

Université de la Réunion

Contribution à l'étude numérique de la ventilation naturelle dans des cavités ouvertes par la simulation des grandes échelles.

Application au rafraîchissement passif des bâtiments

Boris Brangeon

26 Octobre 2012

PIMENT

Directeurs de thèse : Alain BASTIDE et Patrice JOUBERT

- | | | |
|---------------|-----------------|---|
| Rapporteurs : | Etienne WURTZ | Directeur de Recherche CNRS (CEA-LITEN) |
| | Shihe XIN | Professeur Université INSA (CETHIL) |
| Examineurs : | Alain BASTIDE | Professeur Université de la Réunion (PIMENT) |
| | Harry BOYER | Professeur Université de la Réunion (PIMENT) |
| | Patrice JOUBERT | Professeur Université de la Rochelle (LaSIE) |
| | Franck LUCAS | Maître de Conférences HDR Université de la Réunion (PIMENT) |
| | Anne SERGENT | Maître de Conférences Université Paris P-M Curie (LIMSI) |



*Ventilation
naturelle*

*Simulation
numérique*

*Géométries
fermées*

*Géométries
ouvertes*

*Bâtiment à
géométrie
ouverte*

*Conclusions
et
perspectives*

- 1 Ventilation naturelle
- 2 Simulation numérique
- 3 Géométries fermées
- 4 Géométries ouvertes
- 5 Application au rafraîchissement d'un bâtiment à géométrie ouverte
- 6 Conclusions et perspectives

Ventilation naturelle

Introduction

Réglementation thermique

Modélisation numérique des bâtiments

Méthodologie générale

Simulation numérique

Géométries fermées

Géométries ouvertes

Bâtiment à géométrie ouverte

Conclusions et perspectives

- 1 Ventilation naturelle
 - Introduction
 - Réglementation thermique
 - Modélisation numérique des bâtiments
 - Méthodologie générale
- 2 Simulation numérique
- 3 Géométries fermées
- 4 Géométries ouvertes
- 5 Application au rafraîchissement d'un bâtiment à géométrie ouverte
- 6 Conclusions et perspectives

Contexte énergétique global

- diminution des ressources fossiles (pétrole, uranium, charbon) ;
- inflation importante des prix.

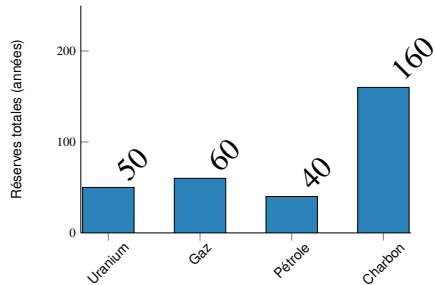


Figure 1.1 : Réserves totales d'énergie. (source : BP, IEA 2011).

Contexte énergétique global

- diminution des ressources fossiles (pétrole, uranium, charbon) ;
- inflation importante des prix.

Le secteur du bâtiment en France.

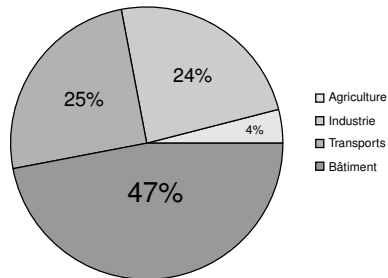


Figure 1.1 : Répartition des consommations d'énergie par secteur d'activité.

Contexte énergétique global

- diminution des ressources fossiles (pétrole, uranium, charbon) ;
- inflation importante des prix.

Le secteur du bâtiment en France.

Contexte énergétique inter-tropical

- \approx 3 milliards de personnes concernés.

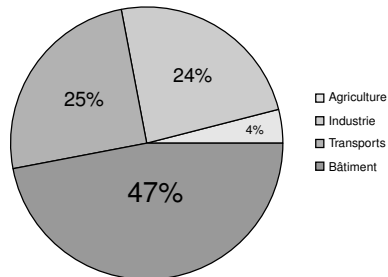


Figure 1.1 : Répartition des consommations d'énergie par secteur d'activité.

Contexte énergétique global

- diminution des ressources fossiles (pétrole, uranium, charbon) ;
- inflation importante des prix.

Le secteur du bâtiment en France.

Contexte énergétique inter-tropical

- ≈ 3 milliards de personnes concernés.

Climatisation

- système actif ;
- utilisation abusive ;
- entraîne des coûts supplémentaires (fonctionnement, maintenance).

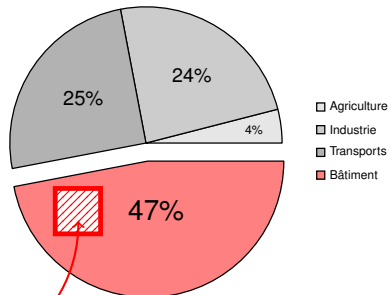


Figure 1.1 : Répartition des consommations d'énergie par secteur d'activité.

Contexte énergétique global

- diminution des ressources fossiles (pétrole, uranium, charbon) ;
- inflation importante des prix.

Le secteur du bâtiment en France.

Contexte énergétique inter-tropical

- ≈ 3 milliards de personnes concernés.

Climatisation

- système actif ;
- utilisation abusive ;
- entraîne des coûts supplémentaires (fonctionnement, maintenance).

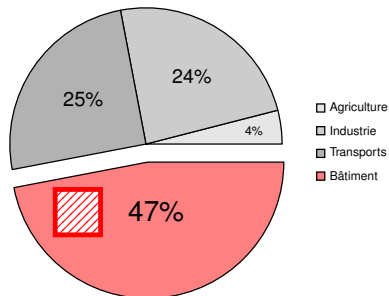


Figure 1.1 : Répartition des consommations d'énergie par secteur d'activité.

Ile de la Réunion

- pic de consommation important ;
- EDF réalise des délestages.

Contexte énergétique global

- diminution des ressources fossiles (pétrole, uranium, charbon) ;
- inflation importante des prix.

Le secteur du bâtiment en France.

Contexte énergétique inter-tropical

- ≈ 3 milliards de personnes concernés.

Climatisation

- système actif ;
- utilisation abusive ;
- entraîne des coûts supplémentaires (fonctionnement, maintenance).

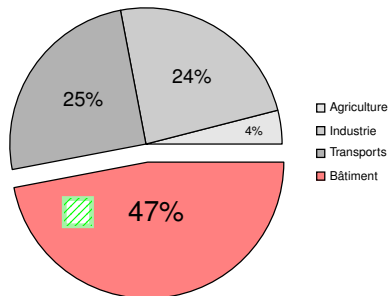


Figure 1.1 : Répartition des consommations d'énergie par secteur d'activité.

Ile de la Réunion

- pic de consommation important ;
- EDF réalise des délestages.

Réduire les dépenses énergétiques.

Quelles sont les solutions ?

Nous pouvons définir les quatre principes suivants :

- minimiser les apports de chaleur ;

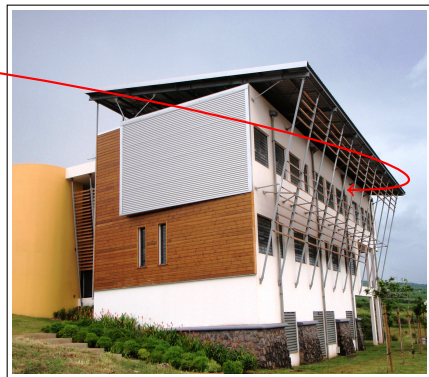


Figure 1.2 : Protection Solaire.

Nous pouvons définir les quatre principes suivants :

- minimiser les apports de chaleur ;
- apporter ou minimiser l'inertie (lieu) ;

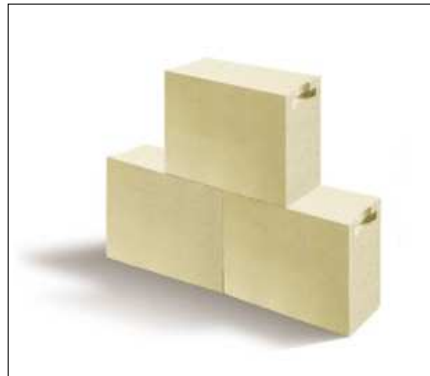


Figure 1.2 : Inertie thermique.

Nous pouvons définir les quatre principes suivants :

- minimiser les apports de chaleur ;
- apporter ou minimiser l'inertie (lieu) ;
- développer des zones végétalisées pour réduire les zones chaudes ;



Figure 1.2 : Apport de fraîcheur.

Nous pouvons définir les quatre principes suivants :

- minimiser les apports de chaleur ;
- apporter ou minimiser l'inertie (lieu) ;
- développer des zones végétalisées pour réduire les zones chaudes ;
- favoriser la ventilation traversante et mécanisée.

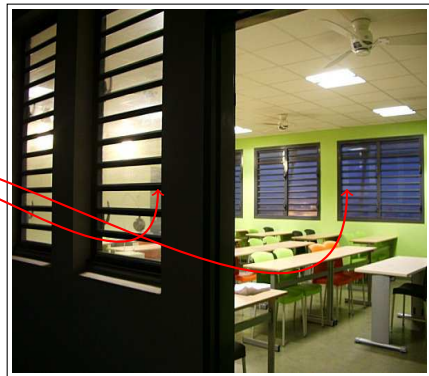


Figure 1.2 : Ventilation traversante.

Nous pouvons définir les quatre principes suivants :

- minimiser les apports de chaleur ;
- apporter ou minimiser l'inertie (lieu) ;
- développer des zones végétalisées pour réduire les zones chaudes ;
- favoriser la ventilation traversante et mécanisée.

Quels sont les leviers politiques et réglementaires ?



Figure 1.2 : Ventilation traversante.

- Ventilation naturelle
- Introduction
- Réglementation thermique
- Modélisation numérique des bâtiments
- Méthodologie générale
- Simulation numérique
- Géométries fermées
- Géométries ouvertes
- Bâtiment à géométrie ouverte
- Conclusions et perspectives

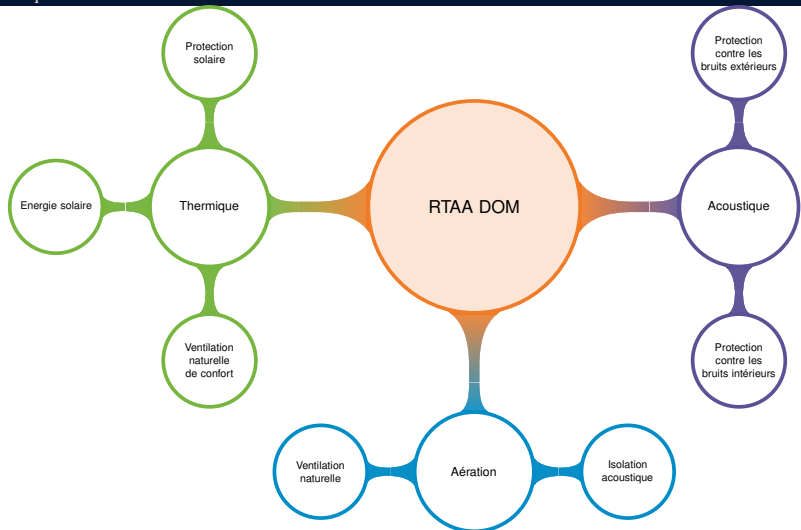


Figure 1.3 : Points clés de la Réglementation Thermique Acoustique Aération (RTAA, 2009).

✓ réduire les consommations d'énergies ;

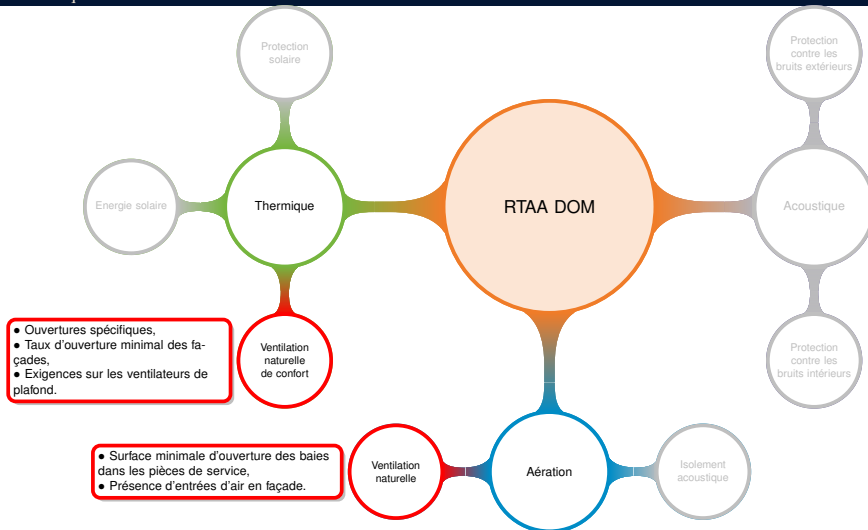


Figure 1.3 : Points clés de la Réglementation Thermique Acoustique Aération (RTAA, 2009).

- ✓ réduire les consommations d'énergies ;
- ✓ ventilation traversante ;

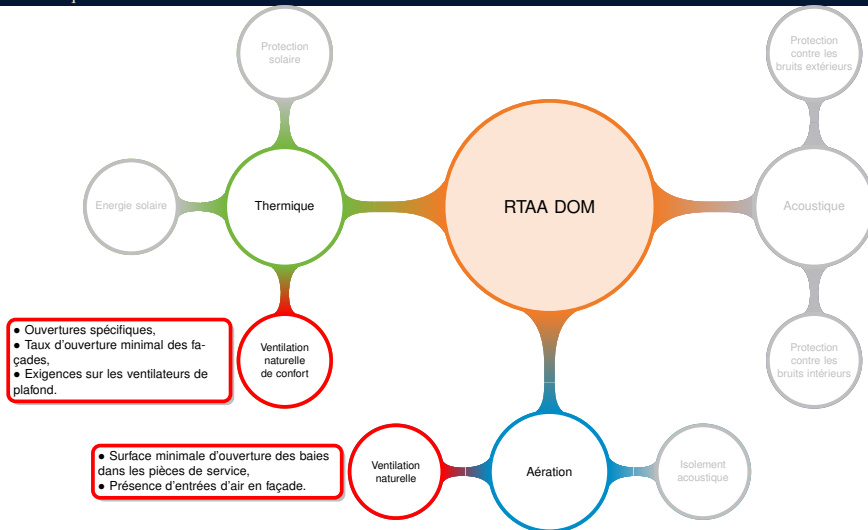


Figure 1.3 : Points clés de la Réglementation Thermique Acoustique Aération (RTAA, 2009).

- ✓ réduire les consommations d'énergies ;
- ✓ ventilation traversante ;

- réglementation basée sur des règles expertes ;
- ✓ améliorer la prédiction issues des outils de simulation.

Modélisation numérique des bâtiments.

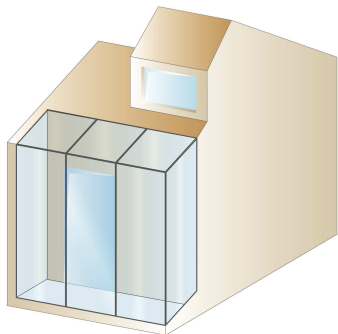
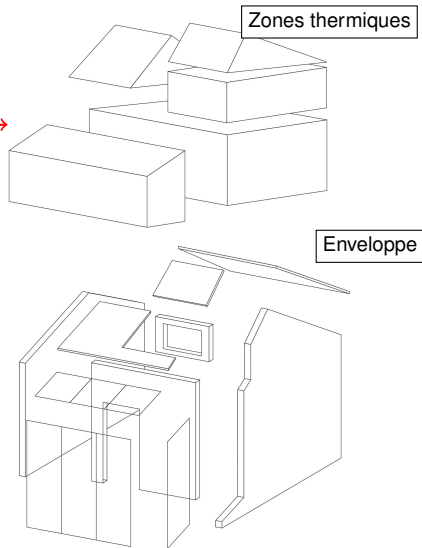


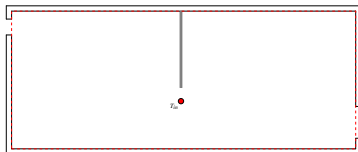
Figure 1.4 : Exemple de bâtiment à modéliser.



- nœuds de calculs ;
- lois de conservation de la physique ;
- évaluation du comportement thermo-aéraulique du bâtiment.

Suivant le niveau de raffinement du modèle les volumes de contrôle correspondront :

- ① au bâtiment dans son intégralité (modèle nodal monozone) ;
- ② aux différentes zones thermiques qui le composent (modèle nodal multizone) ;
- ③ aux différentes zones d'une même zone thermique (modèle zonal) ;



(a) modèle nodal monozone

Figure 1.4 : Exemples de discrétisations spatiales.

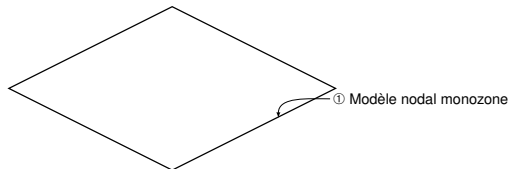
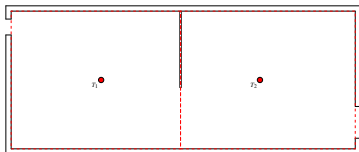


Figure 1.5 : Différents niveaux de discrétisation du bâtiment et modèles correspondants.

Suivant le niveau de raffinement du modèle les volumes de contrôle correspondront :

- ① au bâtiment dans son intégralité (modèle nodal monozone) ;
- ② aux différentes zones thermiques qui le composent (modèle nodal multizone) ;
- ③ aux différentes zones d'une même zone thermique (modèle zonal) ;



(a) modèle nodal multizone

Figure 1.4 : Exemples de discrétisations spatiales.

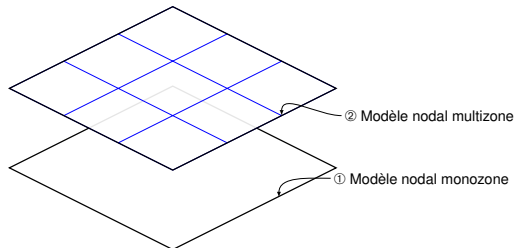
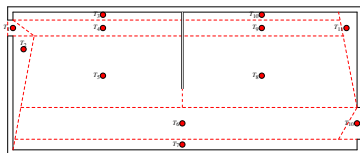


Figure 1.5 : Différents niveaux de discrétisation du bâtiment et modèles correspondants.

Suivant le niveau de raffinement du modèle les volumes de contrôle correspondront :

- ① au bâtiment dans son intégralité (modèle nodal monozone) ;
- ② aux différentes zones thermiques qui le composent (modèle nodal multizone) ;
- ③ aux différentes zones d'une même zone thermique (modèle zonal) ;



(a) modèle zonal

Figure 1.4 : Exemples de discrétisations spatiales.

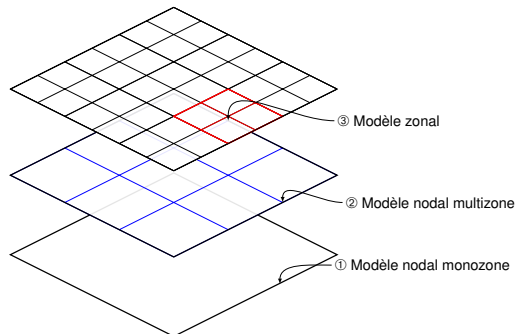


Figure 1.5 : Différents niveaux de discrétisation du bâtiment et modèles correspondants.

Suivant le niveau de raffinement du modèle les volumes de contrôle correspondront :

- ① modèle nodal monozone ;
- ② modèle nodal multizone ;
- ③ modèle zonal ;

Modèles simplifiés :

Avantages :

- simulations annuelles ;
- couplages thermo-aérauliques complexes.

Inconvénients :

- connaître au préalable les écoulements moteurs ;
- validité des lois empiriques.

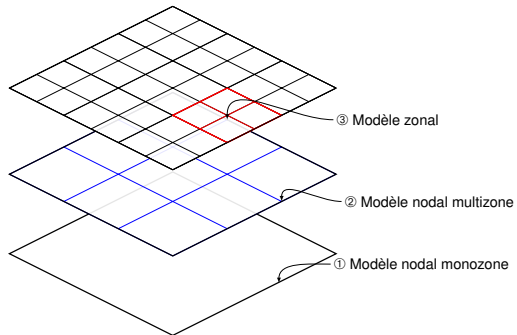
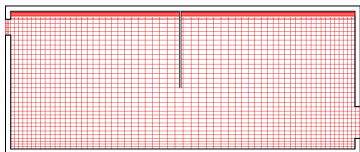


Figure 1.4 : Différents niveaux de discrétisation du bâtiment et modèles correspondants.

Suivant le niveau de raffinement du modèle les volumes de contrôle correspondront :

- ① modèle nodal monozone ;
- ② modèle nodal multizone ;
- ③ modèle zonal ;
- ④ aux volumes définis par un maillage fin de l'ambiance (modèle détaillé).



(a) code de champ

Figure 1.4 : Exemples de discrétisations spatiales.

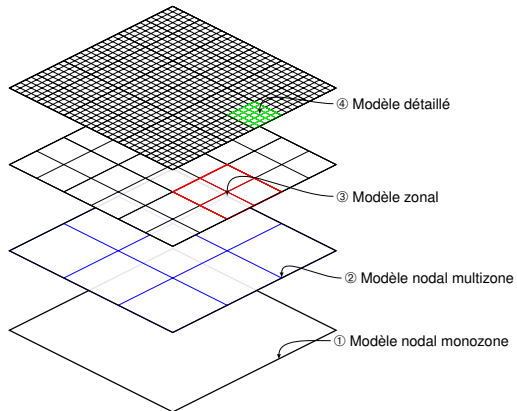


Figure 1.5 : Différents niveaux de discrétisation du bâtiment et modèles correspondants.

Suivant le niveau de raffinement du modèle les volumes de contrôle correspondront :

- ① modèle nodal monozone ;
- ② modèle nodal multizone ;
- ③ modèle zonal ;
- ④ aux volumes définis par un maillage fin de l'ambiance (modèle détaillé).

Modèles fins (MFN) :

Avantages :

- approche précise et détaillée ;
- détermination de corrélation ;
- moins coûteuse qu'une expérimentation.

Inconvénients :

- puissance et temps de calcul important.
- couplage thermo-aéraulique compliqué.

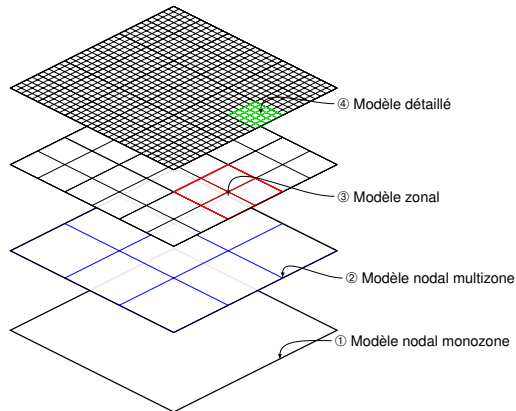


Figure 1.4 : Différents niveaux de discrétisation du bâtiment et modèles correspondants.

Suivant le niveau de raffinement du modèle les volumes de contrôle correspondront :

- ① modèle nodal monozone ;
- ② modèle nodal multizone ;
- ③ modèle zonal ;
- ④ aux volumes définis par un maillage fin de l'ambiance (modèle détaillé).

Modèles fins (MFN) :

Avantages :

- approche précise et détaillée ;
- détermination de corrélation ;
- moins coûteuse qu'une expérimentation.

Inconvénients :

- puissance et temps de calcul important.
- couplage thermo-aéraulique compliqué.

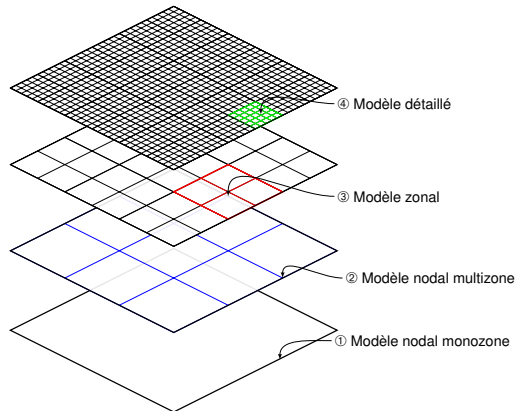


Figure 1.4 : Différents niveaux de discrétisation du bâtiment et modèles correspondants.

La modélisation fine a été choisie pour répondre à nos objectifs de départ.

Réduire les consommations énergétiques

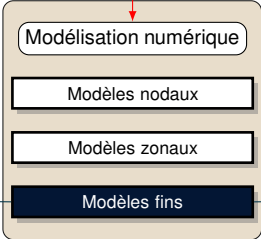
trop coûteuse, impossible

Rafrâichissement passif



Expérimentation fine

Ventilation naturelle



écoulement de convection naturelle turbulente

problématique des conditions aux limites pour les géométries ouvertes

ventilation naturelle dans un bâtiment à géométrie ouverte

- Ventilation naturelle
- Introduction
- Réglementation thermique
- Modélisation numérique des bâtiments
- Méthodologie générale
- Simulation numérique
- Géométries fermées
- Géométries ouvertes
- Bâtiment à géométrie ouverte
- Conclusions et perspectives

Ventilation
naturelleSimulation
numériqueEquations
localesApproches
numériquesSimulation des
Grandes
EchellesChoix du modèle
de sous-mailleEquations sans
dimensionSupport de
développementGéométries
ferméesGéométries
ouvertesBâtiment à
géométrie
ouverteConclusions
et
perspectives

1 Ventilation naturelle

2 Simulation numérique

- Equations locales
- Approches numériques
- Simulation des Grandes Echelles
- Choix du modèle de sous-maille
- Equations sans dimension
- Support de développement

3 Géométries fermées

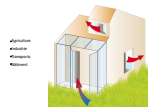
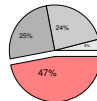
4 Géométries ouvertes

5 Application au rafraîchissement d'un bâtiment à géométrie ouverte

6 Conclusions et perspectives

Rappels sur la partie précédente

- réduire les consommations énergétiques ;
- ventilation naturelle intéressante ;
- modélisations numériques fines (SND-SGE).



Hyphothèses :

- fluide visqueux newtonien ;
- écoulement incompressible ;
- pas de production de chaleur interne au fluide ;
- Approximation de Boussinesq (Boussinesq, 1903) : $\rho(T) = \rho(T_0) [1 - \beta(T - T_0)]$.

Equations locales :

- Equation de la continuité :

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

- Equations locales de la quantité de mouvement (équations de Navier-Stokes) :

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + \frac{\partial (u_i u_j)}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p_m}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\nu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right) + g\beta(T - T_0)\delta_{iz} \quad (2)$$

- Equation locale de l'énergie :

$$\frac{\partial T}{\partial t} + \frac{\partial (u_j T)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\kappa \frac{\partial T}{\partial x_j} \right) \quad (3)$$

Ventilation naturelle

Simulation numérique

Equations locales

Approches numériques

Simulation des Grandes Echelles

Choix du modèle de sous-maille

Equations sans dimension

Support de développement

Géométries fermées

Géométries ouvertes

Bâtiment à géométrie ouverte

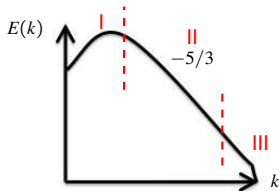
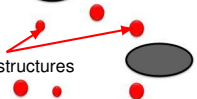
Conclusions et perspectives

Principe de la Simulation Directe des équations de Navier-Stokes (SND)

Grosses structures



Petites structures



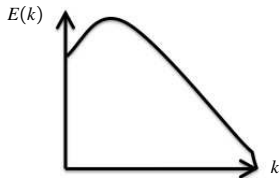
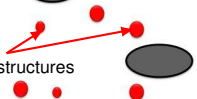
- I zone de production ;
- II zone inertielle ;
- III zone de dissipation.

Principe de la Simulation des Grandes Echelles (SGE)

Grosses structures



Petites structures

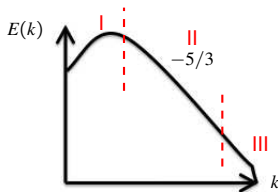
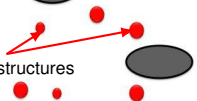


Principe de la Simulation Directe des équations de Navier-Stokes (SND)

Grosses structures



Petites structures



✓ Avantages :

- toutes les échelles sont résolues : précise ;
- mécanismes physiques.

✗ Inconvénients :

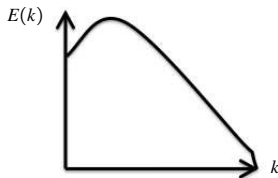
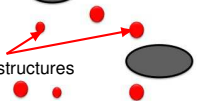
- maillage important : en 3D $\propto Re^{9/4}$;
- coûteuse en temps de calcul : en 3D $\propto Re^{11/4}$;
- verrous scientifiques pour le bâtiment.

Principe de la Simulation des Grandes Echelles (SGE)

Grosses structures



Petites structures



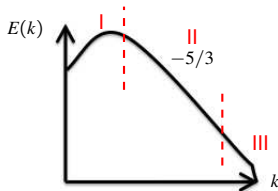
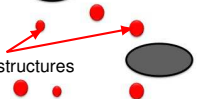
- Ventilation naturelle
- Simulation numérique
- Equations locales
- Approches numériques
- Simulation des Grandes Echelles
- Choix du modèle de sous-maille
- Equations sans dimension
- Support de développement
- Géométries fermées
- Géométries ouvertes
- Bâtiment à géométrie ouverte
- Conclusions et perspectives

Principe de la Simulation Directe des équations de Navier-Stokes (SND)

Grosses structures



Petites structures



✓ Avantages :

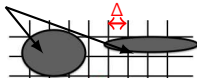
- toutes les échelles sont résolues : précise ;
- mécanismes physiques.

✗ Inconvénients :

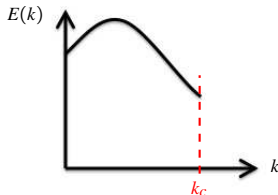
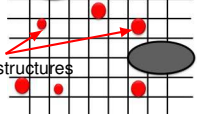
- maillage important : en 3D $\propto Re^{9/4}$;
- coûteuse en temps de calcul : en 3D $\propto Re^{11/4}$;
- verrous scientifiques pour le bâtiment.

Principe de la Simulation des Grandes Echelles (SGE)

Grosses structures



Petites structures



- application d'un filtre boîte ;
- taille du filtre $(\tilde{\Delta}_x \tilde{\Delta}_y \tilde{\Delta}_z)^{1/3}$.

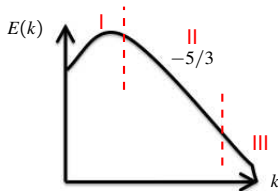
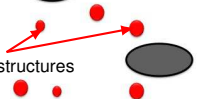
- Ventilation naturelle
- Simulation numérique
- Equations locales
- Approches numériques
- Simulation des Grandes Echelles
- Choix du modèle de sous-maille
- Equations sans dimension
- Support de développement
- Géométries fermées
- Géométries ouvertes
- Bâtiment à géométrie ouverte
- Conclusions et perspectives

Principe de la Simulation Directe des équations de Navier-Stokes (SND)

Grosses structures



Petites structures



✓ Avantages :

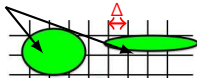
- toutes les échelles sont résolues : précise ;
- mécanismes physiques.

✗ Inconvénients :

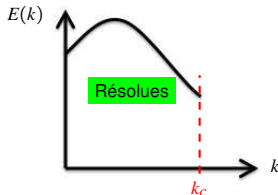
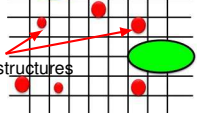
- maillage important : en 3D $\propto Re^{9/4}$;
- coûteuse en temps de calcul : en 3D $\propto Re^{11/4}$;
- verrous scientifiques pour le bâtiment.

Principe de la Simulation des Grandes Echelles (SGE)

Grosses structures



Petites structures



- application d'un filtre boîte ;
- taille du filtre $(\tilde{\Delta}_x \tilde{\Delta}_y \tilde{\Delta}_z)^{1/3}$.

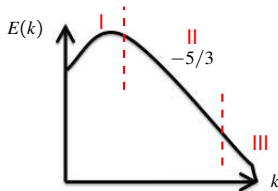
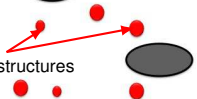
- Ventilation naturelle
- Simulation numérique
- Equations locales
- Approches numériques
- Simulation des Grandes Echelles
- Choix du modèle de sous-maille
- Equations sans dimension
- Support de développement
- Géométries fermées
- Géométries ouvertes
- Bâtiment à géométrie ouverte
- Conclusions et perspectives

Principe de la Simulation Directe des équations de Navier-Stokes (SND)

Grosses structures



Petites structures



✓ Avantages :

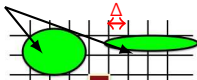
- toutes les échelles sont résolues : précise ;
- mécanismes physiques.

✗ Inconvénients :

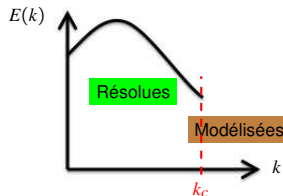
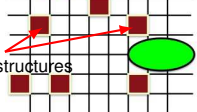
- maillage important : en 3D $\propto Re^{9/4}$;
- coûteuse en temps de calcul : en 3D $\propto Re^{11/4}$;
- verrous scientifiques pour le bâtiment.

Principe de la Simulation des Grandes Echelles (SGE)

Grosses structures



Petites structures

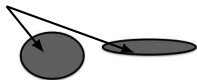


- application d'un filtre boîte ;
- taille du filtre $(\tilde{\Delta}_x \tilde{\Delta}_y \tilde{\Delta}_z)^{1/3}$.

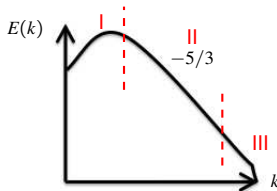
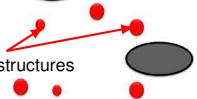
- Ventilation naturelle
- Simulation numérique
- Equations locales
- Approches numériques
- Simulation des Grandes Echelles
- Choix du modèle de sous-maille
- Equations sans dimension
- Support de développement
- Géométries fermées
- Géométries ouvertes
- Bâtiment à géométrie ouverte
- Conclusions et perspectives

Principe de la Simulation Directe des équations de Navier-Stokes (SND)

Grosses structures



Petites structures



✓ Avantages :

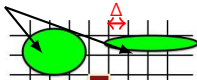
- toutes les échelles sont résolues : précise ;
- mécanismes physiques.

✗ Inconvénients :

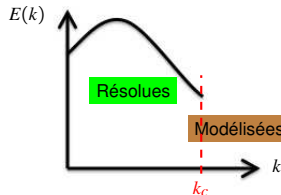
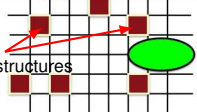
- maillage important : en 3D $\propto Re^{9/4}$;
- coûteuse en temps de calcul : en 3D $\propto Re^{11/4}$;
- verrous scientifiques pour le bâtiment.

Principe de la Simulation des Grandes Echelles (SGE)

Grosses structures



Petites structures



✓ Avantages :

- réduction du temps de calcul ;
- écoulements dans des géométries de grandes tailles.

✗ Inconvénient :

- choix d'un modèle de turbulence performant.

- Equation de la continuité filtrée :

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} = 0 \quad (4)$$

- Equations locales de la quantité de mouvement filtrées :

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \frac{\partial \bar{u}_i \bar{u}_j}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial \bar{p}_m}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\nu \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) \right) - \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} + g\beta(\bar{T} - T_0)\delta_{iz} \quad (5)$$

- Equation locale de l'énergie filtrée :

$$\frac{\partial \bar{T}}{\partial t} + \frac{\partial \bar{u}_j \bar{T}}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\kappa \frac{\partial \bar{T}}{\partial x_j} \right) - \frac{\partial h_j}{\partial x_j} \quad (6)$$

Modélisation de sous-maille :

- hypothèse de Boussinesq : $\tau_{ij}^d = \tau_{ij} - \frac{\delta_{ij}}{3} \tau_{kk} = -2\nu_{sm} \bar{S}_{ij}$
- par analogie on a : $h_j = -\kappa_{sm} \frac{\partial \bar{T}}{\partial x_j}$

Choix d'un modèle de sous-maille performant pour ν_{sm} et κ_{sm} ?

Tableau 1 : Récapitulatif non exhaustif des modèles de sous-maille utilisés dans la littérature.

intitulé du modèle	formule	auteurs
Modèle de Smagorinsky	$\nu_{sm} = (C_s \tilde{\Delta})^2 \tilde{S} $	Smagorinsky, 1963
Modèle basé sur l'énergie cinétique de sous-maille	$\nu_{sm} = C_{TKE} \tilde{\Delta} (q_{sm})^{1/2}$	(Bardina, 1980)
Modèle local (échelles mixtes)	$\nu_{sm} = ((C_s \tilde{\Delta})^2 \tilde{S})^\alpha (C_{TKE} \tilde{\Delta} (q_{sm})^{1/2})^{1-\alpha}$	(Sagaut, 1995)
Modèle de Smagorinsky	$\kappa_{sm} = C_s^2 \tilde{\Delta}^2 \tilde{S} $	(Ezzouhri, 2007)
Modèle basé sur l'énergie du flux thermique de sous-maille	$\kappa_{sm} = C_\phi \frac{\tilde{\Delta}}{\Delta T} \Phi_{sm} ^{1/2}$	(Sergent, 2000)
Modèle local (échelles mixtes)	$\kappa_{sm} = C_L \frac{\tilde{\Delta}^{(2\alpha+1)}}{\Delta T} \tilde{T} ^\alpha \Phi_{sm} ^{(1-\alpha)/2}$	(Sergent, 2003)

- Ventilation naturelle
- Simulation numérique
- Equations locales
- Approches numériques
- Simulation des Grandes Echelles
- Choix du modèle de sous-maille
- Equations sans dimension
- Support de développement
- Géométries fermées
- Géométries ouvertes
- Bâtiment à géométrie ouverte
- Conclusions et perspectives

Tableau 1 : Récapitulatif non exhaustif des modèles de sous-maille utilisés dans la littérature.

intitulé du modèle	formule	auteurs
Modèle de Smagorinsky	$\nu_{sm} = (C_s \bar{\Delta})^2 \bar{S} $!Smagorinsky, 1963)
Modèle basé sur l'énergie cinétique de sous-maille	$\nu_{sm} = C_{TKE} \bar{\Delta} (q_{sm})^{1/2}$	(Bardina, 1980)
Modèle local (échelles mixtes)	$\nu_{sm} = ((C_s \bar{\Delta})^2 \bar{S})^\alpha (C_{TKE} \bar{\Delta} (q_{sm})^{1/2})^{1-\alpha}$	(Sagaut, 1995)
Modèle de Smagorinsky	$\kappa_{sm} = C_s^2 \bar{\Delta}^2 \bar{S} $	(Ezzouhri, 2007)
Modèle basé sur l'énergie du flux thermique de sous-maille	$\kappa_{sm} = C_\Phi \frac{\bar{\Delta}}{\Delta T} \Phi_{sm} ^{1/2}$	(Sergent, 2000)
Modèle local (échelles mixtes)	$\kappa_{sm} = C_L \frac{\bar{\Delta}^{(2\alpha+1)}}{\Delta T} \bar{T} ^\alpha \Phi_{sm} ^{(1-\alpha)/2}$	(Sergent, 2003)

Avantage :

- s'annulent dans les zones laminaires et aux parois.

Ventilation naturelle

Simulation numérique

Equations locales

Approches numériques

Simulation des Grandes

Echelles

Choix du modèle de sous-maille

Equations sans dimension

Support de développement

Géométries fermées

Géométries ouvertes

Bâtiment à géométrie ouverte

Conclusions et perspectives

Tableau 1 : Récapitulatif non exhaustif des modèles de sous-maille utilisés dans la littérature.

intitulé du modèle	formule	auteurs
Modèle de Smagorinsky	$\nu_{sm} = (C_s \bar{\Delta})^2 \bar{S} $	(Smagorinsky, 1963)
Modèle basé sur l'énergie cinétique de sous-maille	$\nu_{sm} = C_{TKE} \bar{\Delta} (q_{sm})^{1/2}$	(Bardina, 1980)
Modèle local (échelles mixtes)	$\nu_{sm} = ((C_s \bar{\Delta})^2 \bar{S})^\alpha (C_{TKE} \bar{\Delta} (q_{sm})^{1/2})^{1-\alpha}$	(Sagaut, 1995)
Modèle de Smagorinsky	$\kappa_{sm} = C_s^2 \bar{\Delta}^2 \bar{S} $	(Ezzouhri, 2007)
Modèle basé sur l'énergie du flux thermique de sous-maille	$\kappa_{sm} = C_\Phi \frac{\bar{\Delta}}{\Delta T} \Phi_{sm} ^{1/2}$	(Sergent, 2000)
Modèle local (échelles mixtes)	$\kappa_{sm} = C_L \frac{\bar{\Delta}^{(2\alpha+1)}}{\Delta T} \bar{T} ^\alpha \Phi_{sm} ^{(1-\alpha)/2}$	(Sergent, 2003)

Avantage :

- s'annulent dans les zones laminaires et aux parois.

➕ approche dynamique pour l'évaluation de la constante (C_s, C_L) (Germano, 1991).

- Ventilation naturelle
- Simulation numérique
 - Equations locales
 - Approches numériques
 - Simulation des Grandes Echelles
- Choix du modèle de sous-maille
 - Equations sans dimension
 - Support de développement
- Géométries fermées
- Géométries ouvertes
- Bâtiment à géométrie ouverte
- Conclusions et perspectives

Tableau 1 : Récapitulatif non exhaustif des modèles de sous-maille utilisés dans la littérature.

intitulé du modèle	formule	auteurs
Modèle de Smagorinsky	$\nu_{sm} = (C_s \bar{\Delta})^2 \bar{S} $	(Smagorinsky, 1963)
Modèle basé sur l'énergie cinétique de sous-maille	$\nu_{sm} = C_{TKE} \bar{\Delta} (q_{sm})^{1/2}$	(Bardina, 1980)
Modèle local (échelles mixtes)	$\nu_{sm} = ((C_s \bar{\Delta})^2 \bar{S})^\alpha (C_{TKE} \bar{\Delta} (q_{sm})^{1/2})^{1-\alpha}$	(Sagaut, 1995)
Modèle de Smagorinsky	$\kappa_{sm} = C_s^2 \bar{\Delta}^2 \bar{S} $	(Ezzouhri, 2007)
Modèle basé sur l'énergie du flux thermique de sous-maille	$\kappa_{sm} = C_\Phi \frac{\bar{\Delta}}{\Delta T} \Phi_{sm} ^{1/2}$	(Sergent, 2000)
Modèle local (échelles mixtes)	$\kappa_{sm} = C_L \frac{\bar{\Delta}^{(2\alpha+1)}}{\Delta T} \bar{T} ^\alpha \Phi_{sm} ^{(1-\alpha)/2}$	(Sergent, 2003)

Un double filtrage est réalisé :

- le premier filtrage (filtre implicite, grille) : \bar{G} , $\bar{\Delta}$, k_c ;

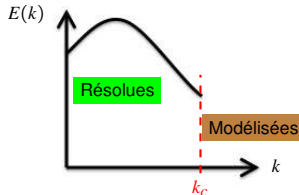
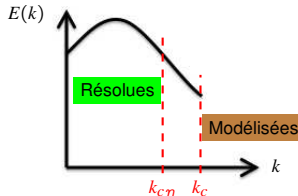


Tableau 1 : Récapitulatif non exhaustif des modèles de sous-maille utilisés dans la littérature.

intitulé du modèle	formule	auteurs
Modèle de Smagorinsky	$\nu_{sm} = (C_s \bar{\Delta})^2 \bar{S} $!Smagorinsky, 1963)
Modèle basé sur l'énergie cinétique de sous-maille	$\nu_{sm} = C_{TKE} \bar{\Delta} (q_{sm})^{1/2}$	(Bardina, 1980)
Modèle local (échelles mixtes)	$\nu_{sm} = ((C_s \bar{\Delta})^2 \bar{S})^\alpha (C_{TKE} \bar{\Delta} (q_{sm})^{1/2})^{1-\alpha}$	(Sagaut, 1995)
Modèle de Smagorinsky	$\kappa_{sm} = C_s^2 \bar{\Delta}^2 \bar{S} $	(Ezzouhri, 2007)
Modèle basé sur l'énergie du flux thermique de sous-maille	$\kappa_{sm} = C_\Phi \frac{\bar{\Delta}}{\Delta T} \Phi_{sm} ^{1/2}$	(Sergent, 2000)
Modèle local (échelles mixtes)	$\kappa_{sm} = C_L \frac{\bar{\Delta}^{(2\alpha+1)}}{\Delta T} \bar{T} ^\alpha \Phi_{sm} ^{(1-\alpha)/2}$	(Sergent, 2003)

Un double filtrage est réalisé :

- le premier filtrage (filtre implicite, grille) : $\bar{G}, \bar{\Delta}, k_c$;
- le second filtrage (filtre test) : $\bar{G}, \bar{\Delta}, k_c \eta$.



Constantes dynamiques :

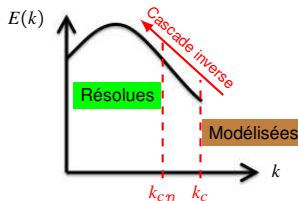
- $C_{dyn}^\nu = \frac{1}{2} \frac{\langle L_{ij}^d M_{ij} \rangle}{\langle M_{ij} M_{ij} \rangle}$,
- $C_{dyn}^\kappa = \frac{1}{2} \frac{\mathcal{L}_j \mathcal{M}_j}{\mathcal{M}_{ij} \mathcal{M}_j}$.

Tableau 1 : Récapitulatif non exhaustif des modèles de sous-maille utilisés dans la littérature.

intitulé du modèle	formule	auteurs
Modèle de Smagorinsky	$\nu_{sm} = (C_s \bar{\Delta})^2 \bar{S} $!Smagorinsky, 1963)
Modèle basé sur l'énergie cinétique de sous-maille	$\nu_{sm} = C_{TKE} \bar{\Delta} (q_{sm})^{1/2}$	(Bardina, 1980)
Modèle local (échelles mixtes)	$\nu_{sm} = ((C_s \bar{\Delta})^2 \bar{S})^\alpha (C_{TKE} \bar{\Delta} (q_{sm})^{1/2})^{1-\alpha}$	(Sagaut, 1995)
Modèle de Smagorinsky	$\kappa_{sm} = C_s^2 \bar{\Delta}^2 \bar{S} $	(Ezzouhri, 2007)
Modèle basé sur l'énergie du flux thermique de sous-maille	$\kappa_{sm} = C_\Phi \frac{\bar{\Delta}}{\Delta T} \Phi_{sm} ^{1/2}$	(Sergent, 2000)
Modèle local (échelles mixtes)	$\kappa_{sm} = C_L \frac{\bar{\Delta}^{(2\alpha+1)}}{\Delta T} \bar{T} ^\alpha \Phi_{sm} ^{(1-\alpha)/2}$	(Sergent, 2003)

Un double filtrage est réalisé :

- le premier filtrage (filtre implicite, grille) : $\bar{G}, \bar{\Delta}, k_c$;
- le second filtrage (filtre test) : $\bar{G}, \bar{\Delta}, k_c \eta$.



Avantages procédure dynamique

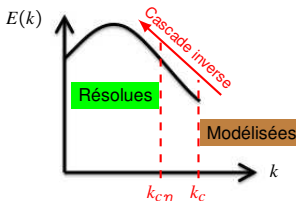
- $C_{dyn}^\nu, C_{dyn}^\kappa$ évaluées à chaque instant et en tous points de l'espace ;
- représentation de la cascade inverse observée expérimentalement.

Tableau 1 : Récapitulatif non exhaustif des modèles de sous-maille utilisés dans la littérature.

intitulé du modèle	formule	auteurs
Modèle de Smagorinsky	$\nu_{sm} = (C_s \bar{\Delta})^2 \bar{S} $!Smagorinsky, 1963)
Modèle basé sur l'énergie cinétique de sous-maille	$\nu_{sm} = C_{TKE} \bar{\Delta} (q_{sm})^{1/2}$	(Bardina, 1980)
Modèle local (échelles mixtes)	$\nu_{sm} = ((C_s \bar{\Delta})^2 \bar{S})^\alpha (C_{TKE} \bar{\Delta} (q_{sm})^{1/2})^{1-\alpha}$	(Sagaut, 1995)
Modèle de Smagorinsky	$\kappa_{sm} = C_s^2 \bar{\Delta}^2 \bar{S} $	(Ezzouhri, 2007)
Modèle basé sur l'énergie du flux thermique de sous-maille	$\kappa_{sm} = C_\Phi \frac{\bar{\Delta}}{\Delta T} \Phi_{sm} ^{1/2}$	(Sergent, 2000)
Modèle local (échelles mixtes)	$\kappa_{sm} = C_L \frac{\bar{\Delta}^{(2\alpha+1)}}{\Delta T} \bar{T} ^\alpha \Phi_{sm} ^{(1-\alpha)/2}$	(Sergent, 2003)

Un double filtrage est réalisé :

- le premier filtrage (filtre implicite, grille) : $\bar{G}, \bar{\Delta}, k_c$;
- le second filtrage (filtre test) : $\bar{G}, \bar{\Delta}, k_c \eta$.



Inconvénient

- stabilité numérique : impose un bornage.

- Equation de la continuité filtrée sans dimensions :

$$\frac{\partial \bar{u}_i^*}{\partial x_i^*} = 0 \quad (7)$$

- Equations locales de la quantité de mouvement filtrées sans dimensions :

$$\frac{\partial \bar{u}_i^*}{\partial t^*} + \frac{\partial (\bar{u}_i^* \bar{u}_j^*)}{\partial x_j^*} = - \frac{\partial \bar{\Pi}}{\partial x_i^*} + \frac{\partial}{\partial x_j^*} \left((\text{Pr} Ra_H^{-1/2} + \nu_{sm}) \left(\frac{\partial \bar{u}_i^*}{\partial x_j^*} + \frac{\partial \bar{u}_j^*}{\partial x_i^*} \right) \right) + \text{Pr} \bar{\theta} \delta_{iz} \quad (8)$$

- Equation locale de l'énergie filtrée sans dimensions :

$$\frac{\partial \bar{\theta}}{\partial t^*} + \frac{\partial (\bar{u}_j^* \bar{\theta})}{\partial x_j^*} = \frac{\partial}{\partial x_j^*} \left((Ra_H^{-1/2} + \kappa_{sm}) \frac{\partial \bar{\theta}}{\partial x_j^*} \right) \quad (9)$$

- $U_{CN} = \frac{\kappa}{H} Ra_H^{1/2}$, $\theta = \frac{T_c + T_f}{2} \frac{\Delta T}{\Delta T}$;
- $10^4 < Ra_H < 10^9$: convection naturelle laminaire ;
- $Ra_H > 10^{10}$: convection naturelle turbulente.

Ex Hall d'entrée : $H = 4$ m et $\Delta T = 2^\circ\text{C} \rightarrow Ra_H = 4 \times 10^{10}$

Ventilation naturelle

Simulation numérique

Equations locales

Approches numériques

Simulation des Grandes Echelles

Choix du modèle de sous-maille

Equations sans dimension

Support de développement

Géométries fermées

Géométries ouvertes

Bâtiment à géométrie ouverte

Conclusions et perspectives

Problématique du bâtiment :

- géométries complexes adaptées au bâtiment.

Outil numérique

- OpenFOAM (Openfoam, 2012)

Caractéristiques :

- code source ouvert (C++);
- volumes finis colocalisés;
- code parallélisé (OpenMPI).

Intérêt :

- se concentrer uniquement sur la physique des écoulements.

Utilisation de notre outil sur des géométries fermées et ouvertes.

Plateforme de travail :

- Cluster BULL Novascale R422;
- performance théorique totale est de 1.92 TFlops avec 200 cœurs et 440 Go RAM.

Ventilation
naturelle

Simulation
numérique

Géométries
fermées

Cavité
différentiellement
chauffée

Géométries
ouvertes

Bâtiment à
géométrie
ouverte

Conclusions
et
perspectives

- 1 Ventilation naturelle
- 2 Simulation numérique
- 3 Géométries fermées**
 - Cavité différenciellement chauffée
- 4 Géométries ouvertes
- 5 Application au rafraîchissement d'un bâtiment à géométrie ouverte
- 6 Conclusions et perspectives

Rappels sur la partie précédente



- équations de conservation ;
- modèle de sous-maille des échelles mixtes ;
- puissance de calcul importante.

Ventilation
naturelleSimulation
numériqueGéométries
ferméesCavité
différentiellement
chaufféeGéométries
ouvertesBâtiment à
géométrie
ouverteConclusions
et
perspectives

Objectifs

- étudier la convection naturelle turbulente ;
- valider le choix des modèles de sous-maille ;
- comparaison aux résultats de la littérature ;
- comparaison aux résultats de l'expérimentation.

Présentation étude

- cavité différenciellement chauffée ;
- rapport de forme 4 (Trias et al., 2010 ; Djanna, 2011) ;

Intérêts

- cas idéal pour l'élaboration de modèles numériques ;
- expérimentation existante.

Description écoulement

- la variation de la masse volumique génère le mouvement.

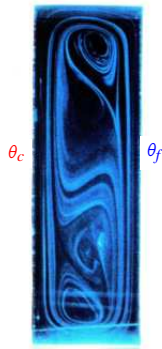


Figure 3.1 : Cavité différenciellement chauffée (source : pPrime).

- Ventilation naturelle
- Simulation numérique
- Géométries fermées
- Cavité différentiellement chauffée
- Géométries ouvertes
- Bâtiment à géométrie ouverte
- Conclusions et perspectives

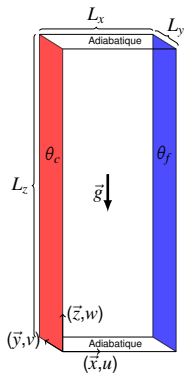


Figure 3.2 : Système de coordonnées et repérage des vitesses.

- Conditions aux limites :

Tableau 2 : Conditions aux limites imposées à la cavité fermée.

	Parois verticales		Parois horizontales		Parois latérales
	Gauches	Droites	Plafond	Plancher	Avant et Arrière
$\vec{V}(u,v,w)$	(0 0 0)	(0 0 0)	(0 0 0)	(0 0 0)	périodique
θ	$\theta_c = 0,5$	$\theta_f = -0,5$	$\frac{\partial \theta}{\partial z} = 0$	$\frac{\partial \theta}{\partial z} = 0$	périodique

- Maillage : loi en tangente hyperbolique en x (Henkes, 1993) donnée par :

$$x(k) = \frac{L_x}{2} \left(1 + \frac{\tanh\left(\gamma_x \left(\frac{2(k-1)}{N_x} - 1\right)\right)}{\tanh(\gamma_x)} \right) \tag{10}$$

Tableau 3 : Caractéristiques des simulations SGE.

		Ra_H	N_x	N_y	N_z	L_y	γ_x	γ_z	TA	Δt
3D	SGE 3D	$6,4 \times 10^8$	64	32	128	2,0	1,5	1,5	740	$5,0 \times 10^{-3}$
		2×10^9	80	64	192	1,0	1,75	0,0	440	$3,0 \times 10^{-3}$
		1×10^{10}	128	64	320	1,0	2,0	0,0	240	$1,0 \times 10^{-3}$

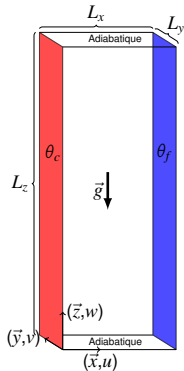


Figure 3.2 : Système de coordonnées et repérage des vitesses.

- Conditions aux limites :

Tableau 2 : Conditions aux limites imposées à la cavité fermée.

	Parois verticales		Parois horizontales		Parois latérales
	Gauches	Droites	Plafond	Plancher	Avant et Arrière
$\vec{V}(u,v,w)$	(0 0 0)	(0 0 0)	(0 0 0)	(0 0 0)	périodique
θ	$\theta_c = 0,5$	$\theta_f = -0,5$	$\frac{\partial \theta}{\partial z} = 0$	$\frac{\partial \theta}{\partial z} = 0$	périodique

- Maillage : loi en tangente hyperbolique en x (Henkes, 1993) donnée par :

$$x(k) = \frac{L_x}{2} \left(1 + \frac{\tanh\left(\gamma_x \left(\frac{2(k-1)}{N_x} - 1\right)\right)}{\tanh(\gamma_x)} \right) \tag{10}$$

Tableau 3 : Caractéristiques des simulations SGE.

		Ra_H	N_x	N_y	N_z	L_y	γ_x	γ_z	TA	Δt
3D	SGE 3D	$6,4 \times 10^8$	64	32	128	2,0	1,5	1,5	740	$5,0 \times 10^{-3}$
		2×10^9	80	64	192	1,0	1,75	0,0	440	$3,0 \times 10^{-3}$
		1×10^{10}	128	64	320	1,0	2,0	0,0	240	$1,0 \times 10^{-3}$

- Comparaison avec SND (Trias et al., 2010).

Ventilation naturelle

Simulation numérique

Géométries fermées

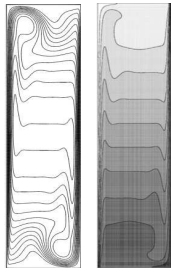
Cavité différentiellement chauffée

Géométries ouvertes

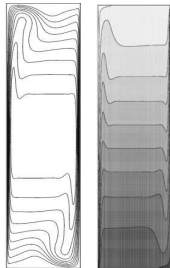
Bâtiment à géométrie ouverte

Conclusions et perspectives

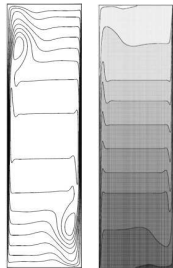
Référence SND 3D
(Trias, 2010)



(a) SND : $6,4 \times 10^8$

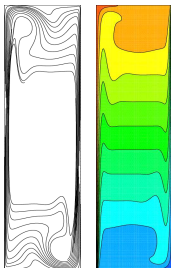


(b) SND : 2×10^9

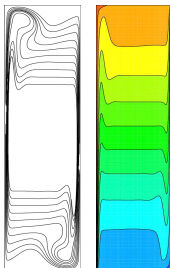


(c) SND : 1×10^{10}

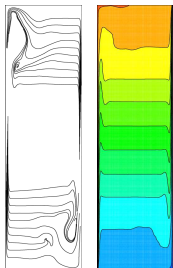
SGE 3D
(Brangeon, 2012)



(a) SGE : $6,4 \times 10^8$



(b) SGE : 2×10^9



(c) SGE : 1×10^{10}

Ventilation naturelle

Simulation numérique

Géométries fermées

Cavité différentiellement chauffée

Géométries ouvertes

Bâtiment à géométrie ouverte

Conclusions et perspectives

Ra_H	Cas#	$\langle Nu_c \rangle$	$\langle Nu_c \rangle_{max}$	$S_{1/2}$
$6,4 \times 10^8$	SGE-3D	49,37	179,61	1,01
	SND-3D	49,24	171,89	1,02
2×10^9	SGE-3D	66,19	260,44	1,01
	SND-3D	66,63	260,49	1,01
1×10^{10}	SGE-3D	101,33	447,40	1,01
	SND-3D	101,94	459,50	1,01

- SND-3D : $190 \times 128 \times 462$;
- SGE-3D : $128 \times 64 \times 320$.

Conclusion cas 3D :

- ✓ résultats globalement satisfaisants ;
- ✓ diminution du temps de calcul.

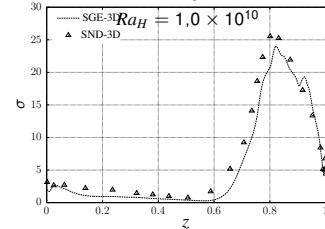
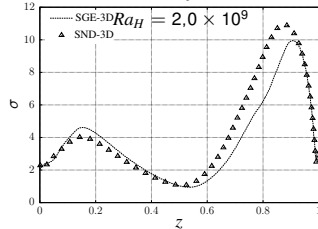
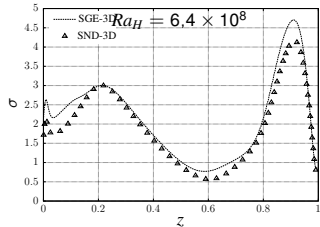
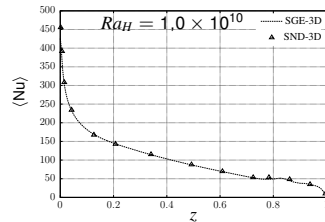
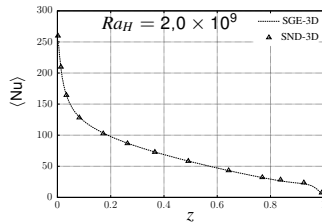
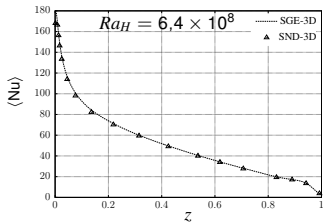
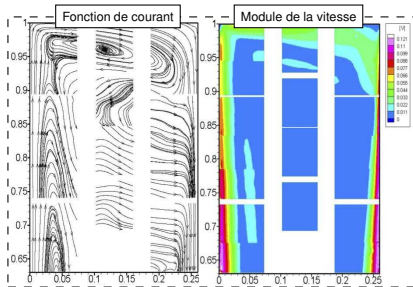
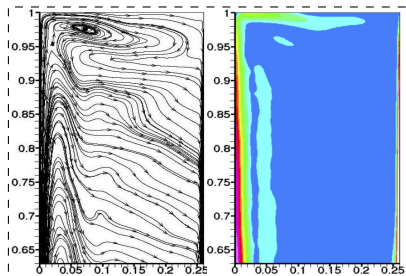


Figure 3.3 : Nombre de Nusselt local moyen (en haut) et son écart type (en bas) le long de la paroi chaude.

Expérimental (Djanna, 2011)



SGE 3D (Brangeon, 2012)



Perspectives :

- étudier des écoulements à haut nombre de Rayleigh ;
- résultats intermédiaires encourageants.

Conclusion générale

- ✓ résultats satisfaisants pour $6,4 \times 10^8 < Ra_H < 1 \times 10^{10}$.
- ✓ validation SGE et modèles de sous-maille.

Vers l'étude des géométries ouvertes.

Ventilation naturelle
 Simulation numérique
 Géométries fermées
 Cavitité différentiellement chauffée
 Géométries ouvertes
 Bâtiment à géométrie ouverte
 Conclusions et perspectives

Ventilation
naturelleSimulation
numériqueGéométries
ferméesGéométries
ouvertes

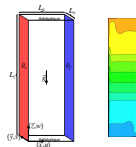
Introduction

Canal asymétriquement
chaufféInfluence des
conditions aux
limitesBenchmark
AmeThCanal asymétriquement
chauffé
inclinéMéthodologie
généraleBâtiment à
géométrie
ouverteConclusions
et
perspectives

- 1 Ventilation naturelle
- 2 Simulation numérique
- 3 Géométries fermées
- 4 **Géométries ouvertes**
 - Introduction
 - Canal asymétriquement chauffé
 - Influence des conditions aux limites aérauliques
 - Benchmark AmeTh
 - Canal asymétriquement chauffé incliné
 - Méthodologie générale
- 5 Application au rafraîchissement d'un bâtiment à géométrie ouverte
- 6 Conclusions et perspectives

Rappels sur la partie précédente

- nombre de Rayleigh élevé ;
- résultats satisfaisants ;
- validation SGE.



Ventilation naturelle

Simulation numérique

Géométries fermées

Géométries ouvertes

Introduction

Canal asymétriquement chauffé

Influence des conditions aux limites

Benchmark AmeTh

Canal asymétriquement chauffé incliné

Méthodologie générale

Bâtiment à géométrie ouverte

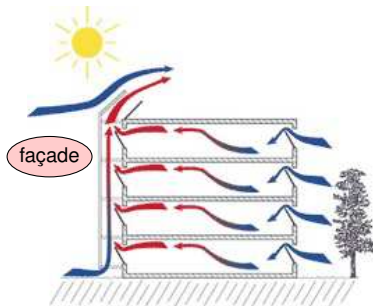
Conclusions et perspectives

Objectif en convection naturelle

- étudier les problèmes associés aux limites des domaines de calcul des géométries ouvertes.

Domaine d'application

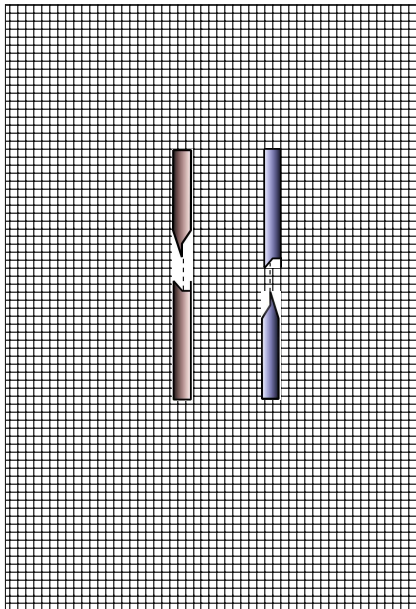
- façade double peau ; mur trombe ; cheminée thermique ; ...
- bâtiments.



L'évaluation des conditions aux limites pour p et v n'est pas évidente.

Démarche adoptée

- maillage externe (limite l'influence sur le système étudié) ;



Ventilation naturelle

Simulation numérique

Géométries fermées

Géométries ouvertes

Introduction

Canal asymétriquement chauffé

Influence des conditions aux limites

Benchmark AmeTh

Canal asymétriquement chauffé incliné

Méthodologie générale

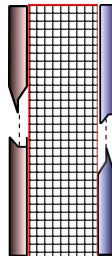
Bâtiment à géométrie ouverte

Conclusions et perspectives

L'évaluation des conditions aux limites pour p et v n'est pas évidente.

Démarche adoptée

- maillage externe (limite l'influence sur le système étudié) ;
- améliorer le temps de calcul ;



Ventilation naturelle

Simulation numérique

Géométries fermées

Géométries ouvertes

Introduction

Canal asymétriquement chauffé

Influence des conditions aux limites

Benchmark AmeTh

Canal asymétriquement chauffé incliné

Méthodologie générale

Bâtiment à géométrie ouverte

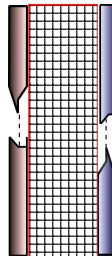
Conclusions et perspectives

L'évaluation des conditions aux limites pour p et v n'est pas évidente.

Démarche adoptée

- maillage externe (limite l'influence sur le système étudié) ;
- améliorer le temps de calcul ;
- définir des conditions limites numériques ;

$$p_s = ?$$



$$p_e = ?$$

Ventilation naturelle

Simulation numérique

Géométries fermées

Géométries ouvertes

Introduction

Canal asymétriquement chauffé

Influence des conditions aux limites

Benchmark AmeTh

Canal asymétriquement chauffé incliné

Méthodologie générale

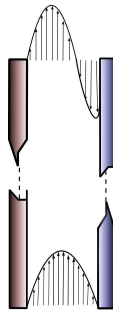
Bâtiment à géométrie ouverte

Conclusions et perspectives

L'évaluation des conditions aux limites pour p et v n'est pas évidente.

Démarche adoptée

- maillage externe (limite l'influence sur le système étudié) ;
- améliorer le temps de calcul ;
- définir des conditions limites numériques ;
- respecter les phénomènes physiques mis en jeu.



Ventilation naturelle

Simulation numérique

Géométries fermées

Géométries ouvertes

Introduction

Canal asymétriquement chauffé

Influence des conditions aux limites

Benchmark AmeTh

Canal asymétriquement chauffé incliné

Méthodologie générale

Bâtiment à géométrie ouverte

Conclusions et perspectives

L'évaluation des conditions aux limites pour p et v n'est pas évidente.

Démarche adoptée

- maillage externe (limite l'influence sur le système étudié) ;
- améliorer le temps de calcul ;
- définir des conditions limites numériques ;
- respecter les phénomènes physiques mis en jeu.

- relation locale le long d'une ligne de courant **LB** :

$$p(x,0) = \frac{p_e^*(x,0)}{\rho} = -\frac{1}{2} V(x,0)^2 \quad (11)$$

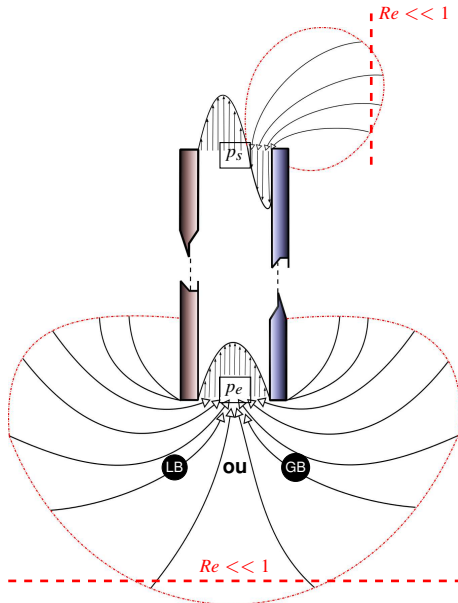
- relation globale le long d'un tube de courant **GB** :

$$p(x,0) = \frac{p_e^*(x,0)}{\rho} = -\frac{1}{2} \left(\int_0^1 V(x,0) dx \right)^2 = \frac{1}{2S_e^2} G^2 \quad (12)$$

où G est le débit d'entrée et S_e est la section d'entrée.

		Entrée	
		GB	LB
Sortie	0	GB-0	LB-0
	LB	GB-LB	LB-LB

Tableau 4 : Récapitulatif des conditions aux limites pour la pression.



Ventilation naturelle

Simulation numérique

Géométries fermées

Géométries ouvertes

Introduction

Canal asymétriquement chauffé

Influence des conditions aux limites

Benchmark AmeTh

Canal asymétriquement chauffé incliné

Méthodologie générale

Bâtiment à géométrie ouverte

Conclusions et perspectives

Mes objectifs :

- étudier les différents jeux de conditions aux limites;
- confronter les résultats avec 6 équipes de recherche.

Présentation du benchmark GDR AmeTh :

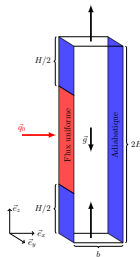
- exercice numérique national;
- canal asymétriquement chauffé (Webb, 1989).

Approche numérique :

- modélisation directe (SND);

Cas étudiés :

- $Ra_m = \frac{g\beta q_0 b^4}{\lambda\nu^2} \frac{b}{H_c} Pr = 1 \times 10^5 ; A = 10 ;$
- GB-0, LB-0, GB-LB, LB-LB ;

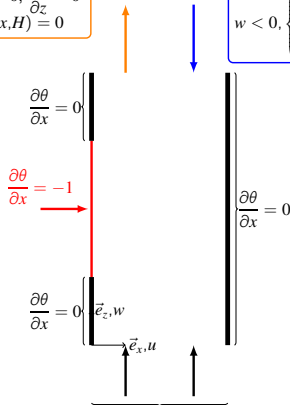


$$u = \frac{\partial w}{\partial z} = 0, \frac{\partial \theta}{\partial z} = 0$$

$$w > 0, p(x, H) = 0$$

$$u = \frac{\partial w}{\partial z} = 0, \theta = 0$$

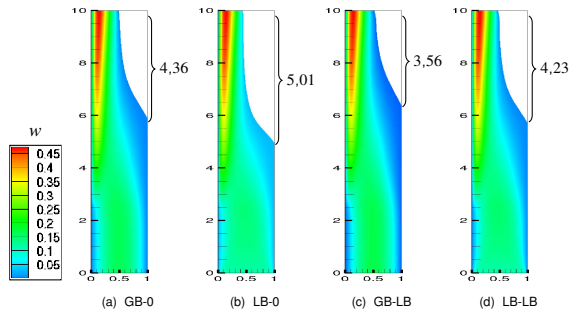
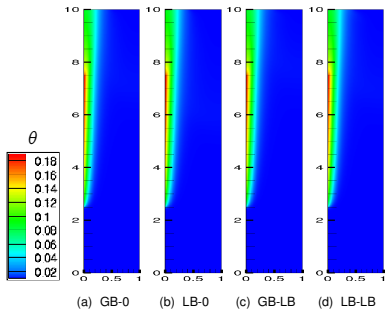
$$w < 0, \begin{cases} p(x, H) = -0,5w(x, 0)^2 \\ \text{ou} \\ p(x, H) = 0 \end{cases}$$



$$u = \frac{\partial w}{\partial y} = 0, \theta = 0$$

$$p(x, 0) = \begin{cases} -0,5 \left(\int_0^1 w(x, 0) dx \right)^2 & \text{LB} \\ \text{ou} \\ -0,5G(x, 0)^2 & \text{GB} \end{cases}$$

- Ventilation naturelle
- Simulation numérique
- Géométries fermées
- Géométries ouvertes
- Introduction
- Canal asymétriquement chauffé
- Influence des conditions aux limites
- Benchmark AmeTh
- Canal asymétriquement chauffé incliné
- Méthodologie générale
- Bâtiment à géométrie ouverte
- Conclusions et perspectives



Résultats :

- peu d'influence sur le champ de température ;

- Ventilation naturelle
- Simulation numérique
- Géométries fermées
- Géométries ouvertes
- Introduction
- Canal asymétriquement chauffé
- Influence des conditions aux limites
- Benchmark
- AmeTh
- Canal asymétriquement chauffé incliné
- Méthodologie générale
- Bâtiment à géométrie ouverte
- Conclusions et perspectives

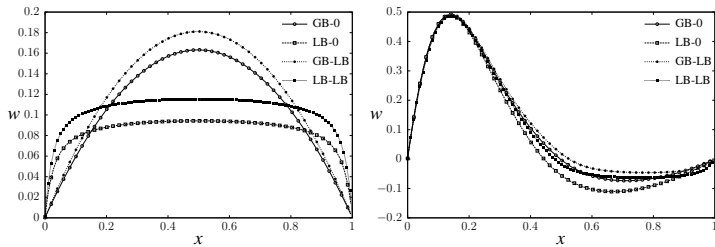
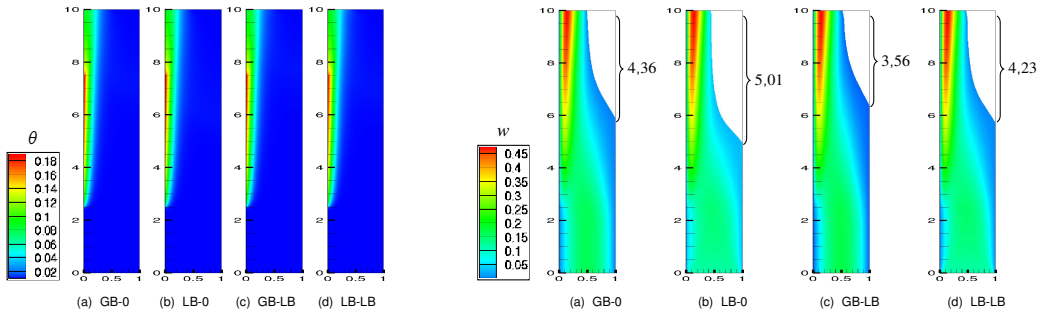
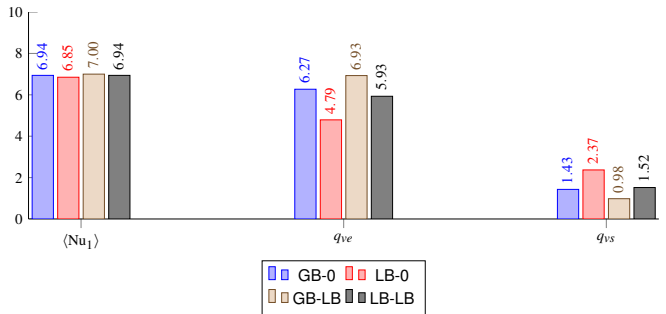
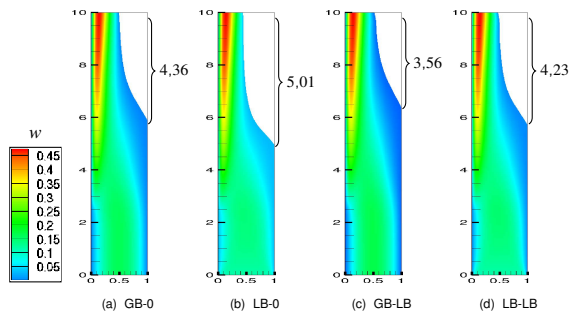
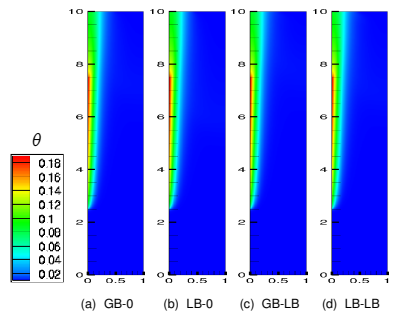


Figure 4.1 : Comparaison du profil de w de la vitesse.

- Résultats :**
- peu d'influence sur le champ de température ;
 - différents profils en entrée ;
 - profondeur de recirculation ;

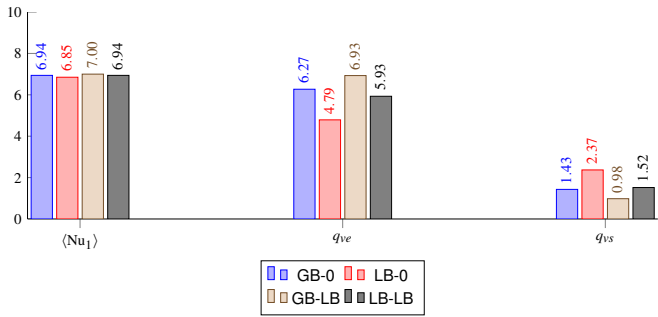
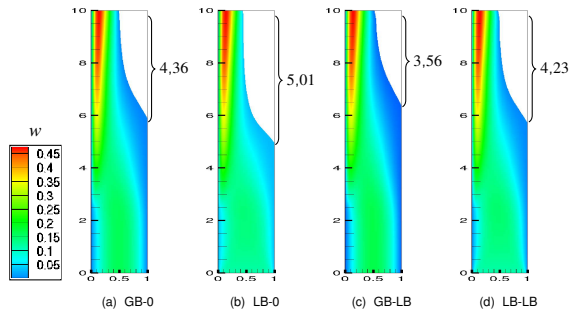
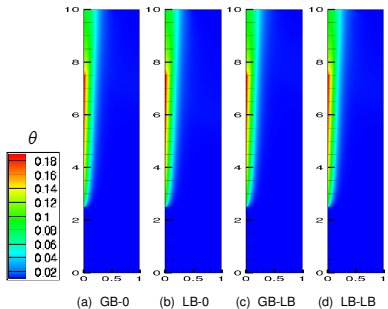
Ventilation naturelle
 Simulation numérique
 Géométries fermées
 Géométries ouvertes
 Introduction
 Canal asymétriquement chauffé
 Influence des conditions aux limites
 Benchmark AmeTh
 Canal asymétriquement chauffé incliné
 Méthodologie générale
 Bâtiment à géométrie ouverte
 Conclusions et perspectives



Résultats :

- peu d'influence sur le champ de température ;
- différents profils en entrée ;
- profondeur de recirculation ;
- quantités intégrales.

Ventilation naturelle
 Simulation numérique
 Géométries fermées
 Géométries ouvertes
 Introduction
 Canal asymétriquement chauffé
 Influence des conditions aux limites
 Benchmark AmeTh
 Canal asymétriquement chauffé incliné
 Méthodologie générale
 Bâtiment à géométrie ouverte
 Conclusions et perspectives



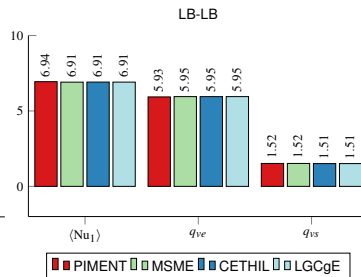
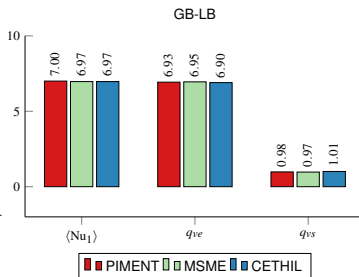
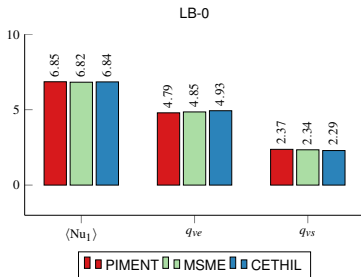
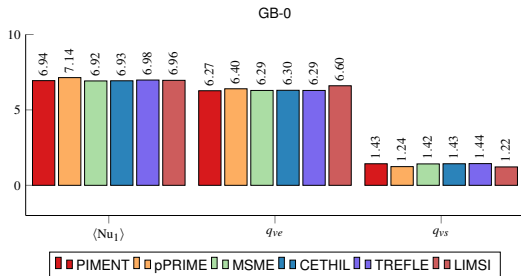
- Résultats :**
- peu d'influence sur le champ de température ;
 - différents profils en entrée ;
 - profondeur de recirculation ;
 - quantités intégrales.

Vers une étude comparative.

Equipe	Laboratoire	Maillage	Méthode	Références
PIMENT		48 × 600	VF	(Brangeon, 2011)
Pprime		400 × 400	DF	(FDS, 2012)
MSME		253 × 1520	VF	(Chenier, 2006)
CETHIL		200 × 1200	DF	(Amine, 2011)
I2M-TREFLE		100 × 1000	VF	(Vincent, 2004)
LIMSI		256 × 2048	VF	(Garnier, 2012)
LGCgE		50 × 300	VF	(FLUENT, 2012)

Résultats :

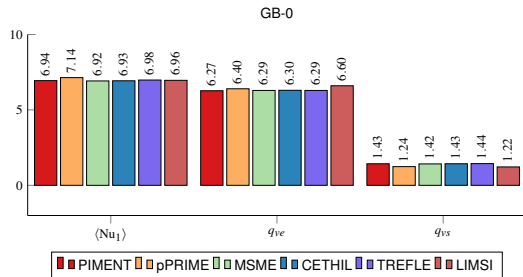
- résultats homogènes.



Equipe	Laboratoire	Maillage	Méthode	Références
PIMENT		48 × 600	VF	(Brangeon, 2011)
Pprime		400 × 400	DF	(FDS, 2012)
MSME		253 × 1520	VF	(Chenier, 2006)
CETHIL		200 × 1200	DF	(Amine, 2011)
I2M-TREFLE		100 × 1000	VF	(Vincent, 2004)
LIMSI		256 × 2048	VF	(Garnier, 2012)
LGCgE		50 × 300	VF	(FLUENT, 2012)

Résultats :

- résultats homogènes.



Les codes numériques fournissent des résultats identiques quand les mêmes conditions en entrée et sortie du canal sont utilisées.

Vers une comparaison expérimentale.

Ventilation naturelle

Simulation numérique

Géométries fermées

Géométries ouvertes

Introduction

Canal asymétriquement chauffé

Influence des conditions aux limites

Benchmark AmeTh

Canal asymétriquement chauffé incliné

Méthodologie générale

Bâtiment à géométrie ouverte

Conclusions et perspectives

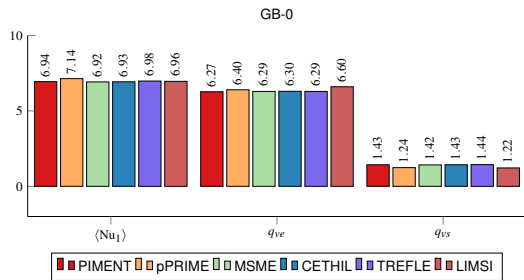
Equipe	Laboratoire	Maillage	Méthode	Références
PIMENT			VF	(Brangeon, 2011)
pprime		400 × 400	DF	(FDS, 2012)
MSME		253 × 1520	VF	(Chenier, 2006)
CETHIL		200 × 1200	DF	(Amine, 2011)
I2M-TREFLE		100 × 1000	VF	(Vincent, 2004)
LIMSI		256 × 2048	VF	(Garnier, 2012)
LGCgE		50 × 300	VF	(FLUENT, 2012)

Résultats :

- résultats homogènes.

Les codes numériques fournissent des résultats identiques quand les mêmes conditions en entrée et sortie du canal sont utilisées.

Vers une comparaison expérimentale.



Ventilation
naturelle

Simulation
numérique

Géométries
fermées

Géométries
ouvertes

Introduction

Canal asymétriquement
chauffé

Influence des
conditions aux
limites

Benchmark
AmeTh

Canal asymétriquement
chauffé
incliné

Méthodologie
générale

Bâtiment à
géométrie
ouverte

Conclusions
et
perspectives

Objectifs numériques :

- tester les différents jeux de conditions aux limites ;
- comparer les résultats numériques ;
- choix d'un jeu de condition aux limites pertinents.

Approche numérique :

- modélisation directe (SND) ;

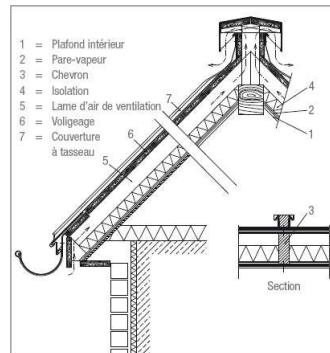


Figure 4.1 : Toiture ventilée (source :<http://www.nedzink.com/>).

Ventilation naturelle

Simulation numérique

Géométries fermées

Géométries ouvertes

Introduction

Canal asymétriquement chauffé

Influence des conditions aux limites

Benchmark AmeTh

Canal asymétriquement chauffé incliné

Méthodologie générale

Bâtiment à géométrie ouverte

Conclusions et perspectives

Objectifs numériques :

- tester les différents jeux de conditions aux limites ;
- comparer les résultats numériques ;
- choix d'un jeu de condition aux limites pertinents.

Approche numérique :

- modélisation directe (SND) ;

Domaine d'application :

- toiture ventilée et refroidissement de PV.

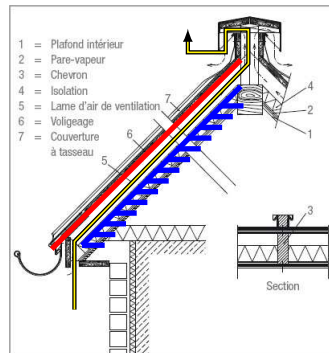


Figure 4.1 : Toiture ventilée (source :<http://www.nedzink.com/>).

Ventilation
naturelle

Simulation
numérique

Géométries
fermées

Géométries
ouvertes

Introduction

Canal asymétriquement
chauffé

Influence des
conditions aux
limites

Benchmark
AmeTh

Canal asymétriquement
chauffé
incliné

Méthodologie
générale

Bâtiment à
géométrie
ouverte

Conclusions
et
perspectives

Objectifs numériques :

- tester les différents jeux de conditions aux limites ;
- comparer les résultats numériques ;
- choix d'un jeu de condition aux limites pertinents.

Approche numérique :

- modélisation directe (SND) ;

Domaine d'application :

- toiture ventilée et refroidissement de PV.

Dispositif expérimental :

- développé au laboratoire pPrime ;
- étudié par le laboratoire GRER (Université des Antilles-Guyane) ;
- mesures de températures, LDV ;
- ambiance contrôlée ;

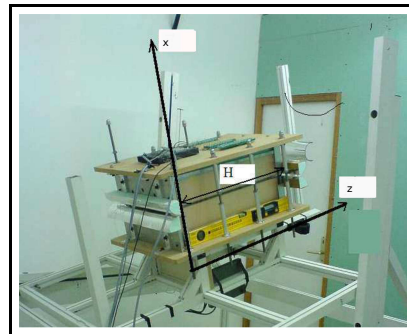


Figure 4.1 : Dispositif expérimental du GRER (Dupont, 2008).

Ventilation naturelle

Simulation numérique

Géométries fermées

Géométries ouvertes

Introduction

Canal asymétriquement chauffé

Influence des conditions aux limites

Benchmark AmeTh

Canal asymétriquement chauffé incliné

Méthodologie générale

Bâtiment à géométrie ouverte

Conclusions et perspectives

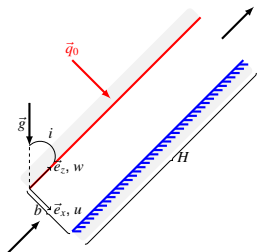


Figure 4.2 : Configuration du domaine étudié.

Descriptif des études :

- conditions aux limites de pression identiques AmeTh : GB-0 et LB-0 ;
- flux imposé sur toute la hauteur du canal $q_0 = 10,50,75,100 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$;
- le canal est incliné ($i = 0^\circ,45^\circ,60^\circ,75^\circ$) ;
- $H/b = 6,5, 10,67$ et $12,8$;
- $4,4 \times 10^3 < Ra_m \cos(i) = \frac{g\beta q_0 b^4}{\lambda\nu^2} \frac{b}{H} Pr \cos(i) < 5 \times 10^6$.

- Ventilation naturelle
- Simulation numérique
- Géométries fermées
- Géométries ouvertes
- Introduction
- Canal asymétriquement chauffé
- Influence des conditions aux limites
- Benchmark AmeTh
- Canal asymétriquement chauffé incliné
- Méthodologie générale
- Bâtiment à géométrie ouverte
- Conclusions et perspectives

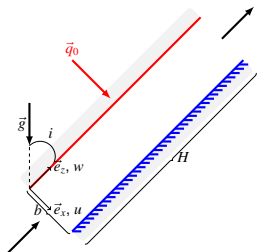


Figure 4.2 : Configuration du domaine étudié.

Descriptif des études :

- conditions aux limites de pression identiques AmeTh : GB-0 et LB-0 ;
- flux imposé sur toute la hauteur du canal $q_0 = 10, 50, 75, 100 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$;
- le canal est incliné ($i = 0^\circ, 45^\circ, 60^\circ, 75^\circ$) ;
- $H/b = 6,5, 10,67$ et $12,8$;
- $4,4 \times 10^3 < Ra_m \cos(i) = \frac{g\beta q_0 b^4}{\lambda\nu^2} \frac{b}{H} Pr \cos(i) < 5 \times 10^6$.

} 30 cas étudiés

- Ventilation naturelle
- Simulation numérique
- Géométries fermées
- Géométries ouvertes
- Introduction
- Canal asymétriquement chauffé
- Influence des conditions aux limites
- Benchmark AmeTh
- Canal asymétriquement chauffé incliné
- Méthodologie générale
- Bâtiment à géométrie ouverte
- Conclusions et perspectives

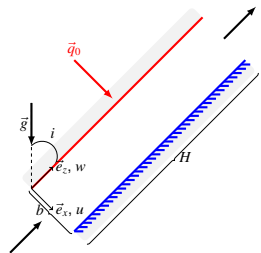
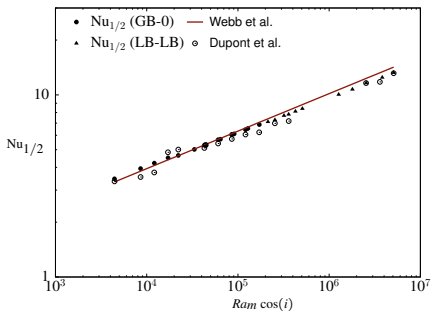


Figure 4.2 : Configuration du domaine étudié.

Descriptif des études :

- conditions aux limites de pression identiques AmeTh : GB-0 et LB-0 ;
- flux imposé sur toute la hauteur du canal $q_0 = 10,50,75,100 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$;
- le canal est incliné ($i = 0^\circ, 45^\circ, 60^\circ, 75^\circ$) ;
- $H/b = 6,5, 10,67$ et $12,8$;
- $4,4 \times 10^3 < Ra_m \cos(i) = \frac{g\beta q_0 b^4}{\lambda\nu^2} \frac{b}{H} Pr \cos(i) < 5 \times 10^6$.



Références	Corrélation
(Webb, 1989)	$Nu_{1/2} = 0,58(Ra_m \cos(i))^{0,206}$
(Dupont, 2007)	$Nu_{1/2} = 0,59(Ra_m \cos(i))^{0,206}$
présente étude	$Nu_{1/2} = 0,61(Ra_m \cos(i))^{0,199}$ $4 \times 10^3 < Ra_m \cos(i) < 2 \times 10^5$
présente étude	$Nu_{1/2} = 0,72(Ra_m \cos(i))^{0,187}$ $2,5 \times 10^5 < Ra_m \cos(i) < 5 \times 10^6$

Résultats :

✓ corrélations satisfaisantes pour l'évaluation des échanges de chaleur ;

- Ventilation naturelle
- Simulation numérique
- Géométries fermées
- Géométries ouvertes
- Introduction
- Canal asymétriquement chauffé
- Influence des conditions aux limites
- Benchmark AmeTh
- Canal asymétriquement chauffé incliné
- Méthodologie générale
- Bâtiment à géométrie ouverte
- Conclusions et perspectives

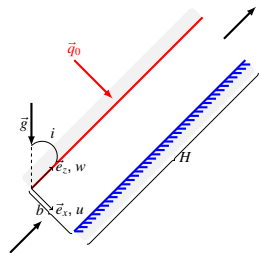
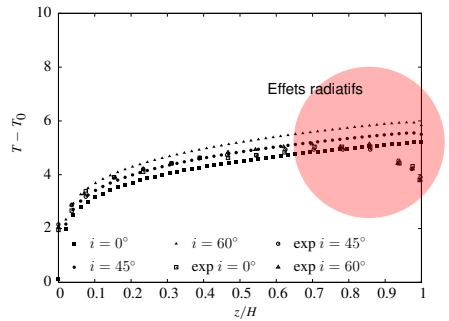


Figure 4.2 : Configuration du domaine étudié.

Descriptif des études :

- conditions aux limites de pression identiques AmeTh : GB-0 et LB-0 ;
- flux imposé sur toute la hauteur du canal $q_0 = 10,50,75,100 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$;
- le canal est incliné ($i = 0^\circ, 45^\circ, 60^\circ, 75^\circ$) ;
- $H/b = 6,5, 10,67$ et $12,8$;
- $4,4 \times 10^3 < Ra_m \cos(i) = \frac{g\beta q_0 b^4}{\lambda\nu^2} \frac{b}{H} Pr \cos(i) < 5 \times 10^6$.



Références	Corrélation
(Webb, 1989)	$Nu_{1/2} = 0,58(Ra_m \cos(i))^{0,206}$
(Dupont, 2007)	$Nu_{1/2} = 0,59(Ra_m \cos(i))^{0,206}$
présente étude	$Nu_{1/2} = 0,61(Ra_m \cos(i))^{0,199}$ $4 \times 10^3 < Ra_m \cos(i) < 2 \times 10^5$
présente étude	$Nu_{1/2} = 0,72(Ra_m \cos(i))^{0,187}$ $2,5 \times 10^5 < Ra_m \cos(i) < 5 \times 10^6$

Résultats :

- corrélations satisfaisantes pour l'évaluation des échanges de chaleur ;
- phénomènes radiatifs à l'extrémité du canal.

- Ventilation naturelle
- Simulation numérique
- Géométries fermées
- Géométries ouvertes
- Introduction
- Canal asymétriquement chauffé
- Influence des conditions aux limites
- Benchmark AmeTh
- Canal asymétriquement chauffé incliné
- Méthodologie générale
- Bâtiment à géométrie ouverte
- Conclusions et perspectives

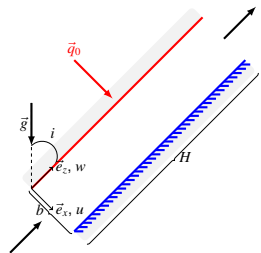
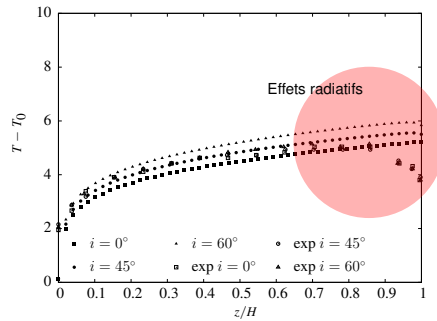


Figure 4.2 : Configuration du domaine étudié.

Descriptif des études :

- conditions aux limites de pression identiques AmeTh : GB-0 et LB-0 ;
- flux imposé sur toute la hauteur du canal $q_0 = 10,50,75,100 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$;
- le canal est incliné ($i = 0^\circ, 45^\circ, 60^\circ, 75^\circ$) ;
- $H/b = 6,5, 10,67$ et $12,8$;
- $4,4 \times 10^3 < Ra_m \cos(i) = \frac{g\beta q_0 b^4}{\lambda\nu^2} \frac{b}{H} Pr \cos(i) < 5 \times 10^6$.



Références	Corrélation
(Webb, 1989)	$Nu_{1/2} = 0,58(Ra_m \cos(i))^{0,206}$
(Dupont, 2007)	$Nu_{1/2} = 0,59(Ra_m \cos(i))^{0,206}$
présente étude	$Nu_{1/2} = 0,61(Ra_m \cos(i))^{0,199}$ $4 \times 10^3 < Ra_m \cos(i) < 2 \times 10^5$
présente étude	$Nu_{1/2} = 0,72(Ra_m \cos(i))^{0,187}$ $2,5 \times 10^5 < Ra_m \cos(i) < 5 \times 10^6$

Résultats :

- corrélations satisfaisantes pour l'évaluation des échanges de chaleur ;
- phénomènes radiatifs à l'extrémité du canal.

Choix d'un jeu d'une condition aux limites pertinente.

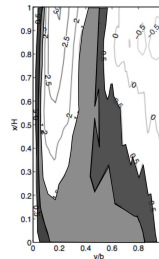
Objectifs étude :

- distinguer une CL pertinente ;
- observer l'influence des effets tridimensionnels.

Descriptif étude :

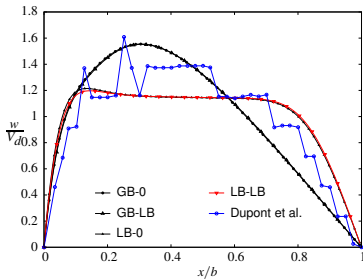
- champs de vitesse expérimentaux (LDV) ;
- $Ra_m \cos(i) = 4,27 \times 10^4$.

- Influence en partie inférieure du canal.

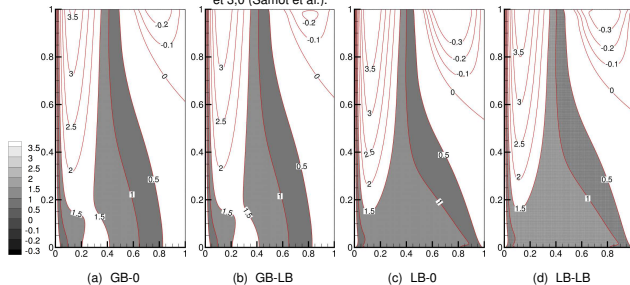


(a) $q_0 = 10 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$

Figure 4.3 : Champ expérimental. Iso-contours de w/V_d uniformément distribués entre -0,5 et 3,0 (Samot et al.).



(a) $z/H = 0,078$.



(a) GB-0

(b) GB-LB

(c) LB-0

(d) LB-LB

Ventilation naturelle

Simulation numérique

Géométries fermées

Géométries ouvertes

Introduction

Canal asymétriquement chauffé

Influence des conditions aux limites

Benchmark AmeTh

Canal asymétriquement chauffé incliné

Méthodologie générale

Bâtiment à géométrie ouverte

Conclusions et perspectives

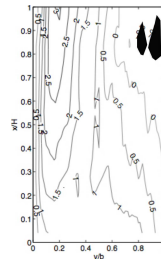
Objectifs étude :

- distinguer une CL pertinente ;
- observer l'influence des effets tridimensionnels.

Descriptif étude :

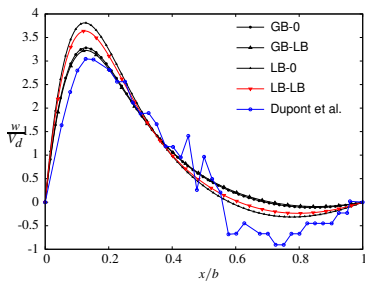
- champs de vitesse expérimentaux (LDV) ;
- $Ra_m \cos(i) = 4,27 \times 10^4$.

- Influence en partie supérieure du canal.

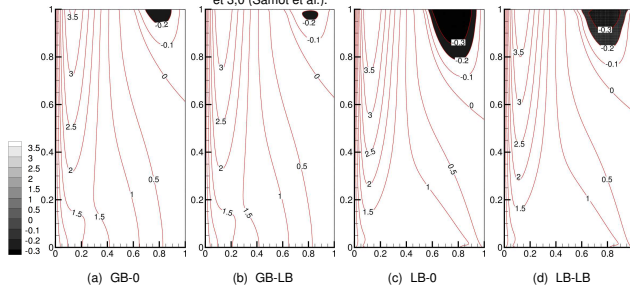


(a) $q_0 = 10 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$

Figure 4.3 : Champ expérimental. Iso-contours de w/V_d uniformément distribués entre -0,5 et 3,0 (Samot et al.).



(a) $z/H = 0,859$.



(a) GB-0

(b) GB-LB

(c) LB-0

(d) LB-LB

Ventilation naturelle

Simulation numérique

Géométries fermées

Géométries ouvertes

Introduction

Canal asymétriquement chauffé

Influence des conditions aux limites

Benchmark AmeTh

Canal asymétriquement chauffé incliné

Méthodologie générale

Bâtiment à géométrie ouverte

Conclusions et perspectives

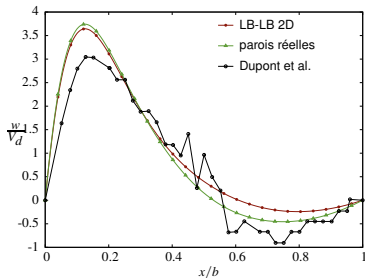
Objectifs étude :

- distinguer une CL pertinente ;
- observer l'influence des effets tridimensionnels.

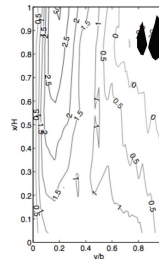
Descriptif étude :

- champs de vitesse expérimentaux (LDV) ;
- $Ra_m \cos(i) = 4,27 \times 10^4$.

- Influence des effets tridimensionnels.

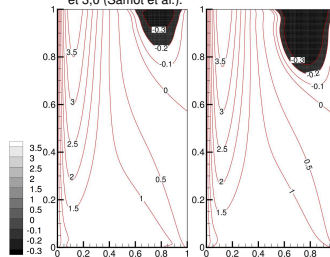


(a) $z/H=0,859$.



(a) $q_0 = 10 W \cdot m^{-2}$

Figure 4.3 : Champ expérimental. Iso-contours de w/V_d uniformément distribués entre -0,5 et 3,0 (Samot et al.).



(b) LB-LB 2D

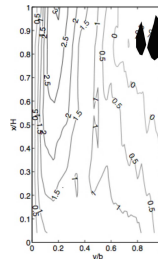
(c) LB-LB 3D

Objectifs étude :

- distinguer une CL pertinente ;
- observer l'influence des effets tridimensionnels.

Descriptif étude :

- champs de vitesse expérimentaux (LDV) ;
- $Ra_m \cos(i) = 4,27 \times 10^4$.



(a) $q_0 = 10 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$

Figure 4.3 : Champ expérimental. Iso-contours de w/V_d uniformément distribués entre -0,5 et 3,0 (Samot et al.).

Conclusions

- ✓ corrélations satisfaisantes pour modélisation intermédiaire ($Nu = f(Ra_m \cos(i))$);
- ✓ condition de pression locale LB en entrée améliore la description ;
- ✗ caractérisation des incertitudes expérimentales ;
- ✗ le rayonnement de surface doit être pris en compte ;
- ✗ problème de la convection naturelle en géométrie ouverte n'est pas évident.

- Vers une application au rafraîchissement d'un bâtiment à géométrie ouverte.

Réduire les consommations énergétiques

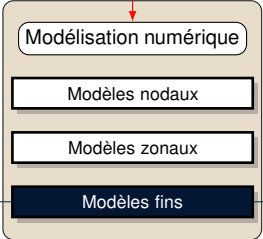
trop coûteuse, impossible

Rafrâichissement passif



Expérimentation fine

Ventilation naturelle



écoulement de convection naturelle turbulente

problématique des conditions aux limites pour les géométries ouvertes

ventilation naturelle dans un bâtiment à géométrie ouverte



- Ventilation naturelle
- Simulation numérique
- Géométries fermées
- Géométries ouvertes
- Introduction
- Canal asymétriquement chauffé
- Influence des conditions aux limites
- Benchmark AmeTh
- Canal asymétriquement chauffé incliné
- Méthodologie générale
- Bâtiment à géométrie ouverte
- Conclusions et perspectives

Ventilation
naturelleSimulation
numériqueGéométries
ferméesGéométries
ouvertesBâtiment à
géométrie
ouverteBenchmark
ADNBâtiConfiguration
réelleProblème
simplifiéDescription
générale de
l'écoulementSimulation de
référence : SNDInfluence des
conditions aux
limitesComparaison
inter-logiciels :
ADNBâti

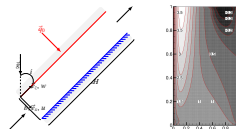
Corrélations

Conclusions
et
perspectives

- 1 Ventilation naturelle
- 2 Simulation numérique
- 3 Géométries fermées
- 4 Géométries ouvertes
- 5 Application au rafraîchissement d'un bâtiment à géométrie ouverte
 - Benchmark ADNBâti
 - Configuration réelle
 - Problème simplifié
 - Description générale de l'écoulement
 - Simulation de référence : SND
 - Influence des conditions aux limites
 - Comparaison inter-logiciels : ADNBâti
 - Corrélations
- 6 Conclusions et perspectives

Rappels sur la partie précédente

- influence des conditions aux limites ;
- comparaison inter-logiciel GDR AmeTh ;
- comparaison expérimentale GRER ;
- résultats corrects.



Ventilation naturelle

Simulation numérique

Géométries fermées

Géométries ouvertes

Bâtiment à géométrie ouverte

Benchmark ADNBBâti

Configuration réelle

Problème simplifié

Description générale de l'écoulement

Simulation de référence : SND

Influence des conditions aux limites

Comparaison inter-logiciels : ADNBBâti

Corrélations

Conclusions et perspectives

Mes objectifs

- établir des résultats de référence (SND) ;
- caractériser les écoulements de ventilation naturelle ;
- comparaison inter-logiciels ;
- fournir des corrélations ;
- compléter mes travaux sur les conditions aux limites.

Présentation du benchmark ADNBBâti

- Amélioration de la **Description Numérique** du **Bâtiment** (ADNBBâti, <http://adnbati.limsi.fr>)
- réflexion au sein de la communauté française thermo-aéraulique du bâtiment ;
- **Objectif** : comparer des méthodes numériques (formules analytiques ; MFN ; modèles, zonaux, nodaux).

Bâtiment étudié

- pièce de l'institut CNRS de Cargèse en Corse ;
- problème de ventilation nocturne.



(a) Façade Est.



(b) Intérieur de la pièce.

Ventilation naturelle

Simulation numérique

Géométries fermées

Géométries ouvertes

Bâtiment à géométrie ouverte

Benchmark ADNBâti

Configuration réelle

Problème simplifié

Description générale de l'écoulement

Simulation de référence : SND

Influence des conditions aux limites

Comparaison inter-logiciels : ADNBâti

Corrélations

Conclusions et perspectives

Objectifs de départ de l'exercice numérique

Se rapprocher le plus possible de la configuration réelle :

- géométrie 3D ;
- couplages des différents modes de transfert conduction, rayonnement et convection.

Cas difficilement réalisable (MFN).

Vers un cas simplifié.

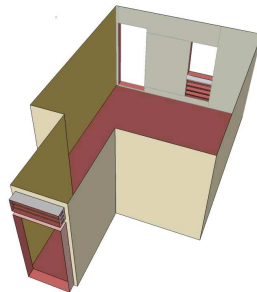


Figure 5.2 : Schéma 3D du cas test ADNBâti.

Hypothèses

- géométrie 2D ;
- ouvertures sont opposées dans le même plan ($\neq 3D$) ;
- domaine de calcul limité à la pièce ;
- rayonnement négligé ;
- air extérieur est fixé à $T_0 = 25\text{ }^\circ\text{C}$;
- température des parois est fixe et constante : $T_W = T_0 + \Delta T$;
- les effets du vent ne sont pas considérés,
- $Ra_H = 1,43 \times 10^8$ et $7,15 \times 10^8$.

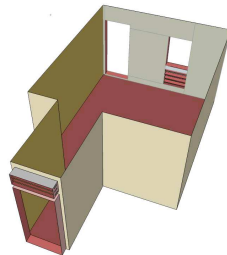
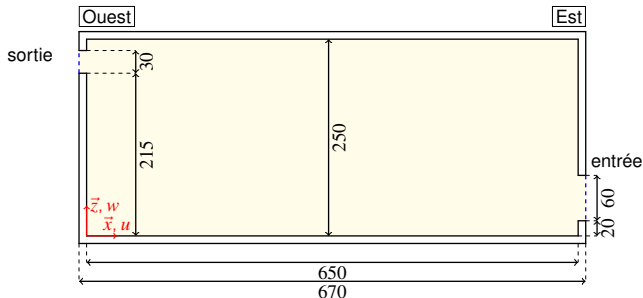


Figure 5.3 : Schéma 3D du cas test ADNBâti.



Ventilation
naturelleSimulation
numériqueGéométries
ferméesGéométries
ouvertesBâtiment à
géométrie
ouverteBenchmark
ADNBâtiConfiguration
réelleProblème
simplifiéDescription
générale de
l'écoulementSimulation de
référence : SNDInfluence des
conditions aux
limitesComparaison
inter-logiciels :
ADNBâti

Corrélations

Conclusions
et
perspectives

CL	ΔT	Ra_H	N_x	N_z	Re_L	Δt	TA
GB-0	0,1	$1,43 \times 10^8$	1024	640	19	2,3ms	100

Tableau 5 : Paramètres physiques et numériques des simulations.

Description de l'écoulement

- écoulement instationnaire d'Est en Ouest ;
- écoulement moyen rampant ;
- jet froid ;
- couche limite épaisse au plafond ;
- cellules de recirculation ;
- champ moyen de température stratifié ;

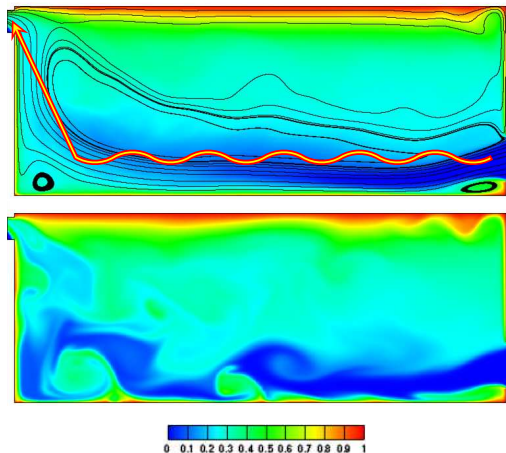


Figure 5.4 : Résultats SND. Champ moyen de température avec lignes de courant en haut et exemple de champ instantané de température en bas.

Ventilation
naturelleSimulation
numériqueGéométries
ferméesGéométries
ouvertesBâtiment à
géométrie
ouverteBenchmark
ADNBâtiConfiguration
réelleProblème
simplifiéDescription
générale de
l'écoulementSimulation de
référence : SNDInfluence des
conditions aux
limitesComparaison
inter-logiciels :
ADNBâti

Corrélations

Conclusions
et
perspectives

CL	ΔT	Ra_H	N_x	N_z	Re_L	Δt	TA
GB-0	0,1	$1,43 \times 10^8$	1024	640	19	2,3ms	100

Tableau 5 : Paramètres physiques et numériques des simulations.

Description de l'écoulement

- écoulement instationnaire d'Est en Ouest ;
- écoulement moyen rampant ;
- jet froid ;
- couche limite épaisse au plafond ;
- cellules de recirculation ;
- champ moyen de température stratifié ;
- configuration du type Rayleigh-Bénard.

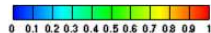
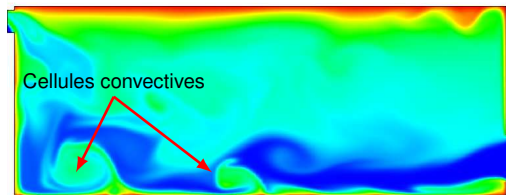
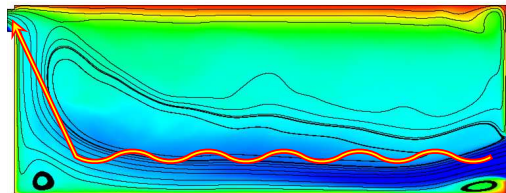


Figure 5.4 : Résultats SND. Champ moyen de température avec lignes de courant en haut et exemple de champ instantané de température en bas.

Référence SND pour les travaux SGE et comparaison inter-logiciels.

Cas #	CL	ΔT	Ra_H
(a)	GB-0	0,1	$1,43 \times 10^8$
(b)	GB-0	0,5	$7,15 \times 10^8$
(c)	GB-0	1,0	$1,43 \times 10^9$

Tableau 6 : Paramètres des simulations.

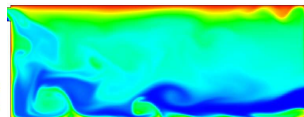
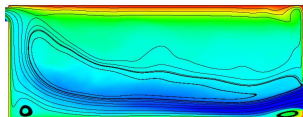
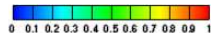
Cas #	q_v	η	Q
(a)	34,63	2,12	0,48
(b)	72,75	4,45	4,17
(c)	97,88	5,99	10,13

Tableau 7 : Valeurs moyennes.

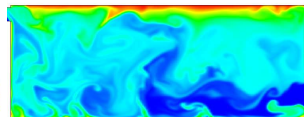
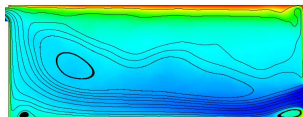
Résultats :

- ✓ quand $Ra_H \nearrow$: meilleur brassage.
- ✓ quand $Ra_H \nearrow$ on a $\eta \nearrow$ et $Q \nearrow$.
- ✓ résultats satisfaisants pour établir une référence numérique ;
- ✗ calculs longs (plusieurs mois).

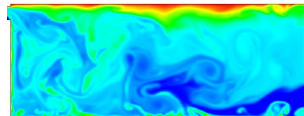
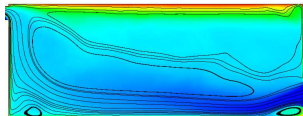
utilisation de la SGE pour des Ra_H importants.



(a) Champ moyen et instantané de température. $Ra_H = 1,43 \times 10^8$.



(b) Champ moyen et instantané de température. $Ra_H = 7,15 \times 10^8$.

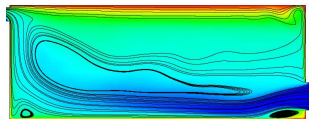


(c) Champ moyen et instantané de température. $Ra_H = 1,43 \times 10^9$.

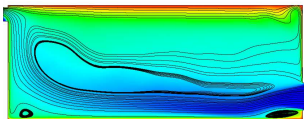
Ventilation naturelle
 Simulation numérique
 Géométries fermées
 Géométries ouvertes
 Bâtiment à géométrie ouverte
 Benchmark ADNBâti
 Configuration réelle
 Problème simplifié
 Description générale de l'écoulement
 Simulation de référence : SND
 Influence des conditions aux limites
 Comparaison inter-logiciels : ADNBâti
 Corrélations
 Conclusions et perspectives

Tableau 8 : Paramètres physiques et numériques des simulations.

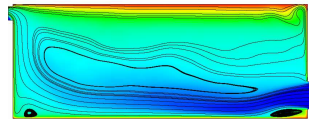
Cas #	Type	CL	ΔT	Ra_H	N_x	N_z	Re_L	Δt	TA
❶	SND2D	GB-0	0,1	$1,43 \times 10^8$	1024	640	19	2,3ms	100
①	SGE2D	GB-0	0,1	$1,43 \times 10^8$	256	265	80	23ms	470
②	SGE2D	GB-LB	0,1	$1,43 \times 10^8$	256	265	83	23ms	360
③	SGE2D	LB-0	0,1	$1,43 \times 10^8$	256	265	88	23ms	350
④	SGE2D	LB-LB	0,1	$1,43 \times 10^8$	256	265	86	23ms	290



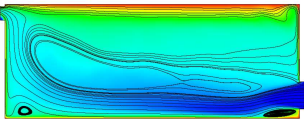
(b) Cas ①. $Ra_H = 1,43 \times 10^8$. GB-0



(c) Cas ②. $Ra_H = 1,43 \times 10^8$. GB-LB

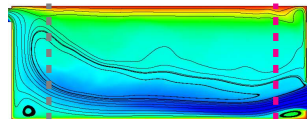


(d) Cas ③. $Ra_H = 1,43 \times 10^8$. LB-0

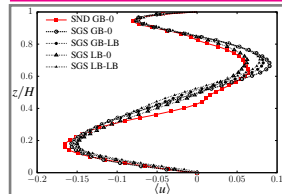
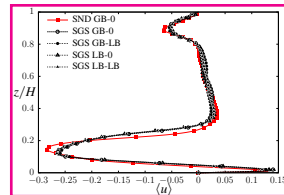


(e) Cas ④. $Ra_H = 1,43 \times 10^8$. LB-LB

Figure 5.5 : Influence des conditions limites.



(a) Cas ❶. $Ra_H = 1,43 \times 10^8$. GB-0



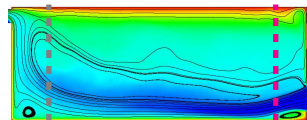
Ventilation naturelle
 Simulation numérique
 Géométries fermées
 Géométries ouvertes
 Bâtiment à géométrie ouverte
 Benchmark ADNBâti
 Configuration réelle
 Problème simplifié
 Description générale de l'écoulement
 Simulation de référence : SND
 Influence des conditions aux limites
 Comparaison inter-logiciels : ADNBâti
 Corrélations
 Conclusions et perspectives

Tableau 8 : Valeurs moyennes.

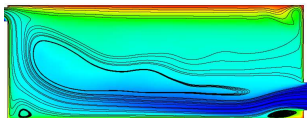
Cas #	η	q_v	Q
❶ (SND GB-0)	0,412	34,63	0,48
① (SGE GB-0)	0,414	35,08	0,49
② (SGE GB-LB)	0,412	35,50	0,49
③ (SGE LB-0)	0,406	36,30	0,50
④ (SGE LB-LB)	0,402	37,00	0,50

Résultats :

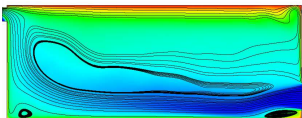
- la SGE permet une étude paramétrique ;
- CL peu influentes dans ce cas ;
- différence entre thermosiphons verticaux et horizontaux.



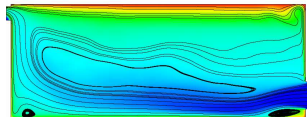
(a) Cas ❶. $Ra_H = 1,43 \times 10^8$. GB-0



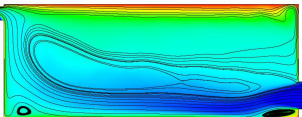
(b) Cas ①. $Ra_H = 1,43 \times 10^8$. GB-0



(c) Cas ②. $Ra_H = 1,43 \times 10^8$. GB-LB

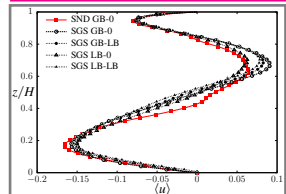
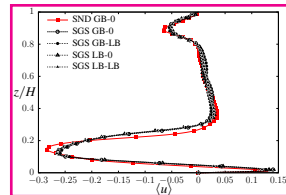


(d) Cas ③. $Ra_H = 1,43 \times 10^8$. LB-0



(e) Cas ④. $Ra_H = 1,43 \times 10^8$. LB-LB

Figure 5.5 : Influence des conditions limites.



Ventilation naturelle

Simulation numérique

Géométries fermées

Géométries ouvertes

Bâtiment à géométrie ouverte

Benchmark ADN*B*âti

Configuration réelle

Problème simplifié

Description générale de l'écoulement

Simulation de référence : SND

Influence des conditions aux limites

Comparaison inter-logiciels : ADN*B*âti

Corrélations

Conclusions et perspectives

Présentation

- 7 contributions et 7 approches différentes ;
- quantités intégrales q_v et Q analysées ;

Objectifs

- proposer la SND comme une référence ;
- analyser la comparaison.

	n°	Méthode	Laboratoire, Symbole	Maillage	Références méthode
Non MFN	①	Modèle analytique semi-empirique	PIMENT□/LaSIE△	–	–
	②	Modèle mono-zone (nodal)	LOCIE×/LaSIE△	–	(Li, 2000)
	③	TRNFLOW-TRNSYS+CONTAM	UCL+/LaSIE△	–	(TRNSYS, 2012)
	④	Modèle zonal	GRESPI/LTM◇	30 cellules	(Wurtz, 2006)
MFN	⑤	MFN laminaire	LOCIE×/CEA/LITEN/LEB▽	4000 cellules	(Stephan, 2010)
	⑥	MFN avec modèle de turbulence (SGE)	CENERAO□/PIMENT□	400 × 256	(Brangeon, 2011)
	⑦	MFN (SND)	CEA/LITEN/LEB▽/PIMENT□	1024 × 640	(FLUENT, 2012)

Ventilation naturelle
 Simulation numérique
 Géométries fermées
 Géométries ouvertes
 Bâtiment à géométrie ouverte
 Benchmark ADNBâti
 Configuration réelle
 Problème simplifié
 Description générale de l'écoulement
 Simulation de référence : SND
 Influence des conditions aux limites
 Comparaison inter-logiciels : ADNBâti
 Corrélations
 Conclusions et perspectives

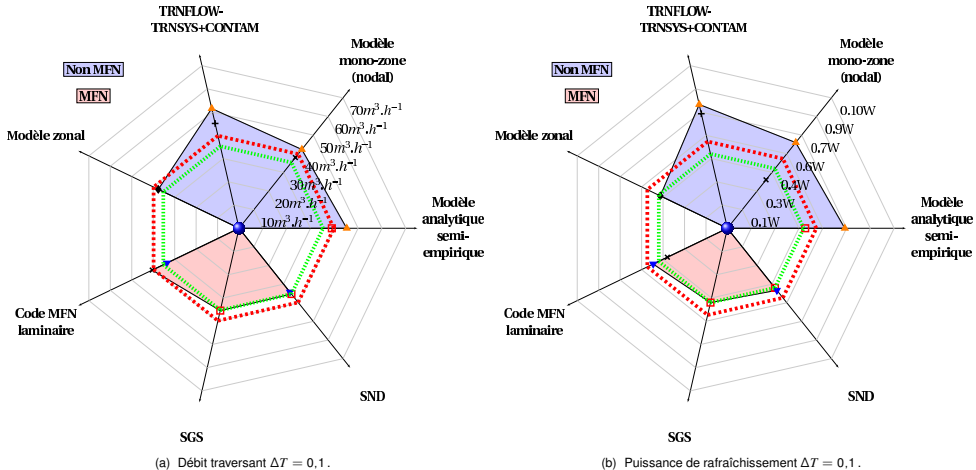


Figure 5.6 : Comparaison inter-logiciels. Débit traversant et puissance de rafraîchissement pour $\Delta T = 0,1$ (6(a) et 6(b)).

q_v correctement estimé.

Q largement sur-estimée ($\pm 20\%$).

Ventilation naturelle
Simulation numérique
Géométries fermées
Géométries ouvertes
Bâtiment à géométrie ouverte
Benchmark ADNBâti
Configuration réelle
Problème simplifié
Description générale de l'écoulement
Simulation de référence : SND
Influence des conditions aux limites
Comparaison inter-logiciels : ADNBâti
Corrélations
Conclusions et perspectives

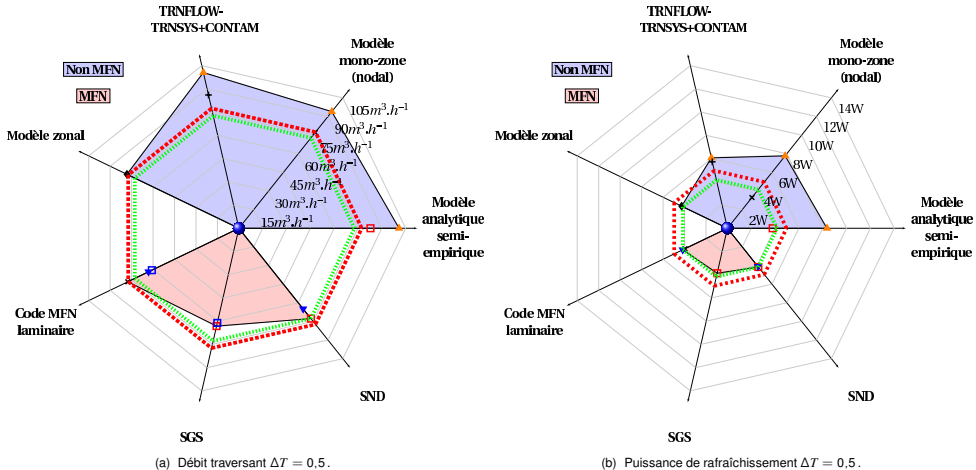


Figure 5.7 : Comparaison inter-logiciels. Débit traversant et puissance de rafraîchissement pour $\Delta T = 0,5$ (7(a) et 7(b)).

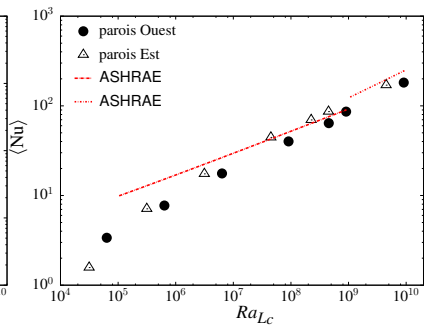
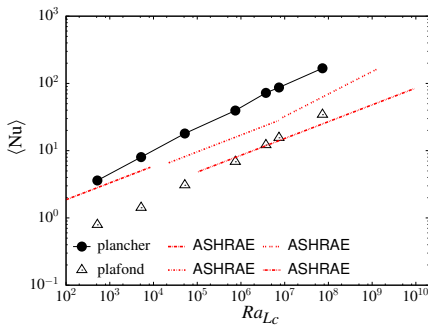
Prédiction satisfaisante des grandeurs par la méthode zonale.

Tableau 9 : Corrélations $Nu = \alpha Ra_{Lc}^\beta$.

Parois	α	β	Domaine
Ouest	0,086	0,333	$4,5 \times 10^7 < Ra_{Lc} < 1,43 \times 10^{10}$
Est	0,242	0,294	$4,5 \times 10^7 < Ra_{Lc} < 1,43 \times 10^{10}$
Plafond	0,065	0,346	$520 < Ra_{Lc} < 1,43 \times 10^{10}$
Plancher	0,402	0,349	$520 < Ra_{Lc} < 5,20 \times 10^4$
Plancher	0,726	0,295	$5,20 \times 10^4 \leq Ra_{Lc} < 7,44 \times 10^5$
Plancher	0,963	0,285	$3,72 \times 10^6 < Ra_{Lc} < 7,31 \times 10^7$

Conclusions :

- ✓ corrélations ASHRAE satisfaisantes pour parois verticales et plafond.
- ✗ corrélation pour parois chaude soumise à jet froid : différences avec nos résultats.
- ✓ amélioration de la corrélation pour modèles simplifiés.



Ventilation naturelle

Simulation numérique

Géométries fermées

Géométries ouvertes

Bâtiment à géométrie ouverte

Benchmark ADNBâti

Configuration réelle

Problème simplifié

Description générale de l'écoulement

Simulation de référence : SND

Influence des conditions aux limites

Comparaison inter-logiciels : ADNBâti

Corrélations

Conclusions et perspectives

Ventilation
naturelle

Simulation
numérique

Géométries
fermées

Géométries
ouvertes

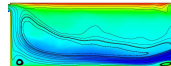
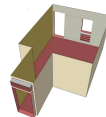
Bâtiment à
géométrie
ouverte

Conclusions
et
perspectives

- 1 Ventilation naturelle
- 2 Simulation numérique
- 3 Géométries fermées
- 4 Géométries ouvertes
- 5 Application au rafraîchissement d'un bâtiment à géométrie ouverte
- 6 Conclusions et perspectives

Rappels sur la partie précédente

- comparaison SND-SGE ;
- influence des conditions aux limites ;
- corrélations proposées ;
- comparaison inter-logiciel ADNBâti satisfaisante.



Géométrie fermée

- ✓ convection naturelle turbulente ($6,6 \times 10^8 < Ra_H < 1 \times 10^{10}$)
- ✓ comparaison SND-SGE satisfaisantes ;
- ✓ approche SGE et modèle de sous-maille dynamique des échelles mixtes ;

Perspectives

- $Ra_H = 1,2 \times 10^{11}$: résultats encourageants ;
- utilisation de la méthode de projection sur un champ à divergence nulle (Peyret, 1983).

Geométrie ouverte

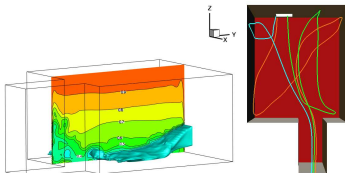
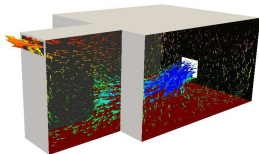
- ☛ cas numérique : canal AmeTh ;
 - ✓ jeux de condition aux limites ;
 - ✓ comparaison inter-logiciels ;
 - ✓ validation développement numérique.
-
- ☛ cas expérimental : canal incliné ;
 - ✓ comparaison résultats numériques-expérimentaux ;
 - ✓ condition en pression LB intéressante ;
 - ✗ rayonnement de surface.

Perspectives

- prise en compte du rayonnement de surface ;
- approfondir la comparaison avec l'expérimental.

Rafrâichissement nocturne d'un bâtiment ouvert (ADNBâti)

- ✓ étude numérique exploratrice ;
- ✓ simulations de référence (SND) ;
- ✓ large gamme de nombre Rayleigh étudiée ($1 \times 10^5 < Ra_H < 1 \times 10^{10}$) ;
- ✓ étude paramétrique sur les CL (SGE) ;
- ✓ méthodes simplifiées sur-estiment de $\approx 20\%$;
- ✓ corrélations proposées.



Perspectives

- prise en compte des effets tridimensionnels ;
- intégrer la corrélation obtenue ;
- prise en compte du couplage solide-fluide.

Congrès internationaux :

Brangeon, B., Bastide, A. et Joubert, P. (2011). Numerical investigation of airflow in an open geometry. Roomvent, volume 12, p.8. Trondheim, Norvège.

Brangeon, B., Bastide, A., Joubert, P. et Pons, M. (2011). Numerical investigation of natural convection in a cavity using an open geometry. Indoor air, p.8. Austin, USA.

Congrès nationaux :

Brangeon, B., Bastide, A., Joubert, P. et Pons, M. (2011). Etude numerique de la ventilation traversante naturelle dans une cavite ouverte . Application au rafraichissement passif des locaux. Congrès Francais de Thermique, p.6, Perpignan.

Brangeon, B., Bastide, A. et Joubert, P. (2012). Etude numerique de la ventilation naturelle dans un canal incline chauffe a flux constant. Congrès Francais de Thermique, p.8, Bordeaux.

Co-auteur :

F. Lucas, M. David, O. Marc, J-F. Martin, B. Brangeon, F. Picgirard (2011). Procedure for performance diagnostic for small air conditioning systems using dynamic simulations. Proceedings of Building Simulation, p.8, Sydney, Australie.

M. Pons, A. Bastide, B. Brangeon, E. Wurtz, L. Stephan, C. Goffaux, A. Jay, C. Maalouf, P. Salagnac (2011). The test case ADNBATI, a benchmark on natural ventilation in a room. Fifth International Conference on ACOMEN, p.10, Liège, Belgique.

Remercié dans :

S. Ramechecandane, C. Beghein, F. Allard (2010). Modeling fine particle dispersion in an inhomogeneous electric field with a modified drift flux model, Building and Environment (45) 1536–1549.

*Ventilation
naturelle*

*Simulation
numérique*

*Géométries
fermées*

*Géométries
ouvertes*

*Bâtiment à
géométrie
ouverte*

*Conclusions
et
perspectives*

Merci de votre attention.

*Ventilation
naturelle*

*Simulation
numérique*

*Géométries
fermées*

*Géométries
ouvertes*

*Bâtiment à
géométrie
ouverte*

*Conclusions
et
perspectives*

Ventilation
naturelle

Simulation
numérique

Géométries
fermées

Géométries
ouvertes

Bâtiment à
géométrie
ouverte

Conclusions
et
perspectives

Problématique

- expérimentation dans une salle de cours ;
- mettre en avant le potentiel de ventilation traversante.



Figure 6.1 : Caractère traversant.

Problématique

- expérimentation dans une salle de cours ;
- mettre en avant le potentiel de ventilation traversante.

Appareils de mesures :

- thermo-hygromètre ;
- thermomètre à boule noire ;
- anémomètre à fil chaud.

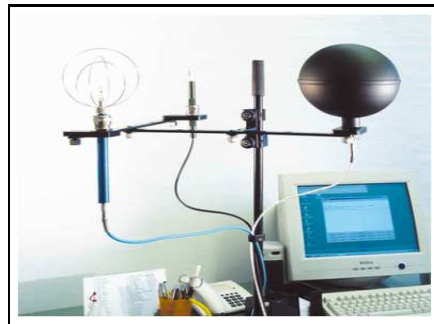
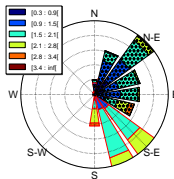
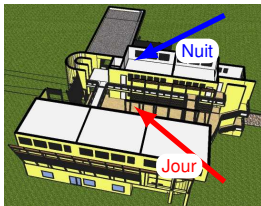
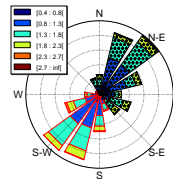
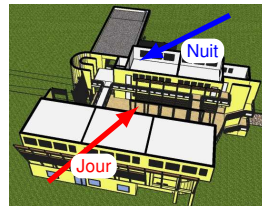


Figure 6.1 : Instrumentation.

Configuration fermée

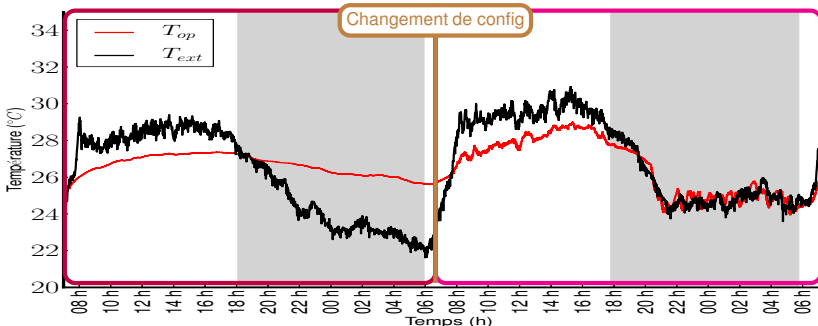


Configuration ouverte

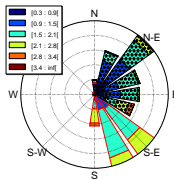
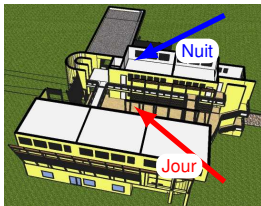


- Ventilation naturelle
- Simulation numérique
- Géométries fermées
- Géométries ouvertes
- Bâtiment à géométrie ouverte

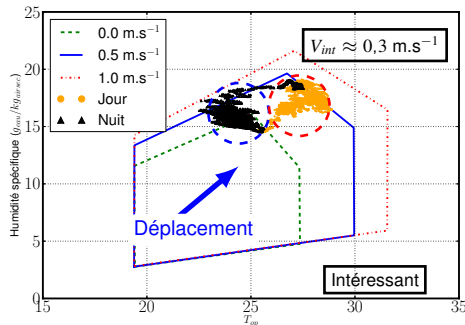
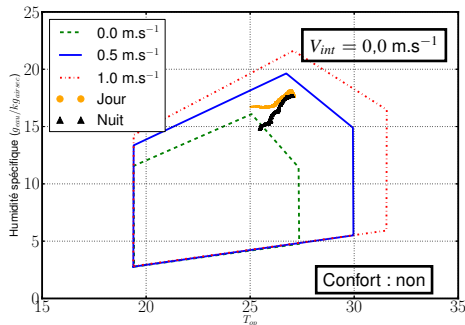
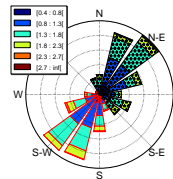
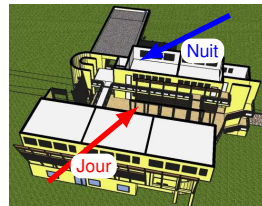
Conclusions et perspectives



Configuration fermée



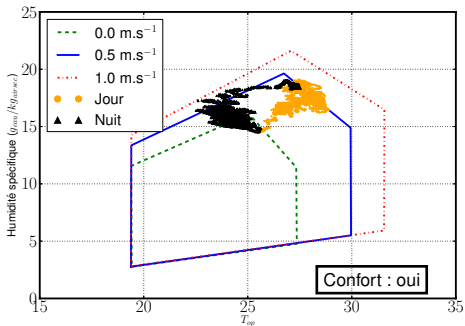
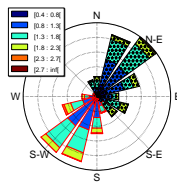
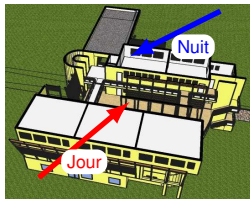
Configuration ouverte



Ventilation naturelle
Simulation numérique
Géométries fermées
Géométries ouvertes
Bâtiment à géométrie ouverte

Conclusions et perspectives

Configuration ouverte



Conclusions

- ventilation traversante intéressante ;
- parfois insuffisante : ventilation mécanique.

Quels sont les leviers politiques et réglementaires ?

Ventilation naturelle

Simulation numérique

Géométries fermées

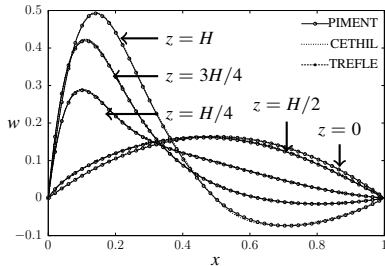
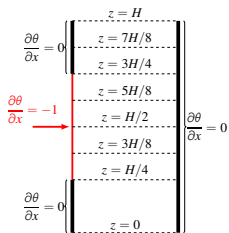
Géométries ouvertes

Bâtiment à géométrie ouverte

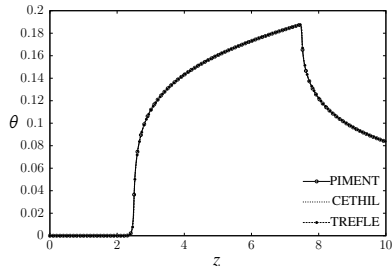
Conclusions et perspectives

Ventilation naturelle
 Simulation numérique
 Géométries fermées
 Géométries ouvertes
 Bâtiment à géométrie ouverte

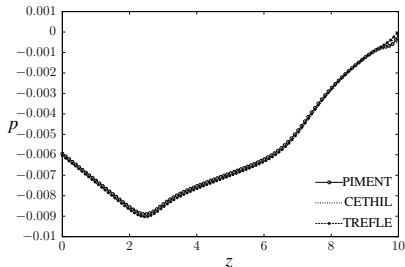
Conclusions et perspectives



(a) Profils de la composante verticale w à différentes hauteurs z .

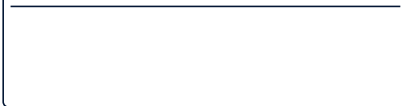


(b) Profils de température le long de la paroi chauffée $x = 0$.



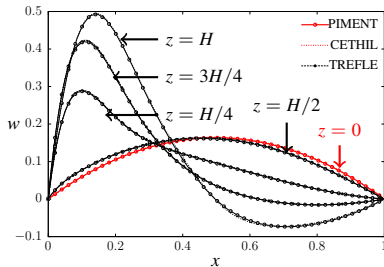
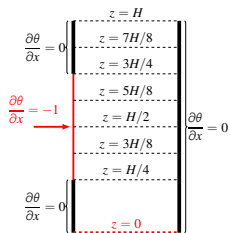
(c) Profils de pression le long de la ligne médiane $x = 0,5$.

Résultats :

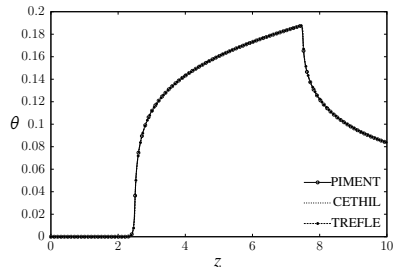


Ventilation naturelle
 Simulation numérique
 Géométries fermées
 Géométries ouvertes
 Bâtiment à géométrie ouverte

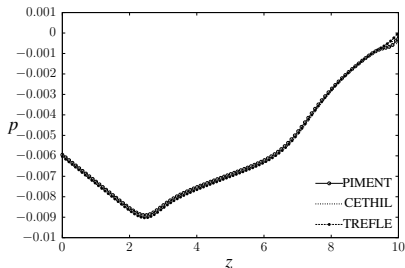
Conclusions et perspectives



(a) Profils de la composante verticale w à différentes hauteurs z .



(b) Profils de température le long de la paroi chauffée $x = 0$.



(c) Profils de pression le long de la ligne médiane $x = 0,5$.

Résultats :

- profil de Poiseuille en entrée ;

Ventilation naturelle

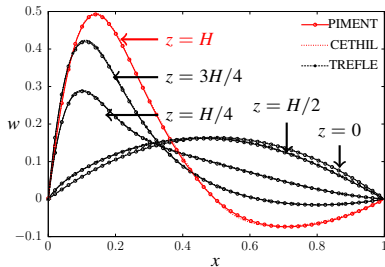
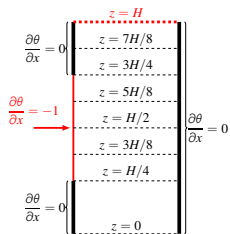
Simulation numérique

Géométries fermées

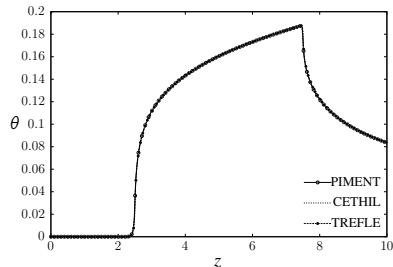
Géométries ouvertes

Bâtiment à géométrie ouverte

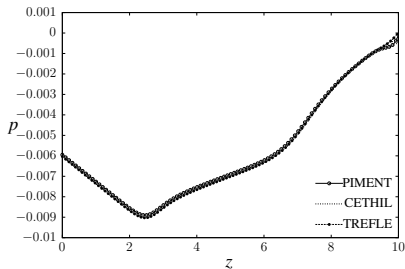
Conclusions et perspectives



(a) Profils de la composante verticale w à différentes hauteurs z .



(b) Profils de température le long de la paroi chauffée $x = 0$.



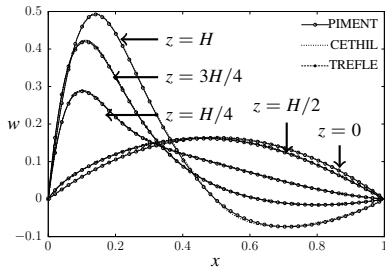
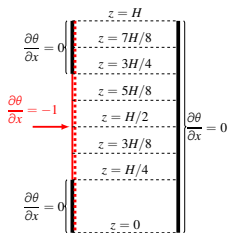
(c) Profils de pression le long de la ligne médiane $x = 0,5$.

Résultats :

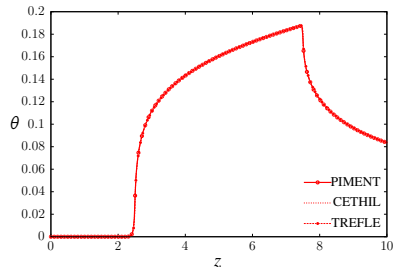
- profil de Poiseuille en entrée ;
- zone de recirculation en sortie ;

Ventilation naturelle
Simulation numérique
Géométries fermées
Géométries ouvertes
Bâtiment à géométrie ouverte

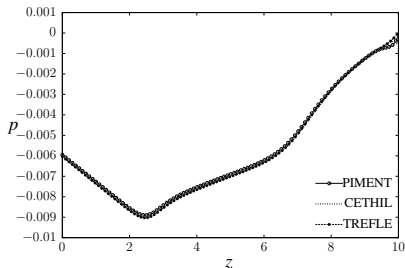
Conclusions et perspectives



(a) Profils de la composante verticale w à différentes hauteurs z .



(b) Profils de température le long de la paroi chauffée $x = 0$.



(c) Profils de pression le long de la ligne médiane $x = 0,5$.

Résultats :

- profil de Poiseuille en entrée ;
- zone de recirculation en sortie ;

Ventilation naturelle

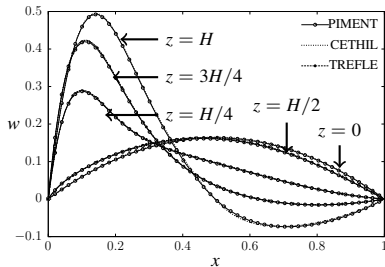
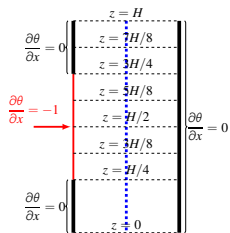
Simulation numérique

Géométries fermées

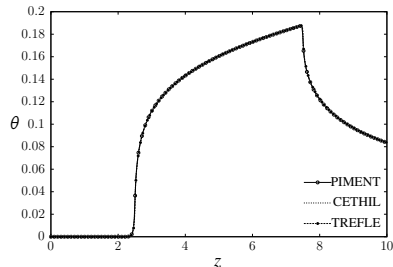
Géométries ouvertes

Bâtiment à géométrie ouverte

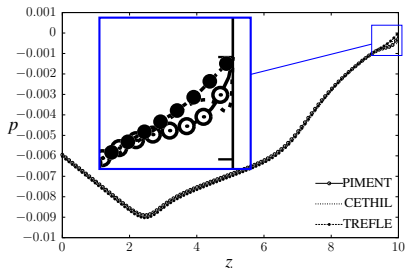
Conclusions et perspectives



(a) Profils de la composante verticale w à différentes hauteurs z .



(b) Profils de température le long de la paroi chauffée $x=0$.



(c) Profils de pression le long de la ligne médiane $x=0.5$.

Résultats :

- profil de Poiseuille en entrée ;
- zone de recirculation en sortie ;
- différence de pression en sortie.

Ventilation naturelle

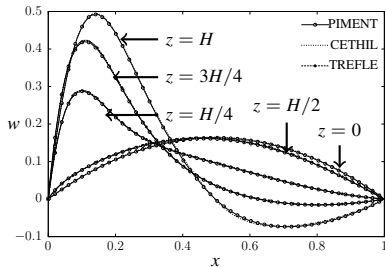
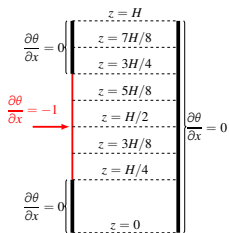
Simulation numérique

Géométries fermées

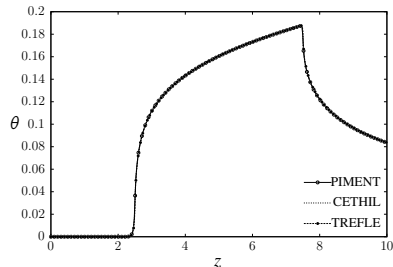
Géométries ouvertes

Bâtiment à géométrie ouverte

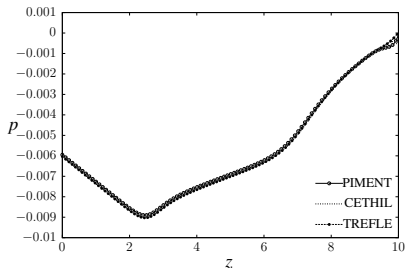
Conclusions et perspectives



(a) Profils de la composante verticale w à différentes hauteurs z .



(b) Profils de température le long de la paroi chauffée $x = 0$.



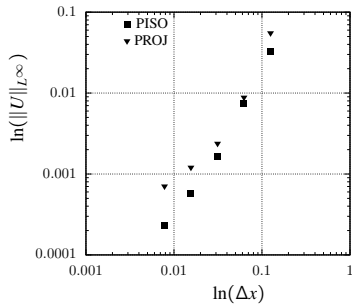
(c) Profils de pression le long de la ligne médiane $x = 0,5$.

Résultats :

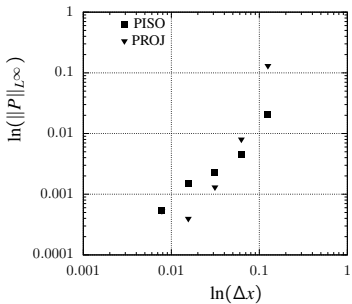
- profil de Poiseuille en entrée ;
- zone de recirculation en sortie ;
- différence de pression en sortie.

Les codes numériques fournissent des résultats identiques quand les mêmes conditions en entrée et sortie du canal sont utilisées.

Vers une comparaison expérimentale.

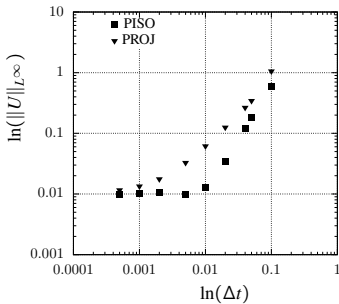


(d) Erreur spatiale sur la vitesse.

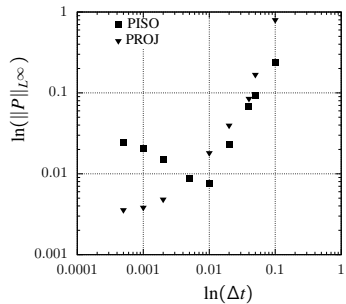


(e) Erreur spatiale sur la pression.

Figure 6.2 : Représentation des erreurs spatiales sur la vitesse et la pression.

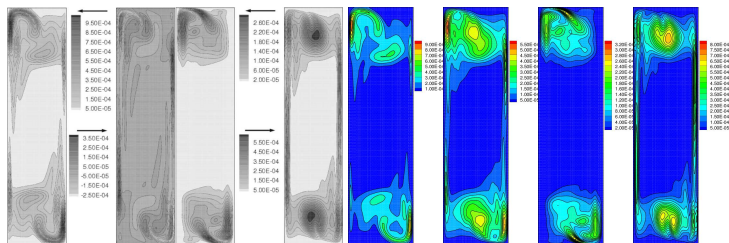


(a) Erreur temporelle sur la vitesse



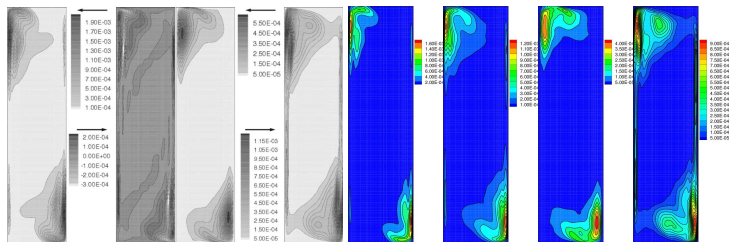
(b) Erreur temporelle sur la pression

Figure 6.3 : Représentation des erreurs temporelles sur la vitesse et la pression.

Ventilation
naturelleSimulation
numériqueGéométries
ferméesGéométries
ouvertesBâtiment à
géométrie
ouverteConclusions
et
perspectives

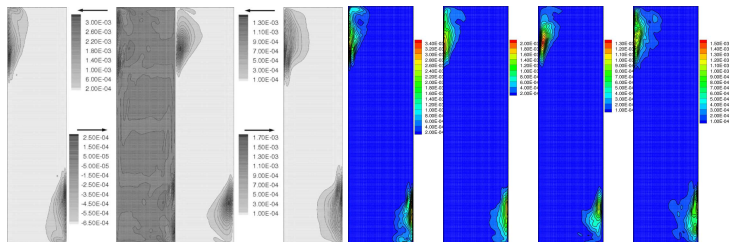
(a) Cas SND 3D. De gauche à droite : $\langle \theta' \theta' \rangle$, $\langle w' \theta' \rangle$, $\langle u' u' \rangle$, (b) Cas SGE 3D. De gauche à droite : $\langle \theta' \theta' \rangle$, $\langle w' \theta' \rangle$, $\langle u' u' \rangle$, $\langle w' w' \rangle$.

Figure 6.4 : Quantités turbulentes pour $Ra_H = 6,4 \times 10^8$.

Ventilation
naturelleSimulation
numériqueGéométries
ferméesGéométries
ouvertesBâtiment à
géométrie
ouverteConclusions
et
perspectives

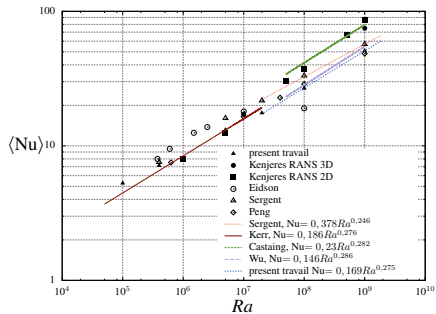
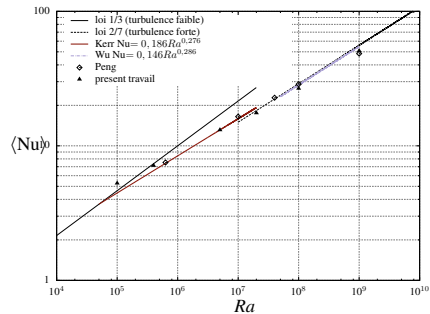
(a) Cas SND 3D. De gauche à droite : $\langle \theta' \theta' \rangle$, $\langle w' \theta' \rangle$, $\langle u' u' \rangle$, (b) Cas SGE 3D. De gauche à droite : $\langle \theta' \theta' \rangle$, $\langle w' \theta' \rangle$, $\langle u' u' \rangle$, $\langle w' w' \rangle$.

Figure 6.5 : Quantités turbulentes pour $Ra_H = 2 \times 10^9$.

Ventilation
naturelleSimulation
numériqueGéométries
ferméesGéométries
ouvertesBâtiment à
géométrie
ouverteConclusions
et
perspectives

(a) Cas SND 3D. De gauche à droite : $\langle \theta' \theta' \rangle$, $\langle w' \theta' \rangle$, $\langle u' u' \rangle$, (b) Cas SGE 3D. De gauche à droite : $\langle \theta' \theta' \rangle$, $\langle w' \theta' \rangle$, $\langle u' u' \rangle$, $\langle w' w' \rangle$.

Figure 6.6 : Quantités turbulentes pour $Ra_H = 1 \times 10^{10}$.

Ventilation
naturelleSimulation
numériqueGéométries
ferméesGéométries
ouvertesBâtiment à
géométrie
ouverteConclusions
et
perspectivesFigure 6.7 : Evolution du nombre de Nusselt $\langle Nu \rangle$ à la paroi.Figure 6.8 : Evolution du nombre de Nusselt $\langle Nu \rangle$ à la paroi avec les deux lois de turbulence.