

Couplage d'un code d'écoulement 3D laminaire avec un modèle de propriétés radiatives de gaz de type « somme pondérée de gaz gris ».

-

Etude de l'effet de la dimension de la cavité.



*Société Française de thermique*  
*Groupe « Mode de transfert – Rayonnement »*  
*GDR CNRS 3438 ACCORT*

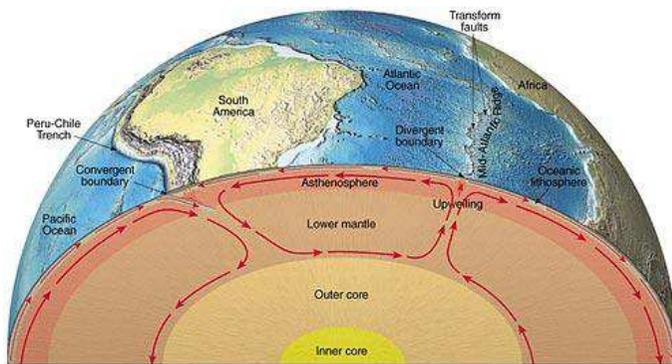


Yann Billaud\*, Didier Saury, Denis Lemonnier

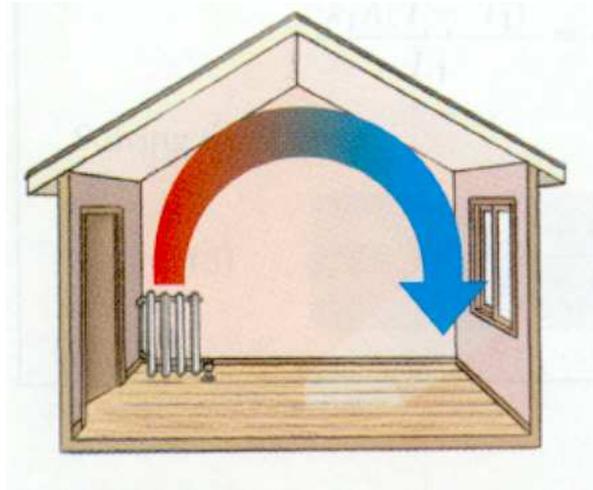
# 1. Introduction

## 1.1 Phénoménologie et enjeux

- Ecoulements de **convection naturelle** = mouvements de fluide → variations spatiales de **densité** dans le champ gravitationnel terrestre.
- Ex: manteau terrestre, local chauffée, ...



$\vec{g}$   
↓



- Maîtrise et optimisation des transferts thermiques → continuité du programme de recherche COCORACOPHA II (COuplage COnvection RAYonnement COndensation Pour l'HAbitat), PIE2 CNRS.

# 1. Introduction

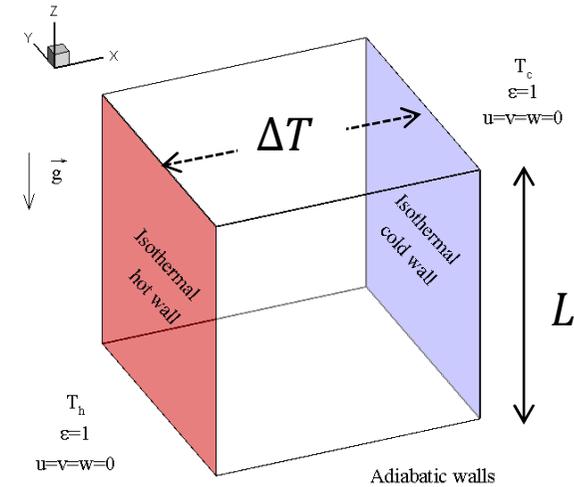
# 1.2 Etat des lieux

Compréhension de la convection naturelle

→ Cavité différentiellement chauffée

$$Ra = \frac{g\beta\Delta TL^3}{\nu\alpha}$$

$$Nu^c = \frac{\phi_{conv}}{\phi_{cond}} = \frac{L}{\Delta T} \left| \frac{\partial T}{\partial x} \right|_w$$



# 1. Introduction

# 1.2 Etat des lieux

Compréhension de la convection naturelle

→ Cavité différentiellement chauffée

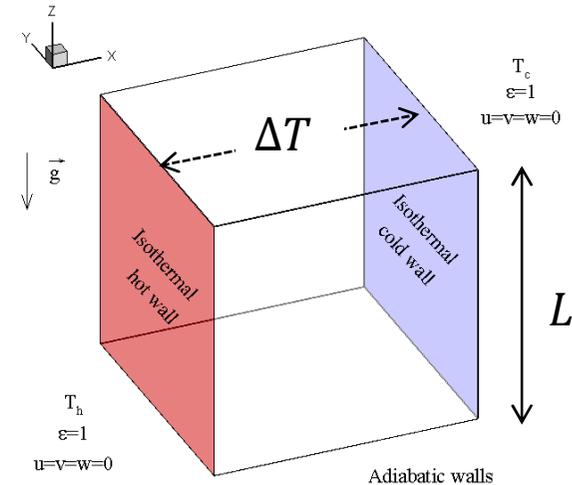
$$Ra = \frac{g\beta\Delta TL^3}{\nu\alpha}$$

$$Nu^c = \frac{\phi_{conv}}{\phi_{cond}} = \frac{L}{\Delta T} \left| \frac{\partial T}{\partial x} \right|_w$$

**2D, carré**

Rayonnement

Année	Auteurs	Ra	Rayonnement	
			Fluide	Parois
1983	de Vahl Davis	$[10^3 \rightarrow 10^6]$	✗	✗
1991	Le Quere	$[10^7 \rightarrow 10^8]$	✗	✗
1991	Lankhorst	$[10^8 \rightarrow 10^{10}]$	✗	✓
1989	Yucel	$10^6$	Gris	✗
2013	Ibrahim	$10^9$	✓	✓



# 1. Introduction

# 1.2 Etat des lieux

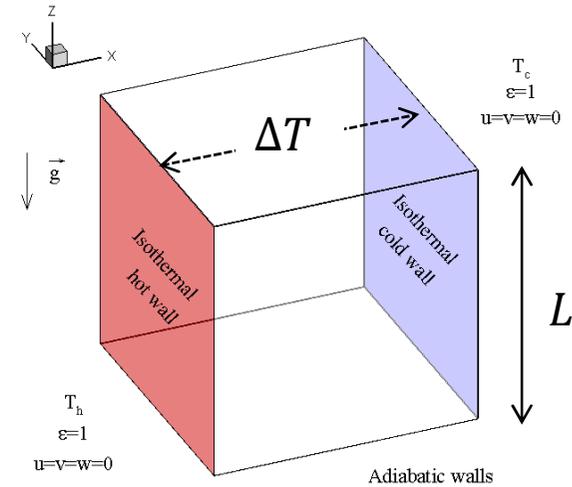
Compréhension de la convection naturelle

→ Cavité différentiellement chauffée

$$Ra = \frac{g\beta\Delta TL^3}{\nu\alpha}$$

$$Nu^c = \frac{\phi_{conv}}{\phi_{cond}} = \frac{L}{\Delta T} \left| \frac{\partial T}{\partial x} \right|_w$$

**2D, carré**



Rayonnement

Année      Auteurs       $Ra$       Fluide      Parois

1983	de Vahl Davis	$[10^3 \rightarrow 10^6]$	×	×
1991	Le Quere	$[10^7 \rightarrow 10^8]$	×	×



$Nu^c \nearrow$

$Ra_c \sim 1,8 \cdot 10^8$

1991	Lankhorst	$[10^8 \rightarrow 10^{10}]$	×	✓
1989	Yucel	$10^6$	Gris	×
2013	Ibrahim	$10^9$	✓	✓

# 1. Introduction

# 1.2 Etat des lieux

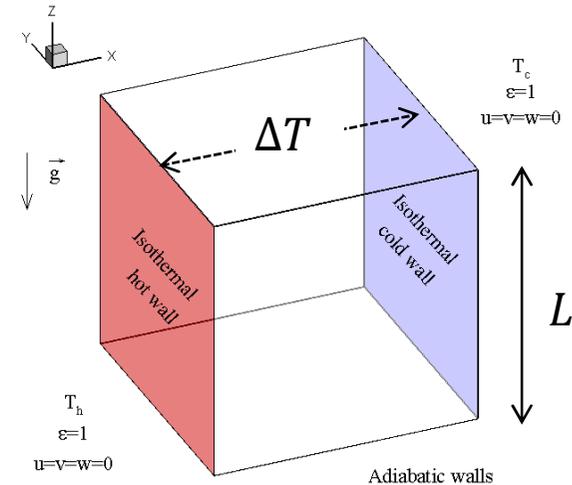
Compréhension de la convection naturelle

→ Cavité différentiellement chauffée

$$Ra = \frac{g\beta\Delta TL^3}{\nu\alpha}$$

$$Nu^c = \frac{\phi_{conv}}{\phi_{cond}} = \frac{L}{\Delta T} \left| \frac{\partial T}{\partial x} \right|_w$$

**2D, carré**



Rayonnement

Année	Auteurs	$Ra$	Fluide	Parois
-------	---------	------	--------	--------

1983	de Vahl Davis	$[10^3 \rightarrow 10^6]$	×	×
1991	Le Quere	$[10^7 \rightarrow 10^8]$	×	×

$Nu^c \nearrow$

$Ra_c \sim 1,8 \cdot 10^8$

1991	Lankhorst	$[10^8 \rightarrow 10^{10}]$	×	✓
1989	Yucel	$10^6$	Gris	×
2013	Ibrahim	$10^9$	✓	✓

Rayonnement:

- Modifie convection

- Effet stabilisant ( $Ra_c \nearrow$ )

# 1. Introduction

# 1.2 Etat des lieux

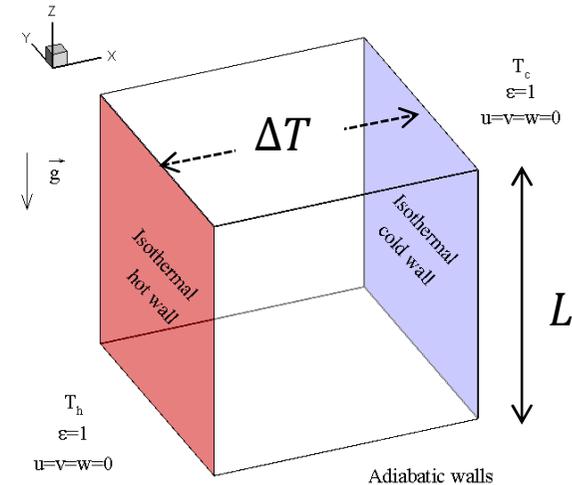
Compréhension de la convection naturelle

→ Cavité différentiellement chauffée

$$Ra = \frac{g\beta\Delta TL^3}{\nu\alpha}$$

$$Nu^c = \frac{\phi_{conv}}{\phi_{cond}} = \frac{L}{\Delta T} \left| \frac{\partial T}{\partial x} \right|_w$$

**3D, cubique**



Rayonnement

Année

Auteurs

*Ra*

Fluide

Parois

2000	Tric	$[10^3 \rightarrow 10^7]$	✗	✗
2008	Borjini	$10^5$	Gris	✗
2004	Colomer	$[10^3 \rightarrow 10^6]$	Gris	✓
1989	Borget	$10^6$	✓	✗
2012	Soucasse	$[10^5 \rightarrow 10^7]$	✓	✓

# 1. Introduction

# 1.2 Etat des lieux

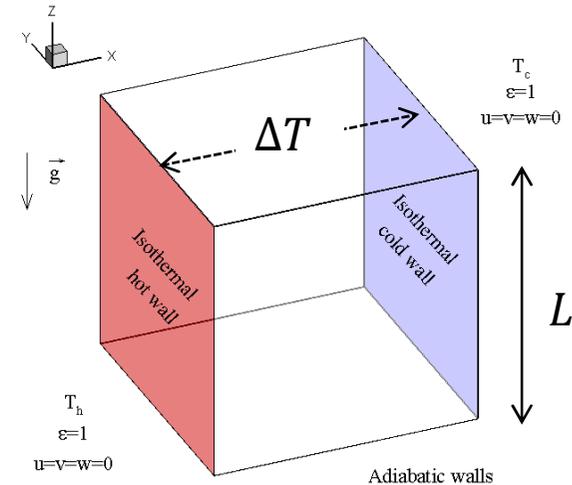
Compréhension de la convection naturelle

→ Cavité différentiellement chauffée

$$Ra = \frac{g\beta\Delta TL^3}{\nu\alpha}$$

$$Nu^c = \frac{\phi_{conv}}{\phi_{cond}} = \frac{L}{\Delta T} \left| \frac{\partial T}{\partial x} \right|_w$$

**3D, cubique**



Rayonnement

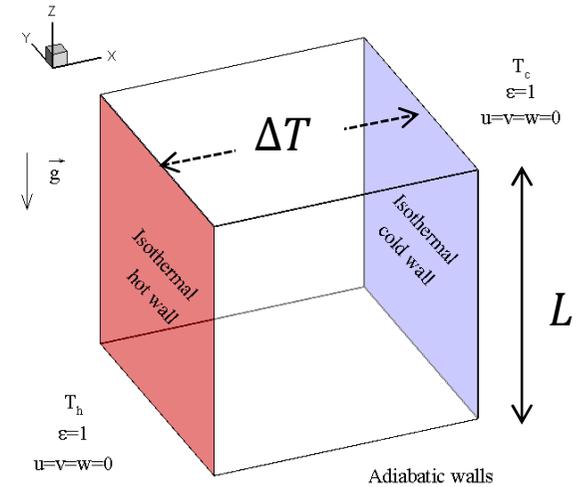
Année	Auteurs	Ra	Rayonnement	
			Fluide	Parois
2000	Tric	$[10^3 \rightarrow 10^7]$	✗	✗
2008	Borjini	$10^5$	Gris	✗
2004	Colomer	$[10^3 \rightarrow 10^6]$	Gris	✓
1989	Borget	$10^6$	✓	✗
2012	Soucasse	$[10^5 \rightarrow 10^7]$	✓	✓

Effet de la dimension de la cavité sur les transferts et sur la transition vers l'instationnarité?

# 1. Introduction

# 1.3 Modèle mathématique

$$\left\{ \begin{array}{l} \nabla \cdot \mathbf{u} = 0 \\ \rho_0 \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + \rho_0 \mathbf{u} \cdot \nabla \mathbf{u} = -\nabla p + \rho_0 \beta \mathbf{g}(T - T_0) + \mu \nabla^2 \mathbf{u} \\ \rho_0 C_p \frac{\partial T}{\partial t} + \rho_0 C_p \mathbf{u} \cdot \nabla T = \lambda \nabla^2 T - \nabla \cdot \mathbf{q}_r \end{array} \right.$$

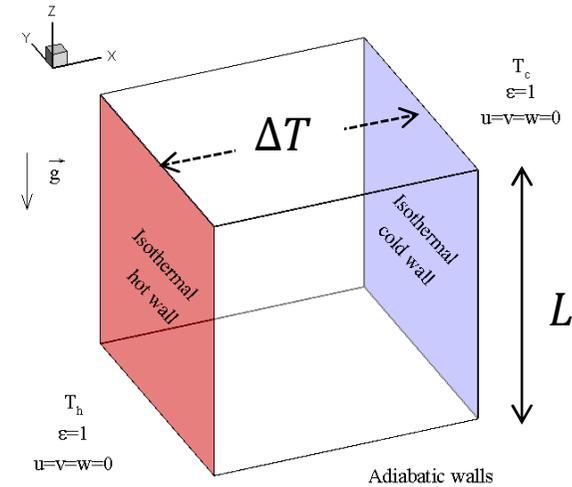


# 1. Introduction

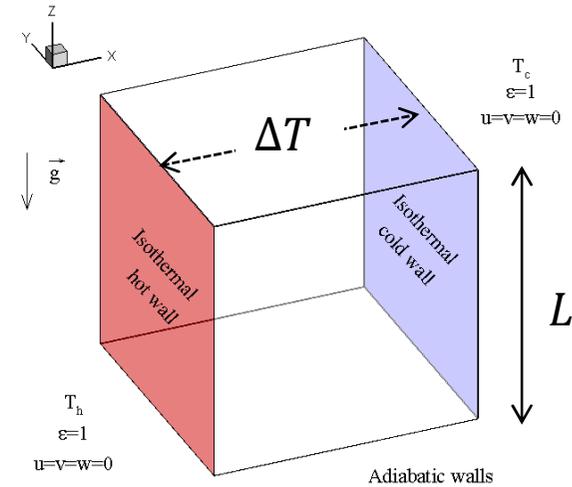
# 1.3 Modèle mathématique

Approximation de Boussinesq

$$\left\{ \begin{array}{l} \nabla \cdot \mathbf{u} = 0 \\ \rho_0 \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + \rho_0 \mathbf{u} \cdot \nabla \mathbf{u} = -\nabla p + \rho_0 \beta \mathbf{g} (T - T_0) + \mu \nabla^2 \mathbf{u} \\ \rho_0 C_p \frac{\partial T}{\partial t} + \rho_0 C_p \mathbf{u} \cdot \nabla T = \lambda \nabla^2 T - \nabla \cdot \mathbf{q}_r \end{array} \right.$$

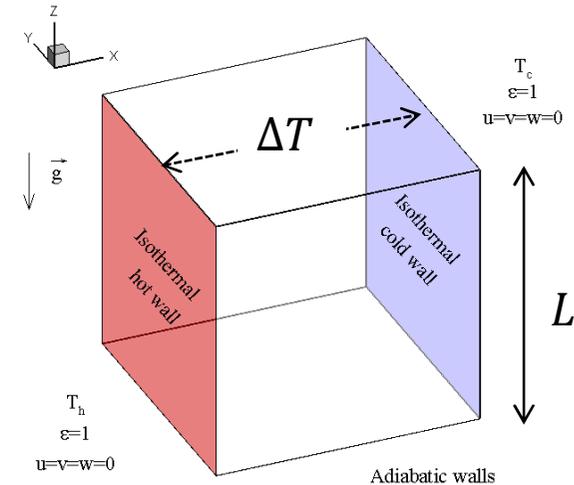


$$\left\{ \begin{array}{l}
 \nabla \cdot \mathbf{u} = 0 \\
 \rho_0 \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + \rho_0 \mathbf{u} \cdot \nabla \mathbf{u} = -\nabla p + \rho_0 \beta \mathbf{g} (T - T_0) + \mu \nabla^2 \mathbf{u} \\
 \rho_0 c_p \frac{\partial T}{\partial t} + \rho_0 c_p \mathbf{u} \cdot \nabla T = \lambda \nabla^2 T - \nabla \cdot \mathbf{q}_r
 \end{array} \right. \quad \text{Approximation de Boussinesq}$$



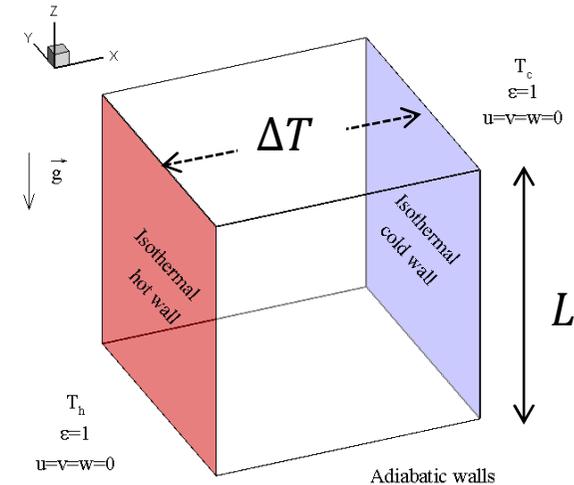
- Couplage écoulement / énergie → renforcé par terme source radiatif

$$\left\{ \begin{array}{l} \nabla \cdot \mathbf{u} = 0 \\ \rho_0 \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + \rho_0 \mathbf{u} \cdot \nabla \mathbf{u} = -\nabla p + \rho_0 \beta \mathbf{g} (T - T_0) + \mu \nabla^2 \mathbf{u} \\ \rho_0 c_p \frac{\partial T}{\partial t} + \rho_0 c_p \mathbf{u} \cdot \nabla T = \lambda \nabla^2 T - \nabla \cdot \mathbf{q}_r \end{array} \right. \quad \text{Approximation de Boussinesq}$$



- Couplage écoulement / énergie → renforcé par terme source radiatif
- **Méthode des Ordonnées Discrètes (MOD) + Spectral line weighted sum of gray gases (SLW)**

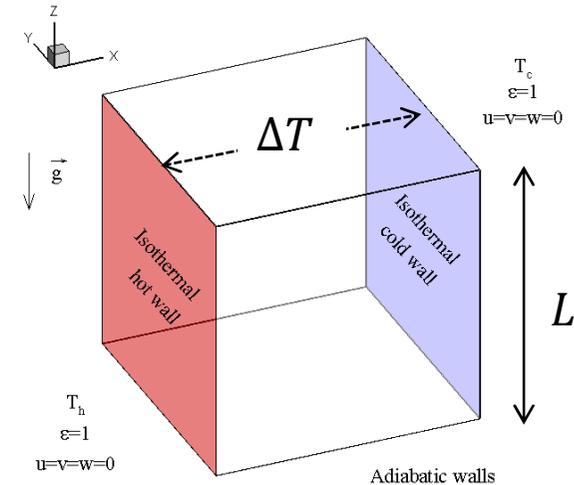
$$\left\{ \begin{array}{l} \nabla \cdot \mathbf{u} = 0 \\ \rho_0 \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + \rho_0 \mathbf{u} \cdot \nabla \mathbf{u} = -\nabla p + \rho_0 \beta \mathbf{g} (T - T_0) + \mu \nabla^2 \mathbf{u} \\ \rho_0 C_p \frac{\partial T}{\partial t} + \rho_0 C_p \mathbf{u} \cdot \nabla T = \lambda \nabla^2 T - \nabla \cdot \mathbf{q}_r \end{array} \right. \quad \text{Approximation de Boussinesq}$$



- Couplage écoulement / énergie → renforcé par terme source radiatif
- **Méthode des Ordonnées Discrètes (MOD) + Spectral line weighted sum of gray gases (SLW)**
- **Conditions aux limites**      **Parois**

$T = T_c$	$x = 0$
$T = T_f$	$x = L$
$(-\lambda \nabla T + \mathbf{q}_r) \cdot \mathbf{n} = 0$	$y = 0, y = L, z = 0, z = L$

$$\left\{ \begin{array}{l} \nabla \cdot \mathbf{u} = 0 \\ \rho_0 \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + \rho_0 \mathbf{u} \cdot \nabla \mathbf{u} = -\nabla p + \rho_0 \beta \mathbf{g} (T - T_0) + \mu \nabla^2 \mathbf{u} \\ \rho_0 c_p \frac{\partial T}{\partial t} + \rho_0 c_p \mathbf{u} \cdot \nabla T = \lambda \nabla^2 T - \nabla \cdot \mathbf{q}_r \end{array} \right. \quad \text{Approximation de Boussinesq}$$



- Couplage écoulement / énergie → renforcé par terme source radiatif
- **Méthode des Ordonnées Discrètes (MOD) + Spectral line weighted sum of gray gases (SLW)**
- **Conditions aux limites**      **Parois**

$T = T_c$	$x = 0$
$T = T_h$	$x = L$
$(-\lambda \nabla T + \mathbf{q}_r) \cdot \mathbf{n} = 0$	$y = 0, y = L, z = 0, z = L$
- Système résolu par Code\_Saturne (EDF)

## 2. Validation

### 2.1 Résolution du rayonnement

#### Méthode aux Ordonnées Discrètes (MOD)

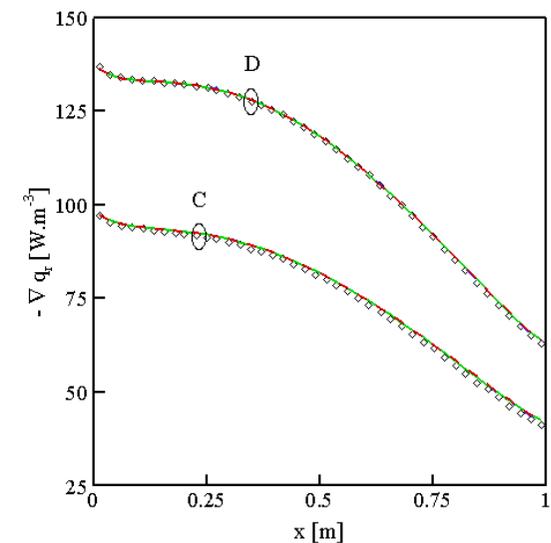
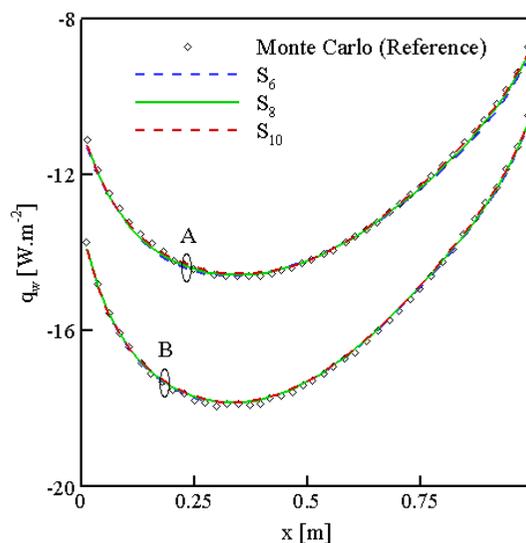
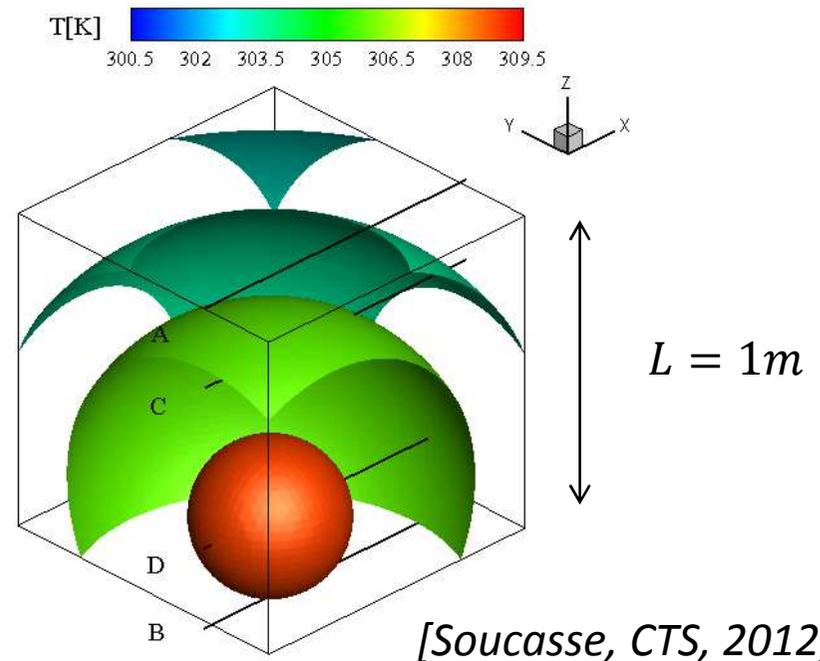
$$-\nabla \cdot q_r = \kappa \sum_{m=1}^M w_m I_m - 4a\sigma T^4$$

#### Cas de validation

- Gaz gris,  $\kappa = 1\text{m}^{-1}$
- Champ de  $T^{\text{ure}}$  imposé
- $T_w = 300\text{K}$ ,  $\varepsilon_w = 0,5$

#### Comparaison (MC-vs-MOD)

- Flux pariétaux → **OK**
- Terme source → **OK**
- Choix de la quadrature  
→  $S_8$  (M=80 directions)

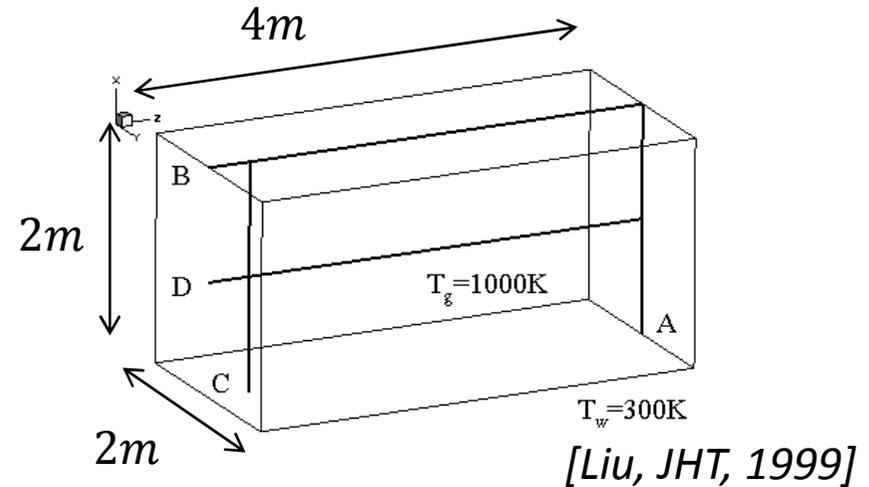


## 2. Validation

### 2.2 Propriétés radiatives

Modèle de type 'somme pondérée de gaz gris' (SLW), [Denison, JHT, 1993]

$$\varepsilon(T) = \sum_{j=0}^{N_g} a_j(T) [1 - \exp(-\kappa_j L)]$$

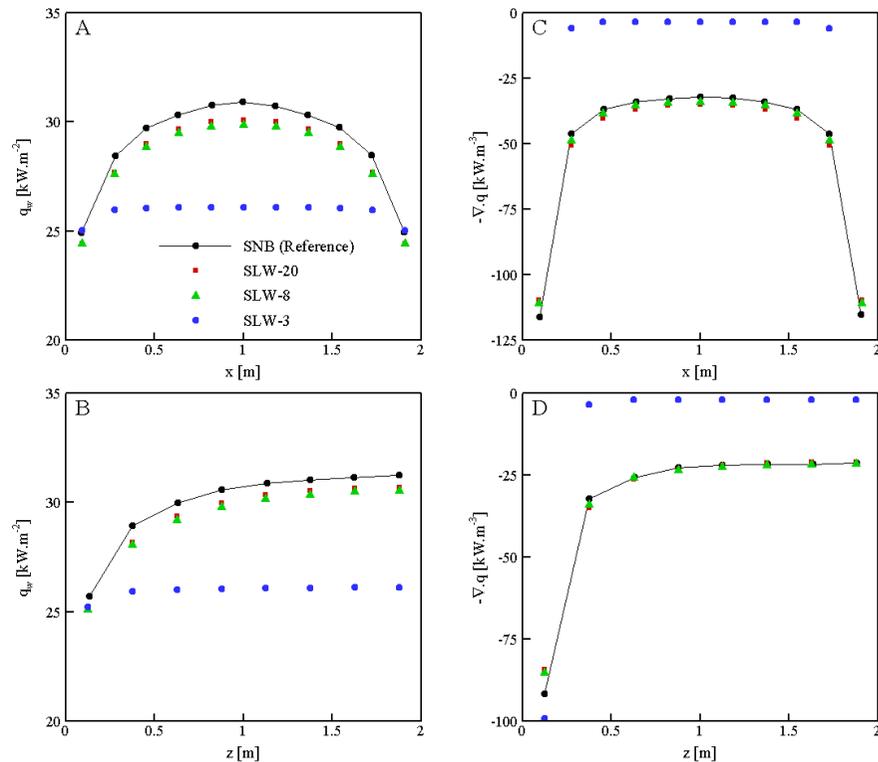


#### Cas de validation

- Vapeur d'eau
- $T = 1000K$
- $T_w = 300K, \varepsilon_w = 1$

#### Comparaison (SNB-vs-SLW)

- Flux pariétaux → **OK**
- Terme source → **OK**
- Choix du nombre de gaz →  $N_g = 8$



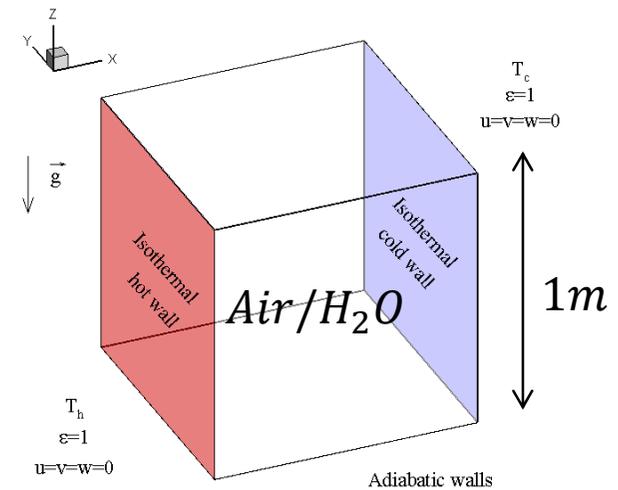
## 2. Validation

## 2.3 Couplage convection/rayonnement

Méthode de collocation de Chebyshev  
+ Ray tracing + ADF, [Soucasse, CTS, 2012]

-VS-

Méthode des volumes finis  
+ MOD ( $S_8$ ) + SLW-8



## 2. Validation

## 2.3 Couplage convection/rayonnement

Méthode de collocation de Chebyshev  
+ Ray tracing + ADF, [Soucasse, CTS, 2012]

-VS-

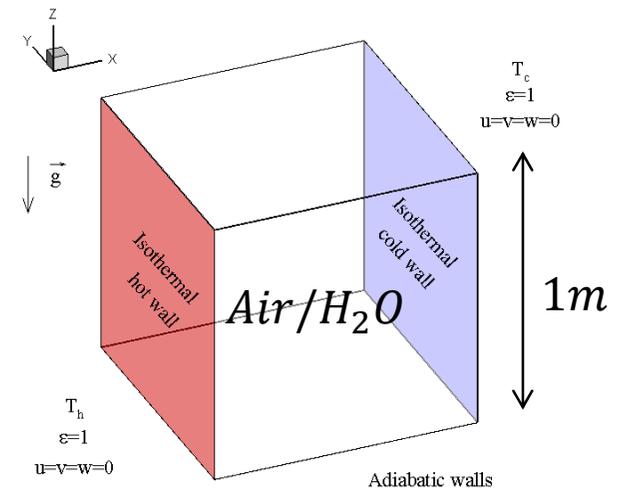
Méthode des volumes finis  
+ MOD ( $S_8$ ) + SLW-8

### Cas de validation

- $x_{H_2O} = 0,02$
- $T_0 = 300K$
- $\Delta T = 0,011K$
- $Ra = 10^6$

### Rayonnement

	Fluide	Parois
A	✗	✗
B	✓	✗
C	✗	✓
D	✓	✓



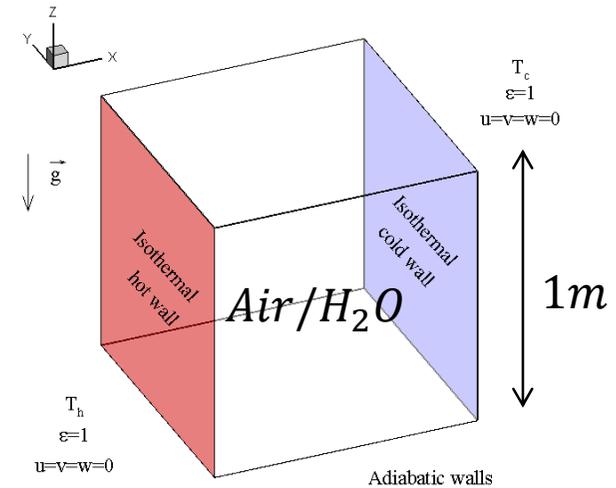
## 2. Validation

## 2.3 Couplage convection/rayonnement

Méthode de collocation de Chebyshev  
+ Ray tracing + ADF, [Soucasse, CTS, 2012]

-VS-

Méthode des volumes finis  
+ MOD ( $S_8$ ) + SLW-8



### Cas de validation

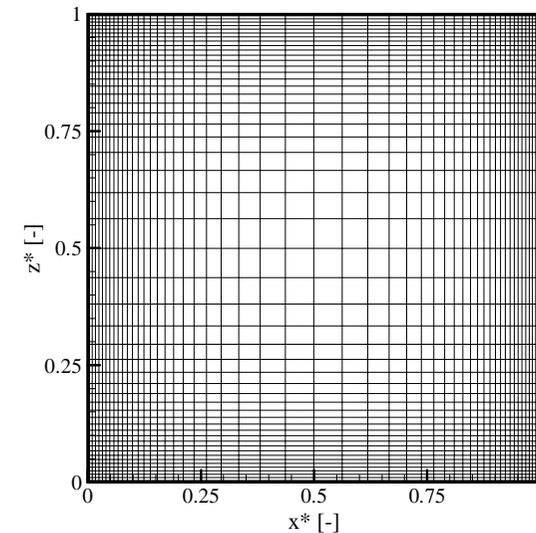
- $x_{H_2O} = 0,02$
- $T_0 = 300K$
- $\Delta T = 0,011K$
- $Ra = 10^6$

### Rayonnement

	Fluide	Parois
A	✗	✗
B	✓	✗
C	✗	✓
D	✓	✓

### Paramètres numériques

- Qdm → décentré avant  $\mathcal{O}(2)$
- Energie → centré  $\mathcal{O}(2)$
- $\Delta t_f = 0,1 s$
- $\Delta t_r = 1 s$



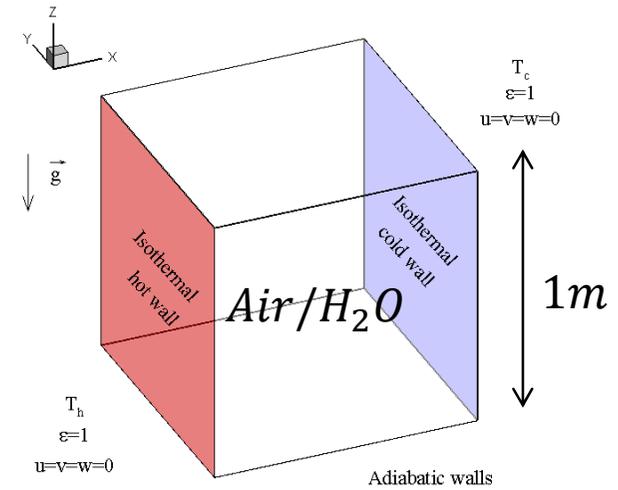
Maillage (fluide et radiatif)  $91^3$   
 $d = \cosh(6t - 3)$  avec  $t \in [0; 1]$

## 2. Validation

## 2.3 Couplage convection/rayonnement

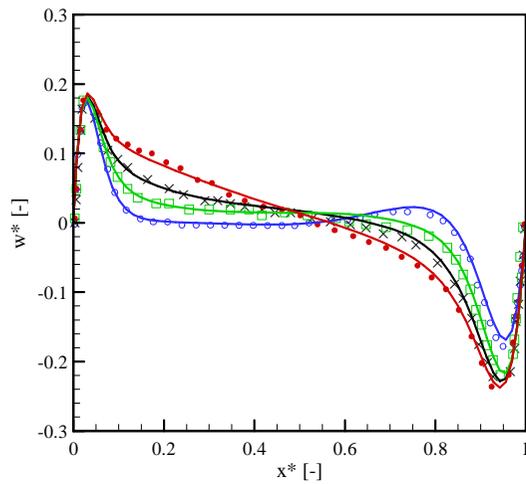
### Comparaison

○ Profils de vitesse → OK

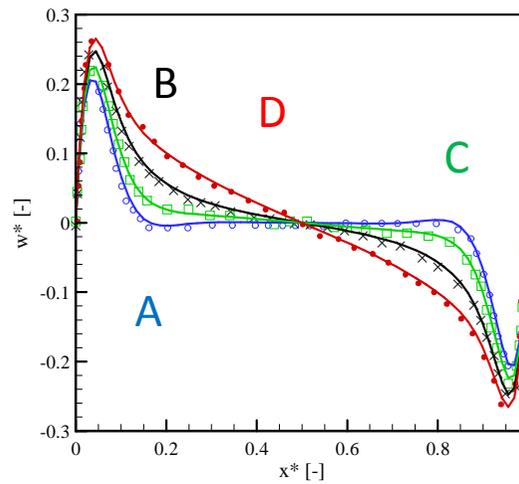


$$U_{ref} = \alpha \sqrt{Ra} / L$$

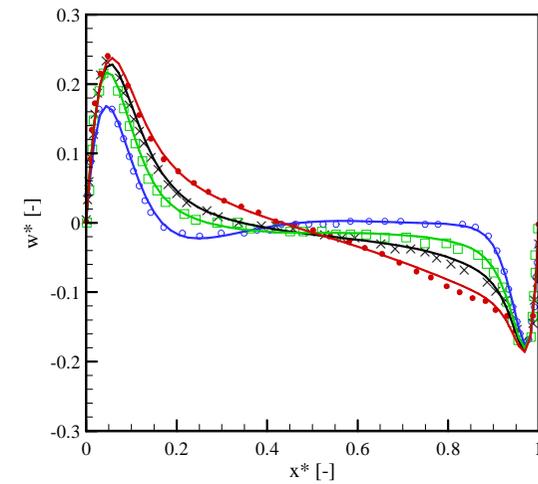
$z = 0,25$



$z = 0,5$



$z = 0,75$

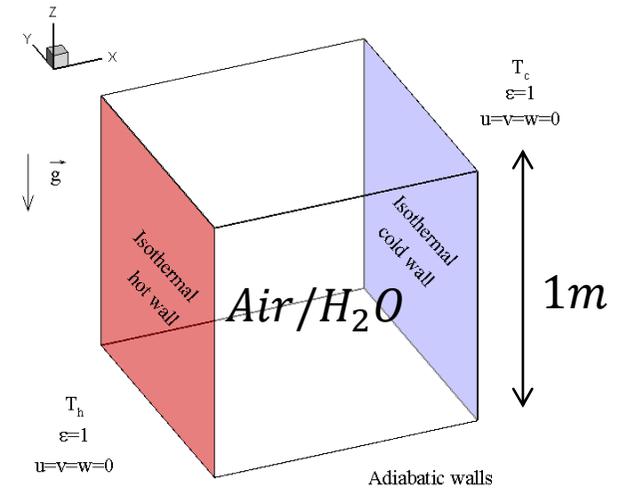


## 2. Validation

## 2.3 Couplage convection/rayonnement

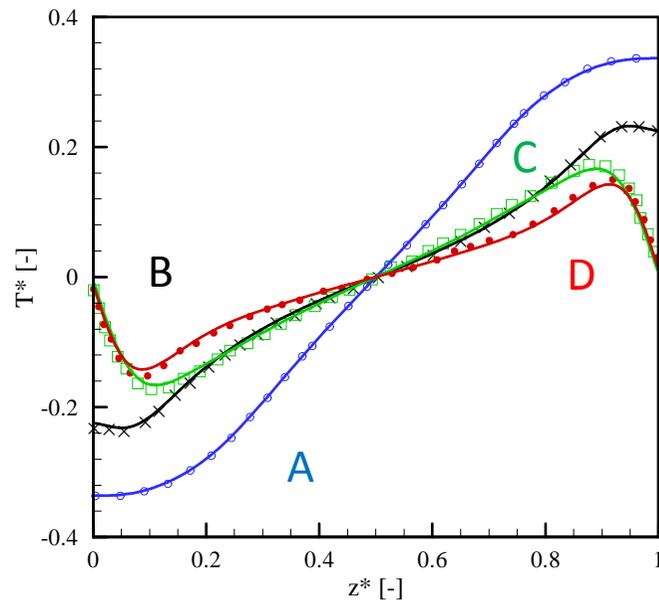
### Comparaison

- Profils de vitesse → OK
- Profils de température → OK

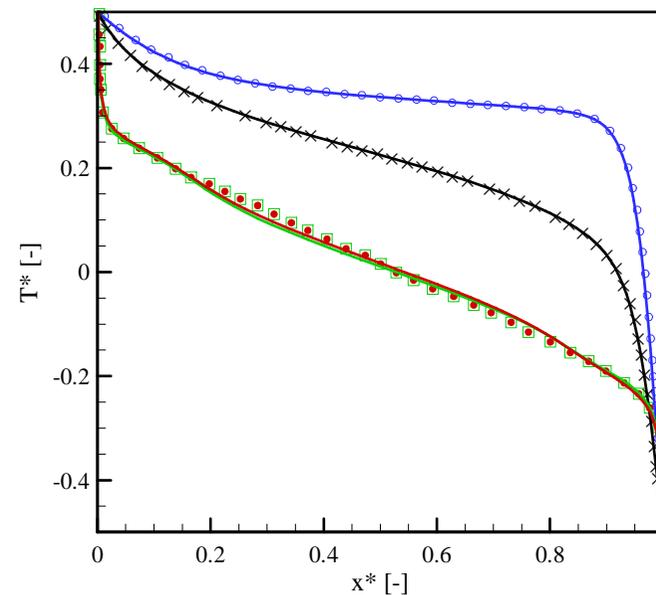


$$T^* = (T - T_0) / \Delta T$$

$z = 0,5$



$z = 1$

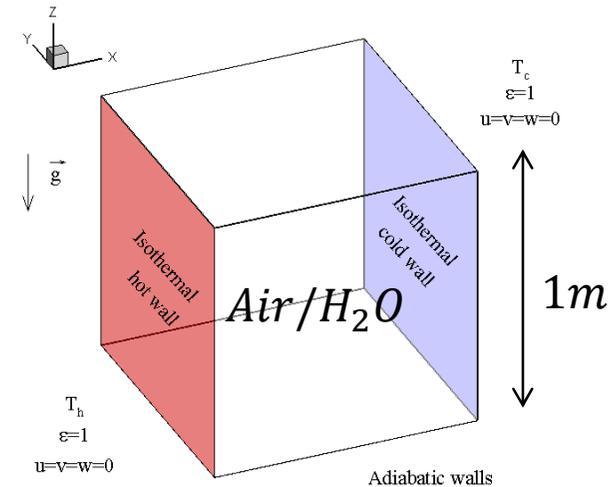


## 2. Validation

## 2.3 Couplage convection/rayonnement

### Comparaison

- Profils de vitesse → **OK**
- Profils de température → **OK**
- Transferts thermiques → **OK**



	A			B			C			D		
	Ref.	*	E	Ref.	*	E	Ref.	*	E	Ref.	*	E
$Nu^c$	8.64	8.65	<1%	7.55	7.42	2%	8.47	8.10	4%	8.48	8.01	5%
$Nu^r$	<del>139.7</del>	125.6	-	120.6	121.3	<1%	124.5	124.8	<1%	119.6	119.9	<1%
S	0.91	0.92	<1%	0.36	0.35	3%	0.42	0.41	2%	0.26	0.24	8%
$t_{CPU}$	20 h	30 h		170 h	25 h		20 h	35 h		100 h	50 h	
$N_{proc}$	4	1		94	1		8	1		94	1	

Erreur associée à la stratification (cas D)

→ maillage au centre de la cavité

Calculs → processeur Quad-Core AMD

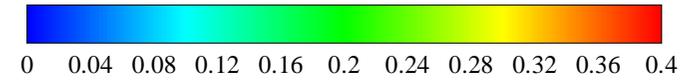
Opteron(tm), 2.3 GHz

### 3. Résultats

### 3.1 Structure de l'écoulement

Parois adiabatiques réfléchissantes

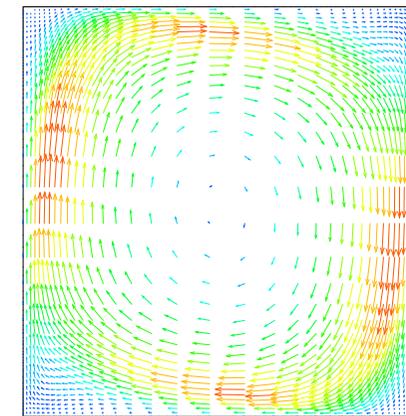
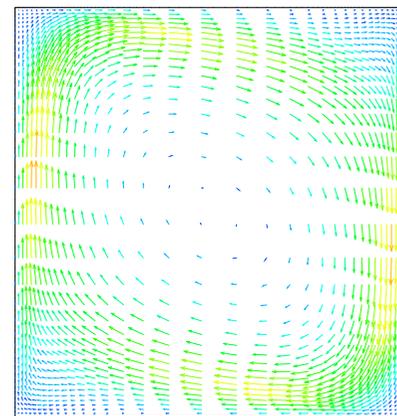
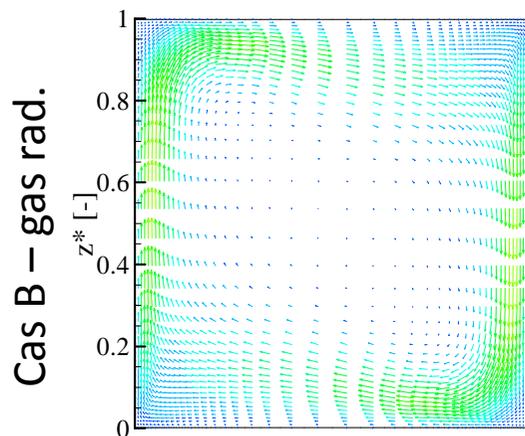
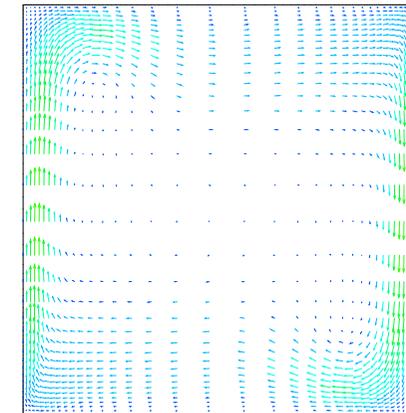
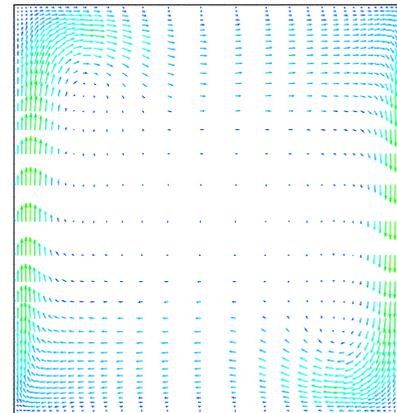
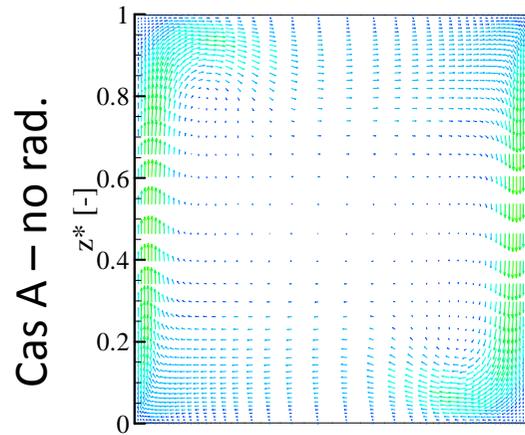
$U^* [-]$



1 m

2 m

3 m



Intensification de l'écoulement

Régime « Couches limites »



Régime « Cœur tournant »

### 3. Résultats

### 3.2 Profils de température et de vitesses verticale et horizontale

Parois adiabatiques réfléchissantes

$$x^* = 0,5 \quad \& \quad z^* = 0,5$$

#### ○ Fort **couplage**

Thermique/Ecoulement:

**Faibles** variations de  $T$  (dues à

↗ épaisseur optique)



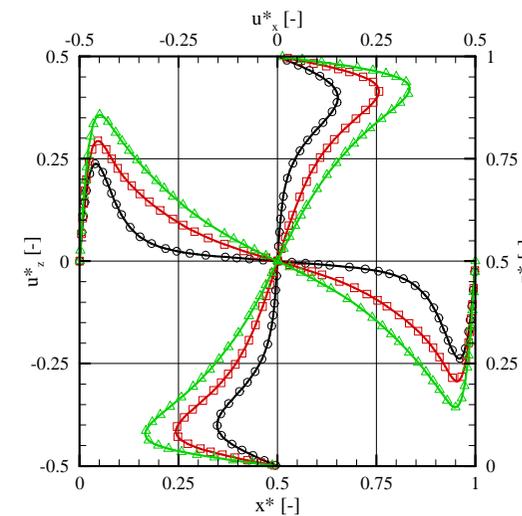
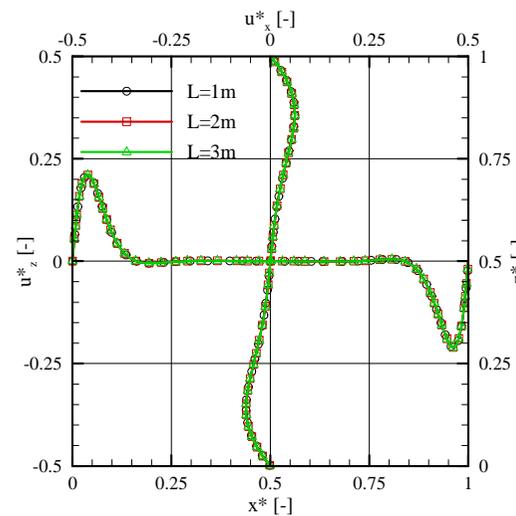
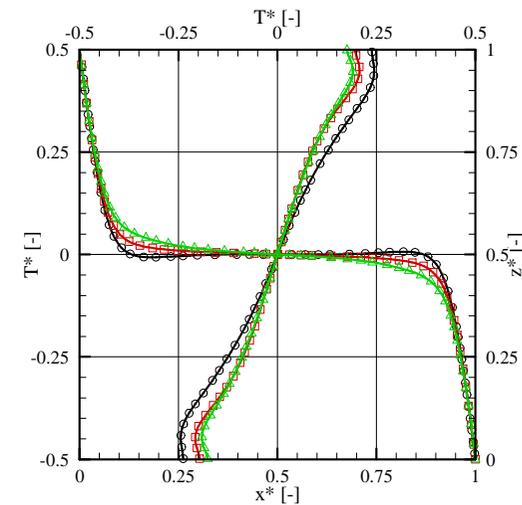
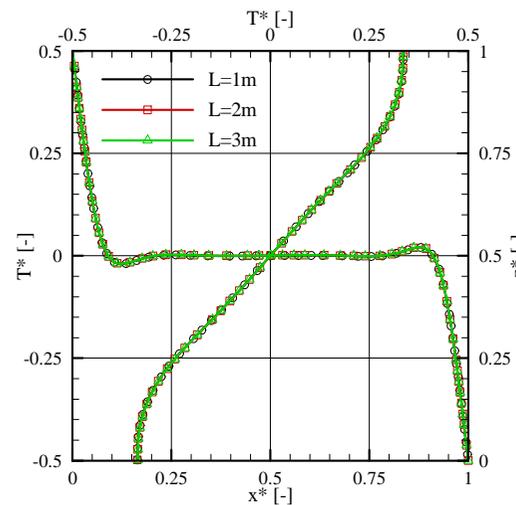
**Importantes** variations de  $V$

#### ○ Variations

- $\max(u_z^*)$  ↗
- épaissement des couches limites visqueuses (ray.)

Cas A – no rad.

Cas B – gas rad.



$$Nu^c = \frac{\phi_{conv}}{\phi_{cond}} = \frac{L}{\Delta T} \int_0^1 \int_0^1 \left| \frac{\partial T}{\partial x} \right|_{x^*=0} dy^* dz^*$$

	A – no rad.			B – gas rad.		
$L(m)$	1	2	3	1	2	3
$Nu^c$	8.65	8.65	8.65	7.54	7.31	7.43
	–	–		↘	↗	
$\max(u_z^*)$	0.24	0.24	0.24	0.29	0.33	0.40

- **Rayonnement** ↘ la contribution convective (ex:  $L=1m, Nu^c = 8,65 \rightarrow 7,54$ ) →

**homogénéisation de la température** (absorption, réémission) →  $\left| \frac{\partial T}{\partial x} \right|_{x^*=0}$  ↘

$$Nu^c = \frac{\phi_{conv}}{\phi_{cond}} = \frac{L}{\Delta T} \int_0^1 \int_0^1 \left| \frac{\partial T}{\partial x} \right|_{x^*=0} dy^* dz^*$$

	A – no rad.			B – gas rad.		
$L(m)$	1	2	3	1	2	3
$Nu^c$	8.65	8.65	8.65	7.54	7.31	7.43
		–	–		↘	↗
$\max(u_z^*)$	0.24	0.24	0.24	0.29	0.33	0.40

- **Rayonnement** ↘ la contribution convective (ex:  $L=1m, Nu^c = 8,65 \rightarrow 7,54$ ) →

**homogénéisation de la température** (absorption, réémission) →  $\left| \frac{\partial T}{\partial x} \right|_{x^*=0}$  ↘

$$Nu^c = \frac{\phi_{conv}}{\phi_{cond}} = \frac{L}{\Delta T} \int_0^1 \int_0^1 \left| \frac{\partial T}{\partial x} \right|_{x^*=0} dy^* dz^*$$

	A – no rad.			B – gas rad.		
$L(m)$	1	2	3	1	2	3
$Nu^c$	8.65	8.65	8.65	7.54	7.31	7.43
		–	–		↘	↗
$\max(u_z^*)$	0.24	0.24	0.24	0.29	0.33	0.40

- **Dimension** de la cavité ↗ ( $L = 1 \rightarrow 2m$ ) →  $Nu^c$  ↘ (OK avec 1<sup>er</sup> constat, *i.e.* ↗

ray. ↘ gradient), mais, la vitesse ↗ avec  $L$ , ce qui a pour effet ↗ gradient!

**Compétition** Rayonnement -vs- Ecoulement → diminution puis une augmentation du Nusselt convectif

### 3. Résultats

### 3.3 Transferts thermiques Rayonnement, paroi chaude ( $x^* = 0$ )

$$Nu^r = \frac{\phi_{rad}}{\phi_{cond}} = \frac{L}{\lambda \Delta T} \int_0^1 \int_0^1 |q_r^{net}|_{x^*=0} dy^* dz^*$$

	A – no rad.			B – gas rad.		
$L(m)$	1	2	3	1	2	3
$Nu^r$	119,9	239,5	359,2	117,1	230,2	340,8
$Nu^{r*}$	119,9	119,7	119,7	117,1	115,1	113,6
	–	–		↘	↘	

### 3. Résultats

### 3.3 Transferts thermiques Rayonnement, paroi chaude ( $x^* = 0$ )

- Prise en compte du **Rayonnement** du milieu  $\searrow$  l'échange radiatif entre les parois (ex:  $L=1\text{m}$ ,  $Nu^r = 119,9 \rightarrow 117,1$ )  $\rightarrow$  absorption du ray.

$$Nu^r = \frac{\phi_{rad}}{\phi_{cond}} = \frac{L}{\lambda \Delta T} \int_0^1 \int_0^1 |q_r^{net}|_{x^*=0} dy^* dz^*$$

	A – no rad.			B – gas rad.		
$L(\text{m})$	1	2	3	1	2	3
$Nu^r$	119,9	239,5	359,2	117,1	230,2	340,8
$Nu^{r*}$	119,9	119,7	119,7	117,1	115,1	113,6
	–	–		↘	↘	

### 3. Résultats

### 3.3 Transferts thermiques Rayonnement, paroi chaude ( $x^* = 0$ )

- Prise en compte du **Rayonnement** du milieu  $\searrow$  l'échange radiatif entre les parois (ex:  $L=1m, Nu^r = 119,9 \rightarrow 117,1$ )  $\rightarrow$  absorption du ray.

$$Nu^r = \frac{\phi_{rad}}{\phi_{cond}} = \frac{L}{\lambda \Delta T} \int_0^1 \int_0^1 |q_r^{net}|_{x^*=0} dy^* dz^*$$



$$q_r^{net} = \varepsilon_w (\sigma T_w^4 - q_r^{inc}) \approx h_r \Delta T$$

	A – no rad.			B – gas rad.		
$L(m)$	1	2	3	1	2	3
$Nu^r$	119,9	239,5	359,2	117,1	230,2	340,8
$Nu^{r*}$	119,9	119,7	119,7	117,1	115,1	113,6
	–	–		$\searrow$	$\searrow$	

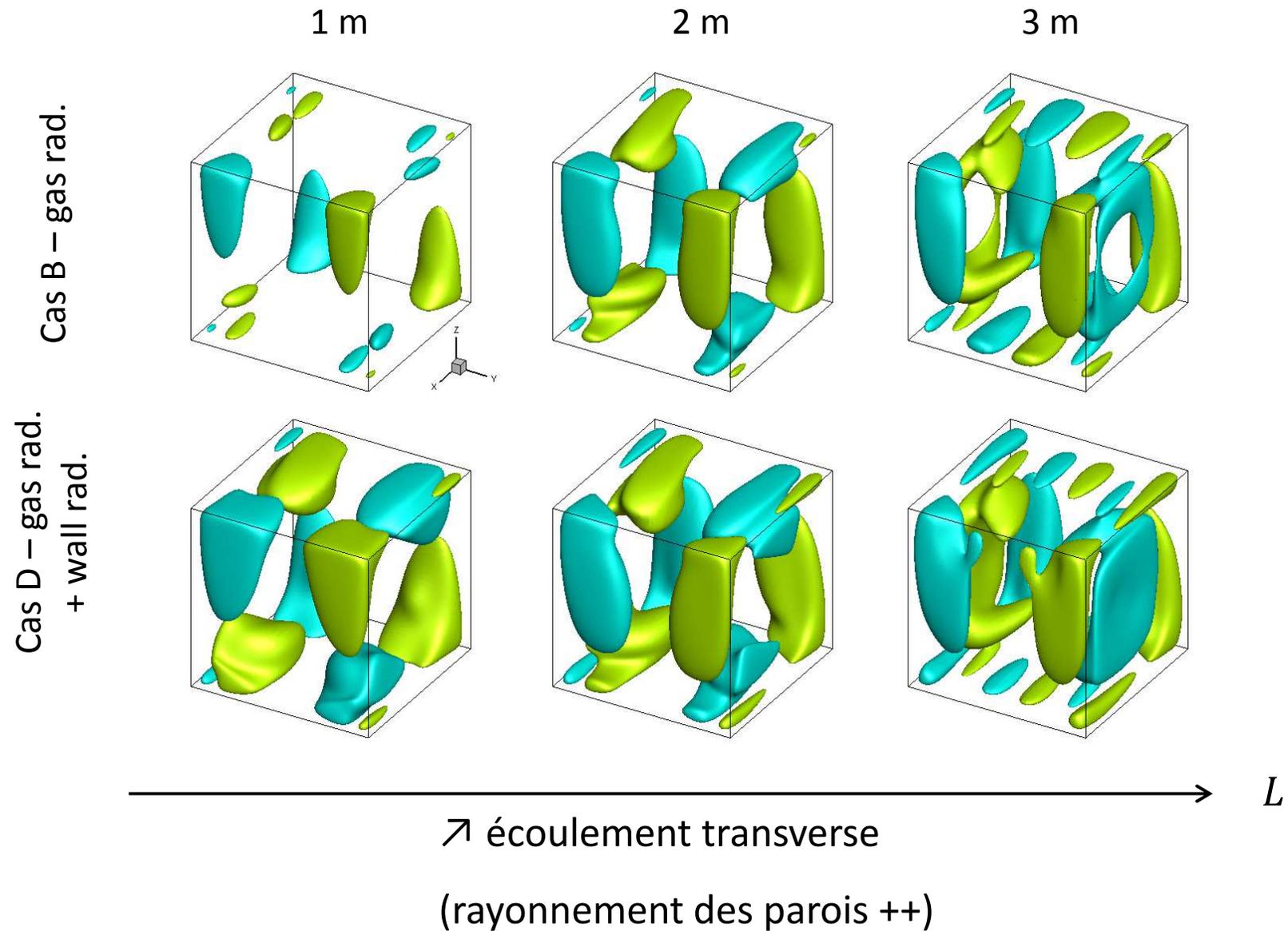
Facteur d'échelle

- Influence de  $L \rightarrow$  une nouvelle variable  $Nu^{r*} = Nu^r \times \left(\frac{L_0}{L}\right)$  avec  $L_0 = 1m$ .
- Sans rayonnement  $\rightarrow Nu^{r*} \sim cste$  car  $\frac{q_r^{net}}{\Delta T} \sim cst$  ( $\Delta T \ll 1$ , linéarisation du ray.)
- Avec rayonnement  $\rightarrow Nu^r \searrow$  car  $\nearrow$  absorption du rayonnement par le milieu ( $\nearrow$  du libre parcours moyen).

### 3. Résultats

### 3.4 Effets 3D

Iso-vitesses transverse  $v^* = -0.02$  (bleu) et  $v^* = +0.02$  (jaune)



## 4. Conclusions & Perspectives

---

- Simulations d'écoulement en **convection naturelle laminaire** ( $Ra = 10^6$ ) → MVF;
- Configuration → **cavité différentiellement chauffée** remplie d'un mélange d'air et de **vapeur d'eau** ( $\varphi = 50\%$ ,  $T_0 = 293,15K$ );
- **Couplage** écoulement/rayonnement → le terme source radiatif (MOD+SLW);
- L'ETR est résolue pour  $n_g = 8$  **gaz fictifs** via  $\kappa_j$  et  $a_j$ .
- **Validation** → comparaison avec des résultats de référence [*Soucasse, 2013*]
  - profils de vitesse et de température,
  - transferts convectif ( $Nu^c$ ) et radiatif ( $Nu^r$ ) aux parois,(sur 3 configurations radiatives + 1 configuration convective pure)
- Modèle → étudier l'**influence de la dimension de la cavité** sur l'écoulement et sur les transferts de chaleur.

## 4. Conclusions & Perspectives

---

- Etude d'un écoulement à **fort couplage vitesse-température** invariant par changement d'échelle (convection pure)
- Milieu est participatif → forte **dépendance** de la température et des champs de vitesse vis-à-vis de la **dimension de la cavité**:
  - ↗ circulation globale du fluide dans la cavité;
  - épaissement des couches limites thermique et donc visqueuses;
  - une disparition du cœur stagnant.
- Le rayonnement de parois accentue ces effets (non montré ici).
- Milieu participatif, ↗ dimension de la cavité entraîne ↗ transferts radiatifs.
- Dimension de la cavité amplifie les effets 3D → **Intensification** de la composante transversale de la vitesse.
- Le rayonnement des parois accentue cet effet.

## 4. Conclusions & Perspectives

---

- Première tentative pour **comprendre les effets du rayonnement** des gaz sur la **prédiction de la transition** vers l'instationnarité à l'échelle de l'habitat dépend de
  - la nature des parois;
  - la dimension de la cavité;
  - la composition de l'air, ...
- Observations pourraient s'avérer utiles pour **comprendre l'influence du rayonnement** (propriétés radiatives du milieu et dimension de l'enceinte) sur les **écoulements turbulents** qui est à l'heure actuelle un enjeu important.