

RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE  
MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA RECHERCHE  
SCIENTIFIQUE  
ÉCOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE



DÉPARTEMENT DE GÉNIE MÉCANIQUE

**Projet de Fin d'Études pour l'obtention du Diplôme  
d'Ingénieur d'État en Génie Mécanique**

Thème :

**Etude numérique de l'écoulement induit  
par une source de chaleur et de masse dans  
une enceinte ouverte**

Proposé et dirigé par :

B. BENKOUSSAS MC (A), ENP

O. VAUQUELIN Prof, Aix-Marseille Université

Réalisé par :

ABOUCI HAMZA

*Septembre 2014*

ENP 10, Hacén-Badi, El-Harrach, 16200 Alger  
Tel. 021.52.53.01-03, Fax. 021.52.29.73 [www.enp.edu.dz](http://www.enp.edu.dz)

## ملخص

في هذا العمل، قمنا بتحليل وقياس التدفقات التي ينتجها مصدر كتلة داخل علبة مستطيلة مهوية متصلة بالخارج عن طريق فتحتين مستطيتين عموديتين ارتفاعهما  $H_E$  و  $H_S$  تقعان على المستوى العلوي و السفلي للعلبة، سوف يتم تنفيذ هذه الدراسة باستخدام برنامج المحاكاة FDS. لقد تمكنا من وصف أنماط التدفق عن طريق علاقات تجريبية. هذه العلاقات التجريبية تربط مختلف العوامل التي تتحكم في التبديل بين مختلف نظم التدفق المحددة في دراستنا.

كلمات مفتاحية: التهوية أنماط التدفق، منبع كتلة، FDS، رقم Froude.

## Résumé :

Dans ce travail, nous avons étudié les écoulements produits par une source de masse à l'intérieur d'une enceinte de forme parallélépipédique, reliée à l'extérieur par deux ouvertures verticales rectangulaires de hauteurs  $H_E$  et  $H_S$  situées en parties basse et haute de ce volume. L'étude est réalisée à l'aide du code de calcul FDS. Nous avons pu visualiser les régimes d'écoulements mis en jeu en fonction des conditions d'injection. Le nombre de Froude est utilisé pour définir les conditions d'injection. Des corrélations décrivant le passage d'un régime à un autre ont été déduites. Ces corrélations lient les paramètres qui contrôlent le passage entre les différents régimes d'écoulements. Dans la perspective de validation de ces résultats numériques, un dispositif d'expérimentation est conçu et réalisé.

**Mots clés :** régimes d'écoulements, source de masse, FDS, nombre de Froude.

## Abstract:

In this work, we studied the flows produced by a source of mass inside an enclosure of parallelepipedal shape, connected to the outside by two vertical rectangular openings of heights  $H_E$  and  $H_S$  located in bottom and top parts of the volume. The study was performed using the computer code FDS. We were able to visualize the flow regimes involved depending of the injection conditions. The Froude number is used to define the injection conditions. Correlations describing the transition from one regime to another have been deducted. These correlations link the parameters that control the transition between the different flow regimes. In the perspective of validation of these numerical results, an experimental device was designed and built.

**Keywords:** flow regime, source of mass, FDS, Froude.

*Nulla œuvre n'est exaltante que celle réalisée avec le soutien moral et financier des personnes qui nous sont proches.*

## **Remerciement**

*Je remercie avant tout Dieu le tout puissant de m'avoir donné la foi, la volonté et le courage de mener à bien ce modeste travail.*

*Quelques phrases de remerciement me semblent bien pauvres pour exprimer toute ma gratitude à monsieur Bouzid BENKOUSSAS qui a proposé ce sujet. Merci pour votre confiance, vos précieux conseils, votre enthousiasme et votre soutien.*

*J'adresse mes sincères remerciements à Monsieur O. VAUQUELIN, E. VALERIO et P. BOURNOT pour m'avoir accueilli au sein d'UNIMECA et pour m'avoir permis de réaliser ce stage dans de si bonnes conditions.*

*Je remercie monsieur Salah LARBI d'avoir accepté de présider le jury, ainsi que monsieur Mohamed Tarek ATTOUCHI qui a accepté de juger ce modeste travail.*

*Je tiens à exprimer ma plus profonde reconnaissance à :*

- Mon père et à ma mère qui m'ont toujours entouré et motivé à sans cesse devenir meilleur ;*
- Tous mes compagnons de promotion ;*

*Trouvez ici l'expression de ma profonde gratitude et reconnaissance.*

**MERCI**

## *Dédicace*

*Je dédie ce mémoire à :*

*· Mes parents :*

*Ma mère, qui a œuvré pour ma réussite, de par son amour, son soutien, tous les sacrifices consentis et ses précieux conseils, pour toute son assistance et sa présence dans ma vie, reçois à travers ce travail aussi modeste soit-il, l'expression de mes sentiments et de mon éternelle gratitude.*

*Mon père, qui peut être fier et trouver ici le résultat de longues années de sacrifices et de privations pour m'aider à avancer dans la vie. Puisse Dieu faire en sorte que ce travail porte son fruit ; Merci pour les valeurs nobles, l'éducation et le soutien permanent venu de toi.*

*Mes frères et sœurs et Mes amis qui n'ont cessé de m'encourager pour être le meilleur.*

*Mes professeurs de département génie mécanique qui doivent voir dans ce travail la fierté d'un savoir bien acquis.*

# Table des matières

<b>Introduction</b> .....	1
<b>Chapitre 1 : Etat de l'art</b>	
1.1 Thermique .....	4
1.1.1 Compartiments fermés en présence de convection naturelle .....	4
1.1.2    Compartiment ouvert en présence de convection naturelle .....	6
1.1.3    Compartiment ouvert en présence de convection mixte .....	7
1.2 Ventilation.....	9
1.2.1    Compartiment fermé en régime de convection naturelle .....	9
1.2.2    Compartiment avec des ouvertures en régime de convection naturelle .....	10
1.2.3    Compartiments présentant deux ouvertures en régime de convection mixte.....	13
1.3 Incendie .....	15
1.3.1    Approches numériques.....	16
1.3.2    Approches expérimentales .....	17
1.4 Synthèse .....	17
1.5 Situation numérique étudiée .....	18
<b>Chapitre 2 : Description de l'outil numérique</b>	
2.1 Description de l'outil numérique utilisé .....	20
2.1.1    Introduction.....	20
2.1.2    Présentation du Code de calcul « FDS » (version 5.5.3).....	20
2.1.3    Domaines d'exploitation du logiciel .....	20
2.1.4    Comment utiliser FDS .....	21
2.1.5    Modèles mathématiques présents dans FDS .....	22
2.1.5.1    Modèle Hydrodynamique .....	22
2.1.5.2    Modélisation en utilisant la technique LES .....	22
2.2 Définition de la problématique .....	23
2.2.1    Maquette thermique : .....	23
2.2.2    Mise en évidence des différents régimes d'écoulement .....	25
2.2.3    Vitesse à l'ouverture .....	26
2.3 Analyse analytique des résultats.....	27
2.3.1    Détermination numérique de la corrélation qui lie le nombre de Froude à l'injection et les paramètres intervenant dans le mode d'écoulement .....	28

2.3.2	Démarche .....	29
<b>Chapitre 3 : Résultat et Interprétation</b>		
3.1	Maillage du domaine de calcul .....	30
3.2	Évolution du débit .....	31
3.3	Effet des paramètres géométriques et d'injection sur les régimes d'écoulement.....	31
3.4	Récapitulatif des différents tests réalisés.....	39
3.5	Résultats récapitulatifs .....	43
<b>Chapitre 4 : Description du dispositif d'expérimentation</b>		
4.1.	Description du dispositif d'expérimentation .....	46
4.1.1.	Alimentation .....	47
4.2.	Techniques de mesures et de contrôle .....	47
4.2.1.	Mesure du débit injecté .....	47
4.2.2.	Visualisations .....	47
4.3.	Mesures de vitesses par PIV .....	48
4.3.1.	Principe .....	48
4.3.2.	Plans lasers .....	50
4.3.3.	Acquisitions et enregistrements .....	50
4.3.4.	Etalonnage.....	51
4.4	Calculs des vitesses .....	52
4.4.1	Protocole d'expérimentation .....	53
<b>Conclusion</b> .....		54
<b>Référence bibliographiques</b> .....		56
<b>Annexes</b> .....		62

# Liste des figures

## Chapitre 1 : Etat de l'art

Figure 1.1 : Exemples de champs de vitesse et de température dans la configuration de type Rayleigh-Bénard, Thual (2006).....	5
Figure 1.2 : Exemple de cavité fermée contenant une plaque isotherme, refroidie par une paroi latérale. Les trois autres parois sont adiabatique, Atlac et Konrat (2009) .....	6
Figure 1.3 : Schéma de principe de la ventilation par mélange .....	11
Figure 1.4 : Schéma de principe de la ventilation par déplacement.....	11
Figure 1.5 : Schéma de l'expérience de Woods et al. (2003). Une solution saline est injectée (débit de flottabilité $Bo$ et volumique $Qo$ ) par le plafond d'une enceinte disposant de deux ouvertures. ....	13
Figure 1.6 : Schéma de l'expérience du Coria, Allano et al. (2008). De l'air chauffé est injecté (débit de flottabilité $Bo$ et volumique $Qo$ ) à la paroi d'une enceinte disposant de deux ouverture .....	14
Figure 1.7 : Situation numérique étudié.....	19

## Chapitre 2 : Description de l'outil numérique

Figure 2.1 Schéma de fonctionnement de FDS.....	21
Figure 2.2 : Schéma de la maquette .....	24
Figure 2.3: Système d'axes utilisés.....	24
Figure 2.4 : Zone de visualisations des résultats.....	25
Figure 2.5 : Les trois régimes d'écoulement.....	25
Figure 2.6 : (a) : naturel, (b) : intermédiaire, (c) : bloqué.....	26
Figure 2.7 : Influence du débit d'injection sur la vitesse à l'ouverture.....	27

## Chapitre 3 : Résultat et Interprétation

Figure 3.1 : Maillage du domaine et détails au niveau de la buse et l'ouverture inférieure. ....	30
Figure 3.2 : Variation de débit en fonction du temps pour $Hs$ et $\Delta\rho$ fixes.....	31
Figure 3.3 : Régime d'écoulement, (a) naturel, (b) intermédiaire, (c) bloqué. ....	32
Figure 3.4 Régime d'écoulement, (a) naturel, (b) intermédiaire, (c) bloqué pour. ....	33
Figure 3.5 : Régime d'écoulement, (a) naturel, (b) intermédiaire, (c) bloqué. ....	34
Figure 3.6 : Régime d'écoulement, (a) naturel, (b) intermédiaire, (c) bloqué. ....	37
Figure 3.7 Régime d'écoulement, (a) naturel, (b) intermédiaire, (c) bloqué .....	38
Figure 3.8 Zones et limites des régimes naturel et bloqué .....	40

Figure 3.9 : Zones et délimitations des régimes naturel et bloqué.....	42
Figure 3.10 : $(H_s/H) = f(Fr)$ .....	44
Figure 4.1 : Diapositif expérimental .....	46

#### **Chapitre 4 : Description du dispositif d'expérimentation**

Figure 4.2 : Exemple de visualisation réalisée en sortie de l'ouverture inférieure .....	48
Figure 4.3 : Principe de fonctionnement de la technique P.I.V. (Dantec Dynamics). .....	49
Figure 4.4 : Pic de correction obtenu pour une maille de calcul, Lecordier (1997).....	49
Figure 4.5 : Schéma de principe de la disposition des caméras en « champ large ».....	51
Figure 4.6 : Mire utilisée pour les étalonnages .....	53

### **Liste des tableaux**

#### **Chapitre 3 : Résultat et Interprétation**

Tableau 3-1 maillage.....	30
Tableau 3-2 Résultats obtenus pour les différents passages en fonction de la variation de $\Delta\rho$ et $Q_m$ pour $H_s/H$ donné.....	39
Tableau 3-3 Résultats obtenus des deux passages en fonction de la variation de $H_s/H$ et $Q_m$ pour $\Delta\rho$ donné.....	41



## Nomenclature

$a$	<i>Diffusivité thermique, [m<sup>2</sup>.s<sup>-1</sup>]</i>
$A_s$	<i>Section ouverture supérieure, [m<sup>2</sup>]</i>
$A_E$	<i>Section ouverture inférieure, [m<sup>2</sup>]</i>
$A_0$	<i>Section buse rectangulaire, [m<sup>2</sup>]</i>
$B$	<i>Débit de flottabilité, [m<sup>4</sup>.s<sup>-3</sup>]</i>
$C_S$	<i>Coefficient de débit de l'ouverture supérieure</i>
$C_E$	<i>Coefficient de débit de l'ouverture inférieure</i>
$C_p(y) = \frac{\Delta P(y)}{1/2\rho_{ext}v_0^2}$	<i>Coefficient de pression</i>
$D_0$	<i>Largeur de la buse, [m]</i>
$g$	<i>Accélération de la pesanteur, [m.s<sup>-2</sup>]</i>
$g' = g \frac{\Delta\rho}{\rho_{ext}}$	<i>Gravité réduite, [m]</i>
$H$	<i>Hauteur de l'enceinte, [m]</i>
$l$	<i>Largeur de l'enceinte, [m]</i>
$L$	<i>Longueur de l'enceinte, [m]</i>
$L_j = \frac{M_0^{3/4}}{B_0^{1/2}}$	<i>Longueur de jet, [m]</i>
$M$	<i>Débit de quantité de mouvement, [m<sup>4</sup>.s<sup>-2</sup>]</i>
$P$	<i>Pression, [Pa]</i>
$Q$	<i>Débit volumique, [m<sup>3</sup>.s<sup>-1</sup>]</i>
$Q_m$	<i>Débit massique, [kg.s<sup>-1</sup>]</i>
$t$	<i>Temps, [s]</i>
$T$	<i>Température, [K]</i>
$U$	<i>Composante horizontale de vitesse, [m.s<sup>-1</sup>]</i>
$u$	<i>Valeur moyenne de la composante horizontale de la vitesse, [m.s<sup>-1</sup>]</i>
$u'$	<i>Écart type de la composante horizontale de la vitesse, [m.s<sup>-1</sup>]</i>

$V$	<i>Composante verticale de la vitesse, [m. s<sup>-1</sup>]</i>
$v$	<i>Valeur moyenne de la composante verticale de la vitesse, [m. s<sup>-1</sup>]</i>
$v'$	<i>Écart type de la composante verticale de vitesse, [m. s<sup>-1</sup>]</i>

### ***Symboles grecs***

$$\alpha = C_S A_S / C_E A_E$$

$$\beta = \rho_{int}(H) / \rho_0$$

$$\gamma = \rho_{ext} / \rho_0$$

$$\delta = \rho_{int}(0) / \rho_0$$

$\alpha$	<i>Coefficient d'entraînement</i>
$\beta$	<i>Coefficient de dilatation thermique, [K<sup>-1</sup>]</i>
$\lambda$	<i>Conductibilité thermique, [W. m<sup>-1</sup>K<sup>-1</sup>]</i>
$\rho$	<i>Masse volumique, [kg. m<sup>-3</sup>]</i>
$\nu$	<i>viscosité cinématique, [m<sup>2</sup>. s<sup>-1</sup>]</i>
$\xi = h/H$	<i>Hauteur adimensionnelle</i>
$\tau$	<i>Temps de mélange ou de vidange, [s]</i>
$\Delta P$	<i>Différence de pression, [Pa]</i>
$\Delta T$	<i>Écart de température, [K]</i>

$$\overline{Fr}_H = Q_0^2 / (\overline{\Delta\rho}_H / gH(C_S A_S)^2) \quad \text{Nombre de Froude densitométrique}$$

$$\overline{Fr}^*_H = \frac{Q_0^2}{\beta\gamma(\overline{\Delta\rho}_H / \rho_{ext})gH(C_S A_S)^2} \quad \text{Nombre de Froude densitométrique généralisé}$$

$$Ra = \frac{g\beta\Delta T_0 H^3}{\nu\alpha} \quad \text{Nombre de Rayleigh}$$

$$Gr = \frac{g\beta\Delta T_0 H^3}{\nu^2} \quad \text{Nombre de Grashof}$$

$$Pr = \frac{\nu}{\alpha} \quad \text{Nombre de Prandtl}$$

$$Re = \frac{UL}{\nu} \quad \text{Nombre de Reynolds}$$

$$Ar = \frac{Ra}{Re^2 Pr} = \frac{g\beta\Delta T_0 H}{U^2} \quad \text{Nombre d'Archimède}$$

$$Ri = \frac{Ra}{Re^2 Pr} = \frac{g\beta\Delta T_0 H}{U^2} \quad \text{Nombre de Richardson,}$$

### **Indices et exposants**

*S*                      *Ouverture supérieure*

*E*                        *Ouverture inférieure*

*ext*                     *Extérieur*

*int*                     *Intérieur*

*m*                        *Massique*

*O*                        *Buse*

$\overline{X_H}$                     *Grandeur X moyennée sur la hauteur H*

### **Abbreviations**

*LES*    *Large Eddy Simulation*

*DNS*    *Direct Numerical Simulation*

*FDS*    *Fire Dynamics Simulator*

*NIST*    *National Institut of Standardisation and Technology*

*CFD*    *Computational Fluid Dynamics*

*EVS*    *The Emergency Ventilation System*

*TMD*    *Transportant de Matières Dangereuses*

*HRR*    *Heat Release Rate*

# Introduction Générale

## Introduction

L'étude des écoulements chauffés ou de faible densité se développant à l'intérieur d'enceintes fermées ou semi confinées présente un grand intérêt car ils interviennent dans un nombre important de domaines. En effet, on rencontre ce type d'écoulements aussi bien dans le refroidissement des équipements électroniques ou téléphoniques qui sont généralement placés dans des armoires, Le Masson et al. (2011), que dans la ventilation des bâtiments, des chambres stériles ou des salles blanches et des habitacles d'avions ou d'automobile, Westhoff et al. (2008). Ils apparaissent également dès qu'une fuite d'hydrogène ou de produits radioactifs se produit dans un local, Prasad et al. (2010), Prêtre et Such (2005), ou qu'un incendie se déclare dans un entrepôt, Karlsson et Quintiere (2000). Ces écoulements ont aussi un rôle majeur dans le fonctionnement des échangeurs de chaleur, des réacteurs nucléaires, Zvirin Y. (1982), mais également à grande échelle dans le mouvement de la lave dans les chambres magmatiques, Philips et Woods (2001).

Dans les applications présentées ci-dessus le transfert de chaleur s'effectue principalement par convection, le transfert dans lequel la chaleur est transportée par l'écoulement. On distingue toutefois différents modes de convection : la convection naturelle, la convection mixte et la convection forcée. En convection naturelle, l'écoulement du fluide résulte de la présence dans le champ de gravité d'inhomogénéités de température ou de concentration qui induisent des forces de flottabilité (différences entre les forces d'Archimède et de pesanteur). En convection forcée, l'écoulement du fluide résulte d'une source externe comme un ventilateur par exemple et dans ce cas les forces d'inertie prédominent devant les forces de flottabilité. Dans le cas de la convection mixte, les forces de flottabilité et d'inertie sont du même ordre de grandeur.

Dans ces mêmes exemples, on constate que les écoulements se trouvent généralement à l'intérieur d'enceintes ventilées. Ils sont confinés par des parois et peuvent ainsi échanger de la chaleur avec ces parois mais également avec le fluide extérieur par l'intermédiaire des ouvertures.

Ce sera le cas par exemple d'un incendie se développant dans un compartiment ventilé, où les écoulements présents et créés par le foyer vont interagir avec les parois de l'enceinte mais

pourront également se mélanger avec de l'air extérieur issu des ouvertures. C'est ce phénomène de ventilation qui contrôlera en grande partie durant certaines phases du feu la température et la richesse des gaz combustibles présents dans le compartiment mais également le mouvement des fumées. Dans le cas d'incendies réels, la présence de ces fumées toxiques, chaudes et opaques peut empêcher les services de secours d'intervenir efficacement et pour remédier à ce problème des stratégies opérationnelles ont été recherchées. C'est dans ce but, par exemple que la technique par ventilation par pression positive a été développée, Gunnerson et al. (1994), Lebey et Cité (2003), Lebey et Lambert (2006). Dans cette technique, après avoir créé un exutoire en partie supérieure du local, on force la ventilation en plaçant un ventilateur à proximité d'une ouverture en partie basse ce qui permet de désenfumer, de diminuer la température et ainsi de rendre plus accessible le local. A l'heure actuelle cette stratégie est toujours controversée car de nombreux points restent à éclaircir, en effet, si cette ventilation supplémentaire n'est pas parfaitement contrôlée elle peut augmenter de manière significative la puissance dégagée par le foyer.

Dans le but d'améliorer les connaissances dans ce domaine, nous essayons à travers une approche numérique de comprendre dans une première phase comment des écoulements chauffés présents dans une enceinte ventilée se comportent afin de pouvoir dans une seconde phase les contrôler plus efficacement. Cette approche très générale demeure très en amont des applications et peut s'appliquer à d'autres domaines que l'incendie.

C'est la caractérisation des régimes d'écoulements chauffés présents dans les enceintes ventilées et des écoulements eux-mêmes qui fait l'objet de ce mémoire.

Le plan de ce mémoire se répartit en quatre chapitres résumés ci-dessous :

Le premier chapitre présente une revue bibliographique du problème des écoulements chauffés ou de faible densité se développant à l'intérieur d'enceintes fermées ou semi confinées en montrant que selon le domaine d'application (thermique, ventilation, incendie) différentes approches ont été suivies.

Le second chapitre est consacré à la description de l'outil numérique utilisé dans cette étude et des techniques de mesures employées.

Le troisième chapitre décrit les trois régimes d'écoulements obtenus dans les simulation quand on modifie les caractéristiques de l'écoulement du mélange et la géométrie de l'enceinte. Il présente également une étude analytique dont le but est de parvenir à caractériser chaque régime d'écoulement par un nombre de Froude  $F_r$ .

Le quatrième chapitre montre une description et un protocole expérimental à suivre pour la validation de ces résultats.

Enfin une conclusion résume les principaux résultats de l'étude et présente quelques perspectives.

# CHAPITRE 1

Etat de l'art



Les écoulements chauffés dans les enceintes étanches ou ventilées sont présents dans un nombre important d'applications dans divers domaines. Ils ont été étudiés différemment dans les cas : thermique, ventilation ou incendie.

## 1.1 Thermique

Les travaux réalisés dans le domaine de la thermique se sont particulièrement focalisés sur les champs dynamiques et thermiques présents à l'intérieur de systèmes composés d'une enceinte avec ou sans ouvertures et dans laquelle se trouvent une ou plusieurs sources de chaleur. Pour des écarts de température pas trop importants, les transferts de chaleur s'effectuent par convection naturelle, mixte ou forcée. Le but recherché est souvent de trouver des solutions qui permettent d'accroître le transfert de chaleur convectif afin, par exemple, de refroidir plus efficacement des équipements électroniques protégés par une enceinte fermée ou semi confinée.

### 1.1.1 Compartiments fermés en présence de convection naturelle

#### 1.1.1.1 Sources de chaleur pariétales

De nombreuses études ont concerné les écoulements dans les enceintes fermées dans lesquelles les écoulements étaient générés par convection naturelle. Deux principaux types de convection ont été principalement étudiés : la convection de type Rayleigh-Bénard et la convection en cavité différentiellement chauffée. Dans le premier cas, la paroi horizontale inférieure est chauffée tandis que la paroi horizontale supérieure est refroidie. Dans le second cas, c'est une des parois verticales qui est chauffée tandis que l'autre est refroidie.

Dans ce type de problème, les paramètres caractéristiques sont le nombre de Rayleigh  $R_a = \frac{g\beta\Delta T_0 H^3}{\nu a}$ , le nombre de Prandtl  $P_r = \frac{\nu}{a}$  et les rapports d'aspect  $\frac{H}{l}$  et  $\frac{H}{L}$  des volumes considérés.

Ici, H, l et L sont respectivement la hauteur, la largeur et la longueur de l'enceinte,  $\Delta t_0$  l'écart de température entre les parois chauffées et refroidies,  $\nu$  et  $a$  la viscosité et la diffusivité thermique du fluide,  $g$  l'accélération de la pesanteur et  $\beta$  le coefficient de dilatation thermique.

Pour des valeurs plus élevées du nombre de Rayleigh, on observe des transitions de l'écoulement vers des régimes instationnaires, périodiques ou quasi périodiques, chaotiques, voire même turbulents. Cette transition se produit généralement lorsque le nombre de Rayleigh devient supérieur à  $10^6$ , **Le Quéré (1987), Xin et Le Quéré (2005)**.

Dans la figure (1.1), nous présentons un exemple de champs de vitesse et de température dans une enceinte.

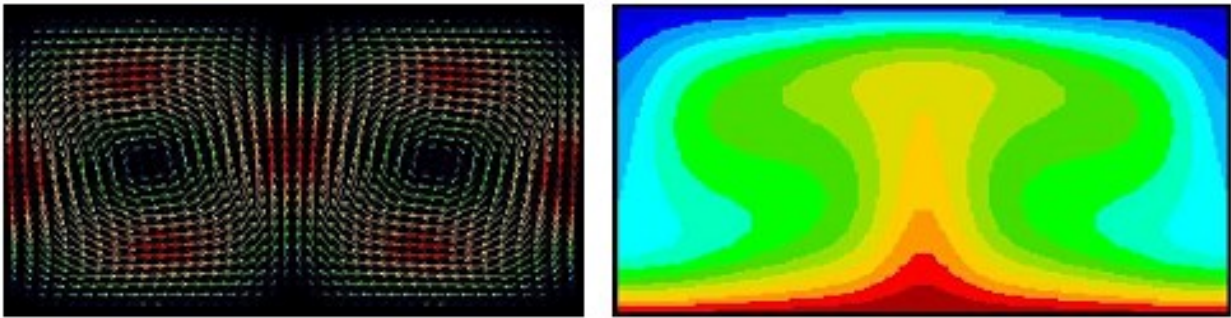


Figure 1.1 : Exemples de champs de vitesse et de température dans la configuration de type Rayleigh-Bénard, **Thual (2006)**

Une grande partie des recherches dans ce domaine est consacrée à l'étude de la variation du nombre de Nusselt  $Nu$  en fonction du nombre de Rayleigh.  $Nu$  varierait initialement comme  $R_a^{1/3}$  ou  $R_a^{2/7}$  selon les auteurs puis comme  $R_a^{1/2}$  pour les valeurs les plus élevées ( $10^7$ - $10^{14}$ ), **Chavanne et al. (1997), Ahlers et al. (2009)**.

Dans le cas de la cavité différentiellement chauffée, les écoulements créés par la convection naturelle se développent principalement le long des parois verticales. Dans ce cas, il existe une grande circulation principale où l'air chaud plus léger monte le long de la paroi chauffée, longe le plafond puis redescend le long de la paroi opposée froide et rejoint la paroi chaude par le plancher, Figure (1.1). Des couches limites laminaires puis turbulentes peuvent ainsi se développer le long de ces parois verticales, et des zones secondaires de recirculation apparaissent au centre de l'enceinte, **Penot et al. (1990), Mergui et Penot (1996), Tian et Karayiannis (2000), Saury et al. (2009, 2011), Djanna-Koffi (2011)**.

### 1.1.1.2 Sources de chaleur situées à l'intérieur d'un compartiment fermé

Dans cette situation, la source de chaleur qui va générer la convection naturelle peut se trouver placée à l'intérieur de l'enceinte. Il peut s'agir d'un cylindre de section carrée, **Ménard (2005)**, **Leplat et al. (2008, 2009)**, ou circulaire, **Dong et Li (2004)**, faiblement ou fortement chauffé placé au centre d'une enceinte carrée ou rectangulaire ou une plaque isotherme, **Altac et Konrat (2009)**, Figure (1.2).

Dans les travaux de **Desrayaud et Lauriat (1993)** et de **Bouafia et Daube (2007)** la chaleur était apportée par une ligne source placée à l'intérieur d'une enceinte rectangulaire. Quelquefois les sources sont multiples comme dans les travaux de **Barozzi et Corticelli (2000)** où le chauffage était réalisé par un bloc rectangulaire situé au centre de l'enceinte. Les autres parois sont généralement adiabatiques ou maintenues à température constante.

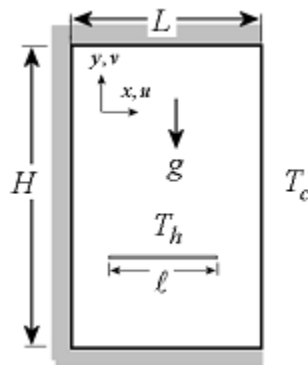


Figure 1.2 : Exemple de cavité fermée contenant une plaque isotherme, refroidie par une paroi latérale. Les trois autres parois sont adiabatique, **Altac et Konrat (2009)**

Dans de nombreux études, les auteurs observaient que le nombre de Grashof  $G_r = \frac{g\beta\Delta T_0 H^3}{\nu^2}$  était le paramètre fondamental. Les résultats montraient une multiplicité de régimes d'écoulements avec l'existence de cellules aussi bien horizontales que verticales. Le transfert de chaleur était très sensible aux caractéristiques et aux positions des sources de chaleur.

### 1.1.2 Compartiment ouvert en présence de convection naturelle

Il existe peu de travaux correspondant à des situations où la convection naturelle est présente à l'intérieur de l'enceinte et induit des échanges convectifs non forcés avec l'extérieur. Ce type de situation étudié par **Abib et Jaluria (1988)** en 2D, **Auban et al. (2001)**

et **Bouzinaoui et al. (2005)** montrait une influence de l'ouverture surtout significative à grand nombre de Rayleigh. **Yu et Joshi (1997)**, **Jilani et al. (2002)** étudiaient par une approche numérique la convection naturelle générée dans une enceinte ventilée par une source de chaleur située sur l'une des parois verticales. **Desrayaud et Lauriat (2004)** développaient une étude numérique de la convection naturelle dans une enceinte ayant une paroi verticale froide et qui communiquait par deux ouvertures avec un réservoir infini d'air chaud. Pour des raisons à la fois hydrodynamiques et thermiques ils devaient considérer un domaine de calcul étendu à proximité de l'ouverture. Dans ce type de situations les nombres de Grashof  $G_r$  ou de Rayleigh  $R_a$  étaient les paramètres caractéristiques et les champs de vitesse et de température étaient très sensibles aux emplacements des ouvertures.

### 1.1.3 Compartiment ouvert en présence de convection mixte

Il existe plus de travaux, principalement numériques, dans lesquels des écoulements de convection naturelle sont générés à l'intérieur de l'enceinte par des sources de chaleur et caractérisés par un nombre de Rayleigh ou de Grashof (parois internes à flux ou températures imposées). Ils sont considérés en présence d'un écoulement de fluide extérieur injecté par une des ouvertures de l'enceinte et caractérisé par un nombre de Reynolds  $R_a = \frac{UL}{\nu}$ . Cet écoulement entrant peut être vertical et avoir la même direction ou s'opposer à l'écoulement créé par la flottabilité. Il peut également être perpendiculaire à cet écoulement.

Dans les situations où l'enceinte comportait deux ouvertures verticales, la ou les parois actives étaient généralement verticales et uniformément chauffées, les parois horizontales adiabatiques et l'écoulement injecté dans l'enceinte pouvait être horizontal, **Neiswanger et al. (1987)**, **Raji et Hasnaoui (1998)**, **Deng, Zhou, Mei et Shen (2004)**, **Beya et Lili (2007)** ou vertical, **Angirasa (2000)**, **Zermane et al. (2005)**, **Sourtiji et al. (2011)**. Dans d'autres expériences, l'écoulement injecté était horizontal et les parois verticales étaient différentiellement chauffées, **Simoneau et al. (1989)**, **Angirasa (2000)**, ou en présence de sources de chaleur localisées, **Papanicolaou et Jaluria (1990, 1993)**, **Ghasemi et Aminossadati (2008)**.

Certains auteurs ont étudié particulièrement dans le cas d'écoulements horizontaux ou verticaux l'influence sur les champs de vitesse, de pression et de température de la position relative des ouvertures d'entrée et de sortie (entrée basse-sortie basse, entrée basse-sortie haute...), **Rahman et al. (2007, 2009)**, **Raji et Hasnaoui (1998, 2000)**. Ils recherchaient les géométries qui permettaient de favoriser le transfert de chaleur sans pénaliser la perte de charge. Le passage dans cette situation de la convection forcée à la convection naturelle est caractérisé par le rapport  $\frac{Ra}{Re^2 Pr} = \frac{g\beta\Delta T_0 H}{H^2}$  (rapport entre les forces de flottabilité et les forces d'inertie) qui selon les auteurs prend le nom de nombre d'Archimède  $A_r$ , **Schmeling et al. (2011)** ou nombre de Richardson, **Ghasemi et Aminossadati (2008)**. Dans le cas de la convection forcée seules, **Saeidi et Khodadadi (2006)** étudiaient l'effet de la position de l'ouverture de sortie sur la perte de charge, le nombre de Nusselt et la taille des vortex présents dans l'enceinte. Dans les situations où l'enceinte comportait des ouvertures multiples, les géométries rencontrées étaient plus diverses. Pour **Saha et al. (2006)**, l'enceinte rectangulaire possédait un plancher délivrant un flux de chaleur constant et l'écoulement entrant pénétrait dans l'enceinte par une ouverture située à la base de la paroi verticale gauche et pouvait quitter l'enceinte par les ouvertures situées au sommet des parois verticales. **Costa et al. (1999)** s'intéressaient à la convection mixte générée par deux jets de parois non isothermes injectés verticalement à la paroi et horizontalement au plafond dans une enceinte où les parois étaient maintenues à température constante.

Dans le cas de l'étude numérique de **Zhao et al. (2011)**, l'enceinte possédait deux parois verticales maintenues à une température  $T_h$  tandis que le plancher et le plafond étaient adiabatiques. L'écoulement de température  $T_c$  était injecté avec un angle  $\varphi$  égal à  $0^\circ$ ,  $20^\circ$ ,  $45^\circ$  ou  $70^\circ$  par deux ouvertures situées symétriquement au sommet des parois verticales de l'enceinte et sortait par deux ouvertures situées à la base de celles-ci. Leurs résultats montraient qu'avec ces angles et selon les valeurs des nombres de Richardson et de Reynolds des régimes stationnaires, périodiques, quasi périodiques ou turbulents pouvaient être obtenus.

Dans les travaux précédents, la convection naturelle était créée par des variations de température. Dans d'autres situations, la convection naturelle est générée par des différences de densité. C'est la situation étudiée analytiquement et numériquement par

**Prasad, Pitts et Yang (2010)** dans le cas d'une enceinte rectangulaire disposant de deux ouvertures inférieure et supérieure situées sur les deux parois verticales latérales et alimentée à sa base par une source d'hydrogène. Dans d'autres travaux, la convection naturelle pouvait avoir une double origine (source de chaleur et de contaminant). **Beya et Lili (2007)** étudiaient numériquement ce cas dans une enceinte disposant de deux ouvertures. En gardant le nombre de Reynolds constant et en faisant varier le nombre de Prandtl, ils observaient des régimes oscillatoires.

## 1.2 Ventilation

En parallèle des travaux précédents axés sur la thermique, d'autres études plus orientées sur la ventilation des constructions se sont également intéressées aux écoulements et aux champs thermiques à l'intérieur d'une enceinte fermée ou ventilée. Ces études concernaient, par exemple, l'existence ou non d'une stratification thermique créée par une source de chaleur localisée ou étendue placée à la base d'une enceinte confinée. L'aspect non stationnaire peu abordé dans les études précédentes était également étudié par la recherche du temps de vidange ou de remplissage d'un local.

### 1.2.1 Compartiment fermé en régime de convection naturelle

La stratification produite par un point source de pure flottabilité dans une enceinte non ventilée, de hauteur  $H$  et de rayon  $R$ , contenant initialement de l'air à température uniforme a été considérée par **Baines et Turner (1969)** dans leur expérience connue sous le nom de « filling box ». Leurs expériences montraient que lorsque  $H/R < 1$  le panache créé par cette source atteint le plafond, s'étale et forme une couche d'air chaud séparée de la couche inférieure d'air froid par une interface horizontale. Il en résulte qu'au cours du temps le panache qui traverse cette couche chaude arrive à une température plus élevée que précédemment, ce qui entraîne l'existence d'une stratification croissante. Dans ces conditions, la position du front au-dessus du niveau du sol variait en fonction du temps  $t$  (temps après que le panache ait atteint le plafond) selon la relation :  $\frac{z_0}{H} = \left[ \frac{4\alpha}{5} \left( \frac{18\alpha}{5\pi} \right)^{\frac{1}{3}} \frac{tH^{\frac{2}{3}}B_0^{\frac{1}{3}}}{R^2} + 1 \right]^{\frac{1}{2}}$  où  $B_0$  est le flux de flottabilité et  $\alpha \approx 0,083$  est le coefficient d'entraînement proposé par **Turner (1986)**. Dans ce type de configuration, le rapport d'aspect  $H/R$  est un paramètre important et correspond

au rapport des forces d'inertie à celles de flottabilité. Pour des valeurs  $1 < H/R < 5,8$  les enroulements « overturning » présents près des parois latérales pour  $H/R > 1,5$  induisent un entrainement d'air supplémentaire qui a pour effet d'épaissir la couche supérieure, **Kaye et Hunt (2007)**. Pour des valeurs encore plus élevées du rapport d'aspect,  $H/R > 5,8$ , **Barnett (1991) cité par Hunt et al. (2001)** a montré que le panache n'atteint plus le plafond et est détruit par le cisaillement. Cependant, l'hypothèse de panache pur choisie par **Baines et Turner (1969)** a été trouvée trop restrictive par **Hunt et al. (2001)** qui ont généralisé cette approche en considérant une source réelle comprenant à la fois un débit initial de flottabilité  $B_0$  et de quantité de mouvement  $M_0 = Q_0 U_0$ . Ils définissaient une longueur adimensionnelle de jet  $\frac{L_J}{H} = \frac{M_0^{3/4}}{H B_0^{1/2}}$ . Cela leur permettait de séparer le cas du jet pur où  $\frac{L_J}{H} \rightarrow \infty$  pour lequel en raison du mélange, l'enceinte reste non stratifiée, du cas du panache pur avec où  $\frac{L_J}{H} \rightarrow 0$  l'enceinte est stratifiée.

## 1.2.2 Compartiment avec des ouvertures en régime de convection naturelle

### 1.2.2.1 Compartiment présentant une ouverture

Dans le cas où un compartiment de hauteur  $H$  se trouve à une température  $T_1$  plus élevée que la température  $T_2$  de son environnement et qu'il dispose d'une ouverture de section  $A$  située dans sa partie haute, **Figure(1.3)**, **Linden (1999)** a montré que la ventilation se fait par mélange (« mixing ventilation »). Elle se produit car l'air froid pénètre dans l'enceinte en partie haute et va refroidir le volume intérieur. Il existe un débit volumique  $Q = C_D A (g'H)^{1/2}$  qui traverse l'ouverture, induit par la différence de pression entre l'intérieur et l'extérieur. Cette situation peut être facilement modélisée en supposant que l'écoulement entrant permet de maintenir l'air intérieur bien mélangé. La température de ce volume  $V$  dans lequel existe initialement une gravité réduite va alors diminuer et tendre vers zéro selon la loi :  $g'(t) = g'_0 (1 + \frac{t}{\tau})^{-2}$  où le temps de mélange  $\tau = \frac{2V}{C_D A} (g'_0 H)^{-1/2}$ .

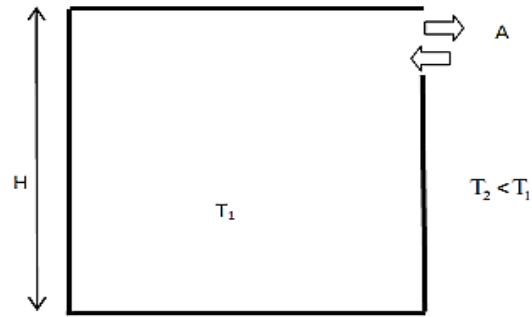


Figure 1.3 : Schéma de principe de la ventilation par mélange

### 1.2.2.2 Compartiment présentant deux ouvertures

Dans la même situation initiale, mais quand le compartiment dispose de deux ouvertures situées respectivement en parties haute et basse du compartiment et séparées de  $H$  dans la direction verticale, on parle de ventilation par déplacement, Figure (1.4). L'air chaud qui sort de l'enceinte par l'ouverture supérieure est remplacé par de l'air froid extérieur pénétrant dans l'enceinte par l'ouverture inférieure, **Linden (1999)**. L'espace intérieur est ainsi divisé en une zone froide de hauteur  $h$  et une zone chaude de hauteur  $(H-h)$ . Le temps de vidange de cette enceinte contenant initialement de l'air chaud peut être calculé à partir du débit volumique  $Q = A^*(g'(H-h))^{\frac{1}{2}}$ . Dans ce cas, la hauteur de la zone froide évolue selon la loi :  $\frac{h}{H} = 1 - (1 - \frac{t}{t_e})^2$  où  $t_e = \frac{2 * S(H/g')^{\frac{1}{2}}}{A^*}$  et  $A^* = \frac{C_D A_E A_S}{(0,5(A_g^2 + A_s^2))^{1/2}}$  est la section effective des ouvertures inférieure et supérieure. Ce type de ventilation est généralement plus rapide que la ventilation par mélange car  $\frac{t_e}{\tau} \approx C_D \approx 0,6 - 0,7$  pour la majorité des ouvertures.

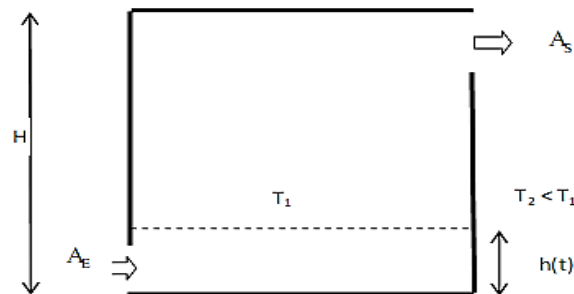


Figure 1.4 : Schéma de principe de la ventilation par déplacement



En présence d'une source continue de flottabilité comme une source de chaleur placée à la paroi inférieure de l'enceinte, il est possible de parvenir à une solution stationnaire. Toutefois le résultat obtenu en termes de stratification ou de mélange ne dépendra pas uniquement de la puissance injectée mais également de la distribution spatiale de cette puissance. **Thomas et al. (1963)**, **Linden et al. (1990)** ont étudié cette situation pour une source ponctuelle de flottabilité. Dans ce cas, il existe un régime de déplacement et une stratification se développe, caractérisée par deux couches séparées par une interface horizontale. La couche inférieure est à la température ambiante et la couche supérieure se trouve à une température uniforme plus élevée qui va dépendre du débit de flottabilité au niveau de la source. La hauteur adimensionnelle de l'interface  $\xi = h/H$  est indépendante de ce débit et est donnée par la relation

$$\frac{A^*}{H^2} = C^{\frac{1}{2}} \left( \frac{\xi^5}{1-\xi} \right)^{1/2}$$

La constante donnée par Morton (1956) a pour valeur  $C = \frac{6}{5} \alpha \left( \frac{9}{10} \alpha \right)^{1/3} \pi^{2/3}$  et  $\alpha \approx 0,083$  est la constante d'entraînement du panache. Toutefois **Fitzgerald et Woods (2004)** montrent que si l'ouverture inférieure se trouve située à une hauteur plus élevée ou la surface effective des ouvertures est plus faible, une situation différente peut exister. Dans ce cas, la couche inférieure se trouve à une température supérieure à la température extérieure et le débit entrant est égal à celui qui existerait avec une source distribuée. Dans le cas d'une source étendue, **Gladstone et Woods (2001)** montrent qu'une situation bien mélangée se produit et que pour une même puissance la source pariétale induit un plus grand débit entrant que la source ponctuelle. En présence simultanément d'une source ponctuelle et d'une source étendue, **Hunt et al. (2001)** ont montré qu'une situation stratifiée existe lorsque que le flux de flottabilité de la source ponctuelle est supérieur à environ 1/6 du flux de flottabilité de la source étendue.

**Fitzgerald et Woods (2004)** étudient la ventilation naturelle de manière théorique et expérimentale en présence d'un compartiment dont le plancher est chauffé et qui dispose d'ouvertures multiples à différentes hauteurs. Les écoulements sont entrants pour les ouvertures situées en dessous du plan neutre de flottabilité et sortants pour celles situées au-dessus. Ils mettent en évidence l'influence de la taille de la source sur la stratification.

### 1.2.3 Compartiments présentant deux ouvertures en régime de convection mixte

#### 1.2.3.1 Expérience de Woods, Caulfield et Phillips (2003)

La prise en compte d'un apport de masse pour la source de flottabilité a permis à **Caulfield et Woods (2002)** de montrer que dans le cas d'un compartiment muni d'une seule ouverture située au niveau de la source on obtenait un régime bien mélangé. **Woods et al. (2003)** ont étudié par la suite le cas d'un compartiment muni de deux ouvertures haute et basse séparées dans la direction verticale par une distance  $H$  et alimenté par cette source de masse et de flottabilité, **Figure (1.5)**. Ils montraient que la ventilation par déplacement n'était pas l'unique mode de ventilation et qu'il existait également dans ce cas un régime bloqué où les écoulements sortaient par les deux ouvertures.

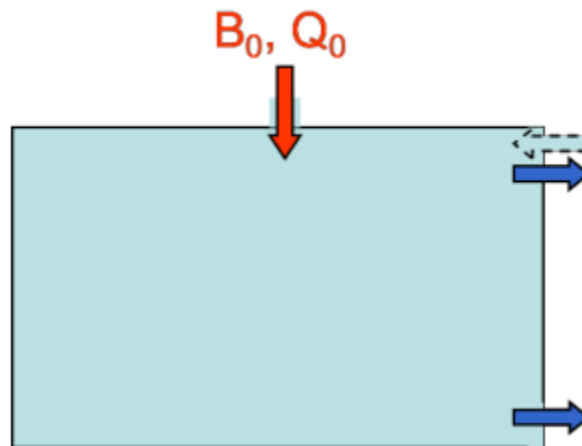


Figure 1.5 : Schéma de l'expérience de Woods et al. (2003). Une solution saline est injectée (débit de flottabilité  $B_0$  et volumique  $Q_0$ ) par le plafond d'une enceinte disposant de deux ouvertures.

#### 1.2.3.2 Expérience du CORIA (2008)

Parallèlement aux travaux de **Woods et al. (2003)**, une étude expérimentale similaire a été développée au CORIA. Les deux études se distinguent par la densité du fluide injecté dans l'enceinte, plus lourde que le fluide ambiant à Cambridge, plus légère à Rouen. Au CORIA le travail était réalisé au moyen d'une enceinte parallélépipédique en communication avec l'extérieur par deux ouvertures rectangulaires verticales S et E, de sections  $A_S$  et  $A_E$ , situées

respectivement en parties haute et basse de l'enceinte, Figure (1.6). Cette enceinte était alimentée à sa base par un panache forcé d'air chaud de débit volumique  $Q_0$  et  $T_0$  de température injecté verticalement par une buse rectangulaire de section  $A_0$ . Quand ce panache forcé se développe, il chauffe progressivement l'intérieur de l'enceinte et modifie les conditions de pression entre l'intérieur et l'extérieur de celle-ci. Selon les valeurs de  $Q_0$ ,  $T_0$  et des dimensions des ouvertures on pouvait observer, quand le régime stationnaire était atteint, différents régimes d'écoulements. Le régime de déplacement que nous appelons également régime naturel est caractérisé par un écoulement entrant par E et sortant par S. Dans le régime bloqué, les écoulements sortent à la fois par E et S. Enfin entre ces deux régimes, en raison de la taille non négligeable de l'ouverture inférieure il existait également un régime intermédiaire où l'écoulement est toujours sortant par S mais est entrant par le bas de E et sortant par le haut de E, **Allano et al. (2008)**.

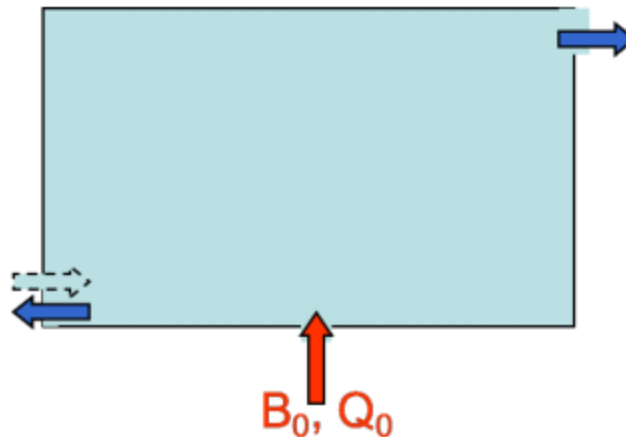


Figure 1.6 : Schéma de l'expérience du Coria, **Allano et al. (2008)**. De l'air chauffé est injecté (débit de flottabilité  $B_0$  et volumique  $Q_0$ ) à la paroi d'une enceinte disposant de deux ouverture

Une approche analytique menée pour des écarts de température  $\Delta T_0 = T_0 - T_{ext}$  relativement faibles a permis de montrer que les régimes d'écoulement dans l'enceinte pouvaient être caractérisés par un nombre de Froude densitométrique  $\overline{Fr}_H = Q_0^2 / (\overline{\Delta\rho}_H / gH(C_S A_S)^2)$  où  $Q_0$  est le débit volumique injecté,  $H$  la hauteur de l'enceinte,  $\overline{\Delta\rho}_H$  la différence de masse volumique moyenne entre l'intérieur et l'extérieur de l'enceinte,  $A_S$  la section de l'ouverture supérieure et  $C_S$  le coefficient du débit sortant par l'ouverture supérieure, **Paranthoën et Gonzalez (2010)**. Cette analyse montrait que la ventilation était naturelle pour

$\overline{Fr_H} > 2$  et bloquée pour  $\overline{Fr_H} < 2$ . La relation donnée par **Woods et al. (2003)** était retrouvée dans le cas limite où la température à l'intérieur de l'enceinte était égale à la température de l'air chaud injecté.

### 1.3 Incendie

Le domaine des feux de compartiment représente un autre domaine où l'on s'intéresse également au développement d'écoulements chauffés dans des enceintes ventilées ou étanches. Ces enceintes étanches peuvent cependant devenir rapidement ventilées quand des ouvertures sont provoquées par l'incendie lui-même ou par l'intervention des services de secours. Il est à noter que dans cette situation, les mouvements de l'air et des gaz de combustion ont une importance significative. En effet, dans certaines phases de l'incendie, ils peuvent contrôler en partie le développement du feu, **Steckler et al. (1982)**, l'air extérieur apportant l'oxygène nécessaire à la combustion. Par ailleurs ces écoulements transportent des fumées chaudes et toxiques qui réduisent fortement la visibilité.

Au cours du développement du feu qui est fortement instationnaire, on identifie généralement différentes phases : allumage, croissance, embrasement généralisé, feu pleinement développé et décroissance, **Karlsson et Quintiere (2000)**. **Cooper (1998)** décrit ainsi ce développement du feu dans un compartiment. Après l'allumage, le feu va croître et produire une flamme de plus en plus énergétique dont le développement se fera initialement sans interaction avec le compartiment. Les gaz chauds de combustion produits par cette flamme entourés par de l'air plus froid vont s'élever en raison des effets de flottabilité en produisant un panache qui entraîne l'air environnant. Ce panache va impacter le plafond, former un jet de plafond et atteindre les murs qui vont le forcer à redescendre. Toutefois, en raison de leur température élevée, ces gaz chauds vont à nouveau s'élever et former une couche chaude sous le plafond. Au cours du temps cette couche chaude va s'épaissir, sa température va croître entraînant une augmentation des transferts de chaleur et conduisant à un embrasement généralisé du compartiment. La présence d'ouvertures au début de l'incendie ou créées par destruction aura une grande importance car elle facilitera l'évacuation des fumées par le haut de l'ouverture mais permettra un apport d'air extérieur par le bas de l'ouverture. La phase de feu pleinement développée pourra durer tant que le combustible et

l'oxygène seront disponibles. Ensuite le feu entrera dans une phase de décroissance où le feu sera contrôlé par le combustible. On peut noter que dans les phases initiales du feu, les écoulements présents dans les incendies de compartiment ont de fortes analogies avec ceux décrits par exemple dans l'expérience de la « filling box ».

L'intérêt porté à la connaissance de l'incendie a encouragé depuis plusieurs décades le développement de nombreuses études expérimentales et numériques pour simuler et comprendre le développement d'un feu de compartiment.

### 1.3.1 Approches numériques

Les approches numériques se divisent généralement en modèles à zones et en modèles de champs.

Le modèle à une zone introduit par **Kawagoe (1958)** pour un feu post embrasement généralisé lui a permis de constater que le débit volumique à l'ouverture était proportionnel à  $AH^{\frac{1}{2}}$ .

Les modèles à deux zones supposent que le compartiment en feu peut être divisé en deux zones supérieure et inférieure homogènes en température et en composition séparées par un plan horizontal, **Thomas (1963)**, **Zukoski (1978)**. On ignore dans ce cas, les différences de vitesse dans chaque zone mais on suppose que la zone supérieure est alimentée par l'air entraîné par le panache du foyer au niveau de l'interface. Ces modèles permettent de calculer les vitesses moyennes de l'air et des produits de combustion sortant et entrant dans le compartiment, **Quintiere (1989)**, **Remesh et Tan (2006, 2007)**.

Dans les modèles à champs (CFD), on résout les équations de conservation de la masse, de quantité de mouvement, de l'énergie et des espèces chimiques en un très grand nombre de points à l'intérieur du compartiment. Les équations considérées peuvent être moyennées (RANS), **Stavrakakis et Markatos (2009)**, filtrées (LES) ou résolues (LES). Des sous-modèles pour la turbulence, la combustion et le rayonnement doivent être intégrés à ces modèles. Parmi tous les modèles existants qui peuvent s'appliquer au cas des feux de compartiments citons parmi les principaux : FDS développé par le NIST (**McGrattan et al. 2002**), SMARTFIRE de l'Université de Greenwich (**SMARTFIRE 1998**), SOFIE de

Cranfield University, **Rubini (1997)**, ISIS développé par l'IRSN, **Suard et al. (2006)** et FIRE FOAM Open Foam.

### 1.3.2 Approches expérimentales

Il existe de nombreuses approches expérimentales. Selon les approches choisies, la source qui simule le foyer d'incendie est un foyer réel, un bruleur à gaz, un bac contenant du combustible liquide ou une source purement thermique ou de gaz léger, **Lucchési (2008)**, **Vauquelin et al. (2009)**, **Besnard (2010)**, généralement placée dans une enceinte parallélépipédique avec une ouverture.

Dans les études précédentes les ouvertures étaient verticales, dans le cas où le compartiment en feu possède une ouverture horizontale située au plafond, l'écoulement de gaz chaud sortira si la pression intérieure est supérieure à la pression extérieure et si une ouverture existe au niveau du plancher. Cette situation est alors similaire au phénomène de ventilation par déplacement décrit précédemment. Quand il n'y a qu'une ouverture horizontale au plafond, il existe une valeur critique pour la différence de pression à travers l'ouverture, **Jaluria et al. (1995)**, **Tan et Jaluria (2001)**, **Li et al. (2002)**. Quand la différence de pression est supérieure à  $\Delta p_c$  l'écoulement est unidirectionnel vers le haut. Dans le cas où elle est inférieure à  $\Delta p_c$  mais positive, il existera un écoulement bi directionnel.

## 1.4 Synthèse

Les travaux que nous avons recensés dans plusieurs domaines montrent que le cas d'une enceinte ventilée en présence de gaz chauds peut exister et a été étudiée dans des situations diverses. Ces différentes situations se distinguent par l'emplacement des ouvertures, le positionnement et la nature de la source de chaleur (paroi chauffée, obstacle chauffé, écoulement chauffé, foyer d'incendie). Quand les forces de flottabilité sont relativement importantes, les échanges avec l'extérieur par les ouvertures sont généralement contrôlés par les différences de pression hydrostatique, c'est ce que montrent un certain nombre d'études de ventilation ou d'incendie de compartiments, **McCaffrey, et Rockett (1977)**, **Linden (1999)**. Quand les forces d'inertie sont prédominantes, ces échanges sont généralement contrôlés par la présence d'un écoulement entrant imposé qui doit cependant composer avec l'effet des parois ou d'obstacles chauffés. Les panaches associés aux sources de chaleur peuvent induire

uniquement un écoulement de convection naturelle, c'est le cas pour un corps chauffé électriquement. Pour un écoulement chauffé ou un foyer d'incendie, il existe en plus de la source de chaleur une source de masse correspondant aux produits de combustion produits mais la majeure partie des écoulements présents est composée d'air entraîné par le panache. Les écoulements chauffés présents dans des domaines ouverts (jets, couches limites, sillages, turbulence de grille) concernent des écoulements qui ont généralement des caractéristiques bien individualisées. Dans les enceintes fermées ou ventilées en raison du confinement on est plus souvent en présence de différentes sortes d'écoulements. Dans le cas des enceintes étanches, on observe des couches limites chaudes ou froides, associées à une ou plusieurs grandes zones de recirculations internes. Dans les enceintes ventilées, on peut rencontrer à l'intérieur des couches limites, panaches, jets de plafond, jets pariétaux, et à l'extérieur des jets entrant ou déversant. Les régimes d'écoulements et les champs thermiques associés sont souvent étudiés et les transferts de chaleur aux parois caractérisés par un nombre de Nusselt. Les couplages vitesse-température et leurs corrélations sont relativement peu abordés. Les conditions aux limites peuvent être fixées ou libres et les transferts de chaleur aux parois sont majoritairement étudiés de manière numérique. Si les situations stationnaires sont considérées dans les problèmes thermiques les aspects instationnaires sont abordés dans les situations d'incendie, de chauffage ou de ventilation de locaux.

## 1.5 Situation numérique étudiée

Pour essayer d'apporter quelques réponses aux nombreuses questions évoquées dans ce chapitre nous avons mené une étude numérique concernant les écoulements présents dans une enceinte ventilée alimentée par un mélange (air-hélium). Cette étude numérique a été réalisée au moyen d'une maquette de forme parallélépipédique. Celle-ci est représentée sur la Figure (1.7). Elle dispose de deux ouvertures rectangulaires. La première ouverture E, située en partie basse, a une section  $A_E$  et affleure le plancher. La seconde ouverture S, située en partie haute sur la face latérale opposée, a une section  $A_S$  et affleure le plafond. Cette enceinte est alimentée par un écoulement d'un mélange (air-hélium) par une buse rectangulaire qui occupe le fond de l'enceinte. Le débit massique et la différence de densité de cette source de masse sont ajustables. L'étude présentée dans ce mémoire fournit des informations sur les régimes d'écoulements et les champs dynamiques au niveau des ouvertures





# CHAPITRE 2

Description de l'outil numérique utilisé

## 2.1. Description de l'outil numérique utilisé

### 2.1.1 Introduction

Ces dernières années, l'évolution de plusieurs codes de calcul a pris un élan important. Les différences entre ces codes résident dans les difficultés à surmonter pour chaque code. Ils sont utilisés pour résoudre des problématiques liées à plusieurs phénomènes physiques, on cite par exemple l'incendie et la propagation des fumées.

Actuellement, les codes utilisés pour la modélisation de l'incendie en milieu confiné sont classés en deux grandes familles : **Les codes dits à zones** qui sont basés sur une simplification tirée d'observations expérimentales.

**Les codes à champ** ou codes dits "CFD" (Computational Fluid Dynamics) qui sont basés sur la résolution complète des équations de la mécanique des fluides. Un code à champ tel que FDS développé par le NIST (National Institute of Standard and Technology, USA), présente une mise en œuvre plus complexe qu'un code à zone. Un tel logiciel permet une modélisation adéquate du développement de l'incendie et de la propagation des fumées.

Dans notre cas, le code FDS 5 (Fire Dynamics Simulator) associé à SmokeView est utilisé pour réaliser la série de simulations et visualiser les résultats.

### 2.1.2 Présentation du Code de calcul « FDS » (version 5.5.3)

FDS en tant que code de calcul se basant sur la résolution des équations de Navier Stokes à faible nombre de Mach, permet de simuler la propagation de fumée issue d'un incendie. Il utilise le modèle « LES » (Large Eddy Simulation) pour prendre en charge la turbulence.

### 2.1.3 Domaines d'exploitation du logiciel

FDS peut être exploité dans des domaines multiples. On cite à titre d'exemples :

- Transport de la chaleur et des produits de combustion à faible vitesse
- Transferts de chaleur entre les solides et les gaz
- Pyrolyse
- Développement du feu
- Propagation du feu

- Activation d'extincteurs de feu et détecteurs de la chaleur

### 2.1.4 Comment utiliser FDS

La création du domaine de calcul et la définition des conditions de simulation (maillage, conditions aux limites, emplacement de la source....) sont réalisées en éditant un fichier texte en utilisant le bloc-notes Windows ou Word Pad. L'exécution du calcul ainsi que la récupération des résultats des simulations se font sous l'invite de commande.

FDS comme tous les logiciels CFD passe par trois étapes pour simuler un phénomène : le Pré- processeur qui est un fichier d'entrée de type texte sur lequel on spécifie la géométrie et les conditions aux limites, ce fichier sera compilé et exécuté par le solveur qui est dans ce cas FDS. Les résultats des simulations peuvent être visualisés sur le Post- Processeur qui est un programme associé appelé Smokeview, **figure (2.1)**.

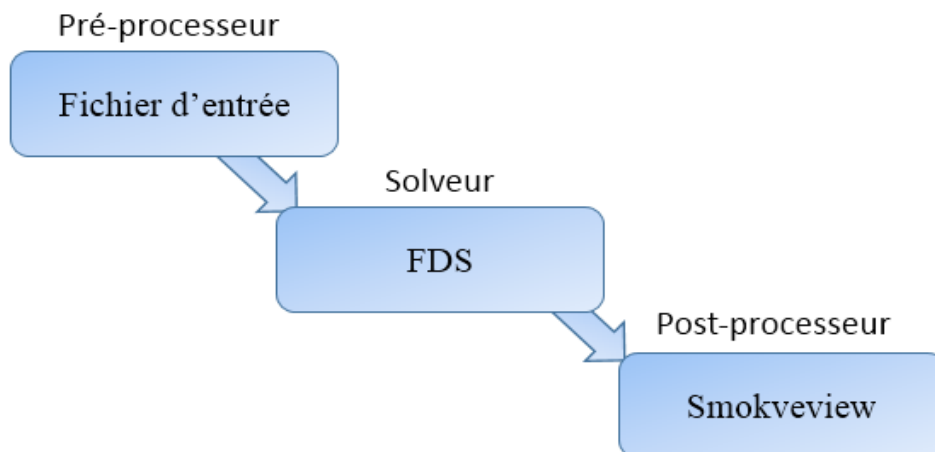


Figure 2.1 Schéma de fonctionnement de FDS.

## 2.1.5 Modèles mathématiques présents dans FDS

### 2.1.5.1 Modèle Hydrodynamique

FDS résout une forme d'équations de Navier-Stokes appropriées aux écoulements à faible vitesse. Ces écoulements chargés de fumée, transportent la chaleur. Les équations de base utilisées pour le développement du code **FDS** se résument en :

- Conservation de la masse :

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{u}) = 0 \quad (2.1)$$

- Conservation de la quantité de mouvement :

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \vec{u}) + \nabla \cdot \rho \vec{u} \vec{u} + \nabla \cdot P = \rho \vec{f} + \nabla \cdot \tau_{ij} \quad (2.2)$$

- Equation d'état pour les gaz parfaits :

$$PV = nRT \quad (2.3)$$

Puisque il est difficile de trouver une solution analytique à ce système d'équations, la solution exige l'usage des méthodes numériques où le volume d'étude est divisé en une grille tridimensionnelle constituée de petits cubes (cellules de la grille). Le modèle calcule les conditions physiques dans chaque cellule en fonction de temps.

L'algorithme utilisé est un algorithme explicite de type prédiction-correction d'une précision du second ordre en espace et en temps.

Il est aussi possible d'exécuter une résolution en mode DNS (Direct Numerical Simulation) dans FDS. Cependant, les simulations avec DNS exigent un maillage très fin, ce qui nécessite des ressources informatiques importantes.

### 2.1.5.2 Modélisation en utilisant la technique LES

Une des approches ayant reçu une large part de développement ces 40 dernières années est la simulation des Grandes Echelles. L'initiateur de cette approche est Smagorinsky, il propose de considérer les contributions aux grandes échelles (Les grands courants atmosphériques). Cette approche résout les équations de Navier-Stokes instationnaires pour tous les mouvements de taille supérieure à une échelle fixée par le maillage disponible. Pour ce

faire, on est amené à filtrer les équations pour ne simuler que les grosses structures porteuses de l'énergie et caractéristiques de l'écoulement. Les petites structures des zones inertielles et dissipatives sont modélisées par des modèles types sous maille. Cette approche, formalisée par Léonard, fait apparaître des termes supplémentaires de tension de sous maille qui correspondent aux interactions entre grosses et petites structures. L'étude de ces interactions montre qu'elles ont deux rôles : d'une part elles régissent le flux d'énergie à travers la coupure entre les grandes échelles et les échelles des sous mailles et d'autre part, elles contribuent à la diffusion visqueuse.

## 2.2 Définition de la problématique

Cette étude consiste à définir la transition du régime d'écoulement dans une enceinte à deux ouvertures et une source de masse. Elle concerne un problème de ventilation par déplacement dans un local.

### 2.2.1 Maquette thermique :

Nous avons réalisés des simulations numériques sur une maquette de forme parallélépipédique ( $L \times l \times H$ ). Celle-ci est représentée sur la figure (2.2). Elle dispose de deux ouvertures rectangulaires. La première ouverture **E**, située au niveau de la partie basse, a une section ( $A_E = l \times H_E$ ). La seconde ouverture **S**, située sur la partie haute de la face latérale opposée, a une section ( $A_S = l \times H_S$ ). Cette enceinte est alimentée par un écoulement d'un mélange (**air + hélium**) à travers une buse rectangulaire de section ( $A = l \times D$ ). Le débit massique  $Q_m$  et la différence de densité  $\Delta\rho$  de la source de masse sont ajustables.

L'enceinte parallélépipédique (maquette) possède un volume interne égale à ( $(L = 500 \text{ mm}) \times (l = 250 \text{ mm}) \times (H = 200 \text{ mm})$ ).

Deux ouvertures rectangulaires **E** et **S** de sections  $A_E$  et  $A_S$  situées respectivement en parties inférieure et supérieure des deux faces latérales. Leur largeur de **225 mm**, est fixe et leurs hauteurs sont ajustables entre **0 et 120 mm**. Ces ouvertures relient l'intérieur de l'enceinte au milieu extérieur au repos à la pression et la température atmosphérique.

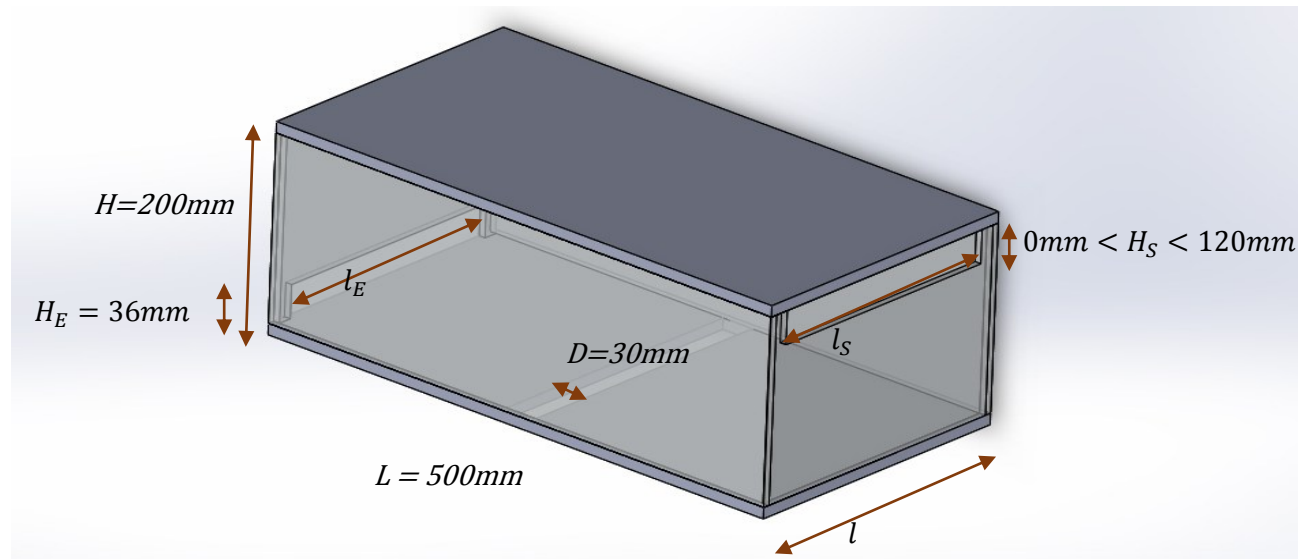


Figure 2.2 : Schéma de la maquette

Cette maquette est alimentée à sa base par un mélange (air-hélium) par une buse rectangulaire.

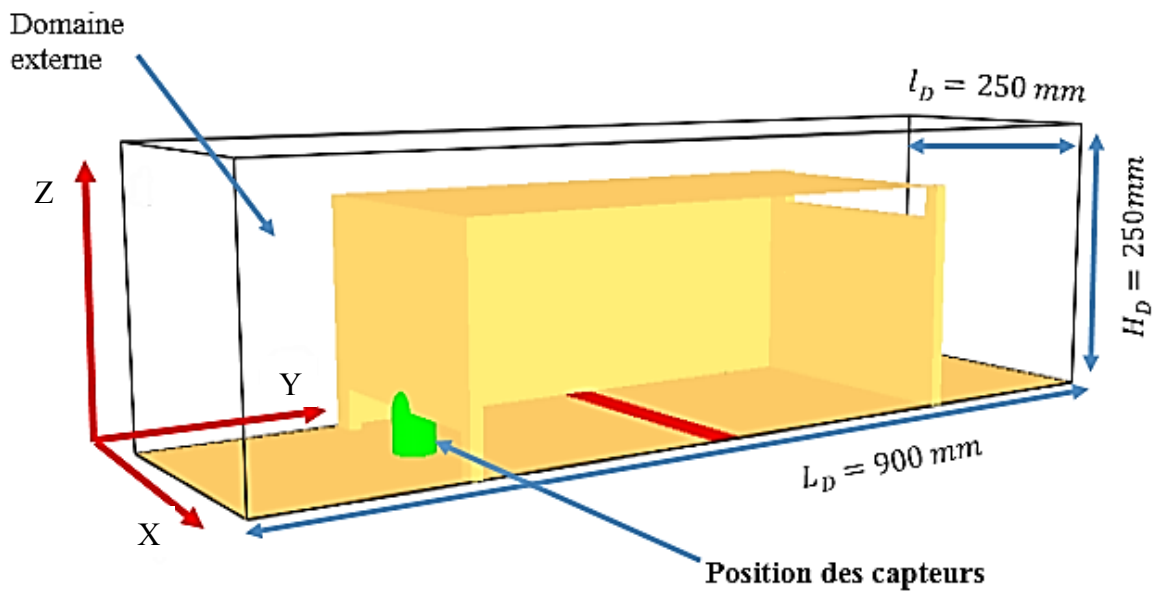


Figure 2.3: Système d'axes utilisés

Sous des conditions données, l'écoulement par l'ouverture inférieure peut être totalement entrant, totalement sortant et en partie entrant et en partie sortant. Cela dépend du régime qui

s'établit dans l'enceinte en fonction des conditions d'injection. Ils sont appelés régimes d'écoulement.

### 2.2.2 Mise en évidence des différents régimes d'écoulement

Pour toutes les hauteurs de l'ouverture supérieure entre 0 mm et 120 mm et les conditions d'injection considérées dans nos simulations, nous avons trouvé que l'écoulement est toujours sortant par l'ouverture supérieure de l'enceinte. Cela est la conséquence directe de la flottabilité.

Le choix est donc porté sur la considération de l'ouverture inférieure d'entrée pour définir les régimes dans l'enceinte.

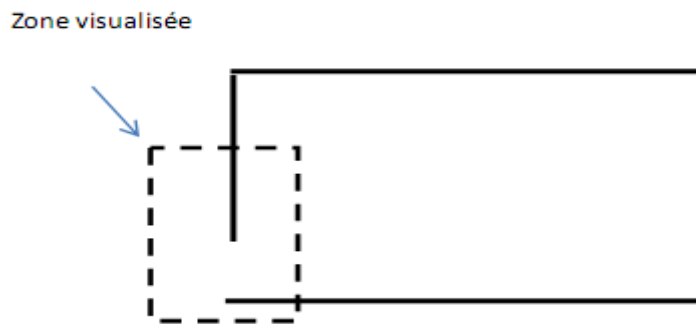


Figure 2.4 : Zone de visualisations des résultats

#### 2.2.2.1 Régime d'écoulement

Dans le cas de la configuration avec  $H_E = 36$  mm fixe et  $H_S$  prise égale à des valeurs entre 0 et 120 mm, nous avons obtenu trois régimes distincts : naturel, intermédiaire et bloqué quand on a varié  $Q_m$  en fonction du temps. Dans la figure (2.5), ces régimes sont illustrés pour  $H_S = 30$  mm et  $\Delta\rho = 0.1\text{kg/m}^3$ .

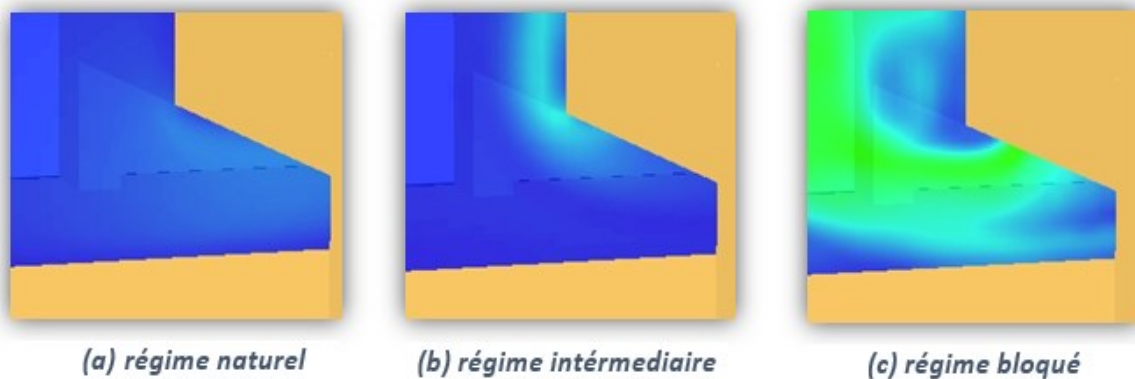


Figure 2.5 : Les trois régimes d'écoulement

La figure 2.5(a) montre le régime naturel, caractérisé par un écoulement totalement entrant. La figure 2.5 (b) montre le régime intermédiaire, caractérisé par un écoulement sortant par la partie supérieure de l'ouverture et entrant par la partie inférieure. La figure 2.5(c) illustre le régime bloqué, caractérisé par un écoulement totalement sortant de l'enceinte. Une visualisation globale de l'enceinte avec les trois régimes d'écoulement est aussi montrée sur la figure (2.6).

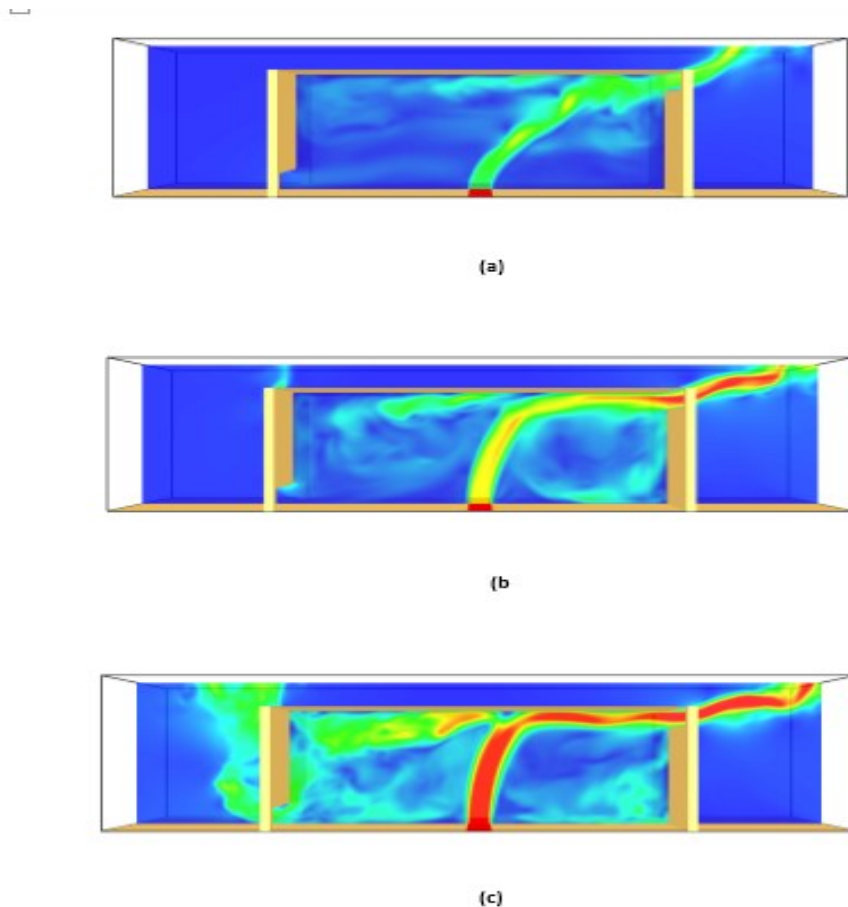


Figure 2.6 : (a) : naturel, (b) : intermédiaire, (c) : bloqué

On a montré que l'apparition des régimes varie en fonction de débit quand les valeurs de  $H_s$  et  $\Delta\rho$  sont variées.

### 2.2.3 Vitesse à l'ouverture

Pour consolider ou valider nos visualisations, nous avons mesuré la vitesse  $V_x$  de l'écoulement au niveau de l'ouverture inférieure. La figure (2.7) montre la variation de cette vitesse en fonction de la hauteur de l'ouverture pour des débits d'injection donnés.



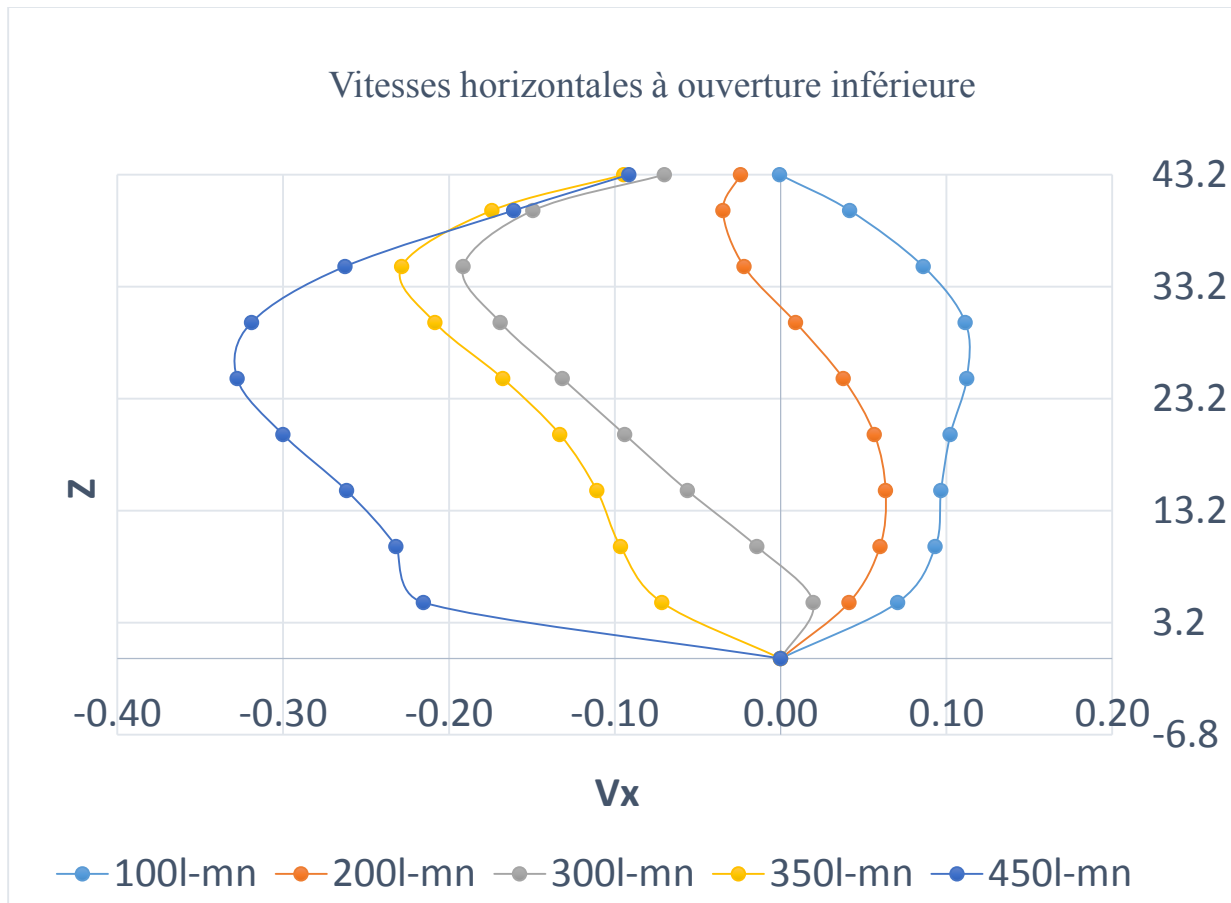


Figure 2.7 : Influence du débit d'injection sur la vitesse à l'ouverture

Les signes des vitesses montrent le sens de l'écoulement : négatives au niveau de l'ouverture inférieure veut dire que le fluide est sortant. Pour le régime naturel représenté par la courbe bleu clair, les vitesses mesurées sont positives. Pour le régime bloqué, courbes jaune et bleu foncé, les vitesses sont négatives. Le régime intermédiaire est montré par la courbe orange, les vitesses sont positives dans la partie inférieure de l'ouverture et négatives dans la partie supérieure.

### 2.3 Analyse analytique des résultats

Par une approche analytique, des corrélations qui montrent la dépendance des régimes obtenus avec les caractéristiques de l'écoulement à l'injection et les données de l'enceinte ont été trouvées

Cette approche consiste à faire varier continuellement le débit d'injection avec le temps et enregistrer les conditions de passage d'un régime à un autre pour des valeurs de  $H_s$  et de  $\Delta\rho$  constantes. Les paramètres des conditions de passage sont corrélés entre eux ; le nombre de Froude et le paramètre géométrique ( $H_s/H$ ) sont introduits.

### 2.3.1 Détermination numérique de la corrélation qui lie le nombre de Froude à l'injection et les paramètres intervenant dans le mode d'écoulement

- Corrélation qui lie le débit adimensionnel à l'injection « $\widetilde{Q}_m$ », la densité « $\frac{\Delta\rho}{\rho_0}$ » et la hauteur « $\frac{H_s}{H}$ ».

On considère la relation généralisée suivante :

$$\widetilde{Q}_m = C \left( \frac{\Delta\rho}{\rho_0} \right)^a \left( \frac{H_s}{H} \right)^b \quad (2.4)$$

Avec

$$\widetilde{Q}_m = \frac{Q_m}{\sqrt{g \cdot L^2 \cdot b^3}} \quad (2.5)$$

$Q_m$  : le débit à l'injection ( $m^3/s$ )

$g$  : la gravité ;

$L$  : la longueur de l'enceinte

$b$  : la demi longueur de la buse

$\left( \frac{\Delta\rho}{\rho_0} \right)^a$  : écart de densité entre la source et le milieu ambiant.

$\left( \frac{H_s}{H} \right)^b$  : paramètre géométrique de l'enceinte.

$C$  : constante.

### 2.3.2 Démarche

Puisque la corrélation est liée à trois variables, nous fixons une variable et nous varions les deux autres afin de déterminer le coefficient « a ». Ce dernier est obtenu à partir de la pente de la droite des résultats des simulations réalisées dans ces conditions, tracée sur une échelle logarithmique.

$$\widetilde{Q}_m = \left( \frac{\Delta\rho}{\rho_0} \right)^a \quad (2.6)$$

Dans la seconde étape, on fixe le paramètre de la densité et on varie le débit et le paramètre géométrique. En procédant de la même manière que dans la première étape, nous obtenons le coefficient « b ».

$$\frac{\widetilde{Q}_m}{\left( \frac{\Delta\rho}{\rho_0} \right)^a} = C \left( \frac{H_S}{H} \right)^b \quad (2.7)$$

#### Remarque :

Cela nous permet d'établir la relation entre ces trois paramètres pour le passage du régime naturelle vers le régime intermédiaire.

Pour le passage du régime intermédiaire vers le régime bloqué on refait la même procédure.

A la fin nous aurons deux relations qui définissent le passage d'un régime à un autre avec différents exposants.

$$\widetilde{Q}_m = C \left( \frac{\Delta\rho}{\rho_0} \right)^a \left( \frac{H_S}{H} \right)^b \quad \text{Passage 1} \quad (2.8)$$

$$\widetilde{Q}_m = C \left( \frac{\Delta\rho}{\rho_0} \right)^m \left( \frac{H_S}{H} \right)^n \quad \text{Passage 2} \quad (2.9)$$

# CHAPITRE 3

## Résultat et Interprétation

Pour mettre en évidence les différents régimes d'écoulement et leurs transitions ainsi que l'étude de l'effet des paramètres géométriques et d'injection, nous avons mené une série d'expérimentations numériques sur un domaine représentatif d'une enceinte, objet de notre étude qui a été maillé comme suit.

### 3.1 Maillage du domaine de calcul

Le domaine représenté sur la figure (3.1) est maillé uniformément suivant les trois directions, tableau (3.1).

Tableau 3-1 maillage

	Dimension	Nombre d'éléments	Taille de l'élément
Longueur (mm) (OX)	900	300	3
Largeur (mm) (OY)	250	50	5
Hauteur (mm) (OZ)	250	125	2
Nombre total des mailles = 1875000 mailles			

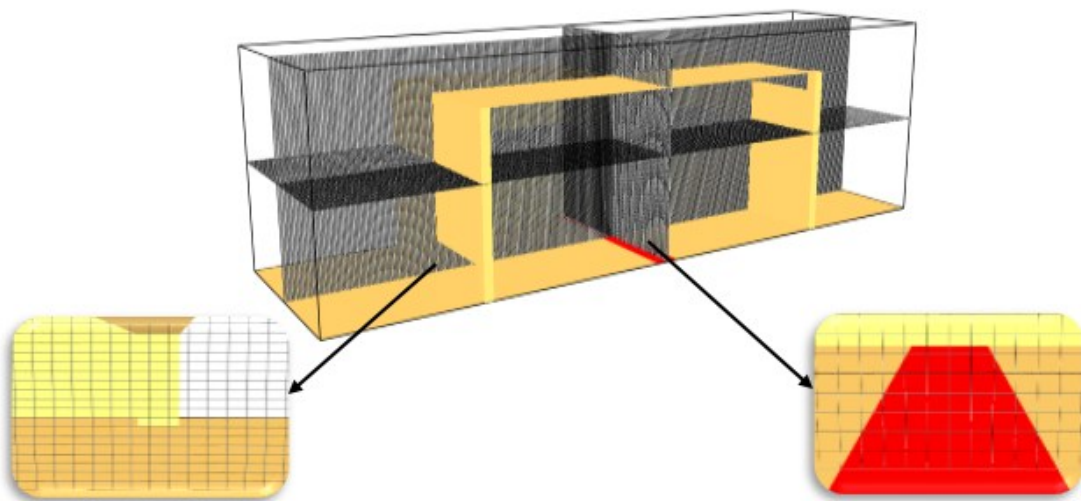


Figure 3.1 : Maillage du domaine et détails au niveau de la buse et l'ouverture inférieure.

Le temps de calcul choisi est de 100 secondes. Les simulations ont été réalisées avec un pas de temps de 0.1 seconde.

### 3.2 Évolution du débit

Pour permettre l'identification automatique et rapide des transitions, nous avons opté pour des simulations avec un débit qui varie avec le temps. A cet effet, nous avons introduit la fonction débit lors de nos simulations. Pour définir cette fonction, plusieurs essais sur la variation du débit à l'injection en fonction du temps ont été testés.

Une variation de débit entre 0 et 100 l/mn pour un temps de 40 s pour les cas de  $H_s$  et  $\Delta\rho$  faibles a été retenue. Par contre pour les  $H_s$  et  $\Delta\rho$  élevés, la variation de débit entre 0 et 800 l/mn sur un temps de 40s est utilisée. La figure 3.2 montre une évolution type du débit en fonction du temps.

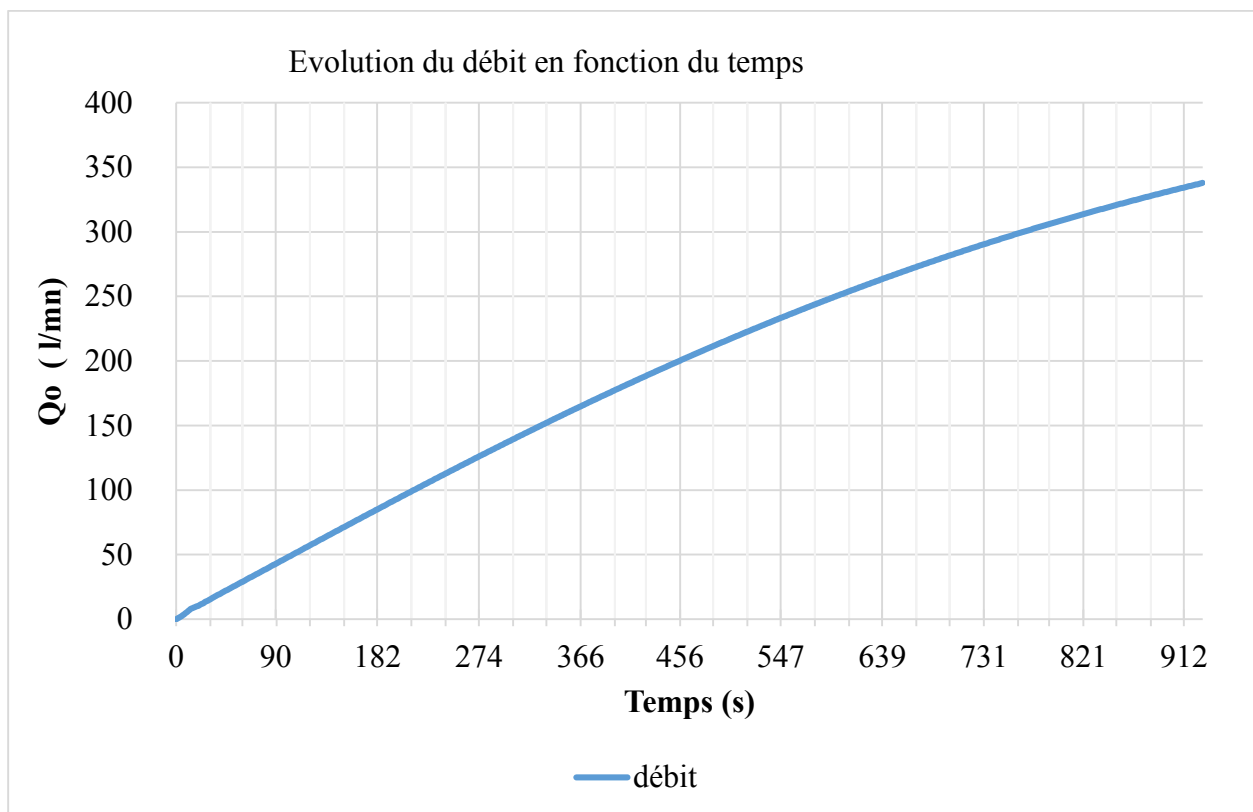


Figure 3.2 : Variation de débit en fonction du temps pour  $H_s$  et  $\Delta\rho$  fixes

### 3.3 Effet des paramètres géométriques et d'injection sur les régimes d'écoulement

### 3.3.1 Effets de $H_s$ sur le régime d'écoulement à l'ouverture inférieure

Pour illustrer l'influence de  $H_s$  sur le régime d'écoulement au niveau de l'ouverture inférieure, nous avons réalisé des simulations aux conditions suivantes :  $H_s$  entre 5 et 55 mm varié avec un pas de 5 mm. La différence de densité  $\Delta\rho = 0.1 \text{ kg/m}^3$ , l'ouverture inférieure  $H_E = 36 \text{ mm}$ . Le débit d'injection au niveau de la buse dans chaque a été pris variable avec le temps entre (0 et 600 l/mn). Les résultats obtenus sont illustrés sur la figure (3.3).

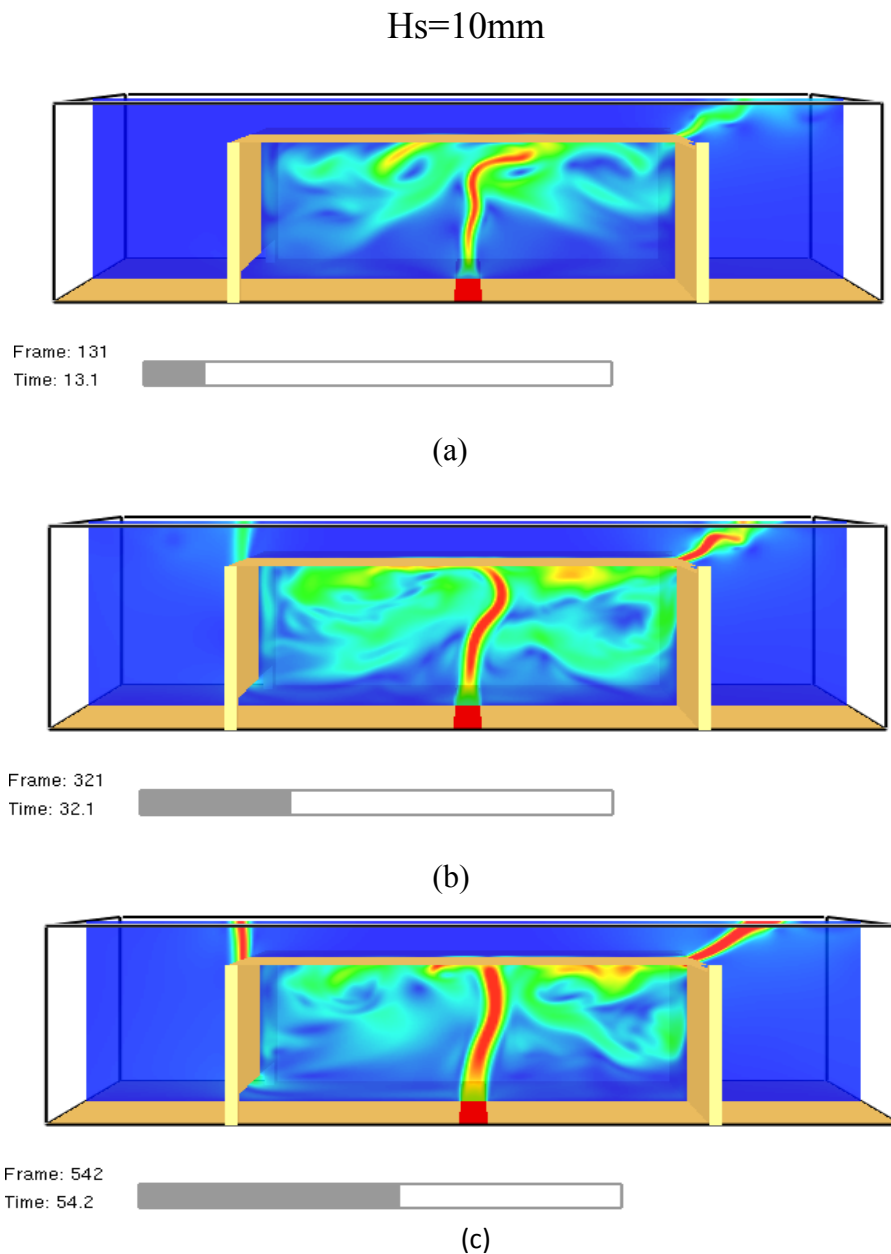
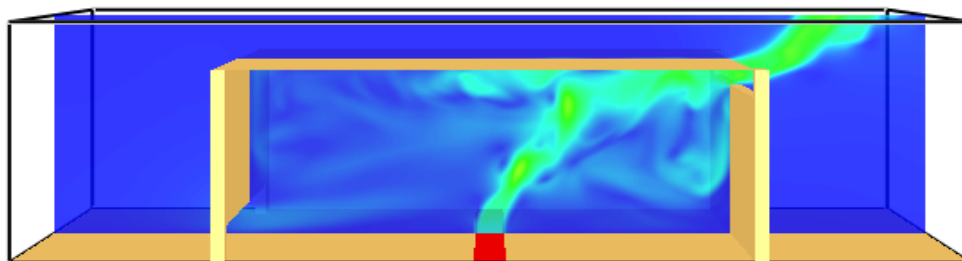


Figure 3.3 : Régime d'écoulement, (a) naturel, (b) intermédiaire, (c) bloqué.

Hs=30mm

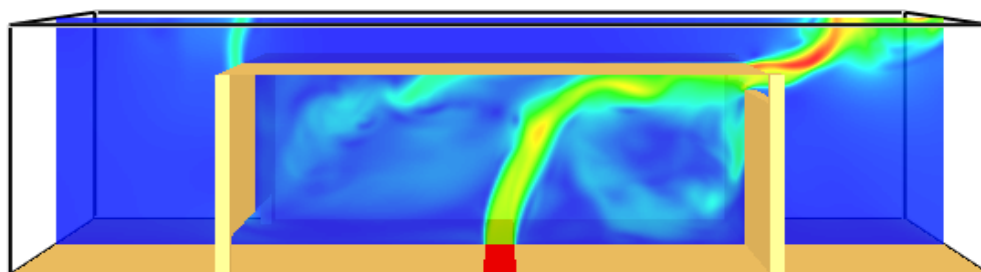


Frame: 167

Time: 16.7



(a)

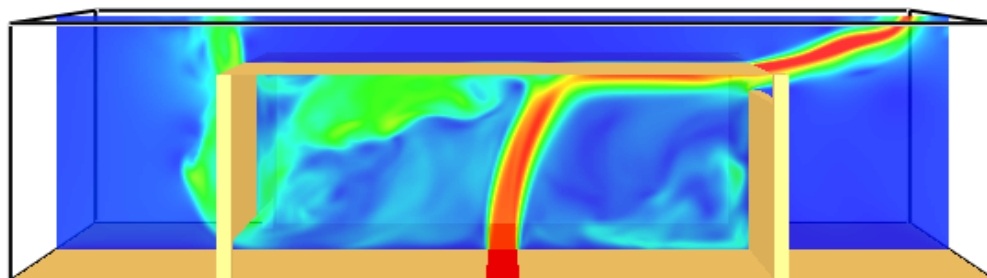


Frame: 454

Time: 45.4



(b)



Frame: 745

Time: 74.5



(c)

Figure 3.4 Régime d'écoulement, (a) naturel, (b) intermédiaire, (c) bloqué pour.



Hs=55mm

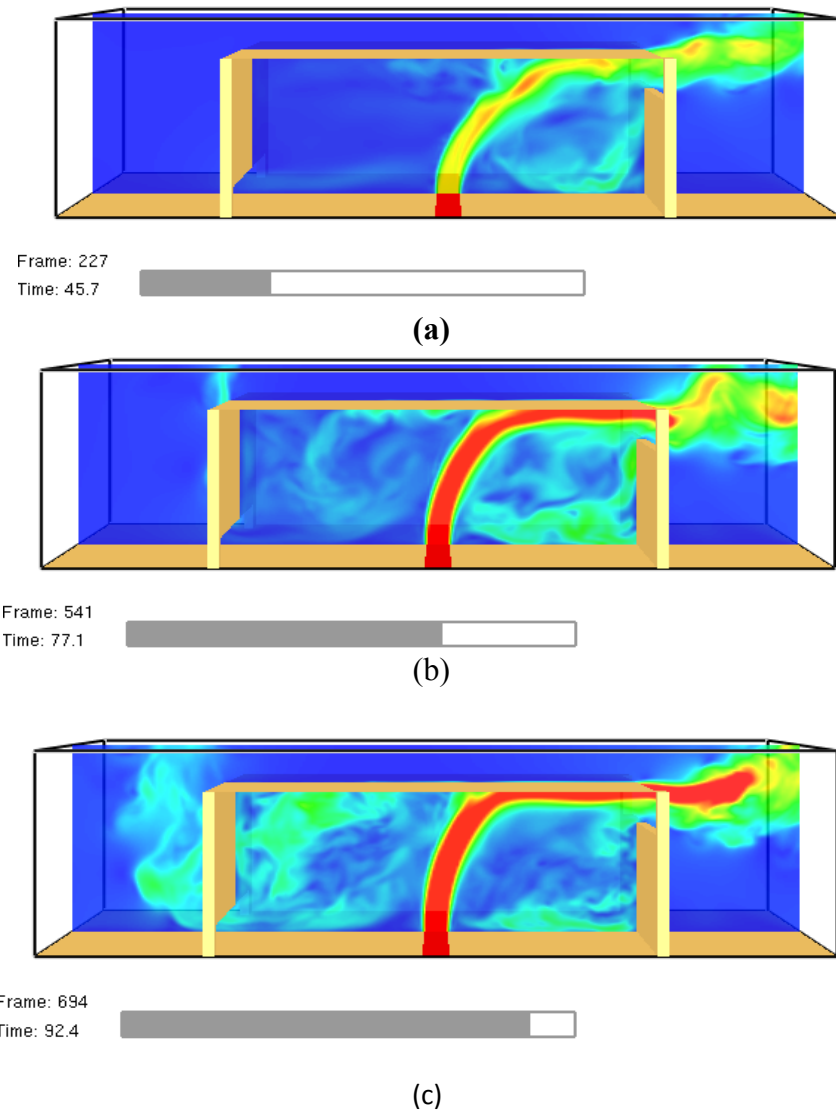


Figure 3.5 : Régime d'écoulement, (a) naturel, (b) intermédiaire, (c) bloqué.

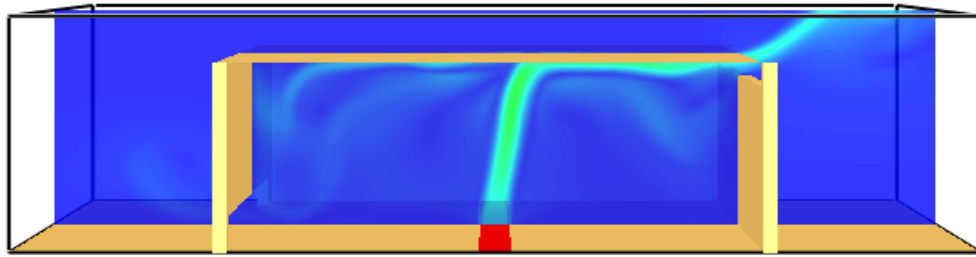
A partir ces expériences numériques on a remarqué que la plage du débit d'injection doit augmenter pour pouvoir capter les différents régimes. Leurs apparitions pour les grandes hauteurs  $H_s$  sont associées aux grandes plages de débit.

### 3.3.2 Effets de $\Delta\rho$ sur le mode d'écoulement à l'ouverture inférieure

Pour illustrer l'influence de  $\Delta\rho$  sur le mode d'écoulement à de l'ouverture inférieure, nous avons réalisé des simulations aux conditions suivantes :  $\Delta\rho$  est varié entre  $0.048 \text{ kg/m}^3$  et

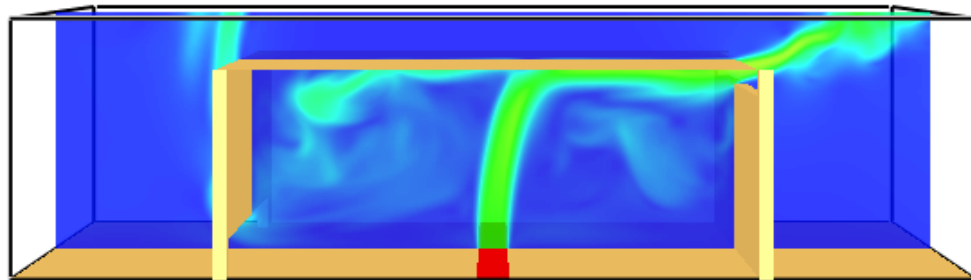
$0.37 \text{ kg/m}^3$  avec un increment de  $0.02 \text{ kg/m}^3$ . Les hauteurs supérieure et inférieure sont maintenues constantes à  $27 \text{ mm}$ , et  $36 \text{ mm}$  respectivement. Le débit d'injection au niveau de la buse pour chaque  $\Delta\rho$ , a été pris variable avec le temps entre (0 et  $600 \text{ l/mn}$ ). Les résultats obtenus sont illustrés sur la figure (3.6).

$$\Delta\rho = 10 \text{ kg/m}^3$$



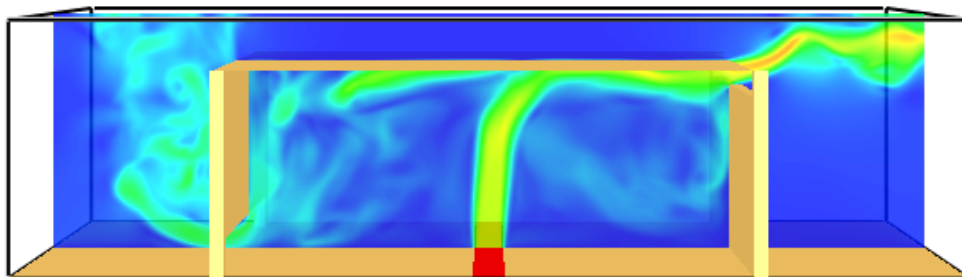
Frame: 114  
Time: 11.4

(a)



Frame: 314  
Time: 31.4

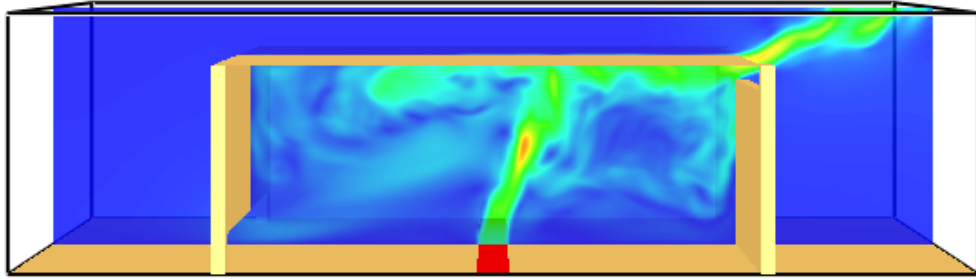
(b)



Frame: 441  
Time: 44.1

(c)

$$\Delta\rho = 45 \text{ kg/m}^3$$

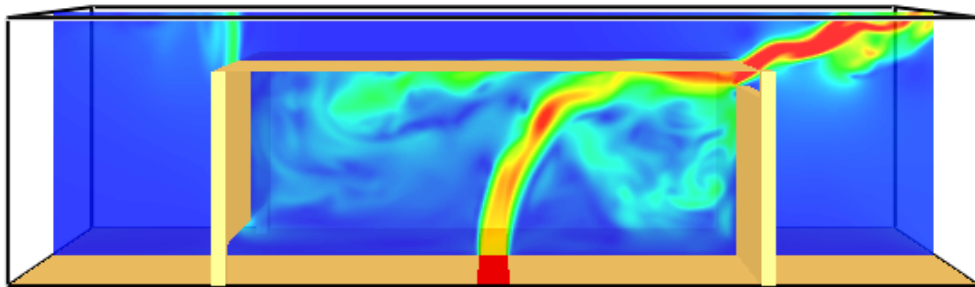


Frame: 129

Time: 12.9



(a)

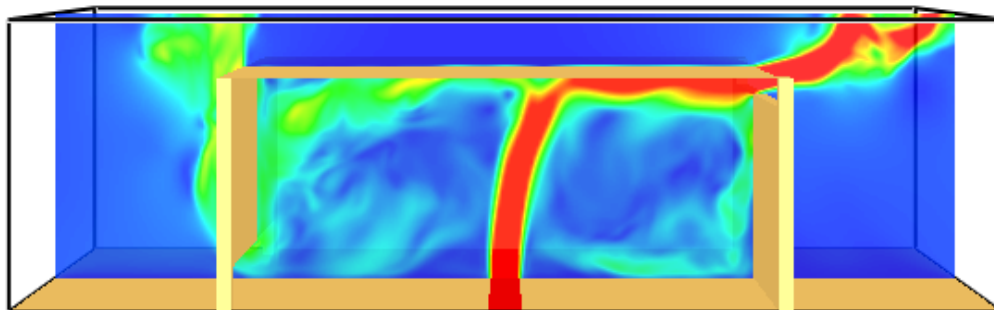


Frame: 297

Time: 29.7



(b)



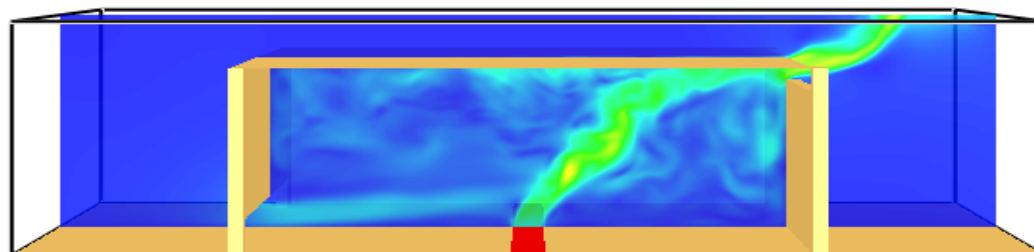
Frame: 467

Time: 46.7



(c)

$$\Delta\rho = 90\text{kg/m}^3$$

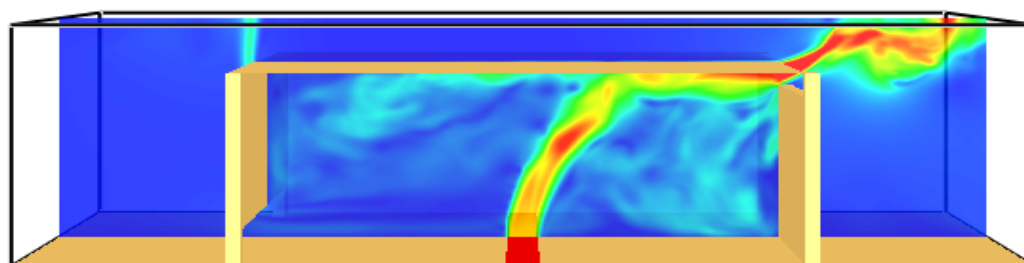


Frame: 160

Time: 16.0



(a)

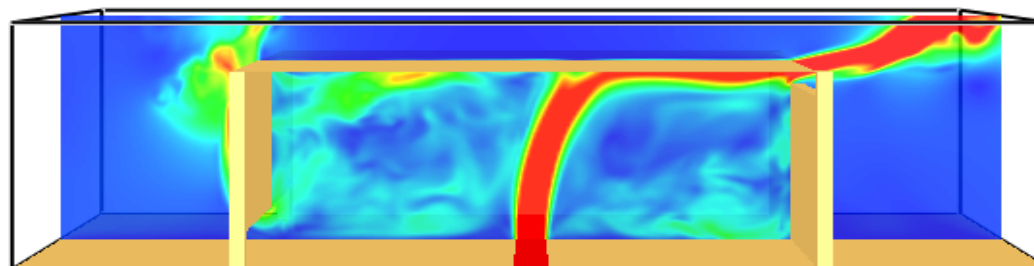


Frame: 453

Time: 45.3



(b)



Frame: 805

Time: 80.5



(c)

Figure 3.6 : Régime d'écoulement, (a) naturel, (b) intermédiaire, (c) bloqué.

Plus en augmente  $\Delta\rho$  , la plage de débit d'injection au quelle tous les régimes apparaissent devient plus large.

### 3.3.3 Effet de $Q_m$ sur le régime d'écoulement à l'ouverture inférieure

Pour illustrer l'influence de  $Q_m$  sur le régime d'écoulement au niveau de l'ouverture inférieure, nous avons réalisé des simulations aux conditions suivantes :  $Q_m$  est varié avec le temps entre (0 et 800 l/mn). La différence de densité  $\Delta\rho = 0.1 \text{ kg/m}^3$ , l'ouverture inférieure  $H_E = 36 \text{ mm}$  et l'ouverture supérieure  $H_s = 25 \text{ mm}$ . Les résultats obtenus sont illustrés sur la figure (3.7).

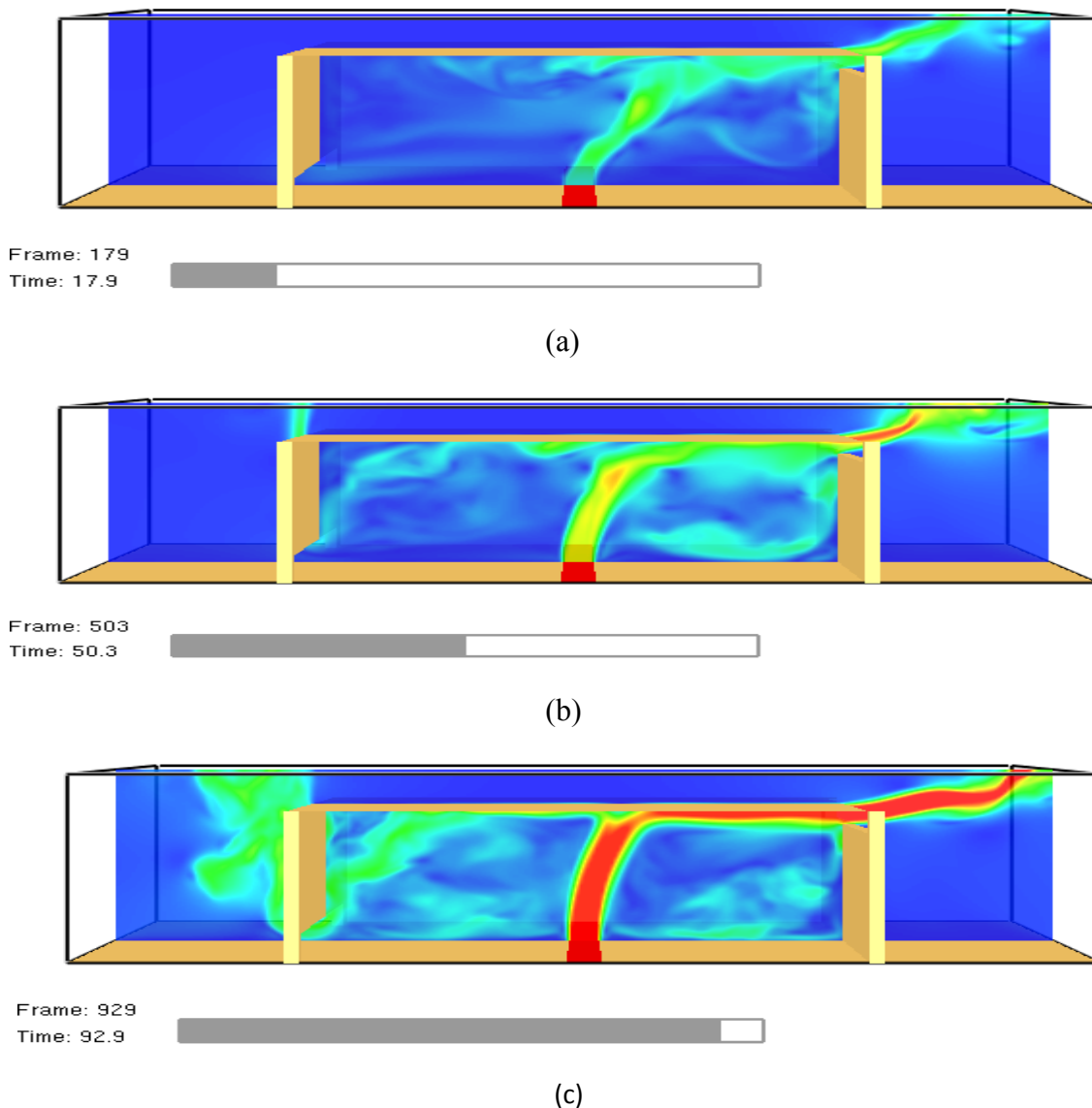


Figure 3.7 Régime d'écoulement, (a) naturel, (b) intermédiaire, (c) bloqué

Plus  $Q_m$  est augmenté, le temps d'apparition des régimes est court.

### 3.4 Récapitulatif des différents tests réalisés

Tableau 3-2 Résultats obtenus pour les différents passages en fonction de la variation de  $\Delta\rho$  et  $Q_m$  pour  $H_s/H$  donné

Donnée d'entrée		Résultats de la transition 1			Résultats de la transition 2		
		Naturel $\leftrightarrow$ Intermédiaire			Intermédiaire $\leftrightarrow$ bloqué		
$\frac{H_s}{H}$	$\frac{\Delta\rho}{\rho_0}$	$Q_m$ L/mn	Re	$Fr$	$Q_0$ L/mn	Re	$Fr$
0.135	0.04	72	672	2.17	135	1260	4.07
0.135	0.05	90	826	2.27	144	1322	3.63
0.135	0.07	117	1057	2.60	162	1464	3.60
0.135	0.08	139.5	1245	2.86	180	1606	3.68
0.135	0.10	166.5	1453	3.05	225	1964	4.12
0.135	0.13	175.5	1473	2.76	283.5	2380	4.46
0.135	0.15	184.5	1517	2.73	288	2368	4.26
0.135	0.17	207	1664	2.88	292.5	2351	4.07
0.135	0.19	216	1702	2.87	306	2412	4.07
0.135	0.20	225	1739	2.88	315	2435	4.03
0.135	0.24	243	1791	2.85	337.5	2487	3.96
0.135	0.31	301.5	2027	3.13	450	3026	4.67

**NB** : les valeurs de  $Q_0$ , Re, et  $Fr$  sont calculés au niveau de la buse d'injection.

On remarque que le nombre de Reynolds a augmenté de 672 à 2027 pour le premier passage et de 1260 à 3026 pour le second passage d'une manière croissante. Le nombre de Fraude a varié entre 2.17 et 3.13 pour le premier passage et entre 3.60 et 4.67 pour le deuxième passage. On remarque que la variation du nombre de Fraude au niveau de la bus est très faible pour une grande variation de la densité ce qui implique que l'influence de la densité sur les régimes d'écoulements est négligeable, d'où le nombre de Froude n'est pas fonction de densité (négligeable).

Dans la figure 3.8 la variation de  $(\widetilde{Q}_m)$  (axe (OY)) en fonction de  $(\Delta\rho)$  (axe (OX)) est présentée. A partir de ces résultats les coefficients des corrélations sont déterminés.

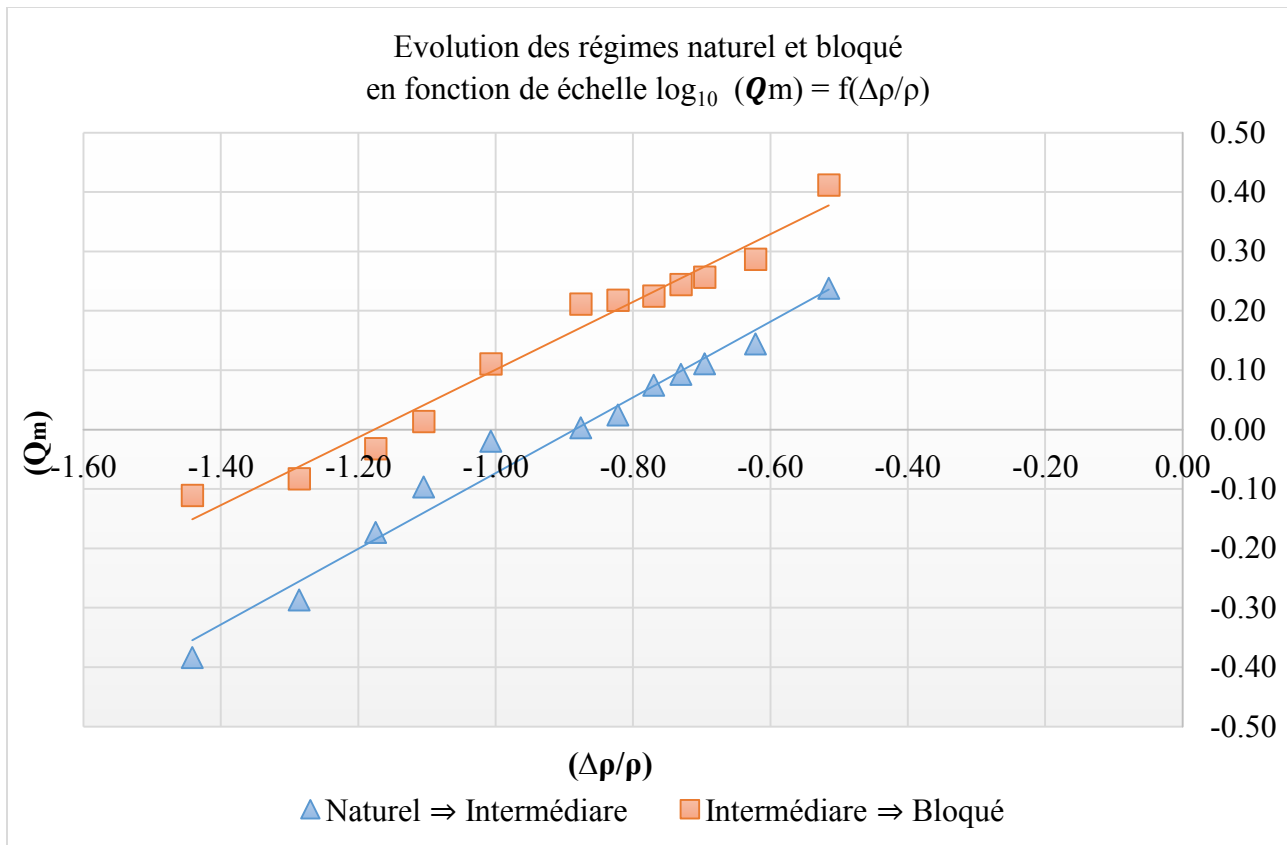


Figure 3.8 Zones et limites des régimes naturel et bloqué

La pente des deux droites représentatives des deux passages des régimes naturel-intermédiaire et intermédiaire-bloqué est la valeur de « a » dans l'équation 3.1. Elle est la même pour les deux passages.

$$\tilde{Q}_m = \left(\frac{\Delta\rho}{\rho_0}\right)^a \tag{3.1}$$

Calcul de a :

Pour le premier passage :

$$\frac{-0.28 - (-0.30)}{-1.36 - (-1.4)} = \frac{1}{2} \Rightarrow NI \tag{3.2}$$

Pour le deuxième passage :

$$\frac{0.12 - 0.1}{-0.96 - (-1.0)} = \frac{1}{2} \Rightarrow BI \tag{3.3}$$

Après la détermination de « a » la relation qui exprime «  $\widetilde{Q}_m$  » en fonction de «  $\left(\frac{\Delta\rho}{\rho_0}\right)^a$  » est :

Pour la première transition :

$$\widetilde{Q}_m = c \left(\frac{\Delta\rho}{\rho_0}\right)^{1/2} \quad (3.4)$$

Pour la deuxième transition :

$$\widetilde{Q}_m = c \left(\frac{\Delta\rho}{\rho_0}\right)^{1/2} \quad (3.5)$$

Dans ce qui suit on cherche à déterminer l'exposant « b » par la réalisation d'une série de tests en fixant  $\frac{\Delta\rho}{\rho_0}$  la densité et on varie le rapport (Hs/H). Comme précédemment, on récupère les débits de passage d'un régime à un autre.

Tableau 3.3 : Résultats obtenus des deux passages en fonction de la variation de Hs/H et  $Q_m$  pour  $\Delta\rho$  donné

Donnée d'entrée		Résultats de transition 1			Résultats transition 2		
		Naturel $\leftrightarrow$ Intermédiaire			Intermédiaire $\leftrightarrow$ bloqué		
$\frac{\Delta\rho}{\rho_0}$	$\frac{H_s}{H}$	Qo L/mn	Re	Fr	Qo L/mn	Re	Fr
0.085	0.05	31.5	279	0.62	112.5	996	2.21
0.085	0.075	45	399	0.88	135	1196	2.65
0.085	0.1	67.5	598	1.33	165	1461	3.24
0.085	0.125	94.5	837	1.86	223	1975	4.38
0.085	0.15	162	1435	3.18	297	2631	5.84
0.085	0.175	202.5	1794	3.98	310.5	2750	6.10
0.085	0.2	270	2391	5.31	360	3189	7.08
0.085	0.225	306	2710	6.01	427.5	3786	8.40
0.085	0.275	418.5	3706	8.23	450	3985	8.84

Tableau 3.4 : Résultats obtenus des deux passages en fonction de la variation de Hs/H et  $Q_0$  pour  $\Delta\rho$  donné



On remarque que le nombre de Reynolds varie entre 279 et 3707 pour le premier passage. Pour le deuxième passage, il varie entre 996 et 3973. Le nombre de Fraude varie entre 0.62 et 8.23 pour le premier passage. Pour le deuxième passage, il varie entre 2.21 et 8.70. La plage de variation du nombre de Froude est significative pour les deux passages ce qui implique que ce dernier est affecté par  $(H_s/H)$ .

En utilisant les données du tableau ci-dessus,  $\frac{\tilde{Q}_m}{\left(\frac{\Delta\rho}{\rho_0}\right)^a}$  est représentée en fonction de  $(H_s/H)$ .

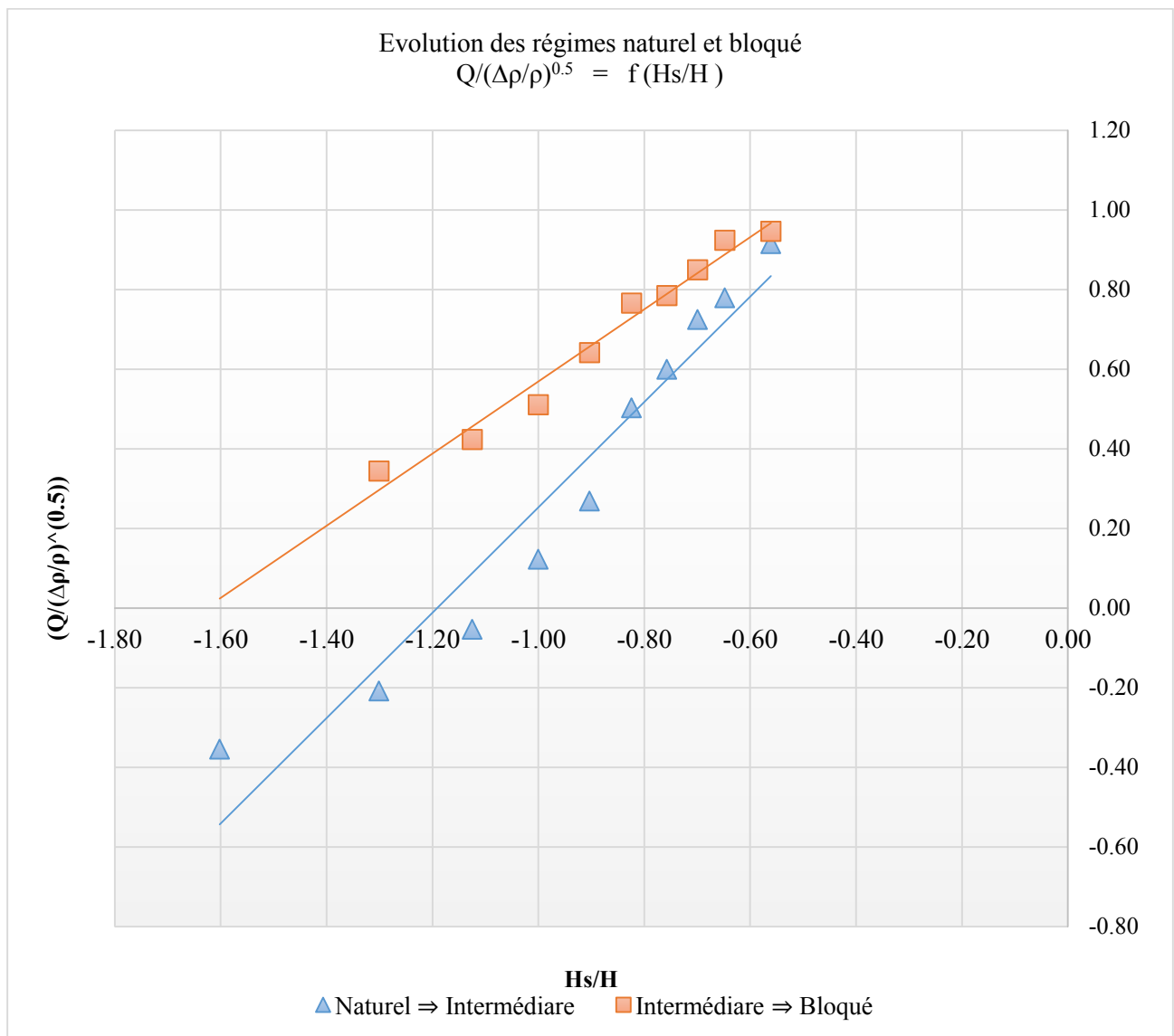


Figure 3.9 : Zones et délimitations des régimes naturel et bloqué

La figure montre les deux droites délimitant les passages des deux régimes. La pente de chaque droite permet le calcul des exposants dans la corrélation empirique suivante :

$$\frac{\tilde{Q}_m}{\left(\frac{\Delta\rho}{\rho_0}\right)^a} = C \left(\frac{H_s}{H}\right)^b \quad (3.6)$$

Les valeurs de la pente de chaque droite sont différentes.

**Calcul de « b » :**

Pour le premier passage :

$$\frac{0.12-0.1}{-0.96-(-1.0)} = \frac{4}{3} \Rightarrow NI \quad (3.7)$$

Pour le deuxième passage :

$$\frac{0.12-0.1}{-0.96-(-1.0)} = \frac{4}{5} \Rightarrow BI \quad (3.8)$$

### 3.5 Résultats récapitulatifs

Après la détermination de « a » et de « b », la relation qui exprime « Q » en fonction de «  $\frac{\Delta\rho}{\rho_0}$  » et «  $H_s/H$  » est :

Pour le premier passage :

$$\tilde{Q}_m = 36 \left(\frac{\Delta\rho}{\rho_0}\right)^{1/2} \left(\frac{H_s}{H}\right)^{4/3} \quad (3.9)$$

Pour le deuxième passage :

$$\tilde{Q}_m = 24 \left(\frac{\Delta\rho}{\rho_0}\right)^{1/2} \left(\frac{H_s}{H}\right)^{4/5} \quad (3.10)$$

Et celle du nombre de Froude en fonction de  $(H_s/H)$  est :

Pour le premier passage :

$$F_r = 9 \cdot \left(\frac{H_s}{H}\right)^{4/3} \quad (3.11)$$

Pour le deuxième passage :

$$F_r = 6 \cdot \left(\frac{H_s}{H}\right)^{4/5} \quad (3.12)$$

Ces deux corrélations du nombre de Froude obtenues proportionnel du rapport  $(H_s/H)$  permettent d'identifier les zones et les délimitations des régimes d'écoulement et les passages entre les différents régimes. La connaissance du nombre de Froude à l'injection permet la connaissance du régime à partir des courbes de la figure (3.10) tracés avec les résultats des tests numériques.

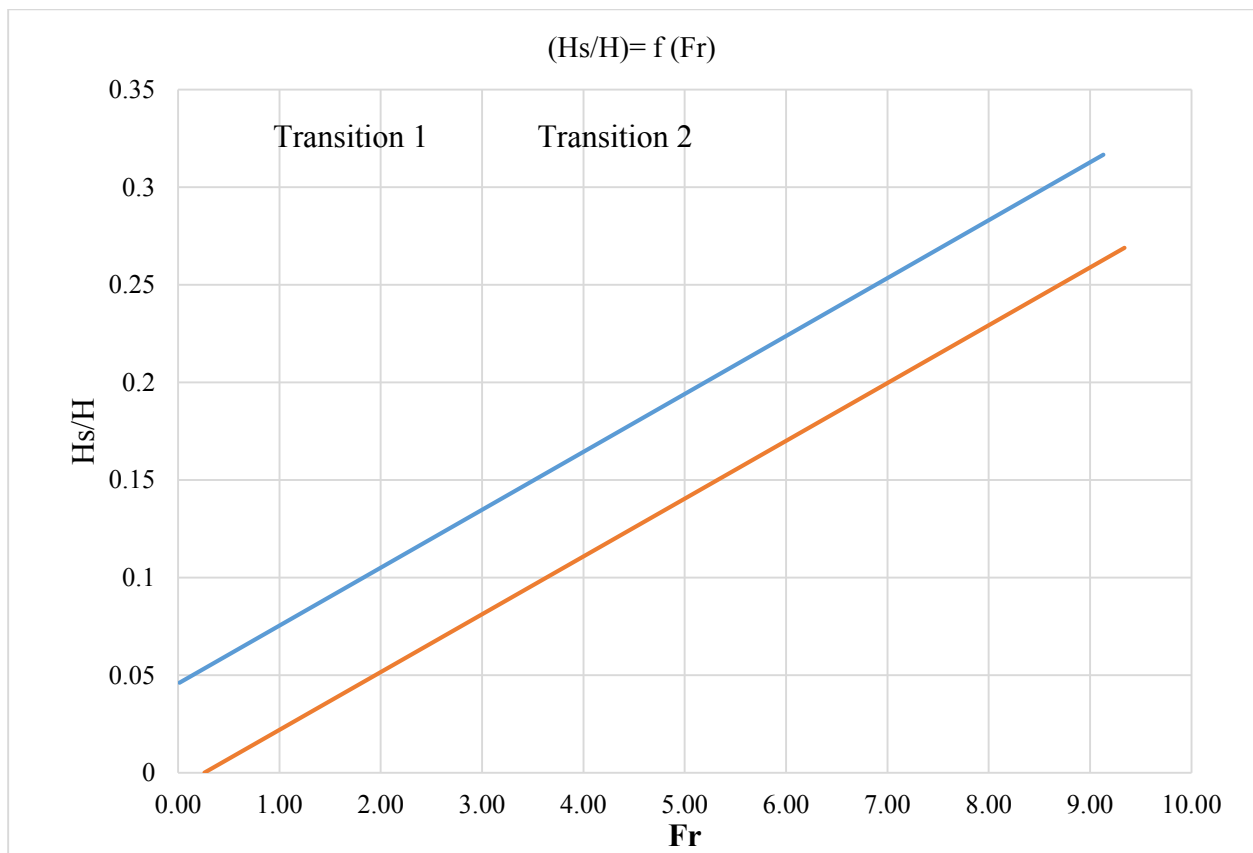


Figure 3.10 :  $(H_s/H) = f(Fr)$

Le graphe est composé de deux droites limitatrices des frontières entre les trois régimes. Pour la première droite (orange) qui représente le passage du régime bloqué au régime intermédiaire. La zone située au-dessous de cette droite est représentative du régime bloqué. La zone située entre les deux droites représente le régime intermédiaire. Pour la zone située au-dessus de la droite bleue, elle est pour le régime naturel.

Les corrélations trouvées pour les deux transitions sont données ci-dessous :

$$\left. \begin{aligned} \widetilde{Q}_m &= 36 \left( \frac{\Delta\rho}{\rho_0} \right)^{1/2} \left( \frac{H_S}{H} \right)^{4/3} \\ F_r &= 9 \cdot \left( \frac{H_S}{H} \right)^{4/3} \end{aligned} \right\} \text{ Naturel} \Rightarrow \text{Intermédiaire}$$

$$\left. \begin{aligned} \widetilde{Q}_m &= 24 \left( \frac{\Delta\rho}{\rho_0} \right)^{1/2} \left( \frac{H_S}{H} \right)^{4/5} \\ F_r &= 6 \cdot \left( \frac{H_S}{H} \right)^{4/5} \end{aligned} \right\} \text{ Intermédiaire} \Rightarrow \text{bloqué}$$

On remarque que les deux droites peuvent se croiser car les pentes sont différentes. L'étude de la zone où les deux droites se croisent, peut probablement conduire à de nouveaux régimes

## Conclusion

Au départ, on avait les trois paramètres qui interviennent dans le mode d'écoulement qui sont : le débit d'injection, la densité et la hauteur de l'ouverture supérieure. Les graphes présentés ci-dessus montrent que pour les débits et les différences de densités faibles, le régime d'écoulement est naturel. L'augmentation de ces derniers, permet le passage au régime intermédiaire puis au régime bloqué. Dans le cas de la variation de «  $H_S$  », la situation est inversée, si on augmente la hauteur supérieure, on passe du régime bloqué au régime naturel en passant par le régime intermédiaire.

# Chapitre 4

Description du dispositif  
d'expérimentation

## 4.1. Description du dispositif d'expérimentation

La partie expérimentale vient valider les résultats des simulations effectuées. Pour cela un dispositif a été conçu et réalisé. Cette partie étant couteuse, pour la lancer, il fallait trouver avant des résultats numériques préliminaires définissant la plage des paramètres d'expérimentation. Le travail numérique s'est avéré volumineux. A cet effet nous nous sommes contentés que de sa finalisation.

La simulation de chaque essai nécessitait un temps avoisinant les cinq jours. Ceci étant, le traitement entier a pris la majorité de la durée du stage. Le temps restant nous a seulement permis concevoir et réaliser un dispositif expérimentale.

Dans ce qui suit nous décrivons ce dispositif et les techniques de mesure et de contrôle à utiliser.

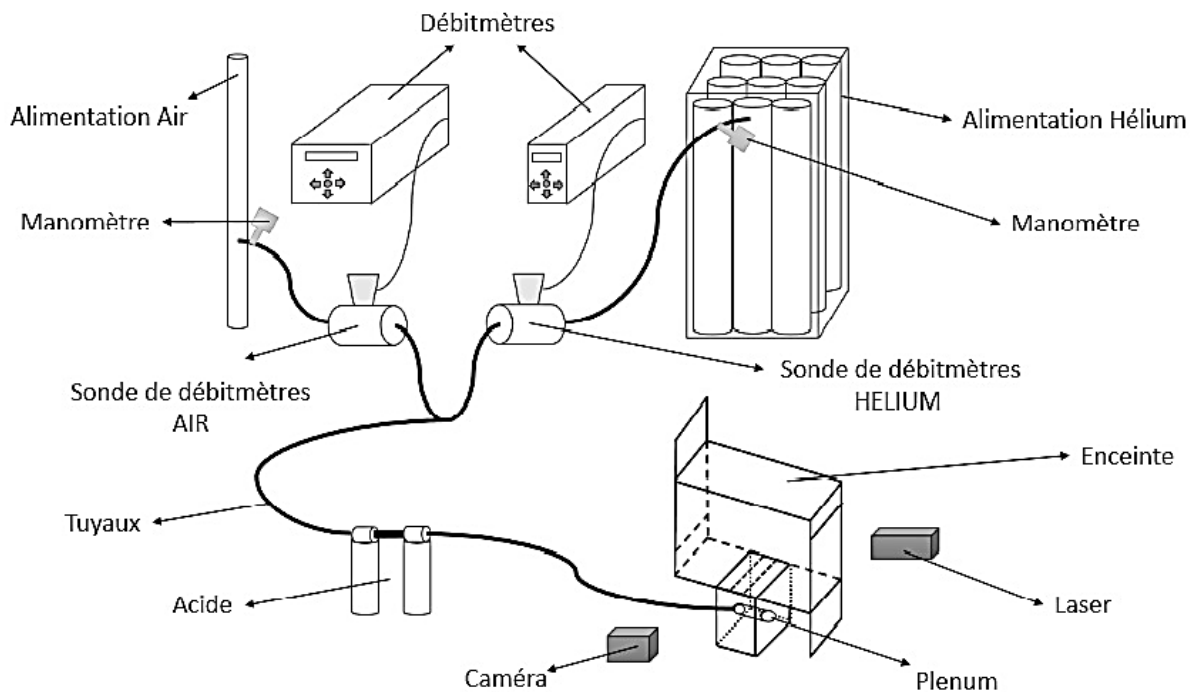


Figure 4.1 : Diapositif expérimental

### 4.1.1. Alimentation

L'écoulement mélange (air+hélium) injecté dans l'enceinte est fourni par un plénum d'alimentation verticale qui est connectée à la buse de l'enceinte. Le plénum est alimenté à sa base par le circuit d'air-hélium comprimé du laboratoire. Le système d'alimentation comporte un robinet d'arrêt, un filtre qui empêche les fines gouttelettes d'huile venant du compresseur de pénétrer dans le circuit, un régulateur de pression permettant d'ajuster la pression amont entre 0 et 2bars et un régulateur de débit. Ce débit est mesuré par un débitmètre AlicatScientific M-1000SLPM-D permettant de déterminer les débits massiques dans la gamme 0 - 1000 NLPM (Normaux litres par minute). 1NLPM correspond à un débit volumique de 1l/mn d'air pris dans des conditions standards (pression atmosphérique de 101 325 Pa et température de 273K). Ce débit d'air- hélium est injecté à la base de plénum, au moyen de deux débitmètres

## 4.2. Techniques de mesures et de contrôle

### 4.2.1. Mesure du débit injecté

La mesure du débit de mélange injecté est faite au moyen de deux débitmètres ALICAT. Chaque débitmètre mesure simultanément la pression différentielle aux bornes d'un élément laminaire, la pression statique et la température pour déterminer le débit massique. Le microprocesseur intégré calcule le débit massique correspondant aux conditions standards de pression et de température (1013mbar, 0°C). Cet appareil indique ainsi le débit volumique (en l/min) et le débit massique (en NI/min) de lfluide qui le traverse.

**Remarque :** NI / min est le débit en l / min mesuré à un point de référence, mais converti aux conditions atmosphériques normales est 1,01325 bar absolu, de 0 ° C et 0% HR (humidité relative).

### 4.2.2. Visualisations

Des visualisations ont été réalisées en ensemençant l'écoulement de panache avec de fines gouttelettes d'huile d'olive. Ces gouttelettes sont produites par un atomiseur et sont injectées en amont du plénum. Le débit d'air nécessaire à cette injection est mesuré par un débitmètre AlicatScientific M-20SLPM-D et est pris en compte dans le calcul du débit total

injecté dans l'enceinte. Pour ces visualisations, l'ensemble de l'enceinte est éclairé au moyen d'une nappe laser de 1mm d'épaisseur. Ce plan lumineux est obtenu par un laser pulsé à 8Hz et un système optique comprenant une fente et une lentille cylindrique. La fente diffracte le faisceau lumineux cylindrique que la lentille cylindrique transforme en une nappe laser. Les images sont enregistrées au moyen d'un système d'acquisition comprenant une caméra et une centrale d'acquisition. Les images enregistrées sont ensuite traitées par le logiciel Image J

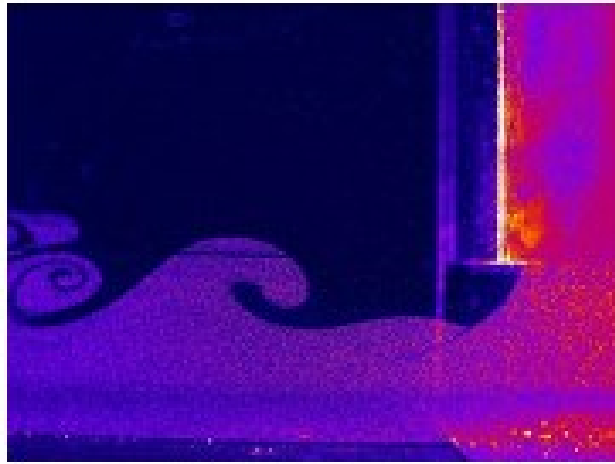


Figure 4.2 : Exemple de visualisation réalisée en sortie de l'ouverture inférieure

### 4.3. Mesures de vitesses par PIV

Les composantes horizontale et verticale de la vitesse peuvent être mesurées au moyen de la technique de la Vélocimétrie par Images de Particules (PIV).

#### 4.3.1. Principe

Le principe de cette technique maintenant bien connue est rappelé sur la figure (4.3). Elle consiste à illuminer de fines particules injectées dans l'écoulement à l'aide d'une nappe laser à deux instants successifs. Une caméra CCD placée perpendiculairement à la nappe est synchronisée avec les deux tirs lasers enregistre les deux images successives du champ des particules éclairées. A partir du temps inter image et du déplacement des particules mesurés par corrélation 2D, on obtient la vitesse.



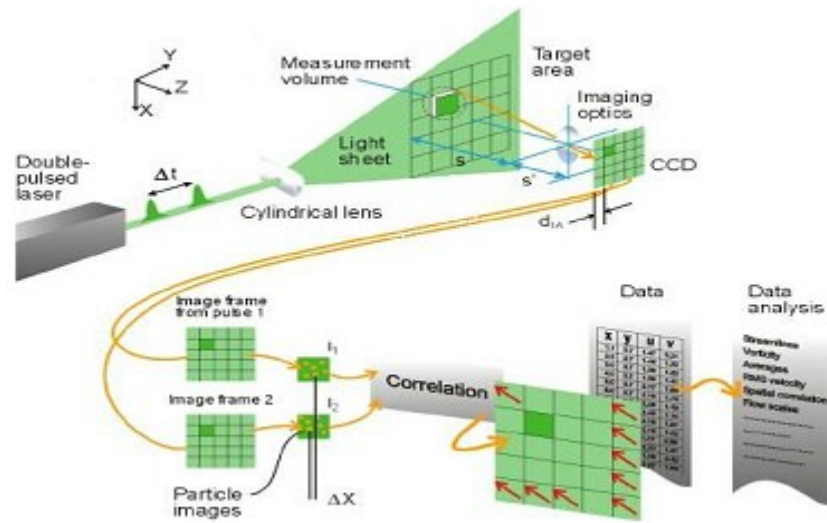


Figure 4.3 : Principe de fonctionnement de la technique P.I.V. (Dantec Dynamics).

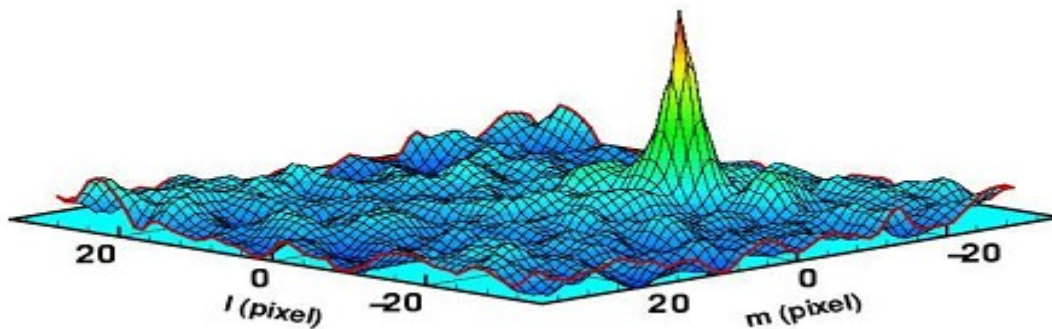


Figure 4.4 : Pic de correction obtenu pour une maille de calcul, Lecordier (1997)

Ainsi pour un déplacement  $\Delta x$  dans la direction  $Ox$  entre les instants  $t$  et  $\Delta t$ , la vitesse horizontale locale des particules  $u$  peut être déduite de la relation  $u = \frac{\Delta x}{\Delta t}$

Afin d'obtenir des vecteurs vitesses locaux, les images sont subdivisées en plusieurs mailles. Le calcul d'inter-corrélation est alors réalisé entre deux mailles correspondant à la même région spatiale de l'écoulement. Comme le montre la figure (4.4), le résultat de ce calcul présente un pic de corrélation dont la position donne directement le déplacement le plus probable des particules dans la maille de calcul.

### 4.3.2. Plans lasers

Le système d'éclairage se compose d'un Laser Yag double pulse (8Hz) et d'un système optique comprenant une lentille sphérique ( $f=750\text{mm}$ ) et une lentille cylindrique. Les deux pulses de l'ordre de 10ns sont décalés de 0,5 à 1,5ms selon les conditions d'écoulement. Au moyen de ce système, il est possible d'obtenir une nappe laser de moins d'1mm d'épaisseur qui permet d'éclairer à la fois les deux zones extérieures situées près des ouvertures inférieure et supérieure et l'intérieur de l'enceinte excepté une petite zone d'épaisseur de 4mm située à proximité de la paroi supérieure de l'enceinte. Pour ce type de mesures l'ensemble de l'écoulement doit êtreensemencé de manière homogène. Ceci est réalisé de deux manières. On utilise pour ensemencer l'intérieur de l'enceinte le système déjà décrit pour la visualisation. Dans ce système, l'atomiseur fournit un débit d'un mélange air-gouttelettes d'huile d'olive dont le diamètre est compris entre 1 et 5  $\mu\text{m}$  et qui est mélangé à l'hélium injecté. Pour ensemencer l'extérieur de l'enceinte, on utilise un ou deux générateurs de fumées de spectacles.

### 4.3.3. Acquisitions et enregistrements

Deux champs d'études peuvent être utilisés : un champ « large » et un champ plus réduit ou « zoom ». pour chaque cas (champs « large » ou « zoom ») la distance entre le plan laser et le système d'enregistrement est fixe. Pour réaliser des mesures en dehors du plan médian, l'ensemble d'alimentation-enceinte qui est sur rails peut être déplacé perpendiculairement au plan laser.

Le champ « large » est utilisé pour déterminer le champ global de vitesse à l'intérieur de l'enceinte dans un plan vertical ( $50 \times 18\text{cm}^2$ ). Ce champ « large » est schématisé sur la Figure (4.4). Il consiste à visualiser simultanément la totalité de l'enceinte au moyen de trois caméras CCD, chacune possédant son propre plan de visualisation mais avec toute fois un petit chevauchement. Ces trois caméras La Vision ImagerPROX4M 2048x2048 pixels utilisent des objectives photos AF 85mm f/1.4D permettant de visualiser une surface allant de  $16 \times 16\text{cm}^2$  à  $20 \times 20\text{cm}^2$ . Elles sont placées sur un banc optique monté parallèlement à la face avant de l'enceinte à une distance d'environ 120cm du plan laser. Comme le montre la Figure (4.5), la caméra C3 placée au centre a une ligne de visée perpendiculaire à la nappe laser, les

caméras C1 et C2 sont positionnées symétriquement de part et d'autre de C3. Les montures Scheimpflug dont elles sont équipées permettent d'imager le plan de mesures incliné de  $16^\circ$  par rapport à l'axe optique des objectifs. La configuration bidimensionnelle de l'écoulement étudié nous autorise à négliger les effets de la troisième composante de vitesse lors de la reconstruction des champs 2D. Le champ « zoom » est utilisé pour déterminer simultanément le champ de vitesse dans un plan vertical ( $8 \times 8 \text{ cm}^2$ ) à l'extérieur de l'enceinte au niveau des ouvertures ou à l'intérieur de l'enceinte au niveau de la buse. Dans ce cas, afin de ne pas déplacer le banc optique et de refaire l'alignement, un rajout aux caméras des bagues allonges NIKON PK-12 fournissant une extension de 14mm

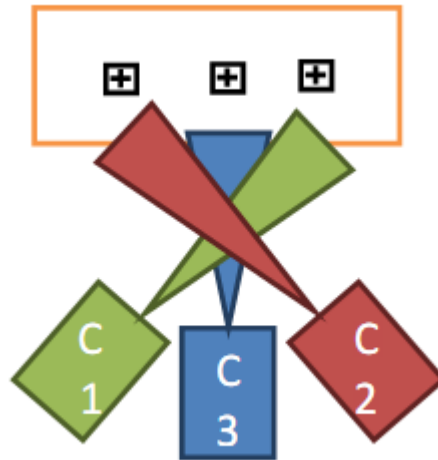


Figure 4.5 : Schéma de principe de la disposition des caméras en « champ large »

#### 4.3.4. Etalonnage

L'utilisation de la PIV requiert un étalonnage des images obtenues par les caméras. Ceci nécessite de connaître le grandissement de chaque caméra mais également de repérer les images dans le repère de l'écoulement. De plus dans cette étude où certaines caméras ont leur axe de visée légèrement incliné par rapport à la normale au plan laser, Il est également nécessaire de corriger la déformation des images. La mire qui a servi pour ces différentes phases de l'étalonnage est présentée sur la Figure (4.6). Elle a été réalisée par gravure laser sur une plaque de plastique plane et rigide. Sur cette mire de  $400 \times 180 \text{ mm}^2$ , de couleur blanche, est gravé un maillage régulier de  $39 \times 17$  points noirs de 1,5mm de diamètres, distants de 10mm dans les deux directions. On vient placer cette mire dans le plan médian de la maquette de manière à ce

que le centre de la mire, représenté par une croix noire, soit situé au-dessus du centre de la buse. La calibration se fait pour les caméras C1 et C3, puis pour les caméras C2 et C3. Après avoir filmé la mire avec les deux caméras, on choisit pour la caméra 3, un repère sur la mire correspondant au centre de l'image. Ce repère sera défini par  $(P_3P'_3, P_3P''_3)$  avec  $P_3(0;+10\text{cm})$ ,  $P'_3(5\text{cm};+10\text{cm})$  et  $P''_3(0;+15\text{cm})$ . Sur l'image on aura un repère correspondant  $(p_3p'_3, p_3p''_3)$  en pixels. Pour la caméra 1, on choisit de même un repère sur la mire correspondant au centre de l'image correspondante. Ce repère sera défini par  $(P_1P'_1, P_1P''_1)$  avec  $P_1(20\text{cm};+10\text{cm})$ ,  $P'_1(25\text{cm};+10\text{cm})$  et  $P''_1(20\text{cm};+15\text{cm})$ . Sur l'image on aura un repère correspondant  $(p_1p'_1, p_1p''_1)$  en pixels. On procède de la même façon pour les caméras C2 et C3. Une fois cette Calibration effectuée sous DaVis 7.2 (LaVision), les images recueillies pourront être redressées et repérées spatialement dans le repère de la maquette.

#### 4.4 Calculs des vitesses

Les vitesses sont ensuite calculées à l'aide du logiciel Davis-La Vision à partir des images redressées. Ce calcul d'inter corrélation s'effectue en plusieurs étapes, la première corrélation se fait avec des mailles de  $64 \times 64$  pixels puis une seconde corrélation est réalisée sur le résultat de la première en utilisant cette fois ci des mailles de  $32 \times 32$  pixels. Dans les deux corrélations, il y a un recouvrement de 50% entre les mailles. Nous obtenons ainsi autant de champs de vitesses instantanées qu'il y a de couples d'images, et nous pouvons effectuer une moyenne sur les N champs de vitesses instantanées obtenus à partir des N couples d'images de la même caméra pour obtenir un champ de vitesses moyennes. L'incertitude statistique sur chaque vitesse estimée sera de l'ordre de  $1.96\sqrt{\tilde{u}^2/N}$ . Ce qui montre que l'incertitude

statistique relative sera égale  $\frac{1.96\sqrt{\tilde{u}^2/N}}{\bar{u}}$

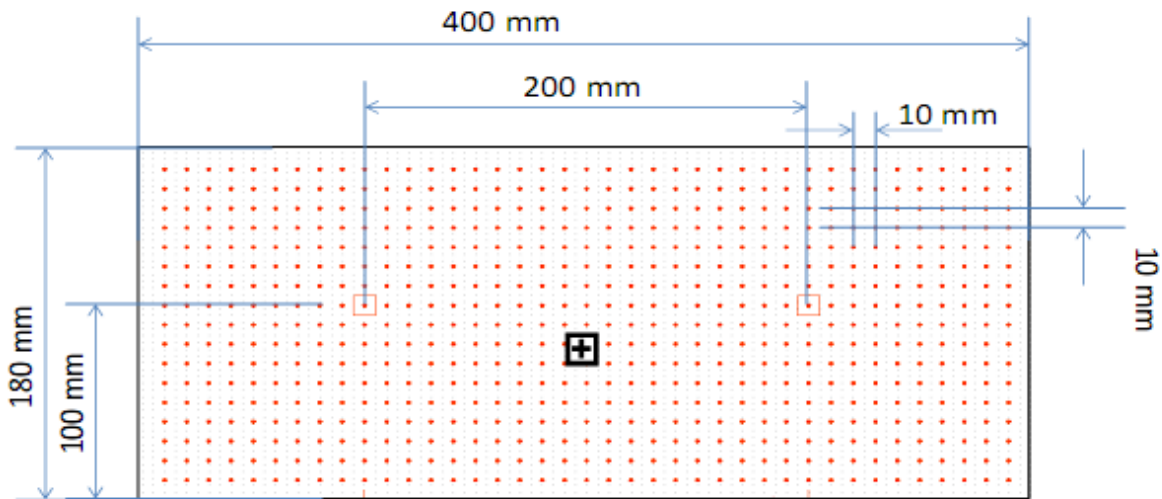


Figure 4.6 : Mire utilisée pour les étalonnages

#### 4.4. 1 Protocole d'expérimentation

Pour confirmer les deux lois établies précédemment :

$$F_r = 9 \cdot \left(\frac{H_S}{H}\right)^{4/3} \left\{ \text{Naturel} \Leftrightarrow \text{Intermédiaire} \right.$$

$$F_r = 6 \cdot \left(\frac{H_S}{H}\right)^{4/5} \left\{ \text{Intermédiaire} \Leftrightarrow \text{bloqué} \right.$$

On suit le protocole expérimental suivant :

Pour déterminer les deux exposants (a et b), on utilise deux débitmètres. L'un pour l'hélium, l'autre pour l'air. Le mélange Hélium-air est injecté à travers la buse comme une source de masse.

En premier, on fixe la hauteur supérieure  $H_s$ , on varie le débit d'hélium par pas de (20 l/mn) et on augmente le débit d'air jusqu'à la récupération des deux points de passages. De cette façon, on obtient la valeur de « a » expérimentalement.

En second, pour déterminer « b », on fixe le débit d'hélium et on varie la hauteur supérieure  $H_s$  par un pas de 5mm et on augmente le débit d'air jusqu'à la récupération des deux points de passages.

# CONCLUSION

## Conclusion

Dans ce travail, nous avons analysé et mesuré les écoulements produits par une source de masse à l'intérieur d'une enceinte parallélépipédique ventilée reliée à l'extérieur par deux ouvertures verticales rectangulaires de hauteurs  $H_E$  et  $H_S$  situées en parties basse et haute de ce volume.

Une simple analyse basée sur la différence de densité montre que les écoulements entre l'intérieur et l'extérieur de l'enceinte sont contrôlés par les distributions verticales de densité à l'intérieur et l'extérieur de l'enceinte liées aux différences de températures intérieure et extérieure. Dans ces conditions, nous avons pu montrer qu'il existait trois régimes d'écoulements : régime naturel, régime intermédiaire et régime bloqué. Dans toutes les situations, l'écoulement au niveau de l'ouverture supérieure est sortant. Ces régimes se différencient au niveau de l'écoulement présent à l'ouverture inférieure qui est entrant en régime naturel, sortant en régime bloqué et à la fois entrant et sortant en régime intermédiaire. Il apparaît que ces régimes d'écoulement sont gouvernés par un nombre de Froude densitométrique  $Fr$  qui dépend du débit  $Q_m$ , de la hauteur séparant les deux ouvertures, de la section effective de l'ouverture supérieure  $A_S$ . Ces lois représentatives des points de passages de régimes en fonction de nombre de Froude sont :

Transition 1 :

$$Fr = 9 \cdot \left(\frac{H_S}{H}\right)^{4/3} \left. \vphantom{Fr} \right\} \text{Naturel} \Leftrightarrow \text{Intermédiaire}$$

Et de régime intermédiaire vers le régime bloqué :

Transition 2 :

$$Fr = 6 \cdot \left(\frac{H_S}{H}\right)^{4/5} \left. \vphantom{Fr} \right\} \text{Intermédiaire} \Leftrightarrow \text{bloqué}$$

## Perspective

On constate que les deux droites peuvent se croiser car les pentes sont différentes pour des grandes valeurs de  $(Fr)$ . L'étude de la zone où les deux droites se croisent, pourrait faire apparaître de nouveaux régimes.

On a remarqué l'apparition de nouveaux régimes si on passe à des hauteurs plus importantes de l'ouverture supérieure (40 % de la hauteur de l'enceinte). Cela pourrait être un sujet d'étude futur.



# Références bibliographiques

## Références

- Allano D., Danlos A., Patte-Rouland B., Gonzalez M., Paranthoën P. (2008) Ventilation naturelle d'une enceinte soumise à une injection de gaz chauds, Congrès SFT08, Toulouse, Mai 2008
- Altac Z., Konrat S. (2009) Natural convection heat-transfer from a thin horizontal isothermal plate in air-filled rectangular enclosures *Journal of Thermal Science and Technology*, 29, 1, 55-65
- Angirasa D. (2000) Mixed convection in a vented enclosure with an isothermal vertical surface, *Fluid Dynamic Research*, 26, 219-233
- Auban O., Lemoine F., Vallette P., Fontaine J.R. (2001) Simulation by solutal convection of a thermal plume in a confined stratified environment: application to displacement ventilation *Int. J. Heat Mass Transfer*, 44, 4679-4691
- Baines W. D., Turner J. S. (1969) Turbulent buoyant convection from a source in a confined region *Journal of Fluid Mechanics*, 37, 51-80
- Barozzi G.S., Corticelli M.A. (2000) Natural convection in cavities containing heat sources, *Heat Mass Transfer*, 36, 6, 473-480
- Barnett S.J. (1991) The dynamics of buoyant release in confined spaces PhD Thesis Cambridge
- Besnard H. (2010) Détermination de grandeurs caractéristiques d'un incendie localisé en espace semi-confiné Thèse Sciences Physiques, Université Le Havre
- Beya B., Lili T. (2007) Oscillatory double-diffusive mixed convection in a two-dimensional ventilated enclosure *Int. J. Heat Mass Transfer*, 50, 4540-4553
- Bouafia M., Daube O. (2007) Natural convection for large temperature gradients around a square solid body within a rectangular cavity *Int. J. Heat Mass Transfer*, 50, 3599-3615
- Bouzinaoui A., Vallette P., Lemoine F., Fontaine J., Devienne R., (2005) Experimental study of thermal stratification in ventilated confined spaces *Int. Journal Heat Mass Transfer*, 48, 4121-4131
- Caulfield C.P., Woods A.W. (2002) The mixing in a room by a localized finite-mass-flux source of buoyancy *Journal of Fluid Mechanics*, 471, 33-50
- Chavanne X., Chillà F., Castaing B., Hébral B., Chabaud B., Chaussy J. (1997) Observation of the Ultimate Regime in Rayleigh-Bénard Convection *Physical Review Letters* 79, 19, 3648-3650
- Cooper L.Y. (1998) Compartment fire-generated environment and smoke filling, *SFPE Handbook of Fire Protection Engineering*, National Fire Protection Association, Quincy, MA, 2.116 -2.138

- Costa J.J., Oliveira L.A., Blay D. (1999) Tests of several versions for the k- $\epsilon$  type turbulence modelling of internal mixed convection flows *Int. J. Heat Mass Transfer*, 42, 4391-4409
- Deng Q.H., Tang G.F., Li Y. (2002) A combined temperature scale for analyzing natural convection in rectangular enclosures with discrete wall heat sources *Int. J. Heat Mass Transfer* 45, 3437–3446
- Deng Q.H., Zhou J., Mei C., Shen Y-M. (2004) Fluid heat and contaminant transport structures of laminar double diffusive mixed convection in a two-dimensional ventilated enclosure *Int. J. Heat Mass Transfer*, 47, 5257-5269
- Desrayaud G., Lauriat G. (1993) Unsteady confined buoyant plumes, *Journal of Fluid Mechanics*, 252, 617–646  
Desrayaud G., Lauriat G. (2004) A numerical study of natural convection in partially open enclosures with a conducting side-wall *J. Heat Transfer*, 126, 1, 76-83
- Djanna-Koffi F.L. (2011) Convection naturelle turbulente en cavité différenciellement chauffée à grands nombres de Rayleigh: caractérisation expérimentale des écoulements et des transferts thermiques, étude numérique du couplage convection-rayonnement Thèse ENSMA Poitiers
- Dong S.F., Li Y.T. (2004) Conjugate of natural convection and conduction in a complicated enclosure *Int. J. Heat Mass Transfer*, 50, 3599-3615
- Fitzgerald S.D., Woods A.W. (2004) Natural ventilation of a room with vents at multiple levels *Building and Environment*, 39, 505-521
- Gladstone C., Woods A.W. (2001) On buoyancy-driven natural ventilation of a room with a heated floor *Journal of Fluid Mechanics*, 441, 293-314
- Ghasemi B., Aminossadati S.M. (2008) Numerical Simulation of Mixed Convection in a Rectangular Enclosure with Different Numbers and Arrangements of Discrete Heat Sources *The Arabian Journal for Science and Engineering*, 33, 189-212.
- Gunnerson F. S., Ziesler P. S., Williams S. K. (1994) Simulation of Positive Pressure Ventilation(PPV) for Research and Training International Proceeding. 4th Intern. Symposium, International Association for Fire safety Science 1029-1039
- Ha M.Y., Kim I-K., Yoon H.S., Yoon K.S., Lee J.R., Balachandar S., Chun H.H. (2002) Two-dimensional and unsteady natural convection in a horizontal enclosure with a square body *Numerical Heat Transfer, Part A: Applications* 41, 2, 183-210
- Hunt G.R., Holford J.M., Linden P.F. (2001) Natural ventilation by the competing effects of localised & distributed heat sources 14th Australasian Fluid Mechanics Conference, Adelaide, Australia

- Hunt G.R., Cooper L.Y., Linden P.F. (2001) Thermal stratification produced by jets and plumes in enclosed spaces, *Building Environment* 36, 871-882
- Jaluria Y., Chiu W.K.S., Lee H.K. (1995) Flow of Smoke and Hot Gases across Horizontal Vents in Room Fires *Combustion Science and Technology* 110-111, 1, 197-208
- Jilani G., Jayaraj S., Khadar Voli K. (2002) Numerical analysis of free convective flows in partially open enclosure *Heat and Mass Transfer*, 38, 261-270
- Kang, B. H. and Jaluria, Y. (1990) Natural convection heat transfer characteristics of a protruding thermal source located on horizontal and vertical surfaces *Int. J. Heat Mass Transfer* 33, 1347-1357
- Kawagoe K. (1958) Fire Behaviour in Rooms Report of the Building Research Institute, No. 27
- Kaye N.B., Hunt G.R. (2007) Overturning in a filling box *Journal of Fluid Mechanics*, 576, 297-323
- Lebey M., Cité O. (2003) Smoke movement control by a free air jet in a large compartment with a localized fire,  
Third Mediterranean Combustion Symposium, MCS3, Marrakech, 8-13 June
- Lebey M., Lambert E. (2006) Contrôle des mouvements de masses gazeuses dans les incendies en espaces semi-confinés Séminaire GDR Incendie Nancy décembre 2006 (disponible sur le site du GDR)
- Le Masson S., Nortershauser D., Deddy B., Glouannec P. (2011) Thermal model for data centre cooling *Telecommunications Energy Conference (INTELEC)*, 33rd International IEEE
- Leplat G., Barricault Ph., Reulet Ph., Millan P. (2008) Caractérisation dynamique d'un écoulement instable de convection naturelle en milieu confiné par PIV Congrès Français de Thermique SFT08, Toulouse
- Leplat G., Laroche E., Reulet Ph., Millan P. (2009) Simulations Numériques 2D d'un Ecoulement Laminaire Instable de Convection Naturelle en Milieu Confiné Congrès Français de Thermique SFT09, Vannes
- Le Quéré P. (1987), Etude de la transition à l'instationnarité des écoulements de convection naturelle en cavité verticale différentiellement chauffée par méthodes spectrales Chebyshev Thèse de Doctorat, Université de Poitiers
- Li Y.Z., Huo R., Chow W.K. (2002) On the operation time of horizontal ceiling vent in an atrium *Journal of Fire Sciences*, 20, 37-51
- Linden P.F. (1999) The fluid mechanics of natural ventilation *Annual Review Fluid Mech.*, 31, 201-238

- Linden P. F., Lane-Serff G. F., Smeed D. A. (1990) Emptying filling boxes: the fluid mechanics of natural ventilation *Journal of Fluid Mechanics*, 212, 309–335
- McGrattan K., Hostikka S., Floyd J., Baum H., Rehm R. (2002) *Fire Dynamics Simulator (Version 5) Technical Reference Guide NIST Special Publication 1018-5*
- Ménard V. (2005) *Convection naturelle dans une cavité contenant une source de chaleur Thèse de Doctorat, Ecole Nationale Supérieure de l'Aéronautique et de l'Espace*
- Mergui S., Penot F. (1996) Natural-Convection in a Differentially Heated Square Cavity Experimental Investigation at  $Ra=1.69 \cdot 10^9$   
*Int. J. Heat Mass Transfer*, 39, 3, 563-574
- Morton B. R., Taylor G. I., Turner J. S. (1956) Turbulent gravitational convection from maintained and instantaneous sources *Proceedings of the Royal Society, A* 234, 1-23
- Papanicolaou E., Jaluria Y. (1993) Mixed convection from a localized heat source in a cavity with conducting walls: a numerical study *Numerical Heat Transfer, Part A: Applications* 23, 463-484
- Paranthoën P., Gonzalez M. (2010) Mixed convection in a ventilated enclosure *Int. J. Heat and Fluid Flow*, 31, 172-178
- Penot F., N'Dame A., Le Quéré P. (1990) Investigation of the route to turbulence in a vertical differentially heated cavity *Proceeding of the 9th International Heat Transfer Conference, Jerusalem*, 2, 417-422
- Perrin L., Micheli F., Brunet Ph., Millan P. (2006) Caractérisation dynamique d'un écoulement de convection naturelle en espace confiné par LDV et PIV *Congrès Francophone de Techniques Laser, CFTL, Toulouse*.
- Philips J.C., Woods A.W. (2001) Bubble plumes generated during recharge of basaltic magma reservoirs  
*Earth and Planetary Science Letters*, 186, 297-309
- Prasad K., Pitts W., Yang J.C. (2010) Effect of wind and buoyancy on hydrogen release and dispersion in a compartment with vents at multiple levels *International Journal of Hydrogen Energy*, 35, 9218-9231
- Prétreil H., Such J.M. (2005) Effect of ventilation procedures on the behaviour of a fire compartment scenario *Nuclear Engineering and Design Journal*, 235, 20, 2125-2226
- Quintiere J.G. (1989) Fundamentals of Enclosure Fire "Zone Model" *Journal of Fire Protection Engineering*, 1, 7, 99-119

- Raji, A., Hasnaoui M. (1998) Mixed convection heat transfer in a rectangular cavity ventilated and heated from the side *Numerical Heat Transfer, Part A: Applications*, 33, 533-548,
- Raji, A., Hasnaoui M., (2000) Mixed convection heat transfer in ventilated cavities with opposing and assisting flows *Engineering Computations: Int. J. for Computer-Aided Engineering*, 17, 5, 556-572
- Rahman M.M., Alim M.A., Mamun M.A.H. (2007) Numerical study of opposing mixed convection in a vented enclosure *ARPJ J. Eng. Appl. Sci.*, 2, 25-35.
- Rahman M.M., Alim M.A., Mamun M.A.H. (2009) Finite element analysis of mixed convection in a rectangular cavity with a heat-conducting horizontal circular cylinder *Nonlinear Analysis: Modelling and Control*, 14, 217–247
- Remesh K., Tan K.H. (2006) Field Model Analysis and Experimental Assessment of Fire Severity and Smoke Movement in a Partitioned and a Non-partitioned Dwelling Unit *Journal of Fire Sciences* 24, 365-391
- Remesh K., Tan K.H. (2007) Performance Comparison of Zone Models with Compartment Fire *Journal of Fire Sciences* 25, 321
- Rubini P.A. (1997) SOFIE - Simulation of Fires in Enclosures *Proceedings 5th International Symposium on Fire Safety Science*, Melbourne, Australia, International Association for Fire Safety Science, 1326-1326
- Saeidi S.M., Khodadadi J.M. (2006) Forced convection in a square cavity with inlet and outlet ports *Int. J. Heat Mass Transfer*, 49, 11–12, 1896–1906
- Saha S., Saha G., Ali M., Islam M.Q. (2006) Combined free and forced convection inside a 2D multiple ventilated rectangular enclosure *ARPJ Journal of Engineering and Applied Sciences*, 1, 3, 23-35
- Saury D., Rouger N., Djanna, Penot F. (2011) Natural convection in an air-filled cavity: Experimental results at large Rayleigh numbers *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 38, 6, 679-687
- Saury D., Rouger N., Djanna F., Penot F. (2009) Mesures de vitesse, de température et de flux thermique en convection naturelle en espace confiné *Congrès Français de Thermique SFT09*, Vannes
- Stavarakakis G.M., Markatos N.C. (2009) Simulation of airflow in one- and two-room enclosures containing a fire source *Int. J. Heat Mass Transfer*, 52, 11-12, 2690-2703
- Schmeling D., Westhoff A., Kuhn M., Bosbach J., Wagner C. (2011) Large-scale flow structures and heat transport of turbulent forced and mixed convection in a closed rectangular cavity *Int. J. Heat and Fluid flow*, 32, 5, 889-900

- Simoneau J-P., Draoui A., Allard F. (1989) Problèmes posés par la convection mixte dans la climatisation de l'habitat : première approche en régime laminaire Rev. Gen. Therm., 325, 3139
- Steckler K. D., Quintiere J. G., Rinkinen W. J. (1982) Flow Induced by Fire in a Compartment 19th. International Symposium on Combustion, August 8-13, 1982, Haifa, Israel, Combustion Institute, Pittsburgh, PA, 913-920
- Thomas P.H., Hinkley P.L., Theobald C.R., Simms D.L. (1963) Investigations into the flow of hot gases in roof venting Fire Res. Tech. Paper 7, HMSO
- Suard S., Audouin L., Babik F., Rigollet L., Latche J.C. (2006) Verification and Validation of the ISIS CFD Code for Fire Simulation Workshop on Assessment of Calculation Methods in Fire Safety Engineering, Southwest Research Institute, San Antonio, Tx, USA,
- Tan Q., Jaluria Y. (2001) Mass flow through a horizontal vent in an enclosure due to pressure and density differences Int. J. Heat Mass Transfer, 44, 1543-1553
- Tian Y.S., Karayiannis T.G. (2000) Low turbulence natural convection in an air filled square cavity. Part I: the thermal and fluid flow field Int. J. Heat Mass Transfer, 43, 849-866
- Vauquelin O., Michaux G., Lucchesi C. (2009) Scaling laws for a buoyant release used to simulate fire-induced smoke in laboratory experiments Fire Safety Journal, 44, 665-667
- Woods, A. W., Caulfield C. P. , Phillips J. C. (2003) Blocked natural ventilation: the effect of source mass flux Journal of Fluid Mechanics 495, 119–133.
- Westhoff A., Bosbach J., Wagner C. (2008) Scaling of mixed convection in aircraft cabins 26th International Congress of the aeronautical sciences ICAS 2008
- Yu E., Joshi Y. (1997) A numerical study of three-dimensional laminar natural convection in a vented enclosure International Journal of Heat and Fluid Flow, 18, 6, 600-612
- Zukoski E.E. (1978) Development of a stratified ceiling layer in the early stages of a closed-room fire Fire and Materials, 2, 54-62
- Zvirin Y. (1982) A review of natural circulation loops in pressurized water reactors and other systems Nuclear Engineering and Design Journal, 67, 2, 203-225

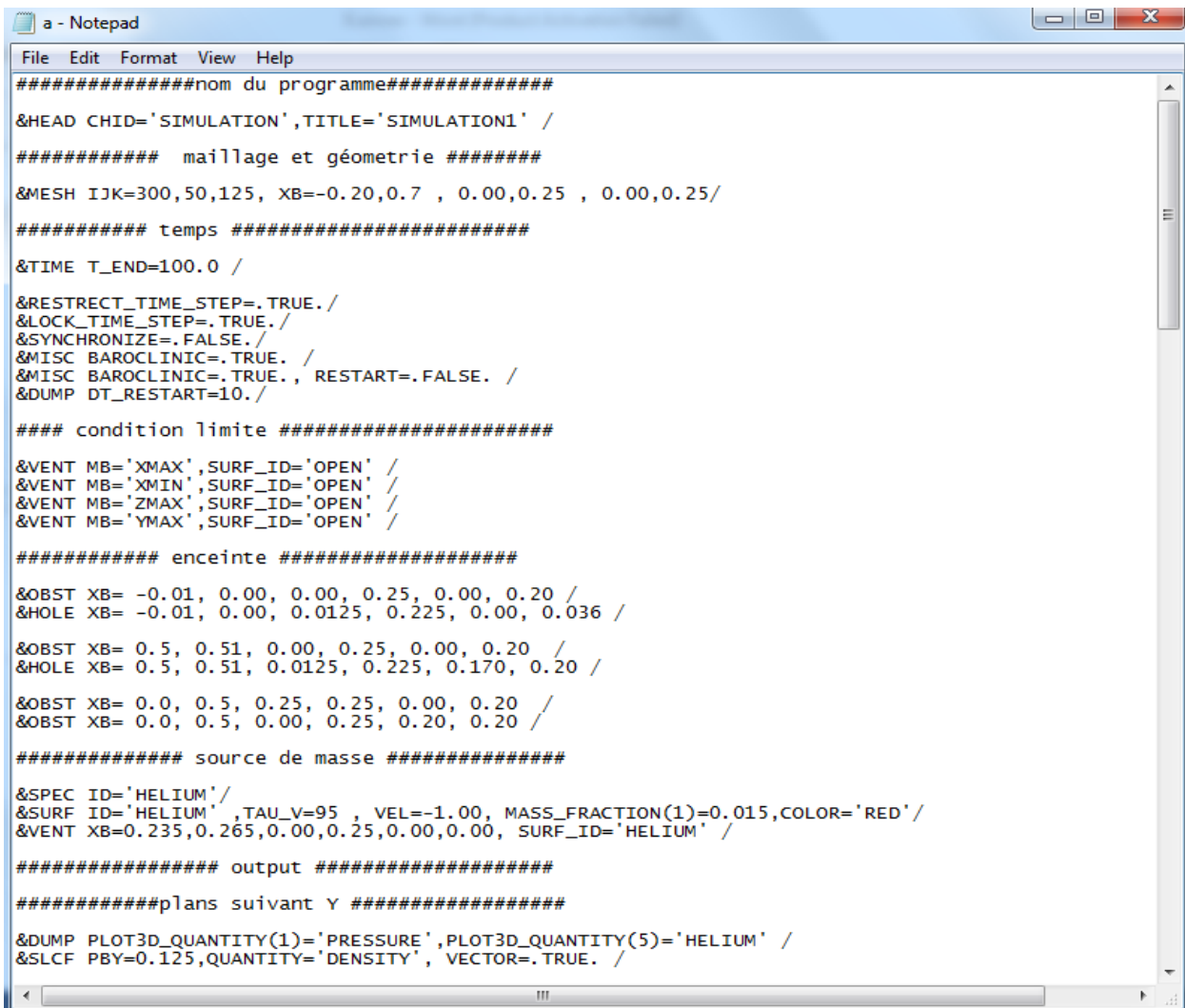
# Annexes



## Annexe A : Présentation d'exemple sur FDS

Un exemple de fichier texte est présenté par la figure (\*). Cet exemple correspond à la simulation de variation du débit au cours du temps (500 mm × 250 mm × 200 mm) non ventilé. Dans ce fichier input sont définis tous les paramètres de calcul nécessaires à la réalisation de la simulation numérique :

- La taille du domaine de calcul (900 mm × 250 mm × 250 mm) et le nombre de mailles (300 × 50 × 125), La taille de la maille est alors fixée : (300 mm) suivant x, (50 mm) suivant y, (125 mm) suivant z.



```

#####nom du programme#####
&HEAD CHID='SIMULATION',TITLE='SIMULATION1' /

##### maillage et géometrie #####
&MESH IJK=300,50,125, XB=-0.20,0.7 , 0.00,0.25 , 0.00,0.25/

##### temps #####
&TIME T_END=100.0 /

&RESTRICT_TIME_STEP=.TRUE./
&LOCK_TIME_STEP=.TRUE./
&SYNCHRONIZE=.FALSE./
&MISC BAROCLINIC=.TRUE. /
&MISC BAROCLINIC=.TRUE., RESTART=.FALSE. /
&DUMP DT_RESTART=10./

#### condition limite #####
&VENT MB='XMAX',SURF_ID='OPEN' /
&VENT MB='XMIN',SURF_ID='OPEN' /
&VENT MB='ZMAX',SURF_ID='OPEN' /
&VENT MB='YMAX',SURF_ID='OPEN' /

##### enceinte #####
&OBST XB= -0.01, 0.00, 0.00, 0.25, 0.00, 0.20 /
&HOLE XB= -0.01, 0.00, 0.0125, 0.225, 0.00, 0.036 /

&OBST XB= 0.5, 0.51, 0.00, 0.25, 0.00, 0.20 /
&HOLE XB= 0.5, 0.51, 0.0125, 0.225, 0.170, 0.20 /

&OBST XB= 0.0, 0.5, 0.25, 0.25, 0.00, 0.20 /
&OBST XB= 0.0, 0.5, 0.00, 0.25, 0.20, 0.20 /

##### source de masse #####
&SPEC ID='HELIUM'/
&SURF ID='HELIUM',TAU_V=95 , VEL=-1.00, MASS_FRACTION(1)=0.015,COLOR='RED'/
&VENT XB=0.235,0.265,0.00,0.25,0.00,0.00, SURF_ID='HELIUM' /

##### output #####

#####plans suivant Y #####

&DUMP PLOT3D_QUANTITY(1)='PRESSURE',PLOT3D_QUANTITY(5)='HELIUM' /
&SLCF PBY=0.125,QUANTITY='DENSITY', VECTOR=.TRUE. /

```

Figure (\*) : Exemple d'un fichier texte généré pour la simulation sous FDS.

**Annexe B : Exemples d'un fichier input FDS5**

```
#####nom du programme#####
&HEAD CHID='SIMULATION',TITLE='SIMULATION1' /

##### maillage et géometrie #####
&MESH IJK=300,50,125, XB=-0.20,0.7 , 0.00,0.25 , 0.00,0.25/

##### temps #####
&TIME T_END=100.0 /

&RESTRICT_TIME_STEP=.TRUE./
&LOCK_TIME_STEP=.TRUE./
&SYNCHRONIZE=.FALSE./
&MISC BAROCLINIC=.TRUE. /
&MISC BAROCLINIC=.TRUE., RESTART=.FALSE. /
&DUMP DT_RESTART=10./

##### condition limite #####
&VENT MB='XMAX',SURF_ID='OPEN' /
&VENT MB='XMIN',SURF_ID='OPEN' /
&VENT MB='ZMAX',SURF_ID='OPEN' /
&VENT MB='YMAX',SURF_ID='OPEN' /

##### enceinte #####
&OBST XB= -0.01, 0.00, 0.00, 0.25, 0.00, 0.20 /
&HOLE XB= -0.01, 0.00, 0.0125, 0.225, 0.00, 0.036 /

&OBST XB= 0.5, 0.51, 0.00, 0.25, 0.00, 0.20 /
&HOLE XB= 0.5, 0.51, 0.0125, 0.225, 0.170, 0.20 /
```

&OBST XB= 0.0, 0.5, 0.25, 0.25, 0.00, 0.20 /

&OBST XB= 0.0, 0.5, 0.00, 0.25, 0.20, 0.20 /

##### source de masse #####

&SPEC ID='HELIUM'/

&SURF ID='HELIUM' ,TAU\_V=95 , VEL=-1.00, MASS\_FRACTION(1)=0.015, COLOR='RED'/

&VENT XB=0.235,0.265,0.00,0.25,0.00,0.00, SURF\_ID='HELIUM' /

##### output #####

#####plans suivant Y #####

&DUMP PLOT3D\_QUANTITY(1)='PRESSURE',PLOT3D\_QUANTITY(5)='HELIUM' /

&SLCF PBY=0.125,QUANTITY='DENSITY', VECTOR=.TRUE. /

&SLCF PBY=0.125,QUANTITY='TEMPERATURE', VECTOR=.TRUE. /

&SLCF PBY=0.125,QUANTITY='VELOCITY', VECTOR=.TRUE. /

&SLCF PBY=0.125,QUANTITY='HELIUM' /

##### capteurs #####

#####ouverture inferieure#####

&DEVC XB=0.00, 0.00, 0.0125, 0.225, 0.0, 0.036, QUANTITY='TEMPERATURE',

ID='T\_MOY1', STATISTICS='MEAN' /

&DEVC XB=0.00, 0.00,0.0125, 0.225, 0.0, 0.036, QUANTITY='DENSITY', ID='D\_MOY',

STATISTICS='MEAN' /

&DEVC XB=0.00, 0.00,0.0125, 0.225, 0.0, 0.036, QUANTITY='VOLUME FLOW', ID='debit1',

STATISTICS='MEAN' /

&DEVC XB=0.00, 0.00,0.0125, 0.225, 0.0, 0.036, QUANTITY='MASS FLOW', ID='debit1',

STATISTICS='MEAN' /

&DEVC XB=0.00, 0.00,0.0125, 0.225, 0.0, 0.036, QUANTITY='VELOCITY', ID='V1',

STATISTICS='MEAN' /

&DEVC XB=0.00, 0.00,0.0125, 0.225, 0.02, 0.02, QUANTITY='TEMPERATURE',  
ID='TEMP2', STATISTICS='MEAN' /

&DEVC XB=0.00, 0.00,0.0125, 0.225, 0.018, 0.018, QUANTITY='TEMPERATURE',  
ID='TEMP 18', STATISTICS='MEAN' /

&DEVC XB=0.00, 0.00,0.0125, 0.225, 0.034, 0.034, QUANTITY='TEMPERATURE',  
ID='TEMP 34', STATISTICS='MEAN' /

&DEVC XB=0.00, 0.00,0.0125, 0.225, 0.0, 0.036, QUANTITY='U-VELOCITY', ID='V\_MOY3',  
STATISTICS='MEAN' /

&DEVC XB=0.00, 0.00,0.0125, 0.225, 0.000, 0.000, QUANTITY='U-VELOCITY',  
ID='V\_MOY-3.0', STATISTICS='MEAN' /

&DEVC XB=0.00, 0.00,0.0125, 0.225, 0.002, 0.002, QUANTITY='U-VELOCITY',  
ID='V\_MOY-3.2', STATISTICS='MEAN' /

&DEVC XB=0.00, 0.00,0.0125, 0.225, 0.004, 0.004, QUANTITY='U-VELOCITY',  
ID='V\_MOY-3.4', STATISTICS='MEAN' /

&DEVC XB=0.00, 0.00,0.0125, 0.225, 0.006, 0.006, QUANTITY='U-VELOCITY',  
ID='V\_MOY-3.6', STATISTICS='MEAN' /

&DEVC XB=0.00, 0.00,0.0125, 0.225, 0.008, 0.008, QUANTITY='U-VELOCITY',  
ID='V\_MOY-3.8', STATISTICS='MEAN' /

&DEVC XB=0.00, 0.00,0.0125, 0.225, 0.010, 0.010, QUANTITY='U-VELOCITY',  
ID='V\_MOY-3.10', STATISTICS='MEAN' /

&DEVC XB=0.00, 0.00,0.0125, 0.225, 0.012, 0.012, QUANTITY='U-VELOCITY',  
ID='V\_MOY-3.12', STATISTICS='MEAN' /

&DEVC XB=0.00, 0.00,0.0125, 0.225, 0.014, 0.014, QUANTITY='U-VELOCITY',  
ID='V\_MOY-3.14', STATISTICS='MEAN' /

&DEVC XB=0.00, 0.00,0.0125, 0.225, 0.016, 0.016, QUANTITY='U-VELOCITY',  
ID='V\_MOY-3.16', STATISTICS='MEAN' /

&DEVC XB=0.00, 0.00,0.0125, 0.225, 0.018, 0.018, QUANTITY='U-VELOCITY',  
ID='V\_MOY-3.18', STATISTICS='MEAN' /

&DEVC XB=0.00, 0.00,0.0125, 0.225, 0.020, 0.020, QUANTITY='U-VELOCITY',  
ID='V\_MOY-3.20', STATISTICS='MEAN' /

&DEVC XB=0.00, 0.00,0.0125, 0.225, 0.022, 0.022, QUANTITY='U-VELOCITY',  
ID='V\_MOY-3.22', STATISTICS='MEAN' /

&DEVC XB=0.00, 0.00,0.0125, 0.225, 0.024, 0.024, QUANTITY='U-VELOCITY',  
ID='V\_MOY-3.24', STATISTICS='MEAN' /

&DEVC XB=0.00, 0.00,0.0125, 0.225, 0.026, 0.026, QUANTITY='U-VELOCITY',  
ID='V\_MOY-3.26', STATISTICS='MEAN' /

&DEVC XB=0.00, 0.00,0.0125, 0.225, 0.028, 0.028, QUANTITY='U-VELOCITY',  
ID='V\_MOY-3.28', STATISTICS='MEAN' /

&DEVC XB=0.00, 0.00,0.0125, 0.225, 0.030, 0.030, QUANTITY='U-VELOCITY',  
ID='V\_MOY-3.30', STATISTICS='MEAN' /

