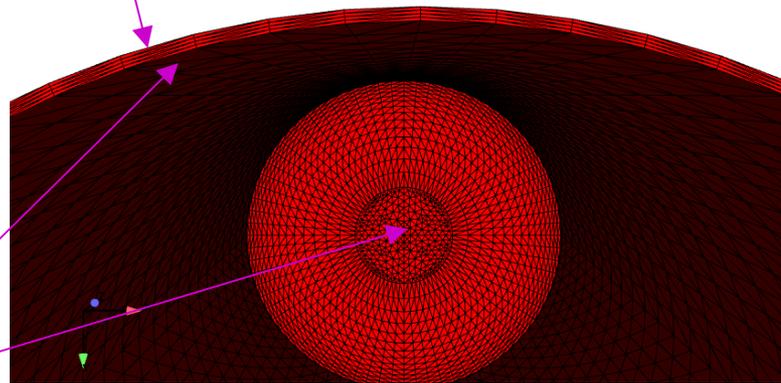
*Volume fini ; maillage conforme.*

*Conditions aux limites : 1 paroi ; 2 symétrie ; 3 entrée ; 4 sortie.*

Conditions aux limites :

- Flux imposé (1)
- Échange (2)

(1)



Rapport d'aspect du cylindre :  $H/D=3$

Épaisseur du cylindre : 3mm

73 000 cellules

# Couplage fluide/solide

Fluide : U-RANS

Solide : équation de la chaleur  
instationnaire

## Code\_Saturne

- Code en volumes finis
  - discrétisation colocalisée
- Couplage vitesse/pression :
  - méthode de prédiction / correction
- $\varepsilon (\mathbf{P}, \mathbf{U}_i, \mathbf{k}, \omega, \mathbf{T}) = 10^{-8}/10^{-5}$
- schéma spatial :
  - vitesse, température : centré avec test de pente
  - grandeurs turbulentes : upwind
- 1<sup>er</sup> ordre en temps
  - Euler implicite
- Profil de vitesse,  $I_k=2\%$ , longueur de mélange
- Propriétés physiques variables

Couplage

## Syrthes

- code éléments finis
  - éléments tétraédriques à 10 nœuds
- fonctions de bases linéaires
  - 1<sup>er</sup> ordre en temps
  - Euler implicite

$T_F^{(n)}$

$T_S^{(n)}$

$$\varphi^{(n)} = h^{(n)} [T_F^{(n)} - T_S^{(n)}]$$

$$T_S^{(n+1)} = f(\varphi^{(n)}, T_F^{(n)})$$

$$T_F^{(n+1)} = f(\varphi^{(n)}, T_S^{(n)})$$

...

pas suivant

# Régimes thermique et hydraulique

P (W/m <sup>2</sup> )	U (m/s)	Re	Ri
0	1	43000	0
330	1	43000	4
<b>600</b>	<b>1</b>	<b>43000</b>	<b>6</b>
850	1	43000	8
850	0,75	32000	14
850	0,5	21000	34
850	0,25	11000	140

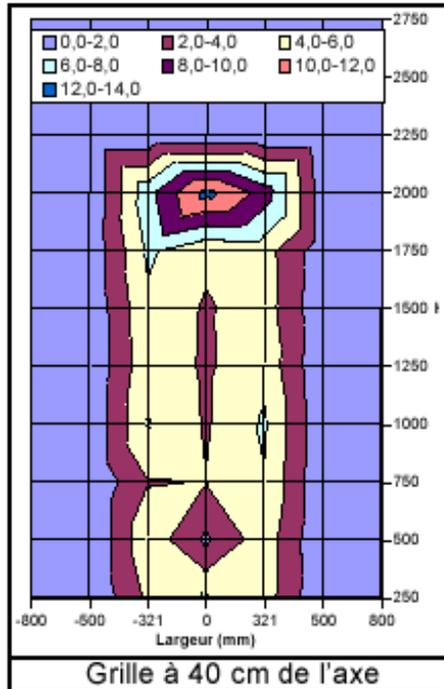
Vitesse



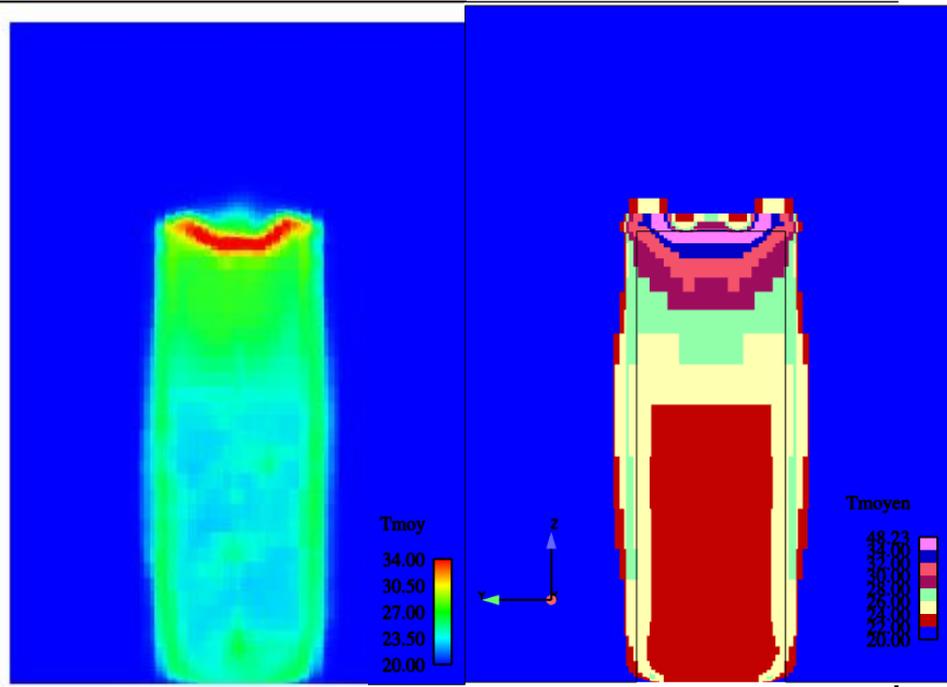
Puissance

# Champs de $T_{air}$ moyennes dans le panache

Expérience



LES

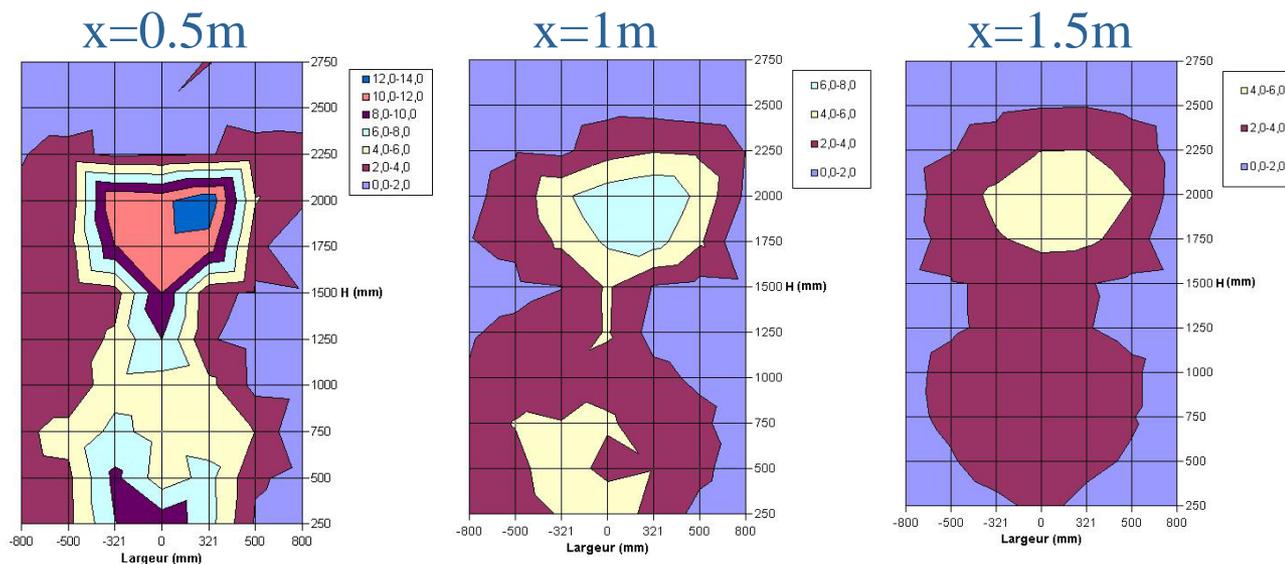


k- $\omega$  SST

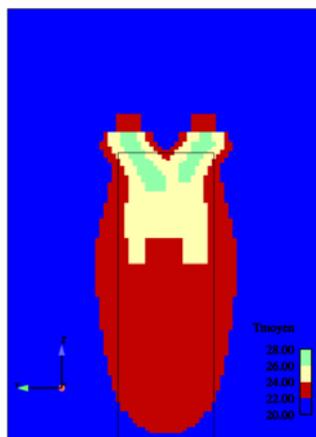
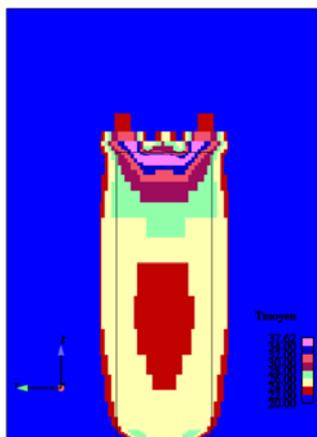
$$\Phi = 600 \text{ W/m}^2$$
$$V_i = 1 \text{ m/s}$$

Plan  $x = 40 \text{ cm}$

# Champs de $T_{air}$ moyennes dans le panache



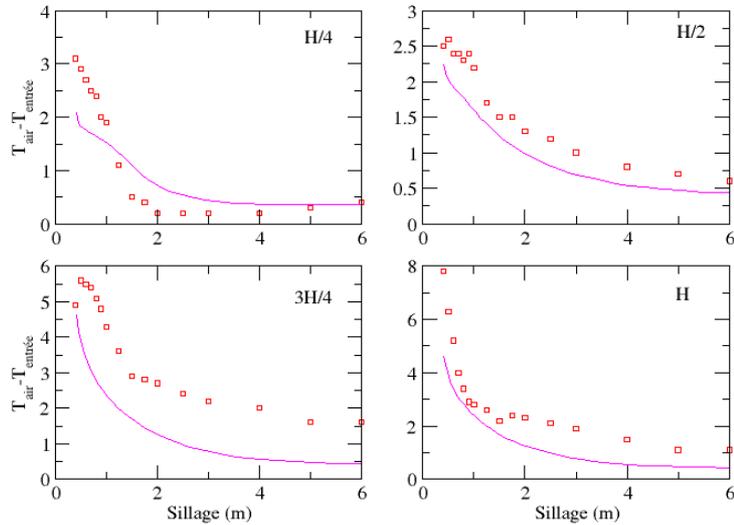
$\Phi=850\text{W/m}^2$   
 $V_i=1\text{ m/s}$



# Températures d'air moyennes dans le panache

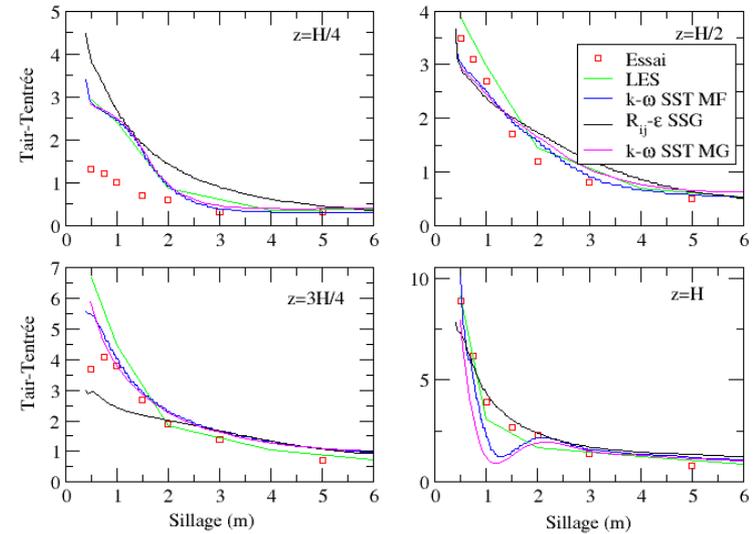
Températures d'air moyennes dans le panache

$\Phi = 330 \text{ W/m}^2$ ;  $\bar{V}_i = 1 \text{ m/s}$ ; plan médian

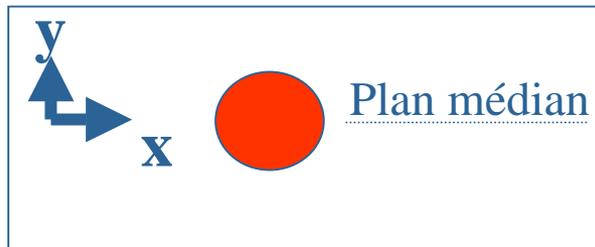
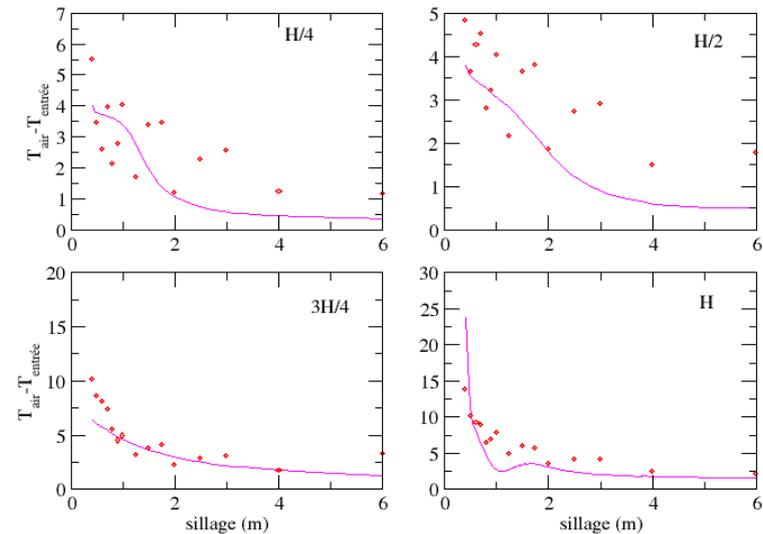


Températures d'air moyennes dans le panache

$\Phi = 600 \text{ W/m}^2$ ;  $\bar{V}_i = 1 \text{ m/s}$ , plan médian



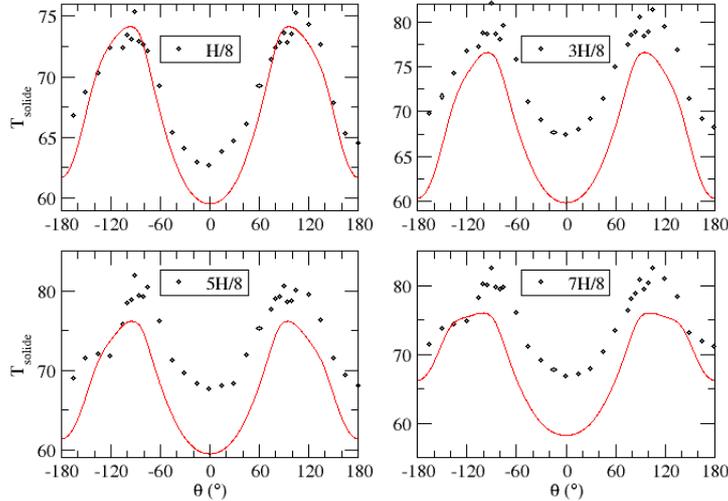
$\Phi = 850 \text{ W/m}^2$ ;  $\bar{V}_i = 1 \text{ m/s}$ , plan médian



# Champs de température sur le cylindre

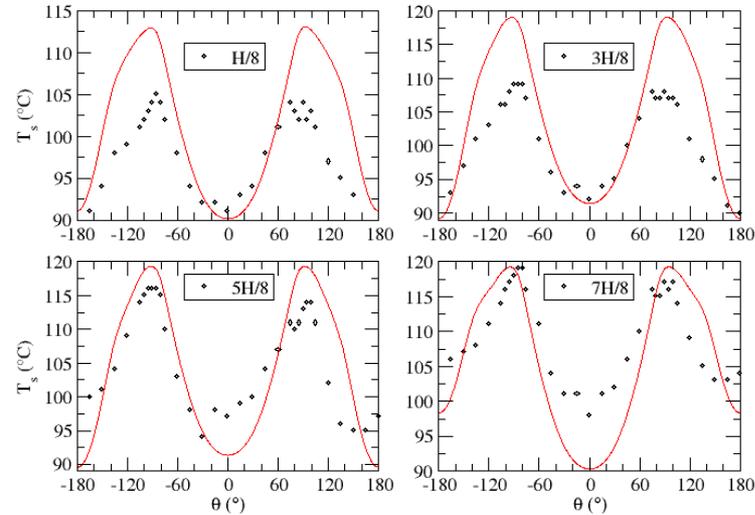
Comparaison des températures solide

$\Phi = 330 \text{ W/m}^2$  ;  $\bar{V}_i = 1 \text{ m/s}$



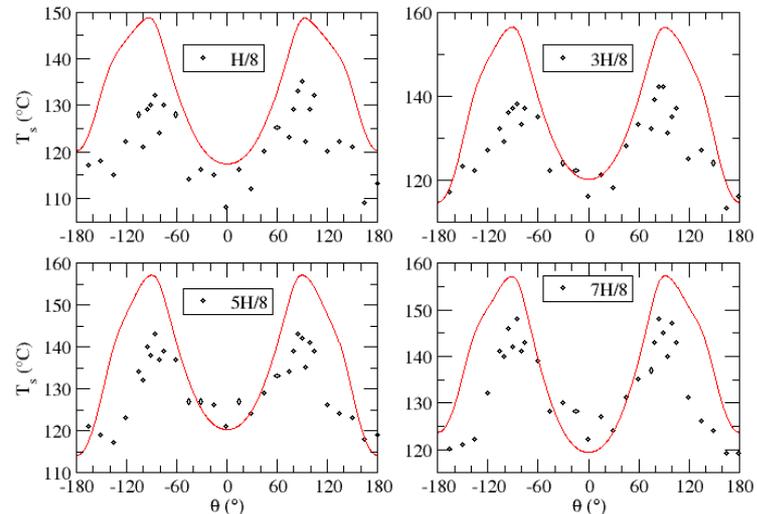
Comparaison des températures solide

$\Phi = 600 \text{ W/m}^2$  ;  $\bar{V}_i = 1 \text{ m/s}$



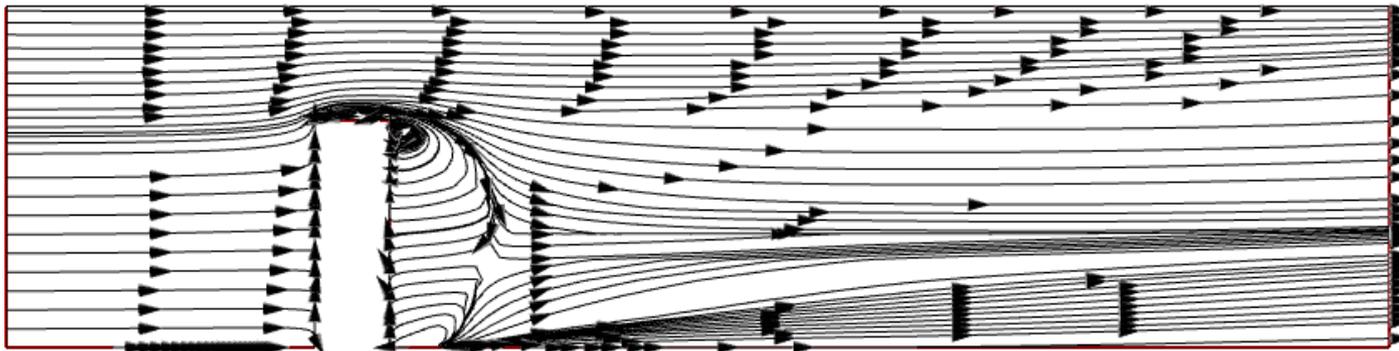
Comparaison des températures solide

$\Phi = 850 \text{ W/m}^2$  ;  $\bar{V}_i = 1 \text{ m/s}$

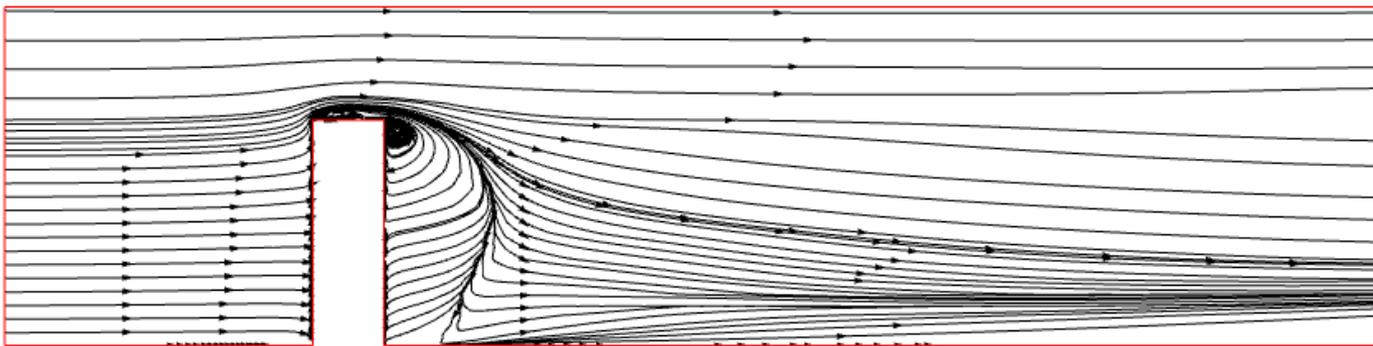


- Tendances retrouvées ;
- Sous-estimation des  $T_s$  au point d'arrêt amont

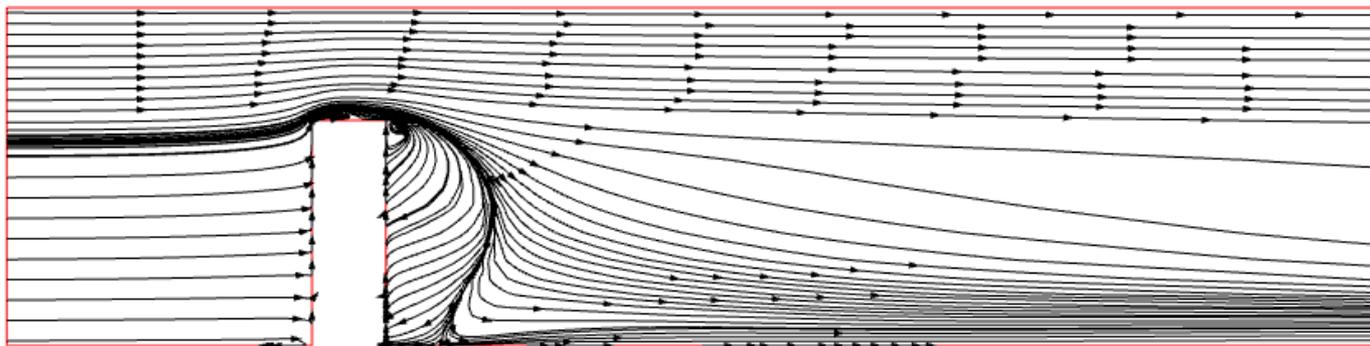
# Lignes de courant moyennes



$\Phi=850\text{W/m}^2$   
 $V_i=1\text{ m/s}$



$\Phi=600\text{W/m}^2$   
 $V_i=1\text{ m/s}$



$\Phi=330\text{W/m}^2$   
 $V_i=1\text{ m/s}$

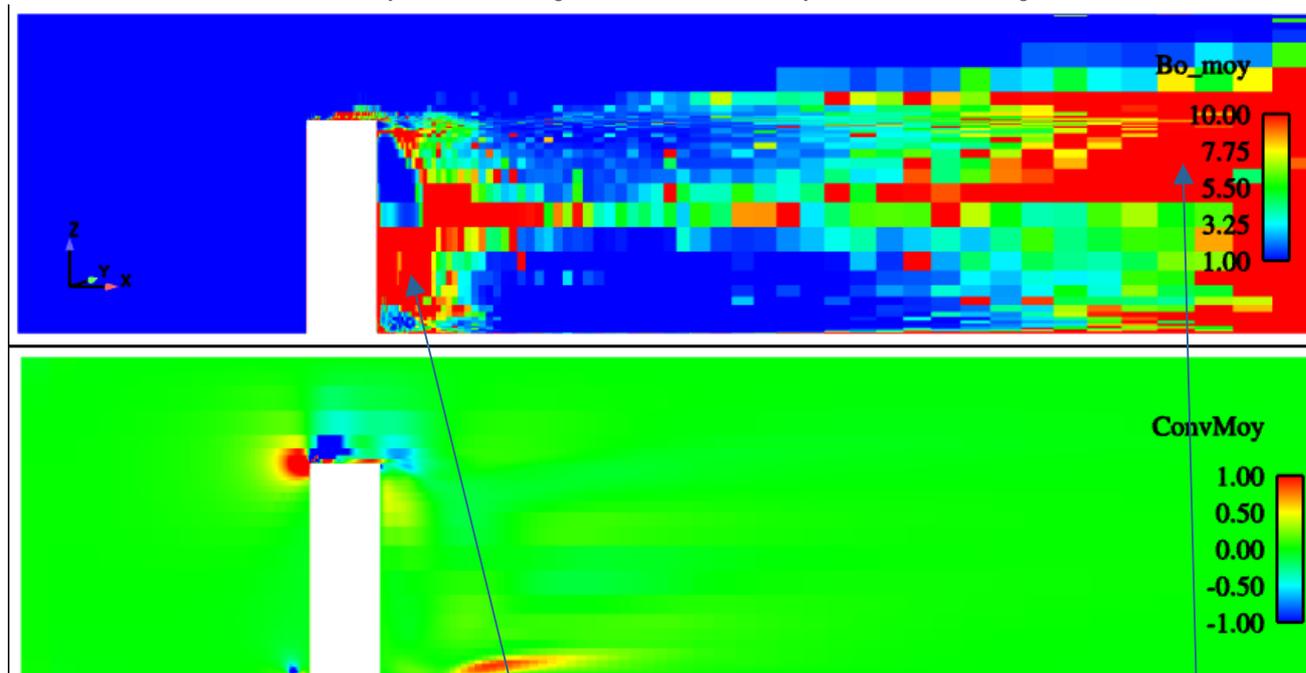
# Synthèse de quelques grandeurs

	0 W/m <sup>2</sup> , 1m/s	330 W/m <sup>2</sup> , 1m/s	600 W/m <sup>2</sup> , 1m/s	850 W/m <sup>2</sup> , 1m/s
y+ max	6,5	5,7	5,36	5,15
strouhal	0,187	0,193	0,19	0,186
CFL max	3,5	3,3	3,25	3,3

Strouhal  $\sim 0,2 \Rightarrow$  allée de Karman  
Atténuation de l'allée avec la hauteur

# Comparaison entre flottabilité et convection

$$\frac{\partial W}{\partial t} + U_i \frac{\partial W}{\partial x_i} = -\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p}{\partial z} + \nu \frac{\partial^2 W}{\partial x_i^2} - \frac{g(\rho - \rho_0)}{\rho_0}$$

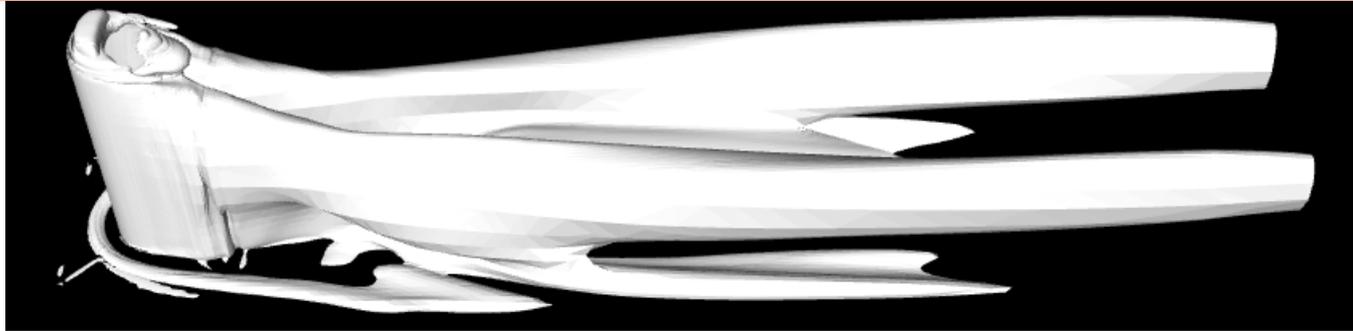


Flottabilité=O(convection) mais flottabilité > convection

$$\overline{Bo} = \frac{g \frac{\Delta\rho}{\rho_0}}{U_i \frac{\partial W}{\partial x_i}}$$

Flottabilité >> convection  
mais flottabilité faible

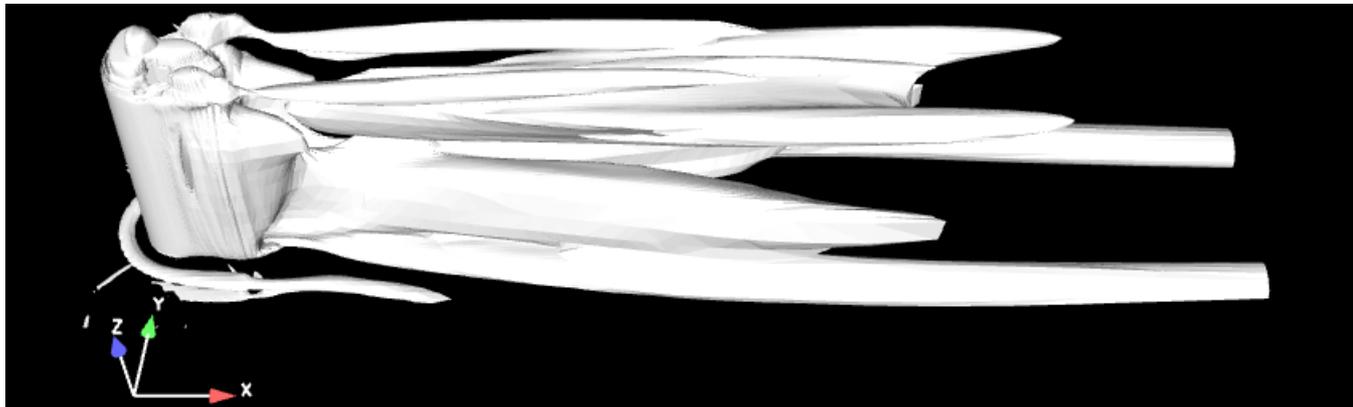
# Effets de la flottabilité sur le champ fluide



Isotherme  
 $V_i=1$  m/s



$\Phi=600$ W/m<sup>2</sup>,  
 $V_i=1$  m/s  
 $g_z = 0$  m/s<sup>2</sup>



$\Phi=600$ W/m<sup>2</sup>  
 $V_i=1$  m/s

# Conclusion et perspectives

## Modèles $k-\omega$ SST et EB-RSM

- Sensibilité au maillage forte pour le SST
- Limite de l'hypothèse de viscosité turbulente en convection naturelle
- Degré de modélisation élevé avec la pondération elliptique

## Modèle $k-\omega$ SST

- Caractéristiques des écoulements autour de cylindre de hauteur finie retrouvées : Strouhal, tourbillon en fer à cheval, tourbillons marginaux...
- Concordance correcte des résultats en températures autour du solide et dans le panache par rapport à l'expérience et la LES.
- Mise en évidence de l'importance et du rôle joué par la flottabilité

## Perspectives

- Comparaison des résultats de calcul et des mesures sur les champs de vitesses
- Validation du modèle à pondération elliptique avec thermique à poursuivre
- Finalisation des calculs en cours et post-traitement correspondant