
**Contribution à l'analyse et à la modélisation des écoulements turbulents
en régime de convection mixte - Application à l'entreposage des déchets
radioactifs**

YANNICK LECOCQ

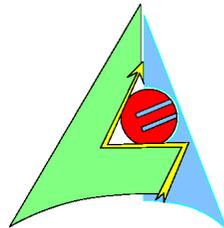
Thèse CIFRE : EDF R&D Chatou (80%) Université de Poitiers (20%)

Sophie Bournaud

Laurent-Emmanuel Brizzi

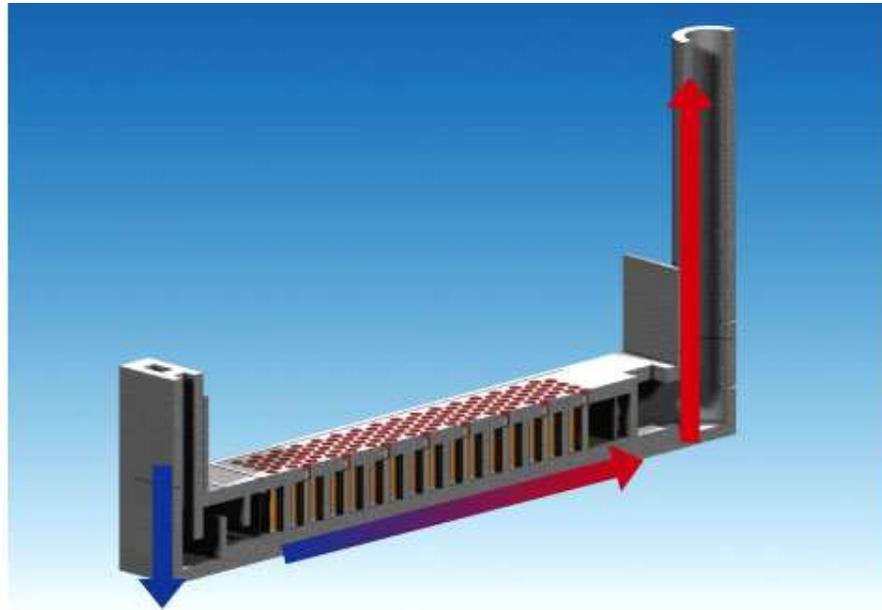
Sofiane Benhamadouche

Rémi Manceau



Introduction

- Entreposage des déchets combustibles : fûts cylindriques refroidis par principe du thermosiphon.
 - ▷ Situation optimale : convection mixte
 - ▷ Situation accidentelle : convection naturelle



- Cadre de l'étude : écoulement turbulent avec transferts thermiques à Re élevé + présence d'instantanéités + présence de parois

- Principaux outils de simulation

	+	-
DNS	Solution instationnaire	Fort coût CPU
LES	Solution instationnaire	Fort coût CPU si paroi
RANS	Solution stationnaire	Faible coût CPU

- Informations instationnaires nécessaires dans l'industrie :

- ▷ IFS, résonance, fatigue thermique, *etc.* → fréquences caractéristiques

Modèles RANS calculent un champ moyen \Rightarrow approche insuffisante

- Écoulements autour de cylindre en régime sous-critique :

- ▷ Caractéristiques : $300 \leq Re = \frac{\rho U_0 D}{\mu} \leq 2 \cdot 10^5$, couche limite laminaire autour du cylindre, décollement laminaire, transition dans la couche cisailée, allée tourbillonnaire de Von Kàrmàn $St = 0.20 \pm 10\%$

-
- Développement de différentes approches, intermédiaires entre RANS et LES
 - ▷ hybrides : DES, VLES, PANS, PITM, *etc.*
 - ▷ autres : OES, SAS, URANS, *etc.*
 - URANS : résolution des équations RANS + terme $\partial/\partial t$

Iaccarino *et al.* (2003), Shah & Ferziger (1997), Bosch & Rodi (1998), ...

 - * Fréquences caractéristiques pour un coût moindre que la LES
 - * Grandeurs moyennes plus justes qu'en RANS
 - Modélisation RANS des transferts thermiques
 - ▷ modèles au premier ordre insuffisants pour rendre compte des effets de flottabilité
 - ▷ représentation manquante de la région de proche paroi des modèles au second ordre avec transfert thermiques

Objectifs

- ✓ Validation de modèles RANS dans une approche URANS sur l'écoulement autour d'un cylindre fini monté en paroi
- ✓ Amélioration des modèles des flux thermiques en convection mixte avec prise en compte des effets de paroi

Plan de l'exposé

1. Présentation des codes de calcul
2. Écoulement autour d'un cylindre de hauteur finie
 - (a) Simulation isotherme (expérience du LEA)
 - (b) Simulations anisothermes (expérience VALIDA)
 - i. Convection mixte
 - ii. Convection naturelle
3. Piste d'amélioration par modélisation au second ordre
 - (a) Prise en compte des effets de paroi
 - (b) Construction d'un modèle algébrique des flux thermiques
 - i. Validation : tests *a priori*, simulations
4. Conclusions et perspectives

Plan de l'exposé

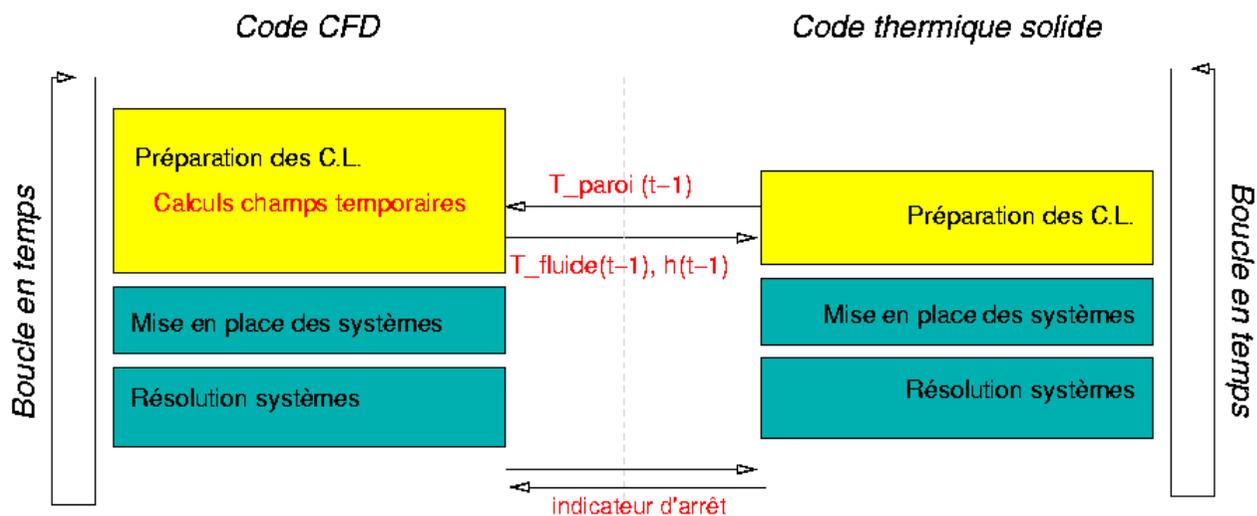
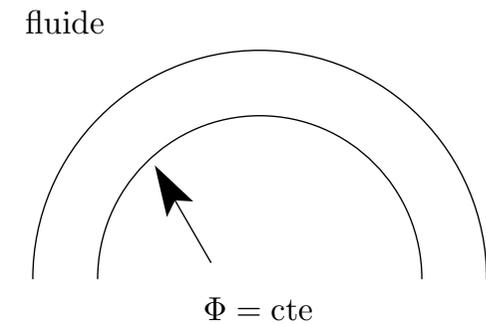
1. Présentation des codes de calcul
2. Écoulement autour d'un cylindre de hauteur finie
 - (a) Simulation isotherme (expérience du LEA)
 - (b) Simulations anisothermes (expérience VALIDA)
 - i. Convection mixte
 - ii. Convection naturelle
3. Piste d'amélioration par modélisation au second ordre
 - (a) Prise en compte des effets de paroi
 - (b) Construction d'un modèle algébrique des flux thermiques
 - i. Validation : tests *a priori*, simulations
4. Conclusions et perspectives

Code de CFD et méthodes numériques

- *Code_Saturne* :
 - ▷ Code industriel parallélisé développé par EDF R&D (Archambeau *et al.*, 2004) ;
 - ▷ volumes finis, maillages (non-)structurés, variables colocalisées au centre de gravité des éléments ;
 - ▷ Étape vitesse/pression → algorithme SIMPLEC ;
 - ▷ Schéma temporel : Euler implicite ;
 - ▷ Schéma spatial (terme convectif) : centré pur avec test de pente (U_i) et décentré amont ($T, \overline{u_i u_j}, k, \varepsilon, \omega$) ;
 - ▷ modèles de turbulence : $k-\omega$ SST ou $R_{ij}-\varepsilon$ SSG ;
 - ▷ propriétés physiques : Sutherland pour simuler l'expérience VALIDA et approximation de Boussinesq pour le reste.

Code de thermique et couplage entre *Code_Saturne* & *SYRTHES*

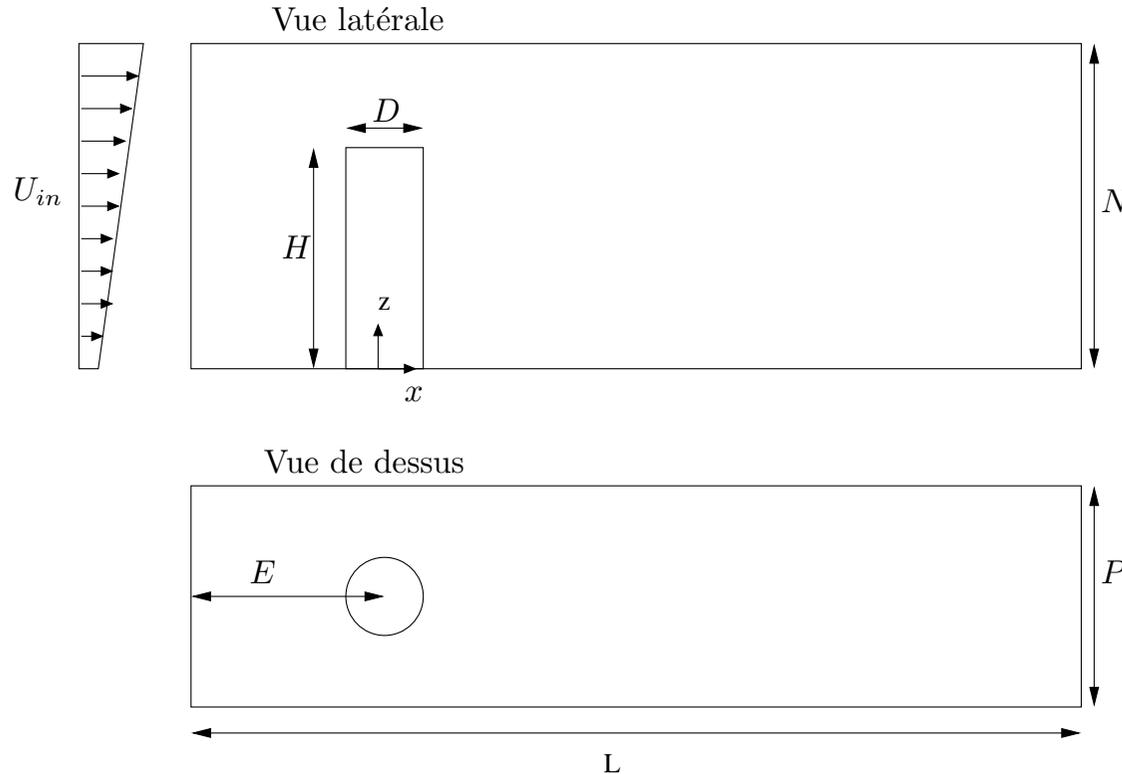
- *SYRTHES* :
 - ▷ Code industriel développé par EDF R&D (Péniguel & Rupp, 2001) ;
 - ▷ éléments finis, maillages tétraédriques non-structurés, température définie aux nœuds.
- Couplage faible entre *Code_Saturne* & *SYRTHES*



Plan de l'exposé

1. Présentation des codes de calcul
2. Écoulement autour d'un cylindre de hauteur finie
 - (a) Simulation isotherme (expérience du LEA)
 - (b) Simulations anisothermes (expérience VALIDA)
 - i. Convection mixte
 - ii. Convection naturelle
3. Piste d'amélioration par modélisation au second ordre
 - (a) Prise en compte des effets de paroi
 - (b) Construction d'un modèle algébrique des flux thermiques
 - i. Validation : tests *a priori*, simulations
4. Conclusions et perspectives

Géométrie et conditions d'entrée

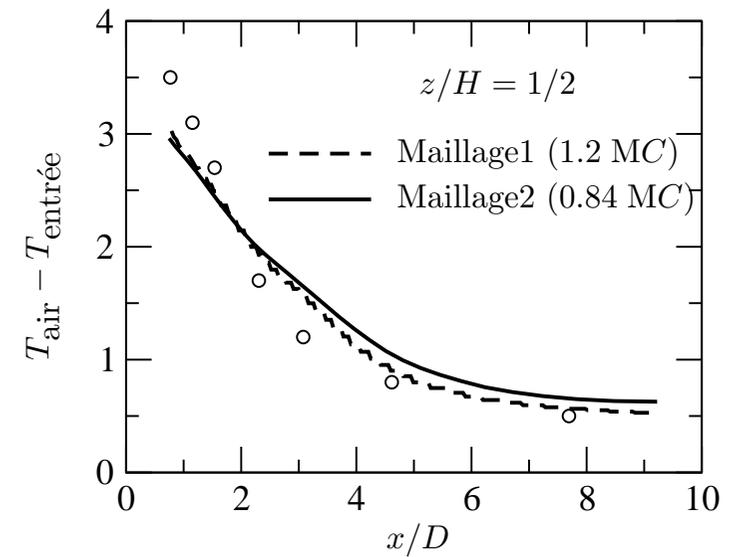
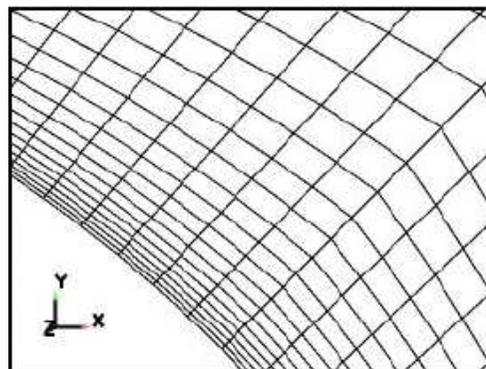
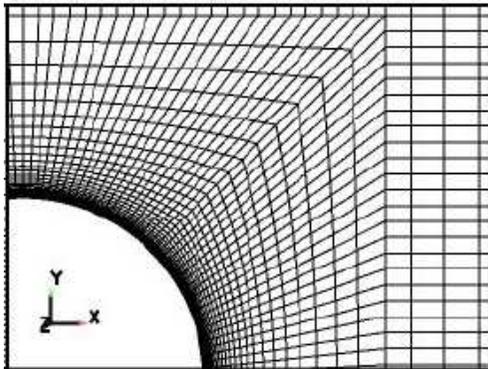
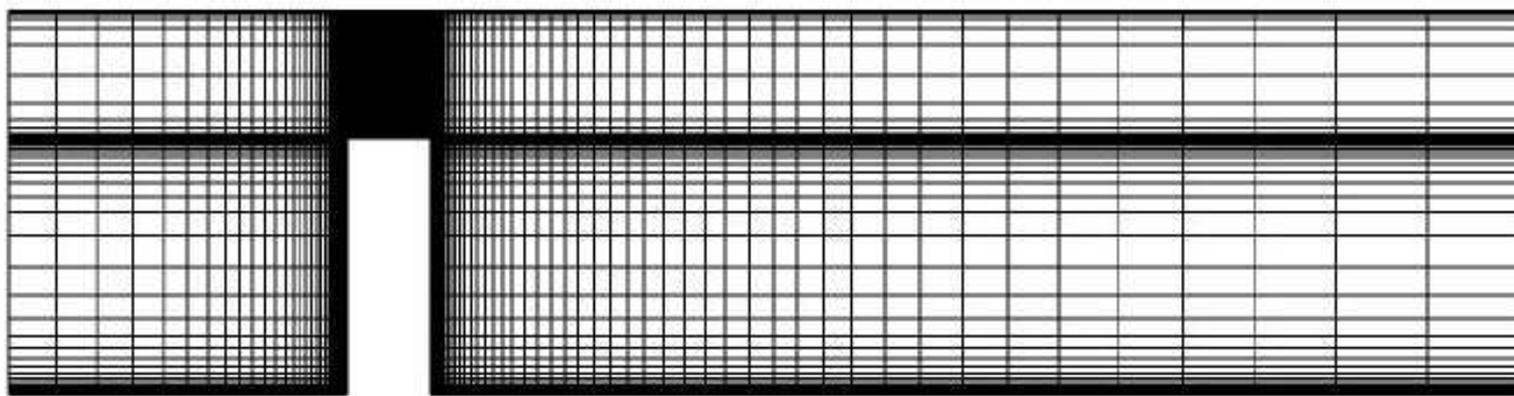


Profil de vitesse $U_{in} = az + b$ et $U_b = \int_0^N U_{in} dz$, $U_b = 1 \text{ m/s} \Leftrightarrow Re = 43000$

Intensité turbulente $I_k = 2\%$

Longueur de mélange $L_{int} = 2 \text{ cm} \rightarrow k = 3/2 U_b^2 I_k^2 \quad \varepsilon = C_\mu^{3/4} k^{3/2} / L_{int}$

Maillage et sensibilité

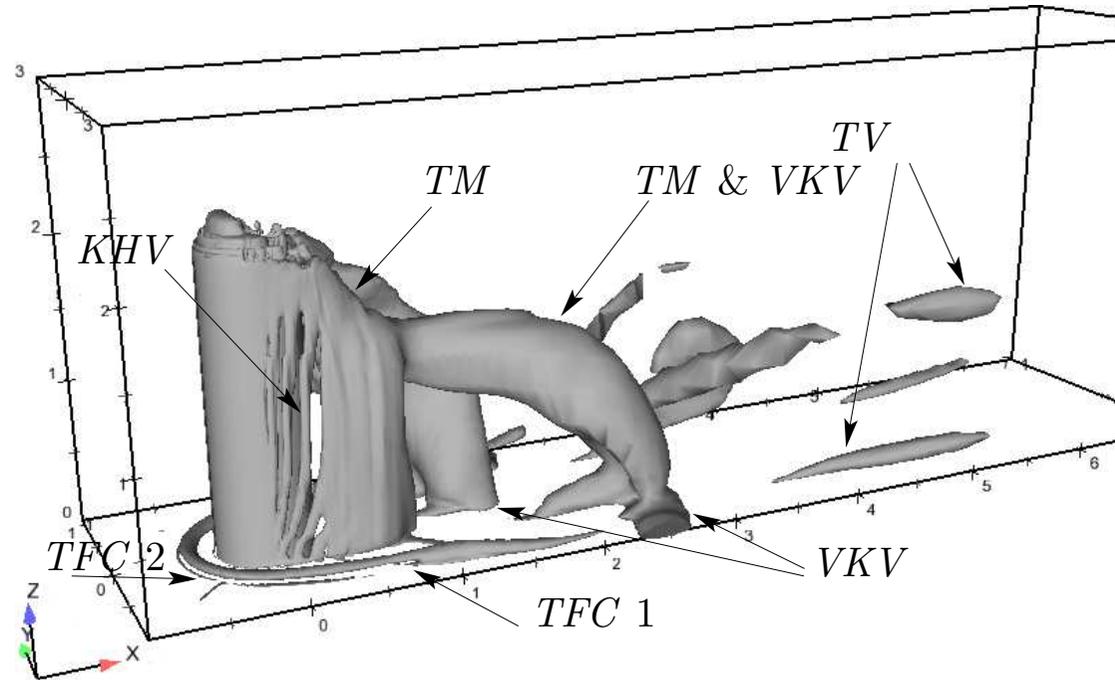
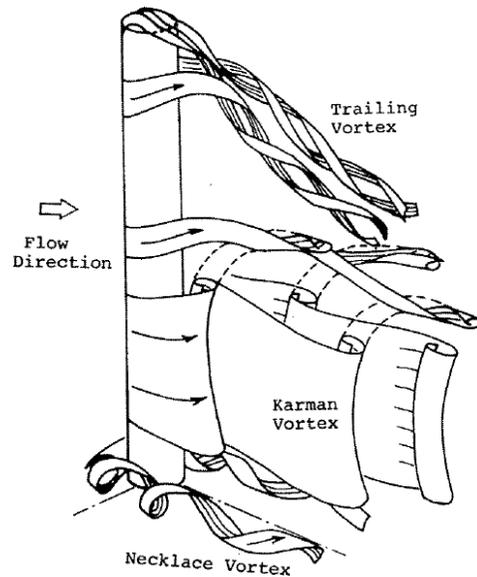


Sensibilité au maillage raisonnable.

Plan de l'exposé

1. Présentation des codes de calcul
2. Écoulement autour d'un cylindre de hauteur finie
 - (a) Simulation isotherme (expérience du LEA)
 - (b) Simulations anisothermes (expérience VALIDA)
 - i. Convection mixte
 - ii. Convection naturelle
3. Piste d'amélioration par modélisation au second ordre
 - (a) Prise en compte des effets de paroi
 - (b) Construction d'un modèle algébrique des flux thermiques
 - i. Validation : tests *a priori*, simulations
4. Conclusions et perspectives

Champ instantané



(d) Kawamura *et al.* (1984) (e) $k-\omega$ SST : Iso-contour instantané du critère-Q

Intégralité des structures recensées par la bibliographie retrouvées, $St \simeq 0.19$.

TFC : Tourbillon en Fer à Cheval

TLV : Tornado-Like Vortices

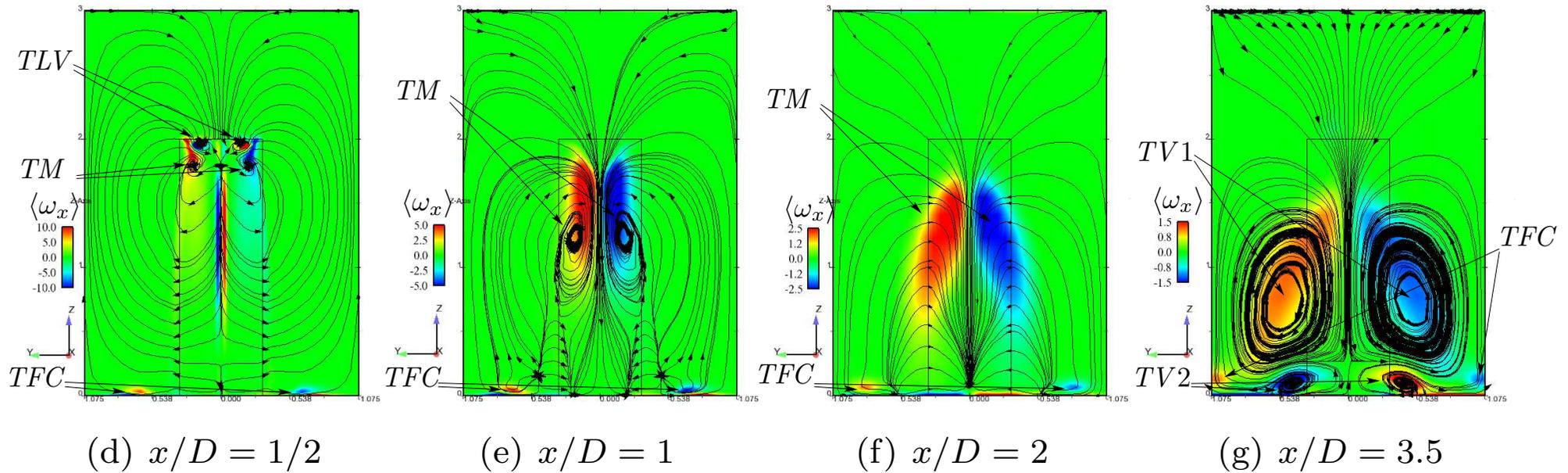
VKV : Von Kàrmàn Vortices

KHV : Kelvin-Helmholtz Vortices

TV : Trailing Vortices

TM : Tourbillons marginaux

Lignes de courant moyennes dans différentes sections droites



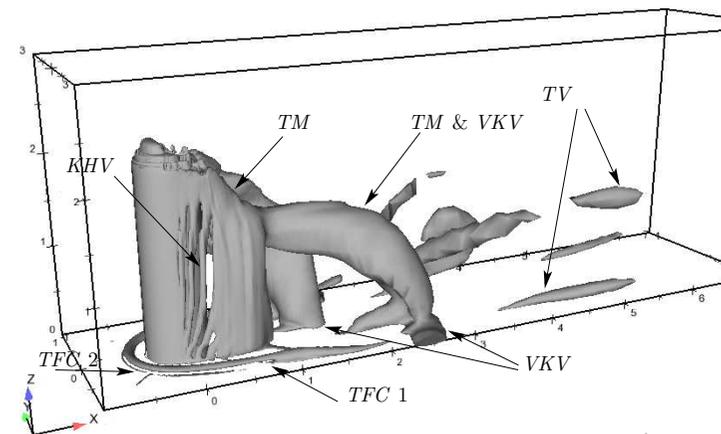
Descente des tourbillons marginaux ;
Autres tourbillons visibles : *TFC*, *TLV* et *TV*.

TFC : Tourbillon en Fer à Cheval

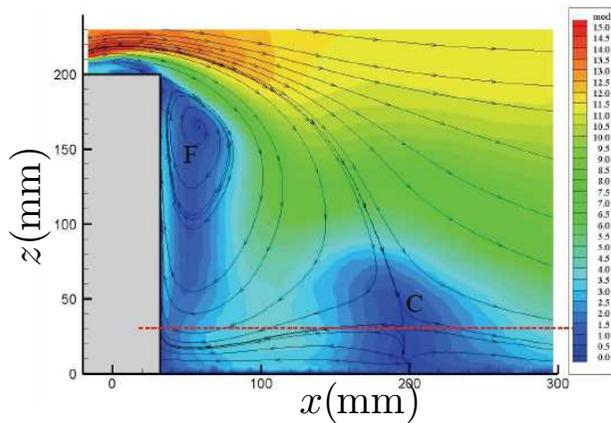
TLV : Tornado-Like Vortices

TV : Trailing Vortices

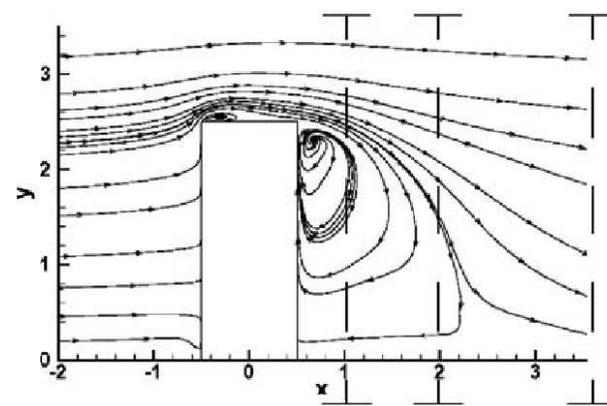
TM : Tourbillons marginaux



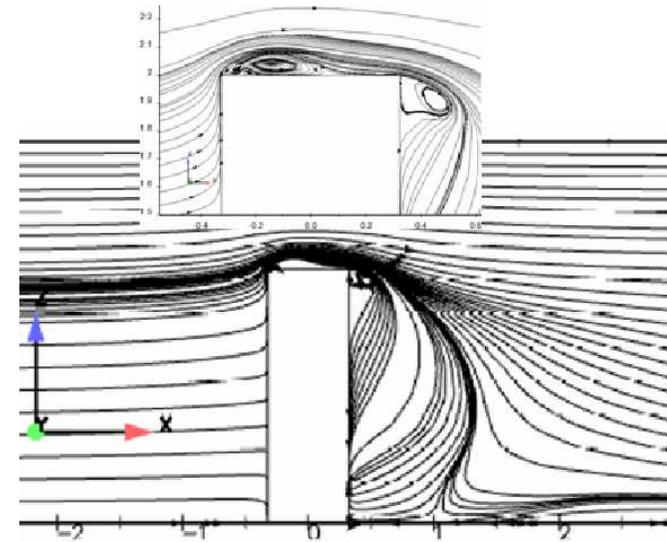
Lignes de courant moyennes dans le plan médian



(d) Expérience du LEA



(e) LES de Fröhlich & Rodi (2004)



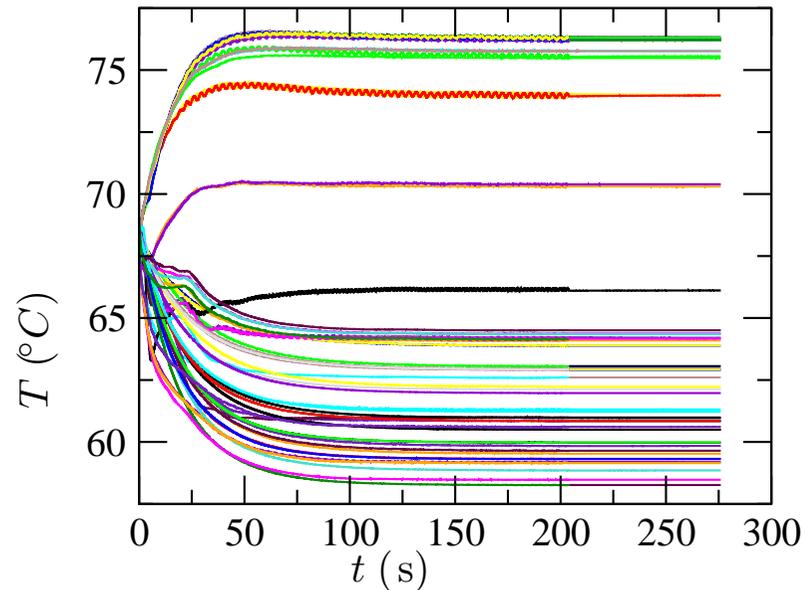
(f) Résultats URANS issus du $k-\omega$ SST

Résultats expérimentaux du LEA cohérents avec la LES de Fröhlich & Rodi ;
Résultats URANS ($k-\omega$ SST) qualitativement cohérents avec l'expérience et la
LES.

Plan de l'exposé

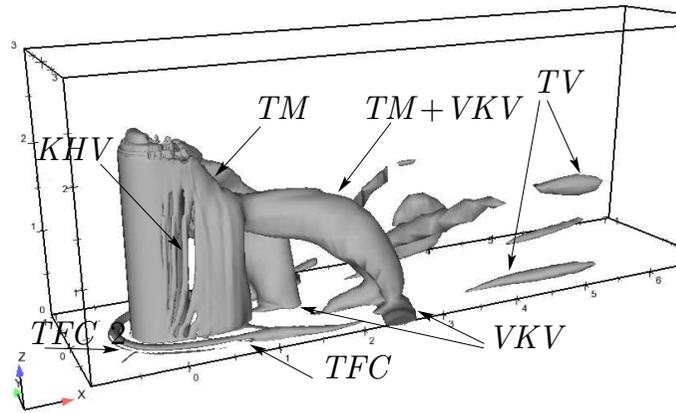
1. Présentation des codes de calcul
2. Écoulement autour d'un cylindre de hauteur finie
 - (a) Simulation isotherme (expérience du LEA)
 - (b) Simulations anisothermes (expérience VALIDA)
 - i. Convection mixte
 - ii. Convection naturelle
3. Piste d'amélioration par modélisation au second ordre
 - (a) Prise en compte des effets de paroi
 - (b) Construction d'un modèle algébrique des flux thermiques
 - i. Validation : tests *a priori*, simulations
4. Conclusions et perspectives

Inertie thermique - régime transitoire

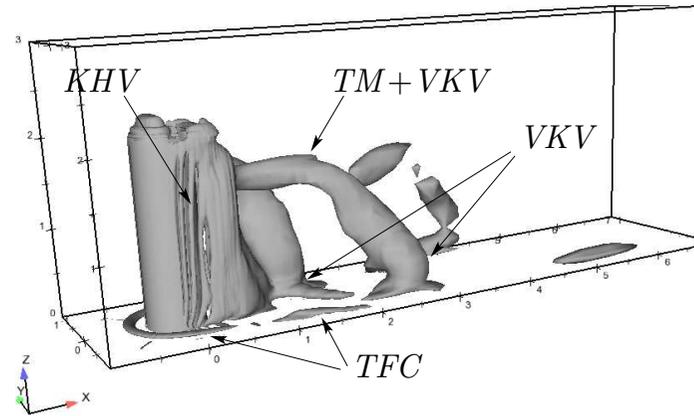


- ✓ Régime transitoire : propriétés physiques modifiées ;
- ✓ Régime permanent : propriétés physiques d'origine → calcul des statistiques.

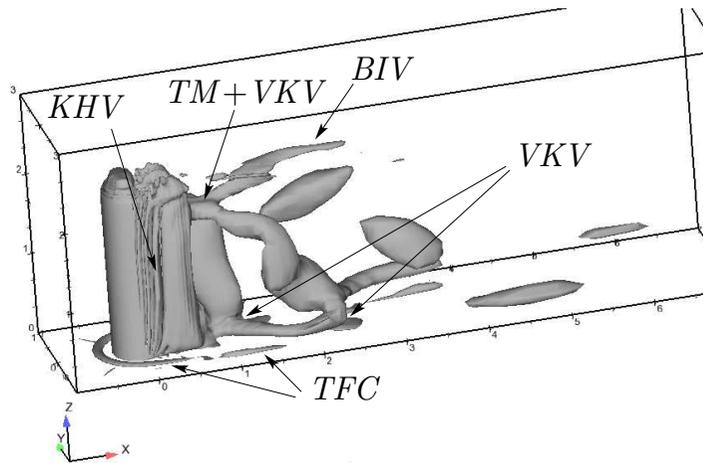
Champ instantané



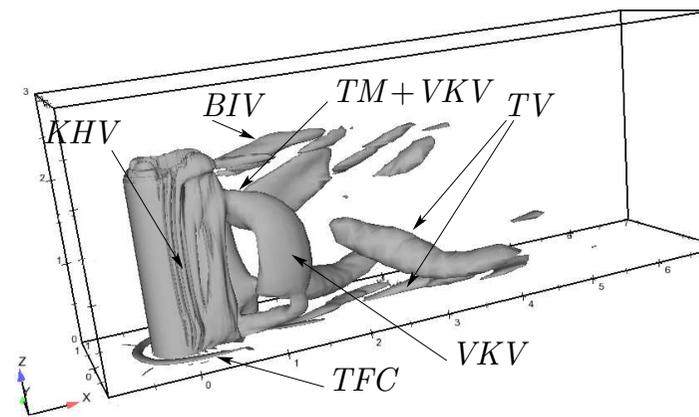
(d) $\Phi = 0 \text{ W/m}^2, Ri = 0$



(e) $\Phi = 330 \text{ W/m}^2, Ri = 4$

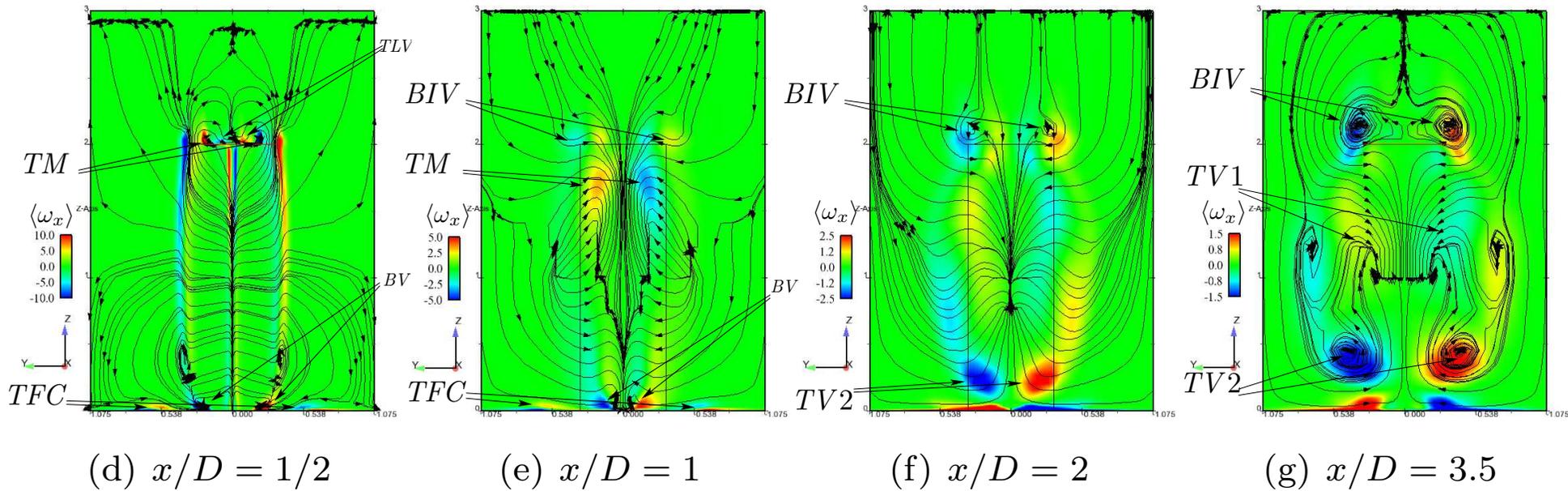


(f) $\Phi = 600 \text{ W/m}^2, Ri = 6$

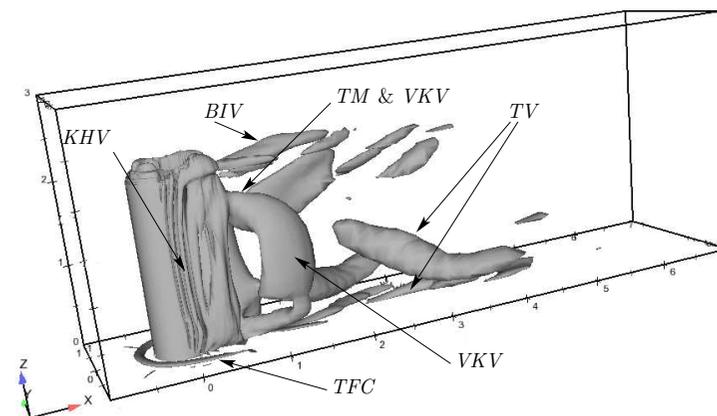


(g) $\Phi = 850 \text{ W/m}^2, Ri = 8$

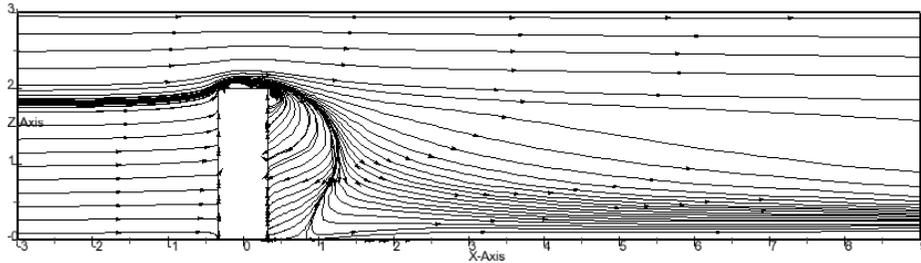
Lignes de courant moyennes dans différentes sections droites - cas $\Phi = 850 \text{ W/m}^2, U_b = 1 \text{ m/s}$



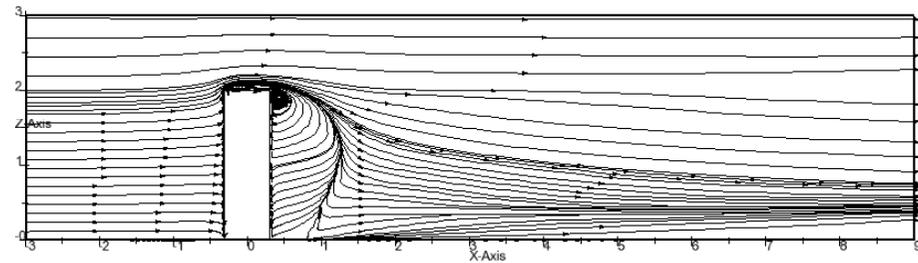
Tourbillons marginaux moins sujets à la déflexion ;
 Visualisation du *Base Vortex* ;
 Naissance des *BIV*, *Buoyancy-Induced Vortex*.



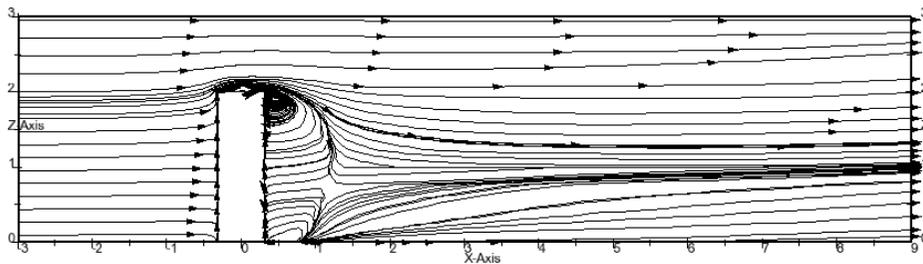
Lignes de courant moyennes dans le plan médian



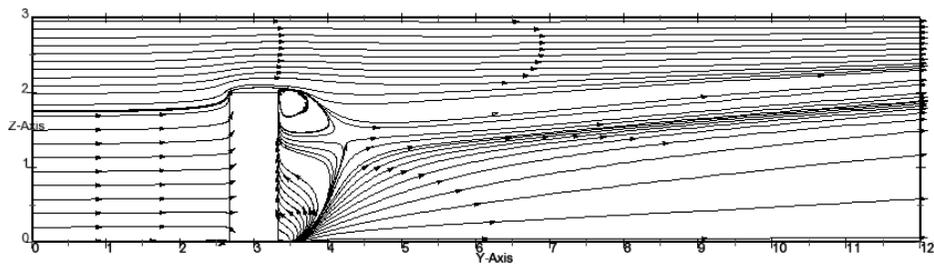
(d) $k-\omega$ SST, $\Phi = 330 \text{ W/m}^2$, $Ri = 4$



(e) $k-\omega$ SST, $\Phi = 600 \text{ W/m}^2$, $Ri = 6$



(f) $k-\omega$ SST, $\Phi = 850 \text{ W/m}^2$, $Ri = 8$



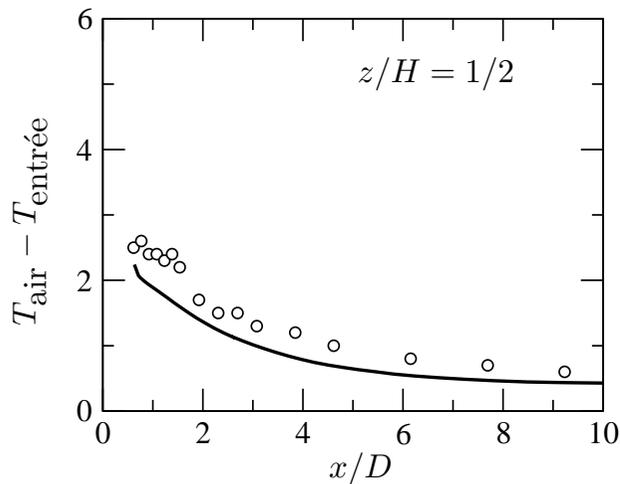
(g) $R_{ij}-\epsilon$ SSG, $\Phi = 600 \text{ W/m}^2$, $Ri = 6$

$\Phi \nearrow \Rightarrow$ diminution de l'intensité de la déflexion ;

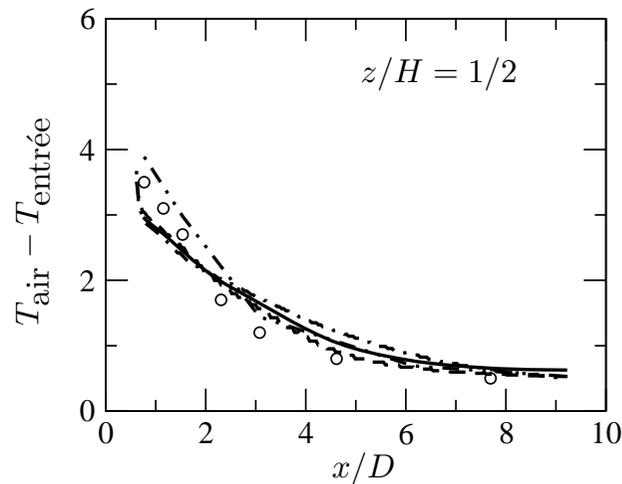
$\Phi \nearrow \Rightarrow$ remontée du point selle depuis la paroi inférieure ;

Résultat du modèle $R_{ij}-\epsilon$ SSG très différent du modèle $k-\omega$ SST.

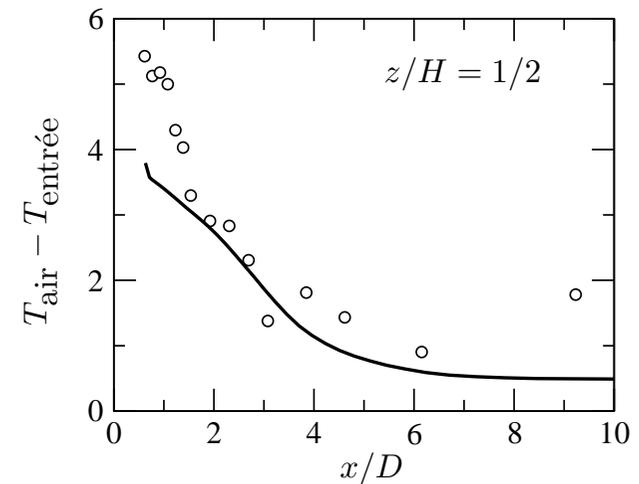
Profils de température moyenne dans le sillage dans le plan médian



(d) $\Phi = 330 \text{ W/m}^2$, $Ri = 4$



(e) $\Phi = 600 \text{ W/m}^2$, $Ri = 6$



(f) $\Phi = 850 \text{ W/m}^2$, $Ri = 8$

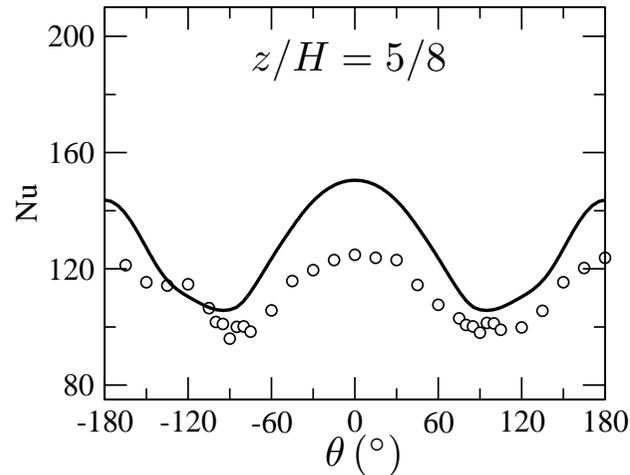
— : $k-\omega$ SST ; - · - : $R_{ij}-\varepsilon$ SSG ; - · · - : LES* ; o : essais

Augmentation de ΔT avec la puissance ;

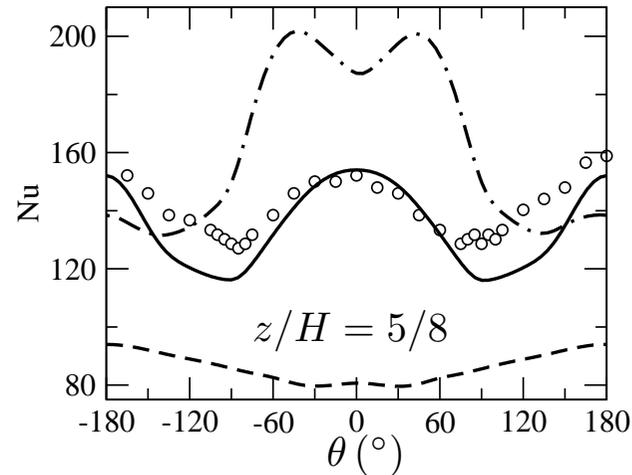
$k-\omega$ SST, $R_{ij}-\varepsilon$ SSG : tendances repectées par rapport à l'expérience VALIDA.

* LES : Benhamadouche *et al.* (2006)

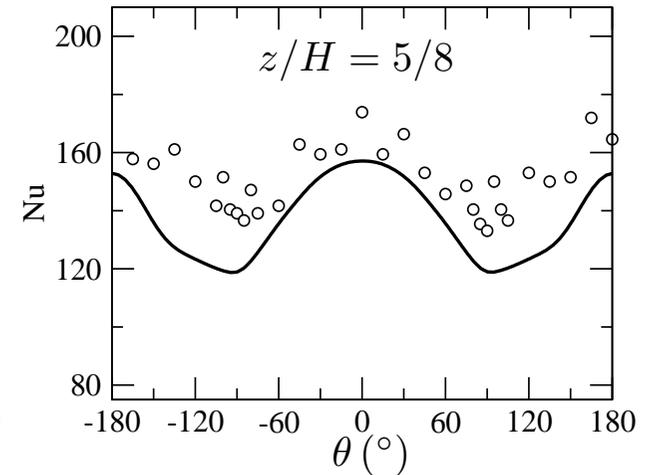
Profils du nombre de Nusselt local



(d) $\Phi = 330 \text{ W/m}^2$, $Ri = 4$



(e) $\Phi = 600 \text{ W/m}^2$, $Ri = 6$



(f) $\Phi = 850 \text{ W/m}^2$, $Ri = 8$

— : $k-\omega$ SST ; - - - : $R_{ij}-\varepsilon$ SSG ; - · - : LES ; o : essais

Augmentation du nombre de Nusselt avec la puissance ;

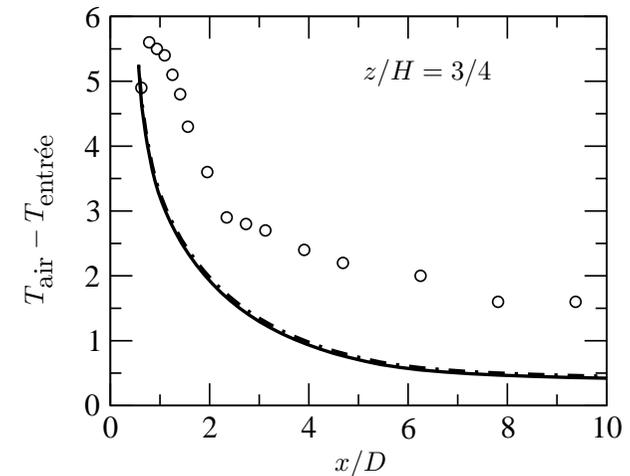
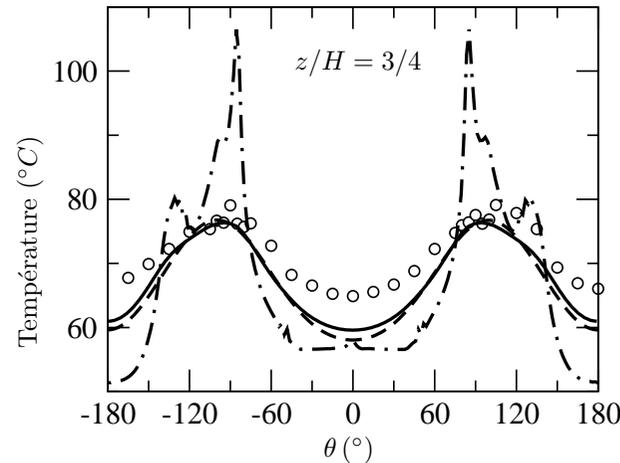
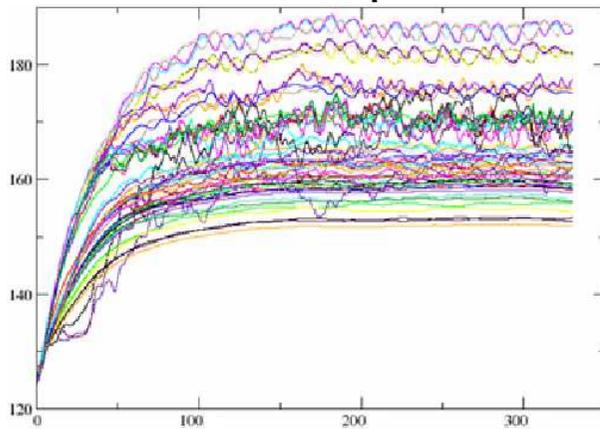
Résultats corrects avec le $k-\omega$ SST $\forall \Phi$ par rapport à l'expérience VALIDA ;

Résultats très écartés avec le $R_{ij}-\varepsilon$ SSG (lois de paroi) et la LES (maillage).

Plan de l'exposé

1. Présentation des codes de calcul
2. Écoulement autour d'un cylindre de hauteur finie
 - (a) Simulation isotherme (expérience du LEA)
 - (b) Simulations anisothermes (expérience VALIDA)
 - i. Convection mixte
 - ii. Convection naturelle
3. Piste d'amélioration par modélisation au second ordre
 - (a) Prise en compte des effets de paroi
 - (b) Construction d'un modèle algébrique des flux thermiques
 - i. validation : tests *a priori*, simulations
4. Conclusions et perspectives

Influence de la conduction



— : $k-\omega$ SST+couplage ; - . - : $k-\omega$ SST ; - - - : filtre gaussien ; o : essais

Impossibilité d'établissement des températures dans l'épaisseur du cylindre ;

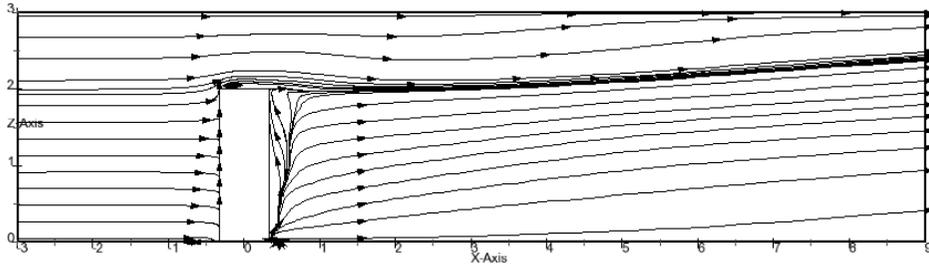
état symétrique jamais atteint \Rightarrow couplage abandonné ;

Écarts considérables de T sur la peau du cylindre quand prise en compte ou non de la conduction ;

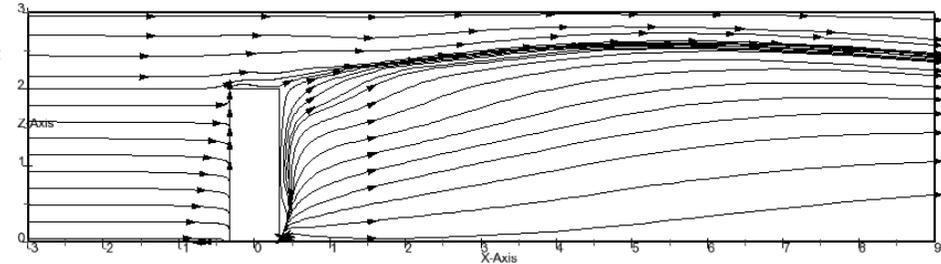
Filtre gaussien approxime très bien les températures de peau ;

Influence de la conduction marginale loin du cylindre.

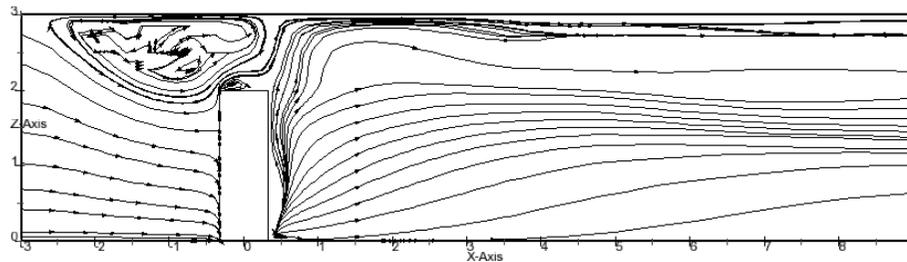
Lignes de courant moyennes dans le plan médian



(d) $k-\omega$ SST, $U_b = 0.75$ m/s, $Ri = 14$



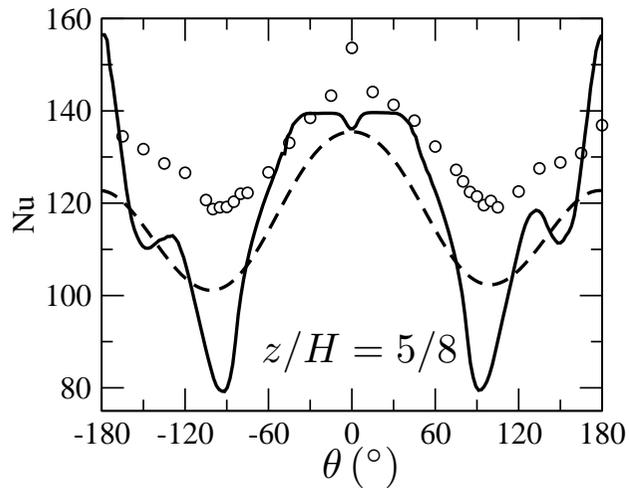
(e) $k-\omega$ SST, $U_b = 0.5$ m/s, $Ri = 34$



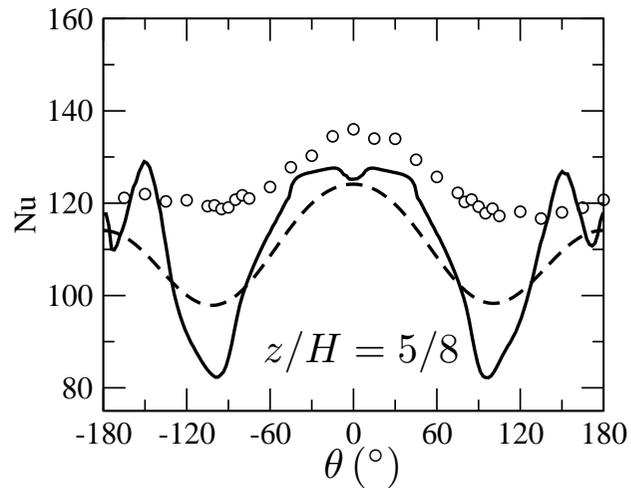
(f) $k-\omega$ SST, $U_b = 0.25$ m/s, $Ri = 140$

Absence de déflexion derrière le cylindre, absence d'allée de Von Kàrmàn ;
Séparation de l'écoulement en deux qui s'élève lorsque $U_b \searrow$;
Macro-structure quand $U_b = 0.25$ m/s \rightarrow *Ground Vortex*.

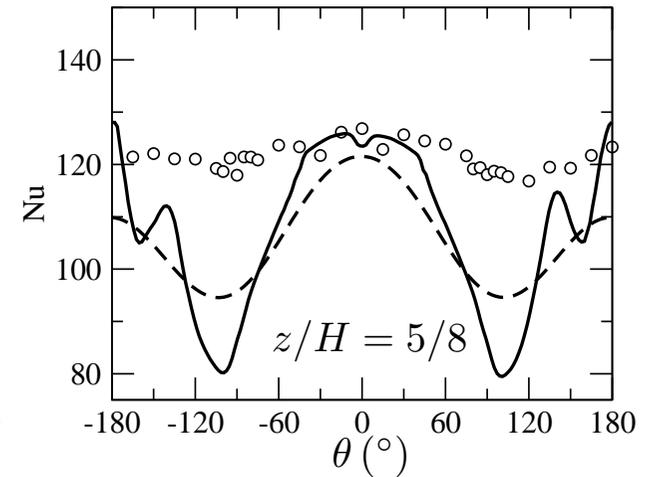
Profils du nombre de Nusselt local



(d) $U_b = 0.75$ m/s, $Ri = 14$



(e) $U_b = 0.5$ m/s, $Ri = 34$



(f) $U_b = 0.25$ m/s, $Ri = 140$

Globalement, nombre de Nusselt sous-estimé ;

Similitude des profils avec le cas $\Phi = 330$ W/m², $U_b = 1$ m/s sans conduction.

Plan de l'exposé

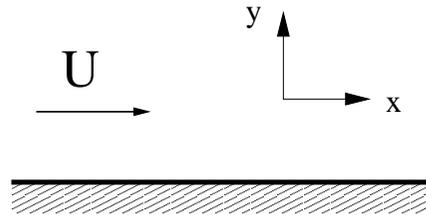
1. Présentation des codes de calcul
2. Écoulement autour d'un cylindre de hauteur finie
 - (a) Simulation isotherme (expérience du LEA)
 - (b) Simulations anisothermes (expérience VALIDA)
 - i. Convection mixte
 - ii. Convection naturelle
3. Piste d'amélioration par modélisation au second ordre
 - (a) Prise en compte des effets de paroi
 - (b) Construction d'un modèle algébrique des flux thermiques
 - i. validation : tests *a priori*, simulations
4. Conclusions et perspectives

Modèle à relaxation elliptique

✓ calculs RANS : nécessité d'un modèle pour $\overline{u_i u_j}$

Équations aux tensions de Reynolds :

$$\frac{D\overline{u_i u_j}}{Dt} = P_{ij} + D_{ij}^\nu - D_{ij}^T + \phi_{ij}^* - \varepsilon_{ij}$$



✓ $\overline{v^2} = \mathcal{O}(y^4)$ $\overline{u^2} = \overline{w^2} = \mathcal{O}(y^2) \Rightarrow$ effet de blocage

effet de blocage de la paroi }
Non-localité de la pression } \Rightarrow Relaxation Elliptique (Durbin, 1993) :
6 équations supplémentaires sur ϕ_{ij}^* .

$$f_{ij} - L^2 \nabla^2 f_{ij} = \phi_{ij}^h \quad (1)$$

Modèle à pondération elliptique,

EB-RSM : *Elliptic-Blending Reynolds Stress Model*

(Manceau & Hanjalić, 2002 ; Manceau, 2005)

✓ EB-RSM : seulement **1** équation supplémentaire sur ϕ_{ij}^* au lieu de **6**.

$$\cancel{f_{ij} - L^2 \nabla^2 f_{ij} = \phi_{ij}^h}$$

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

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

$$\phi_{ij}^w = -5 \frac{\varepsilon}{k} \left[\overline{u_i u_k n_j n_k} + \overline{u_j u_k n_i n_k} - \frac{1}{2} \overline{u_k u_l n_k n_l} (n_i n_j + \delta_{ij}) \right] \quad (\text{limite 2C})$$
$$\mathbf{n} = \frac{\nabla \alpha}{\|\nabla \alpha\|}$$

EB-RSM testé avec succès sur différentes configurations dans les régimes de convection forcée, naturelle et mixte (Thielen *et al.*, 2005 ; Borello *et al.*, 2005 ; Choi & Kim, 2008 ; Viti *et al.*, 2007 ; *etc.*).

Plan de l'exposé

1. Présentation des codes de calcul
2. Écoulement autour d'un cylindre de hauteur finie
 - (a) Simulation isotherme (expérience du LEA)
 - (b) Simulations anisothermes (expérience VALIDA)
 - i. Convection mixte
 - ii. Convection naturelle
3. Piste d'amélioration par modélisation au second ordre
 - (a) Prise en compte des effets de paroi
 - (b) Construction d'un modèle algébrique des flux thermiques
 - i. validation : tests *a priori*, simulations
4. Conclusions et perspectives

Équations de départ

Utilisation de l'approximation de Boussinesq ;

$$\begin{aligned}
 \underbrace{\frac{D\overline{u_i\theta}}{Dt}}_{C_{\theta i}} &= \underbrace{-\overline{u_j\theta} \frac{\partial U_i}{\partial x_j}}_{P_{\theta i}^U} - \underbrace{\overline{u_i u_j} \frac{\partial T}{\partial x_j}}_{P_{\theta i}^T} - \underbrace{g_i \beta \overline{\theta^2}}_{G_{\theta i}} - \underbrace{\frac{\theta}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i}}_{\boxed{\phi_{\theta i}^*}} - \underbrace{(\lambda + \nu) \frac{\partial \theta}{\partial x_j} \frac{\partial u_i}{\partial x_j}}_{\boxed{\varepsilon_{\theta i}}} \\
 &+ \underbrace{\frac{\partial}{\partial x_j} (-\overline{\theta u_i u_j})}_{D_{\theta i}^T} + \underbrace{\frac{\partial}{\partial x_j} \left(\lambda \frac{\partial \theta}{\partial x_j} u_i + \nu \theta \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right)}_{\boxed{D_{\theta i}^\nu}}
 \end{aligned} \tag{2}$$

Modèle $\phi_{\theta i}^*$ donné par Launder (1975) :

$$\phi_{\theta i}^* = -C_{\theta 1} \frac{\varepsilon}{k} \overline{u_i \theta} - C_{\theta 2} P_{\theta i}^U - C'_{\theta 2} P_{\theta i}^T - C_{\theta 3} G_{\theta i} \tag{3}$$

Contexte industriel $\Rightarrow \cancel{\frac{D\overline{u_i\theta}}{Dt}} = \dots$

Modélisation algébrique classique

Vecteur des flux adimensionné $\zeta_i = \overline{u_i\theta} / \sqrt{k\overline{\theta^2}} \rightarrow$ tenseur d'anisotropie ;
Équilibre faible supposé, Dol *et al.* (1997) et Hanjalic (2002) :

- $\frac{D\zeta_i}{Dt} = 0$;
- $\mathcal{D}_{\theta i} = \overline{u_i\theta} \left(\frac{\mathcal{D}_k}{k} + \frac{\mathcal{D}_{\overline{\theta^2}}}{\overline{\theta^2}} \right)$ où \mathcal{D} . représente la diffusion totale ;
- entre les termes de production et de dissipation de k et $\overline{\theta^2}$.

Ces hypothèses conduisent au modèle algébrique des flux thermiques (AFM, *Algebraic Flux Model*), Hanjalic (2002) :

$$\overline{u_i\theta} = -C_\theta \frac{k}{\varepsilon} \left[\zeta \overline{u_i u_j} \frac{\partial T}{\partial x_j} + \xi \overline{u_j \theta} \frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \eta \beta g_i \overline{\theta^2} \right] \quad (4)$$

Extension du AFM à la région de proche paroi

Modèle algébrique des flux thermiques avec pondération elliptique

(EB-AFM : *Elliptic-Blending Algebraic Flux Model*)

Version algébrique du modèle de Shin *et al.*, 2008 :

$$\phi_{\theta i}^* - \varepsilon_{\theta i} = -D_{\theta i}^{\nu} \quad (5)$$

Formule de pondération analogue à celle utilisée dans l'EB-RSM :

$$\phi_{\theta i}^* - \varepsilon_{\theta i} = (1 - \alpha^3)(\phi_{\theta i}^w - \varepsilon_{\theta i}^w) + \alpha^3(\phi_{\theta i}^h - \varepsilon_{\theta i}^h) \quad (6)$$

$\phi_{\theta i}^h$ toujours donné par Launder (1975) et Kenjeres (2005) ;

$$\varepsilon_{\theta i}^w = C_{\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} \overline{u_i \theta}, \quad C_{\varepsilon} = \frac{1}{2} \left(1 + \frac{1}{Pr} \right)$$
$$\phi_{\theta i}^w = - \left[1 + \frac{1}{2} \left(1 + \frac{1}{Pr} \right) \right] \frac{\varepsilon}{k} \overline{u_j \theta} n_i n_j$$

Méthodologie algébrique utilisée pour obtenir le AFM conduit ici au modèle EB-AFM :

$$\overline{u_i \theta} = -C_\theta \frac{k}{\varepsilon} \left[\zeta \overline{u_i u_j} \frac{\partial T}{\partial x_j} + \xi \overline{u_j \theta} \frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \eta \beta g_i \overline{\theta^2} + \gamma \frac{\varepsilon}{k} \overline{u_k \theta} n_i n_k \right] \quad (7)$$

$$C_\theta = \frac{C'_\theta}{\alpha^3 C_{\theta 1} + (1 - \alpha^3) C_\varepsilon}$$

$$\zeta = 1 - \alpha^3 C'_{\theta 2}$$

$$\xi = 1 - \alpha^3 C_{\theta 2}$$

$$\eta = 1 - \alpha^3 C_{\theta 3}$$

$$\gamma = (1 - \alpha^3) \left[1 + \frac{1}{2} \left(1 + \frac{1}{Pr} \right) \right]$$

Calibration de Launder (1975) : $C_{\theta 1} = 3.0$, $C_{\theta 2} = 0.55$, $C'_{\theta 2} = 0$, $C_{\theta 3} = 0.55$

Modèles utilisés

Modèles Standards : $C_\theta = 0.235$

(Coefficients constants)

$$\text{AFM : } \overline{u_i \theta} = -C_\theta \frac{k}{\varepsilon} \left[\zeta \overline{u_i u_j} \frac{\partial T}{\partial x_j} + \xi \overline{u_j \theta} \frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \eta \beta g_i \overline{\theta^2} \right]$$

$$\text{GGDH : } \overline{u_i \theta} = -C_\theta \frac{k}{\varepsilon} \left[\zeta \overline{u_i u_j} \frac{\partial T}{\partial x_j} \right]$$

Modèles avec prise en compte de la zone de proche paroi : $C_\theta = 0.227$

(Coefficients variables)

$$\text{EB-AFM : } \overline{u_i \theta} = -C_\theta \frac{k}{\varepsilon} \left[\zeta \overline{u_i u_j} \frac{\partial T}{\partial x_j} + \xi \overline{u_j \theta} \frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \eta \beta g_i \overline{\theta^2} + \gamma \frac{\varepsilon}{k} \overline{u_k \theta} n_i n_k \right]$$

$$\text{EB-GGDH : } \overline{u_i \theta} = -C_\theta \frac{k}{\varepsilon} \left[\zeta \overline{u_i u_j} \frac{\partial T}{\partial x_j} + \gamma \frac{\varepsilon}{k} \overline{u_k \theta} n_i n_k \right]$$

GGDH : *Generalized Gradient Diffusion Hypothesis*

AFM : *Algebraic FLux Model*

EB-GGDH : *Elliptic Blending-Generalized Gradient Diffusion Hypothesis*

EB-AFM : *Elliptic Blending-Algebraic FLux Model*

Plan de l'exposé

1. Présentation des codes de calcul
2. Écoulement autour d'un cylindre de hauteur finie
 - (a) Simulation isotherme (expérience du LEA)
 - (b) Simulations anisothermes (expérience VALIDA)
 - i. Convection mixte
 - ii. Convection naturelle
3. Piste d'amélioration par modélisation au second ordre
 - (a) Prise en compte des effets de paroi
 - (b) Construction d'un modèle algébrique des flux thermiques
 - i. **Validation : tests *a priori*, simulations**
4. Conclusions et perspectives

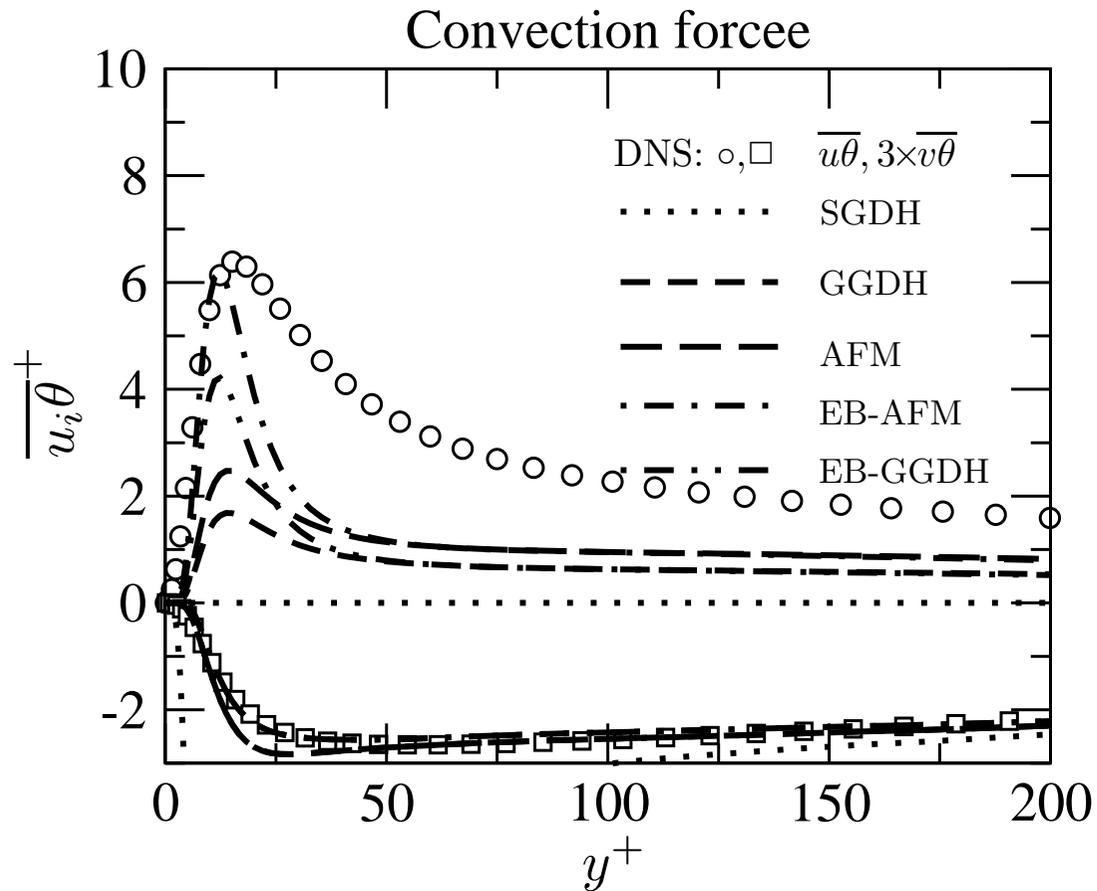
Validation du nouveau modèle

	Re_τ	Gr	\vec{g}/g	Pr
Convection forcée (Kawamura <i>et al.</i> , 1999)	636	0	NA	0.71
Convection mixte (Kasagi & Nishimura, 1997)	150	9.6×10^5	$-\vec{e}_x$	0.71
Stratification instable (Iida & Kasagi, 1995)	150	1.3×10^6	$-\vec{e}_y$	0.71
Convection naturelle (Versteegh & Nieuwstadt, 1998)	0	$5 \times 10^6 / 0.709$	$-\vec{e}_x$	0.709

Chaque écoulement est défini par un jeu de 4 paramètres :

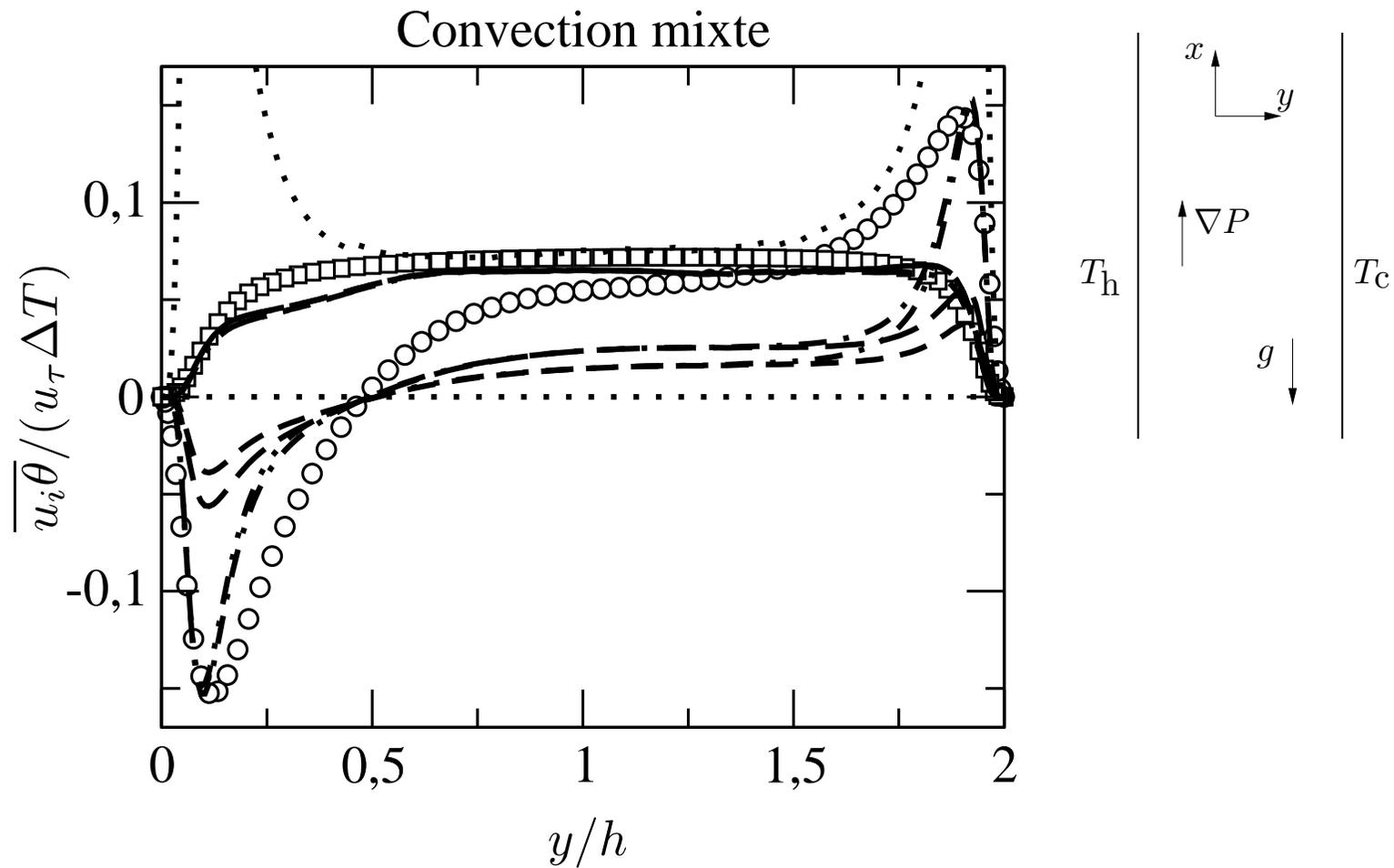
$$Re_\tau = \frac{u_\tau h}{\nu}, \quad Gr = \frac{g\beta\Delta T(2h^3)}{\nu^2}, \quad \frac{\vec{g}}{g} \quad \text{et} \quad Pr = \frac{\nu}{\lambda}.$$

Tests *a priori*

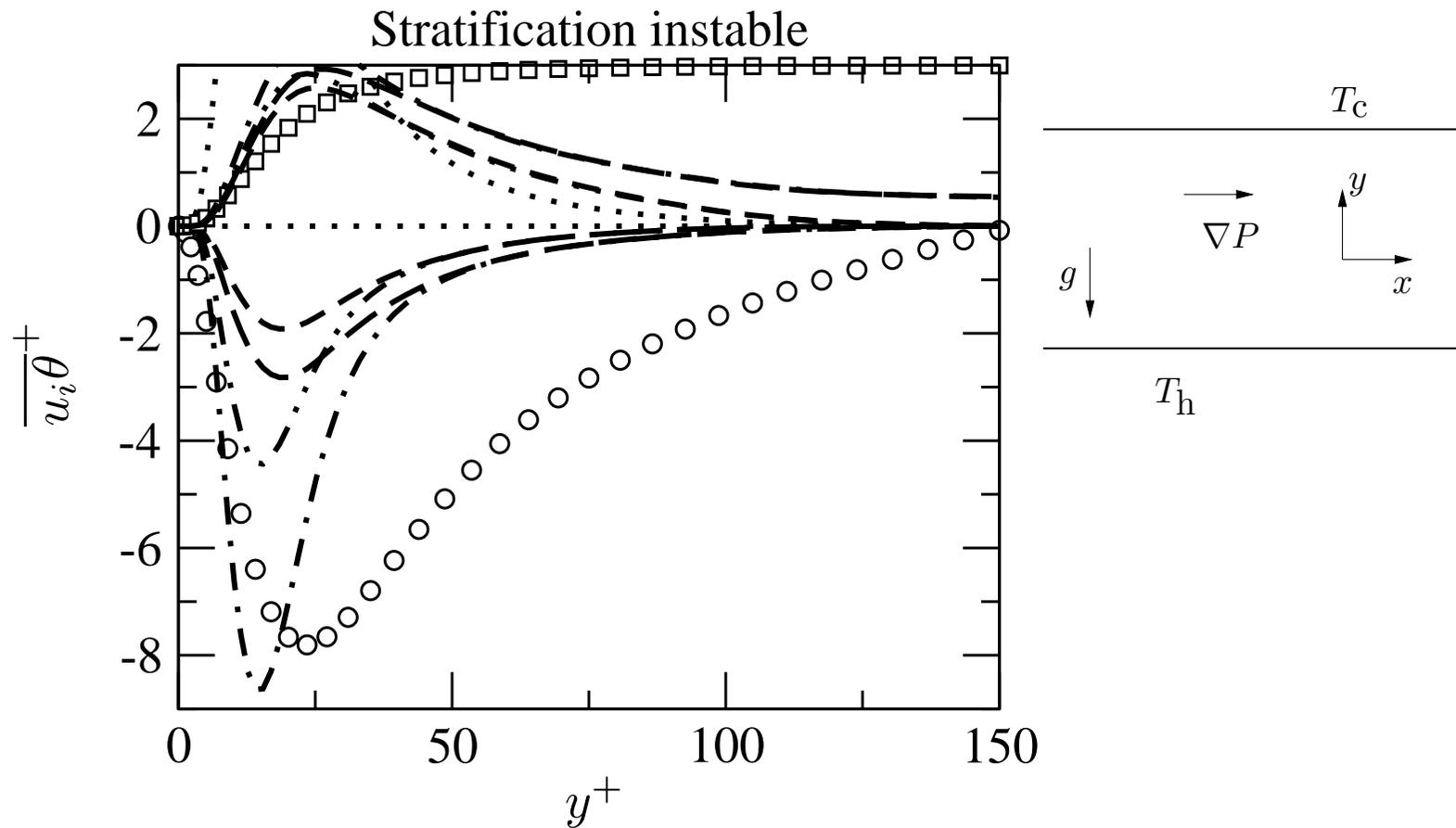


Modèle SGDh :
$$\overline{u_i\theta} = \frac{\mu_t}{Pr_t} \frac{\partial T}{\partial x_i}$$

EB-AFM : amélioration significative de la composante longitudinale.

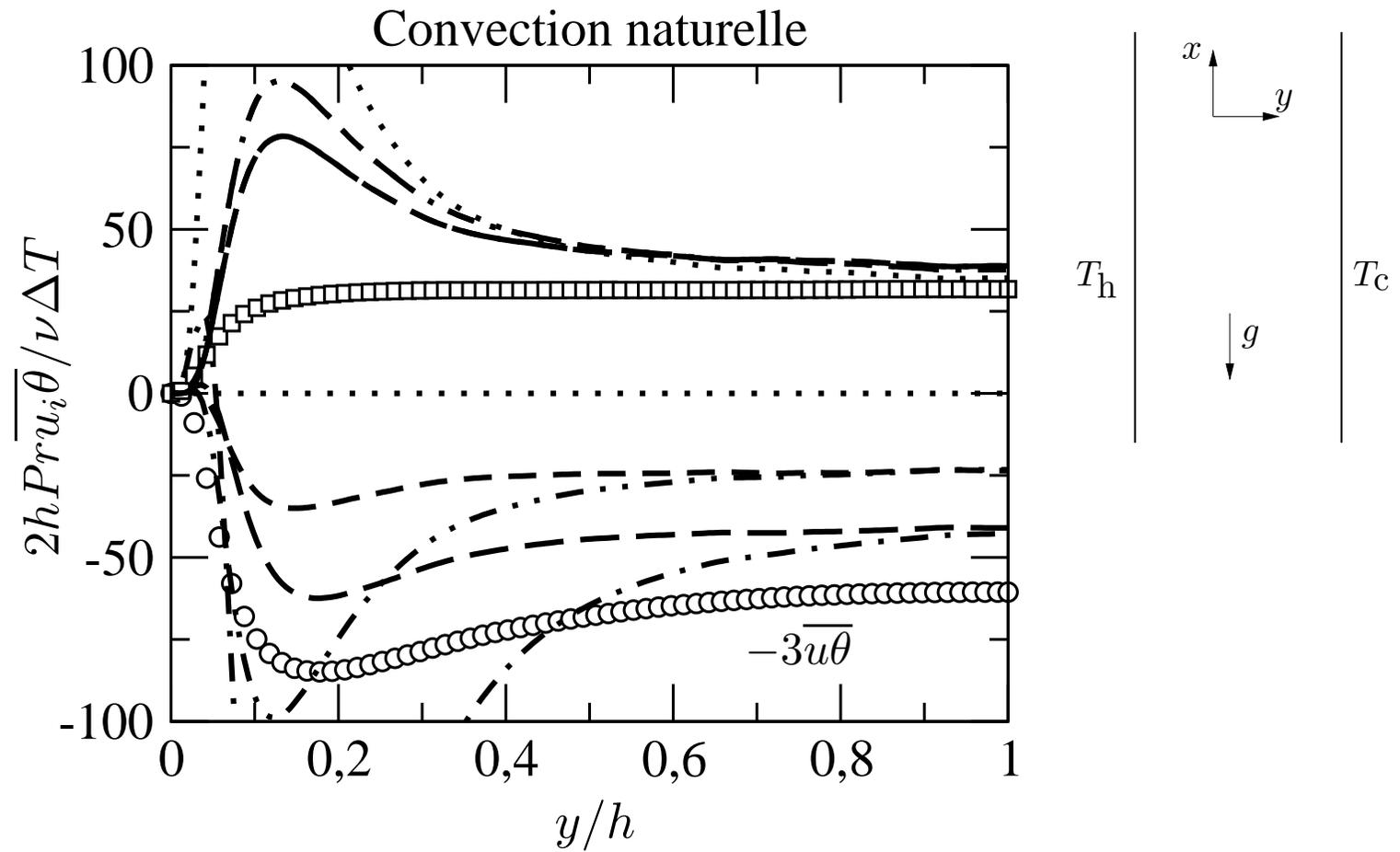


Résultats globalement analogues au cas de convection forcée ;
Influence de la flottabilité marginale.



Écarts en stratification instable.

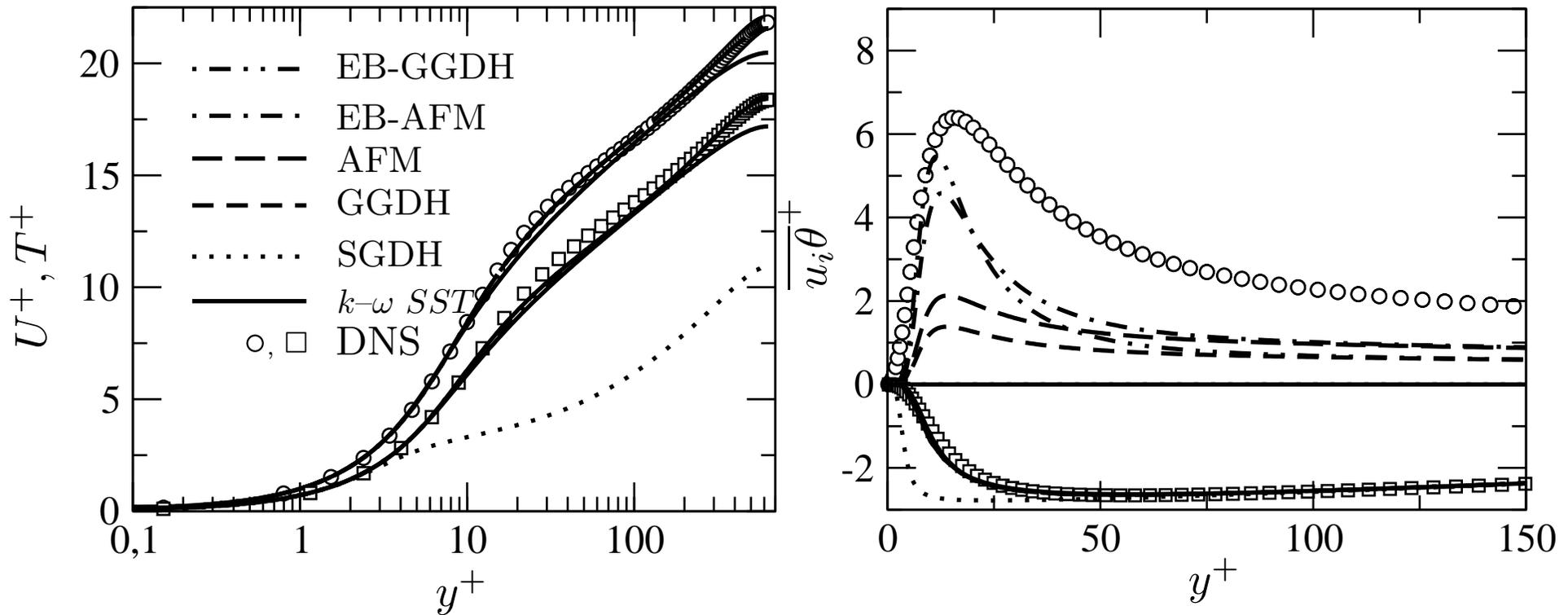
$\overline{v\theta}|_{y=h}^{DNS}$: équilibre régi par $g_{\theta 2}$, $D_{\theta 2}^T$ et $D_{\theta 2}^p$.



Amélioration des flux thermiques, longitudinal en particulier.
Écarts en stratification instable et en convection naturelle.

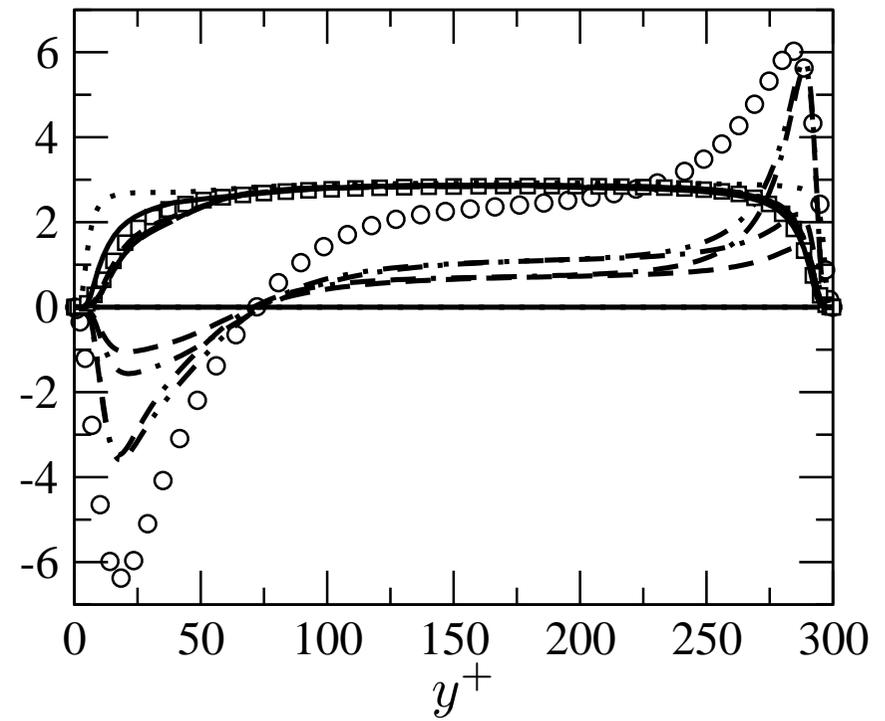
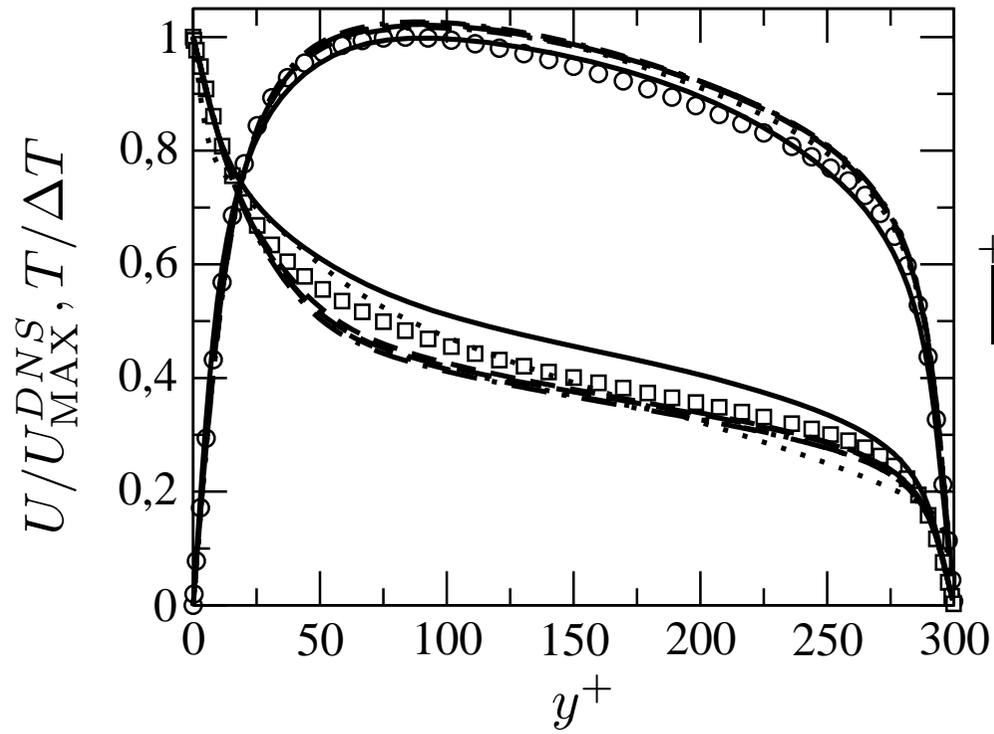
Calculs : champs de vitesse et de température

Convection forcée

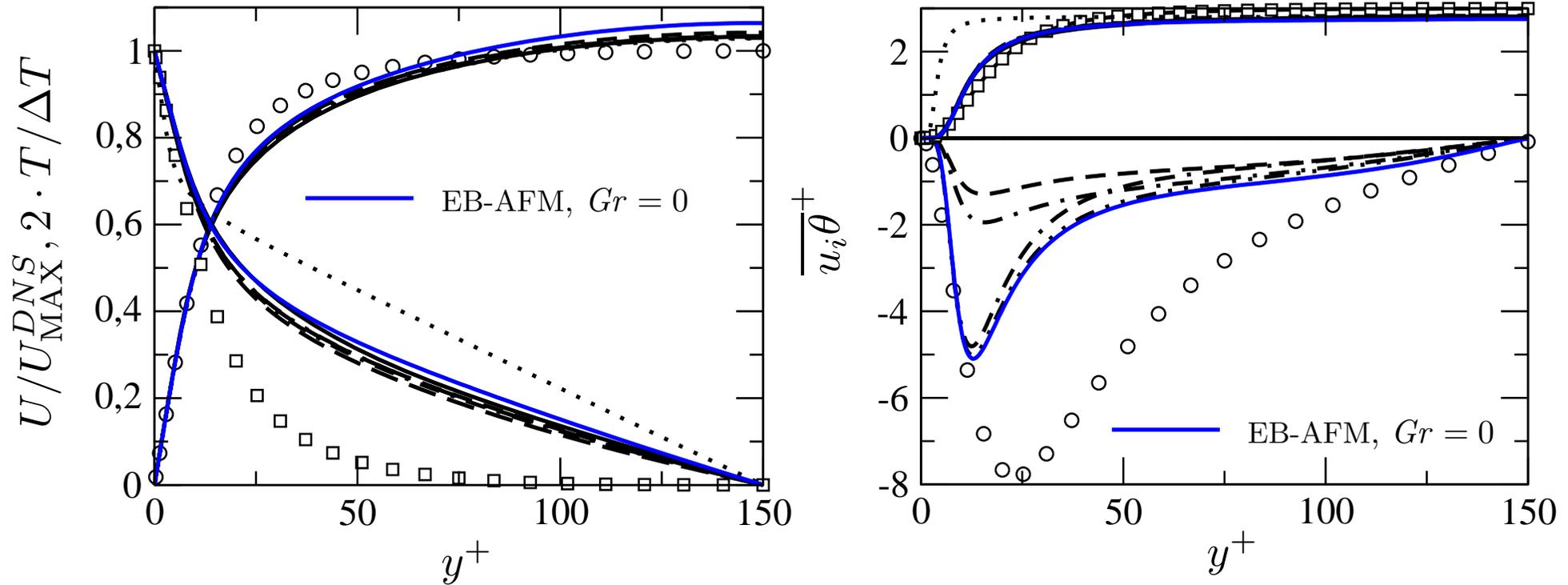


Problèmes avec le modèle SGDH ;

Convection mixte



Stratification instable

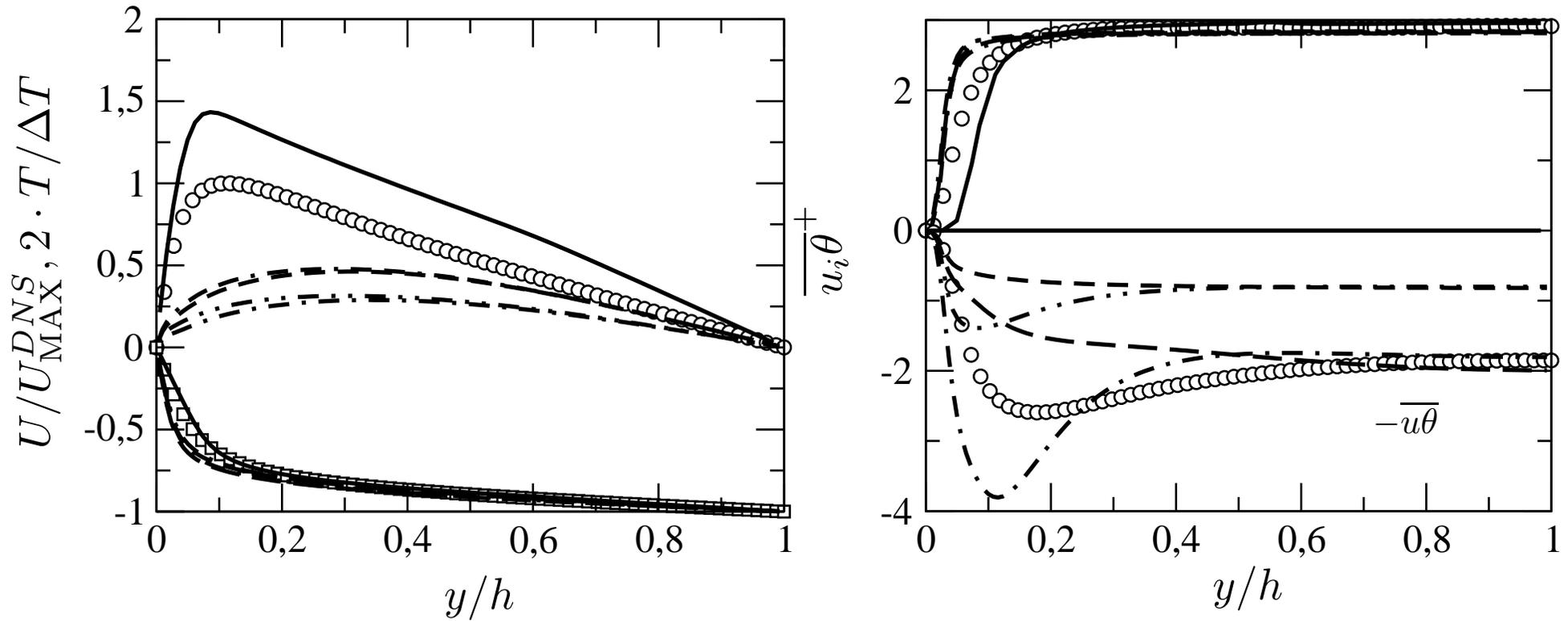


Influence de la flottabilité marginale ;

DNS montre \nexists loi logarithmique (U) alors que tous les modèles la prédisent ;

Contribution du flux moléculaire $\Rightarrow \overline{v\theta^+}|_h \neq \overline{v\theta^+}|_h^{DNS}$

Convection naturelle



Profils de température faiblement influencés par le modèle des flux thermiques.

Problèmes avec le modèle SGDh ; convection naturelle difficile à reproduire.

Calculs conformes aux tests *a priori*.

Écarts en stratification instable et convection naturelle.

Plan de l'exposé

1. Présentation des codes de calcul
2. Écoulement autour d'un cylindre de hauteur finie
 - (a) Simulation isotherme (expérience du LEA)
 - (b) Simulations anisothermes (expérience VALIDA)
 - i. Convection mixte
 - ii. Convection naturelle
3. Piste d'amélioration par modélisation au second ordre
 - (a) Prise en compte des effets de paroi
 - (b) Construction d'un modèle algébrique des flux thermiques
 - i. validation : tests *a priori*, simulations
4. Conclusions et perspectives

Conclusions

- ✓ Résultats des simulations URANS bas-Reynolds $k-\omega$ SST dans les différents régimes de convection réalistes :
 - ▷ topologie, profils de température et de nombre de Nusselt moyens cohérents avec l'expérience VALIDA.
 - ▷ précautions à prendre quant à l'analyse de la solution URANS.
- ✓ Simulation $R_{ij}-\varepsilon$ SSG peu réaliste \rightarrow imputables aux lois de paroi.
- ✓ Développement d'un modèle algébrique des flux thermiques valable dans la région de proche paroi (EB-AFM) :
 - ▷ tests *a priori* dans les 3 régimes de convection \rightarrow amélioration des $\overline{u_i\theta}$;
 - ▷ simulations (couplées à l'EB-RSM) fidèles aux tests *a priori* ;
 - ▷ formulation SGDh à proscrire ;

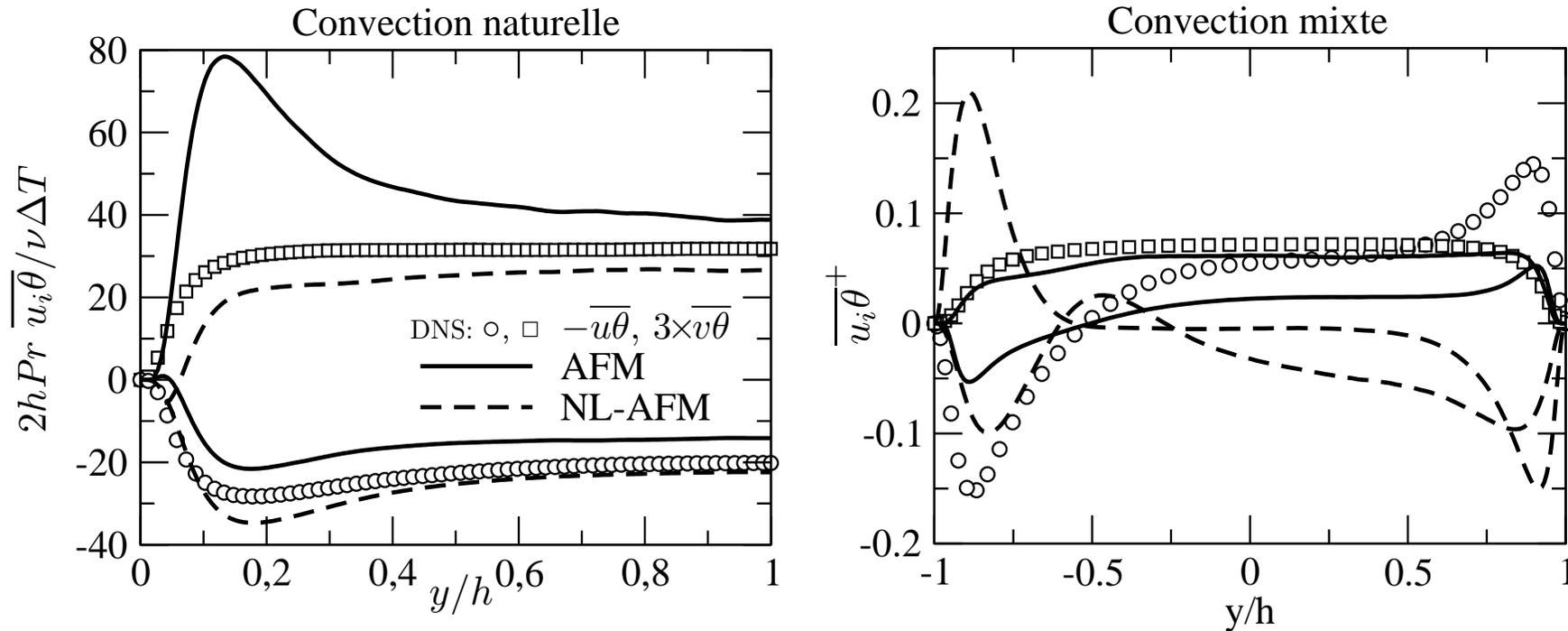
Perspectives

- ✓ URANS alternative intéressante à la LES dans les cas où la connaissance des variations à très grande échelle est suffisante ;
- ✓ Étude plus exhaustive de l'impact des schémas numériques sur la solution ;
- ✓ Extension de l'étude de l'EB-AFM sur différents écoulements ;
- ✓ Application de l'EB-AFM sur VALIDA.





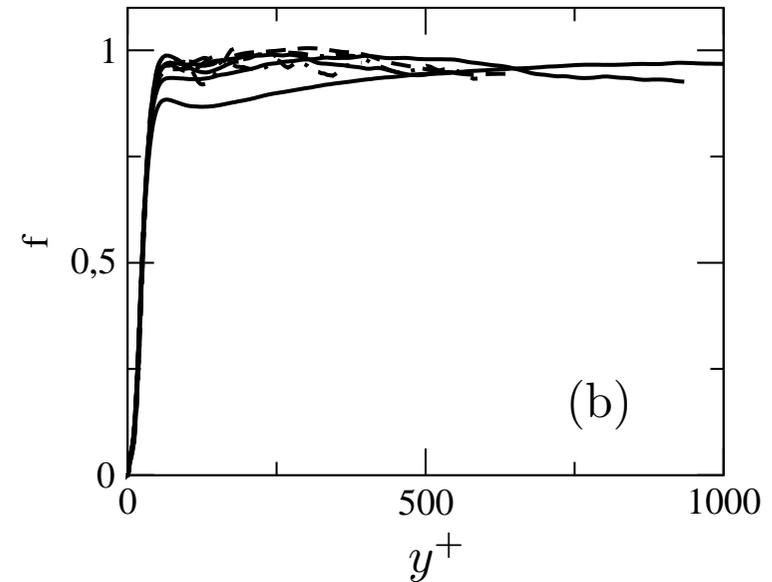
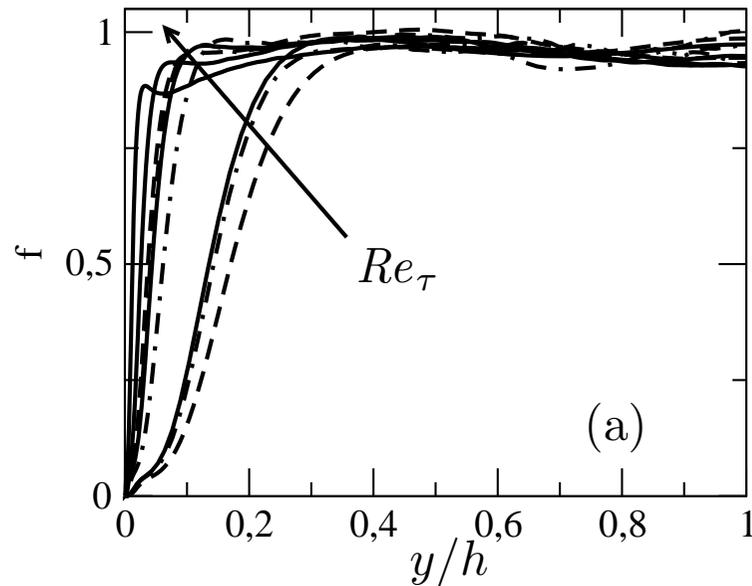
Tests *a priori* préliminaires



- ✓ bons résultats du NL-AFM en convection naturelle
- ✓ résultats complètement faux en convection mixte

$$\overline{u_i \theta} = -C_\theta \frac{k}{\varepsilon} \left[\dots - \alpha^3 C'_{\theta 1} \frac{C_{\theta 1}}{C_\theta} \frac{\varepsilon}{k} a_{ij} \overline{u_j \theta} \right] \Rightarrow C'_{\theta 1} = 0 \text{ par la suite}$$

Influence de la turbulence sur l'échelle de longueur

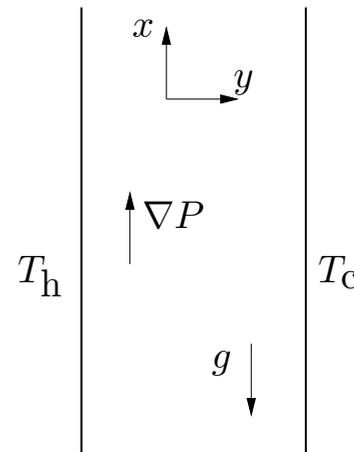
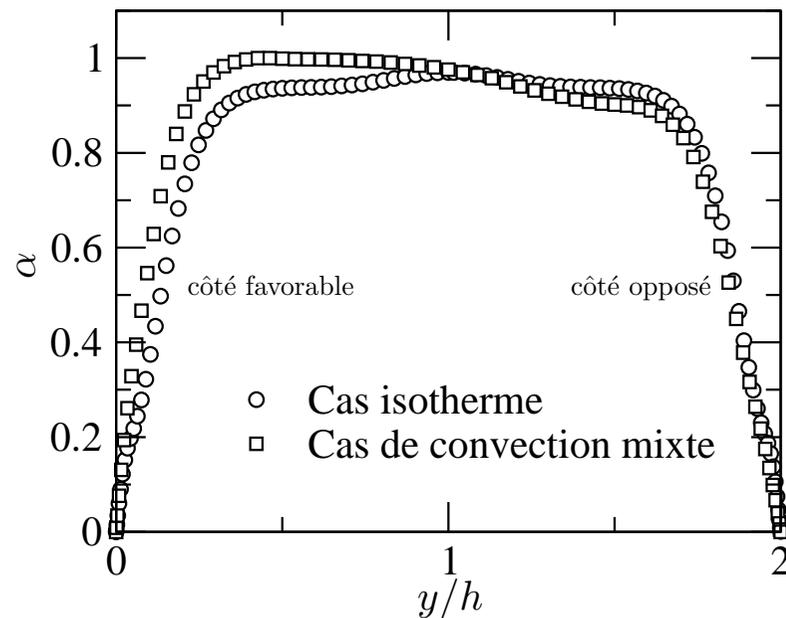


$$f = \alpha^3 = \frac{(\phi_{22}^* - \varepsilon_{22}) - (\phi_{22}^w - \varepsilon_{22}^w)}{(\phi_{22}^h - \varepsilon_{22}^h) - (\phi_{22}^w - \varepsilon_{22}^w)}$$

- (a) : diminution de l'échelle de longueur avec augmentation du Re_τ ;
- (b) : l'échelle de longueur se met à l'échelle.

Validité de l'échelle de longueur en présence de flottabilité

Comportement de proche paroi : $G_{\alpha\gamma}/\phi_{\alpha\gamma}^* = \mathcal{O}(y)$;



Données DNS : Kasagi & Nishimura (1997)

Modifications marginales \Rightarrow reproductibles.

Remarque au sujet de $\overline{v\theta}$

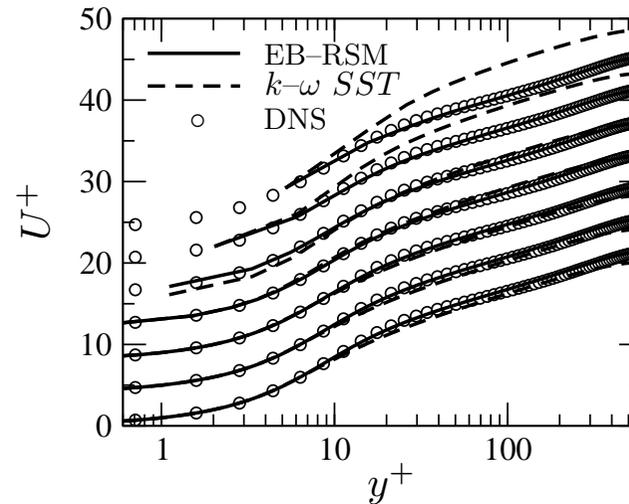
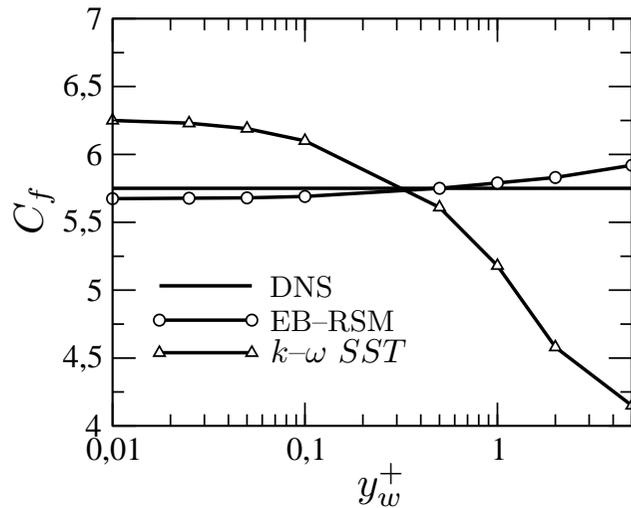
Canal vertical : $\overline{v\theta} = -C_\theta \frac{k}{\varepsilon} \left[\overline{v^2} \frac{\partial T}{\partial y} + \gamma \frac{\varepsilon}{k} \overline{v\theta} \right]$

$$\overline{v\theta} = -C_\theta^* \frac{k}{\varepsilon} \overline{v^2} \frac{\partial T}{\partial y}, \quad \text{où } C_\theta^* = \frac{C'_\theta}{\alpha^3 C_{\theta 1} + (1 - \alpha^3) \left(2 + \frac{1}{Pr} \right)} \quad (8)$$

		C_θ^*	
		$\alpha \rightarrow 0$	$\alpha \rightarrow 1$
Pr		au mur	loin du mur
0.71		0.2	0.226
0.025		0.017	0.226

Absence de prise en compte des effets de Pr pour les modèles GGDH et AFM ;
 EB-AFM, EB-GGDH : problèmes de modélisation lorsque $Pr \ll 1$.

Remarques sur la sensibilité au maillage



Solution analytique de ω en proche paroi : $\omega(y) = \frac{6\nu}{\beta^* y^2}$;

Expression implantée dans *Code_Saturne* : $\omega_F = \omega_I + y_1 \frac{120 \cdot 8\nu}{\beta^* y_1^3}$

→ Idée : imposer la solution analytique au premier point de calcul.