

Ministère de l'Enseignement Supérieure et de la Recherche Scientifique
Ecole Nationale Polytechnique



المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
Ecole Nationale Polytechnique

Département de Génie Mécanique

Projet de fin d'études
pour l'obtention du diplôme d'Ingénieur d'Etat en Génie Mécanique

Thème :

**Ecoulement induit par une source de flottabilité dans
une enceinte à deux ouvertures**

Encadré par

- Dr Bouzid Benkoussas, MC(A), ENP
- Pr Olivier Vauquelin, AMU
- Pr Eric Valério, AMU

Présenté par

- Mlle Nabila Yasmine IKEN

*« Ce n'est pas dans la science qu'est le bonheur, mais dans
l'acquisition de la science. »*

Edgar Allan Poe

Remerciements

*Je remercie chaleureusement mes professeurs encadrants
Benkoussas Bouzid, Vauquelin Olivier et Valérie Eric
pour le temps qu'ils m'ont consacré, les conseils qu'ils m'ont donnés
et leur apport scientifique, ainsi que toute personne ayant contribué
de près ou de loin à la réalisation de mon humble travail.*

*Aux enseignants du département de Génie Mécanique de
l'Ecole Nationale Polytechnique d'Alger, formateurs
d'exception qui m'ont transmis la passion du métier, je tiens à
exprimer ma profonde gratitude et ma reconnaissance la plus
sincère.*

Dédicaces

À ma mère, pour son amour capable de déplacer des montagnes,

À mon père pour sa dévotion sans limite,

À ma grand-mère pour son humour et sa gentillesse,

À mes alliées pour la vie, mes chères sœurs Neila et Fella,

*À mes amis qui ont cru en moi et m'ont soutenue dans les
moments de doute,*

À mes enseignants qui m'ont formée en tant qu'ingénieure,

À tous ceux qui m'ont forgée en tant que personne,

Je dédie ce modeste travail comme symbole de mon affection.

ملخص: يتعلق هذا المشروع على الدراسة العددية والتجريبية لظاهرة التهوية الطبيعية المسببة بمصدر طفو داخل علبة لها فتحة على الجدار العمودي الأيسر بجوار الأرضية، وعلى الجدار العمودي الأيمن بجوار السقف. سوف نتحدث عن مختلف أنظمة التدفق التي يمكن أن نوجدها في العلبة، وكذلك شروط مرور هذه التدفقات من نظام إلى آخر. يتم استخدام برنامج المحاكات الديناميكية للحريق (FDS) لتحديد مختلف الأنظمة وتطويرها من حيث ظروف الحقن والشروط الهندسية. يتم التعبير عن هذه الشروط على شكل إرتباطات بين عدد فرود على مستوى الحقن، عامل هندسي (ارتفاع الفتحة العليا)، وكذلك كثافة الغاز المحقون، ذلك يسمح لنا بتنبؤ سلوك التدفق بوصفه نسبة لسرعة الحقن. تمت محاولة التحقق من صحة النتائج التي تم الحصول عليها عدديًا، وقد لوحظ اتفاق جزئي مع الارتباطات التي وضعتها الاختبارات التجريبية.

الكلمات المفتاحية: التهوية الطبيعية، عدد فرود، المحاكات الديناميكية للحريق (FDS)، نظم التدفق، الطفو.

Résumé: Le présent projet a pour objet une étude numérique et expérimentale du phénomène de ventilation naturelle induit par une source de flottabilité à l'intérieur d'une enceinte dotée d'une ouverture sur la paroi verticale gauche à proximité du sol et sur la paroi verticale droite à proximité du plafond. Il est question des différents régimes d'écoulement pouvant exister dans l'enceinte, ainsi que des conditions de passage de ces écoulements d'un régime à un autre. Le logiciel FDS est utilisé pour déterminer ces différents régimes ainsi que leur évolution en fonction des conditions d'injection et des conditions géométriques. Celles-ci sont exprimées sous forme de corrélations reliant le nombre de Froude d'injection au paramètre géométrique (hauteur de l'ouverture de sortie), ainsi qu'à la masse volumique du fluide injecté, ce qui permettra de prévoir le comportement de l'écoulement en fonction de la vitesse d'injection. Une tentative de validation des résultats numériques obtenus, en l'occurrence les corrélations établies par des tests expérimentaux a été entreprise et une concordance partielle a été observée.

Mots clés: Ventilation naturelle, FDS, Nombre de Froude densitométrique, Régimes d'écoulement, Flottabilité.

Abstract: The objective of the present project is to study numerically and experimentally the natural ventilation phenomenon generated by a buoyancy source in an enclosure with an opening on the left vertical wall close to the ground, and an opening on the right vertical wall close to the ceiling. This work is about the different flow regimes that exist in the enclosure, and the conditions of passage between one regime and another. The FDS software is used to determine the different regimes and their evolution in terms of injection conditions and geometrical conditions. These are expressed as correlations between the Froude number of injection and the geometrical parameter (height of the outlet opening) as well as the density of the injected fluid. This allows us to predict the behavior of the flow as a function of the injection speed. A test of validation of numerical results obtained (in this case the correlations established by experimental tests) was made and a partial agreement was observed.

Keywords: Natural ventilation, FDS, Densitometrical Froude number, Flow regime, Buoyancy.

Nomenclature

Liste des abréviations, sigles et acronymes

CFD	Computational Fluid Dynamics
FDS	Fire Dynamics Simulator
HVAC	Heating, Ventilating and Air-conditioning
LASER	Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation
LES	Large Eddy Simulation
NIST	National Institute of Science and Technology
VTT	"Valtion Teknillinen Tutkimuskeskus"

Symboles et unités

A	Section	m^2
a	Diffusivité thermique	$m^2.s^{-1}$
C	Capacité thermique	$J.kg^{-1}.K^{-1}$
e	Epaisseur de la buse d'injection	m
g	Accélération de la pesanteur	$m.s^{-2}$
H	Hauteur de l'enceinte	m
l	Largeur de l'enceinte	m
L	Longueur de l'enceinte	m
Q_v	Débit volumique	$m^3.s^{-1}$
t	Temps	s
T	Température	K
U	Composante horizontale de la vitesse	$m.s^{-1}$
V	Vitesse d'injection	$m.s^{-1}$
μ	Viscosité dynamique	$kg.m^{-1}.s^{-1}$
ν	Viscosité cinématique	$m^2.s^{-1}$
ρ	Masse volumique	$kg.m^{-3}$
χ	Fraction volumique de l'hélium dans le mélange	

$$Fr = \frac{v^2}{eg}$$

Nombre de Froude

$Fr^* = \frac{V^2}{\frac{\Delta\rho}{\rho} eg}$	Nombre de Froude densitométrie
$Ra = \frac{g\beta\Delta T_o H^3}{\nu a}$	Nombre de Rayleigh
$Gr = \frac{g\beta\Delta T_o H^3}{\nu^2}$	Nombre de Grashof
$Pr = \frac{\nu}{a}$	Nombre de Prandtl
$Re = \frac{e\rho V}{\mu}$	Nombre de Reynolds
$Ri = \frac{g\beta\Delta T_o H}{U^2}$	Nombre de Richardson

Indices et exposants

*	Densitométrie
e	Ouverture inférieure
i	Injection
moy	Moyenne
o	Milieu extérieur
s	Ouverture supérieure
NI	Passage du naturel à l'intermédiaire
IB	Passage de l'intermédiaire au bloqué

Figures et illustrations

Figure	Page
Figure 1.2: Schéma d'un écoulement entre parois verticales différentiellement chauffées.....	4
Figure 1.3: Modélisation d'un panache plan par Baines et Turner (1968)	6
Figure 1.4 :(a) Régime de mélange. (b) Régime de déplacement	7
Figure 1.5: Ecoulement dans deux enceintes connectées.....	8
Figure 1.6: (a) Régime bloqué, (b) Régime naturel	9
Figure 2.1: Les régimes d'écoulement existants dans l'enceinte	13
Figure 2.3: Procédure d'exploitation du logiciel FDS	19
Figure 2.4 (a) : Le domaine de référence	20
Figure 2.4 (b) : Domaine réduit.....	20
Figure 2.4(c): Profils de vitesse moyenne à l'orifice d'entrée pour un domaine réduit et le domaine de référence	20
Figure 2.5: (a) schéma des sous-domaines de maillage, (b) aspect du domaine obtenu sur Smokeview	21
Figure 2.6 : Profils de vitesse moyenne au niveau de l'entrée pour le domaine optimal et le domaine de référence	21
Figure 2.7 : Profils de vitesse moyenne au niveau de la sortie pour le domaine optimal et le domaine de référence	22
Figure 2.8: Aspect de la grille de maillage sur Smokeview	23
Figure 2.10 : Capteurs de vitesse et de masse volumique à l'orifice d'entrée	24
Figure 2.11 : Capteurs de vitesse et de masse volumique à l'orifice de sortie.....	25
Figure 2.12 : Profils de vitesses horizontales moyennes au niveau de l'orifice d'entrée sur différents plan Y	25
Figure 2.13 : Profils de vitesses horizontales moyennes au niveau de l'orifice de sortie sur différents plan Y	26
Figure 2.14: profil de vitesse horizontale moyenne au niveau de l'entrée en régime naturel..	28

Figure 2.15: profil de vitesse horizontale moyenne au niveau de la sortie en régime naturel .	28
Figure 2.16 : Champs de vitesse en régime naturel à t=1s	29
Figure 2.17 : Champs de vitesse en régime naturel à t=5s	29
Figure 2.18 : Champs de vitesse en régime naturel à t=16s	29
Figure 2.19 : profil de vitesse horizontale moyenne au niveau de l'entrée en régime intermédiaire.....	30
Figure 2.20 : profil de vitesse horizontale moyenne au niveau de la sortie en régime intermédiaire.....	30
Figure 2.21 : Champs de vitesse en régime intermédiaire à t=0,8s.....	31
Figure 2.22 : Champs de vitesse en régime intermédiaire à t=4s.....	31
Figure 2.23 : Champs de vitesse en régime intermédiaire à t=11s.....	31
Figure 2.24 : profil de vitesse horizontale moyenne au niveau de l'entrée en régime bloqué .	32
Figure 2.25 : profil de vitesse horizontale moyenne au niveau de la sortie en régime bloqué	32
Figure 2.26 : Champs de vitesse en régime bloqué à t=0,6s	33
Figure 2.27 : Champs de vitesse en régime bloqué à t=2s	33
Figure 2.28 : Champs de vitesse en régime bloqué à t=5s	33
Figure 2.29 : Evolution des vitesses horizontales moyennes aux orifices en fonction de la vitesse d'injection.....	37
Figure 2.31 : Champs de vitesse horizontale moyenne à l'entrée pour différentes vitesses d'injection.....	38
Figure 2.36 : Evolution du nombre de Froude de passage du régime naturel au régime intermédiaire et de l'intermédiaire au bloqué en fonction du paramètre de forme H_s/H	41
Figure 2.37 : Evolution du logarithme népérien du nombre de Froude de passage du régime naturel au régime intermédiaire et de l'intermédiaire au bloqué en fonction du logarithme népérien de H_s/H	42
Figure 2.38 : Evolution du nombre de Froude de passage du régime naturel au régime intermédiaire en fonction de $\Delta\rho/\rho$	43

Figure 2.40 : Evolution du nombre de Froude de passage du régime intermédiaire au régime bloqué en fonction de $\Delta\rho/\rho$	44
Figure 3.1 : Maquette expérimentale.....	45
Figure 3.2 : Schéma du dispositif expérimental	46
Figure 3.3 (a) : Schéma du plan LASER de visualisation.....	47
Figure 3.4 (b) : Image réelle du plan LASER de visualisation	47
Figure 3.5 : Ensemencement du mélange air hélium par des sels d'ammonium	48
Figure 3.6 : Courbe expérimentale pour l'évolution du nombre de Froude densitométrique du passage du régime naturel au régime intermédiaire en fonction de H_s/H	51
Figure 3.7 : Courbe expérimentale pour l'évolution du nombre de Froude densitométrique du passage du régime intermédiaire au régime bloqué en fonction de H_s/H	51
Figure 3.8 : Courbe expérimentale pour l'évolution du nombre de Froude densitométrique du passage du régime naturel au régime intermédiaire en fonction de $0,06 < H_s/H < 0,18$	52
Figure 3.10: Courbe expérimentale pour l'évolution du logarithme népérien du nombre de Froude densitométrique du passage du régime naturel au régime intermédiaire en fonction du logarithme de H_s/H pour $0,06 < H_s/H < 0,18$	53
Figure 3.11: Courbe expérimentale pour l'évolution du logarithme du nombre de Froude densitométrique du passage du régime intermédiaire au régime bloqué en fonction du logarithme de H_s/H pour $0,06 < H_s/H < 0,18$	54

Liste des tableaux

Tableau	Page
Tableau 2.1 : Matrice dimensionnelle des grandeurs physiques	15
Tableau 2.2 : Tailles et nombre des mailles dans les trois dimensions de l'espace pour les trois sous-domaines	23
Tableau 2.4: Tableau récapitulatif des nombres de Froude de changement de régime pour différentes valeurs de H_s/H	35
Tableau 2.5 : Tableau des différents régimes obtenus pour différentes masses volumiques d'injection pour la 1 ^{ère} série de simulations	36

Tableau 2.6 : Tableau récapitulatif des nombres des valeurs de $\Delta\rho/\rho$ de changement de régime pour différentes valeurs de vitesse d'injection.....	36
Tableau 3.1 : Résultats expérimentaux pour le passage du régime naturel au régime intermédiaire.....	49
Tableau 3.2 : Résultats expérimentaux pour le passage du régime intermédiaire au régime bloqué.....	50
Tableau 3.3 : bilan comparatif des résultats numériques et résultats expérimentaux	55

TABLE DES MATIERES

INTRODUCTION	1
CHAPITRE (1) : ETAT DE L'ART	3
1.1. Aspect thermique.....	3
1.1.1. Etude de la convection dans un compartiment fermé	3
1.1.3. Source de chaleur à l'intérieur d'une enceinte ouverte	5
1.2. Aspect cinématique	5
1.2.1. Etude des panaches de fluide à l'intérieur d'espaces clos.....	5
1.2.2. Etude du remplissage (expérience du « filling box », 1969).....	6
1.2.3. Ventilation dans une enceinte ouverte.....	6
1.2.4. Modélisation physique des régimes d'écoulements	9
1.3. Ventilation et incendies	10
1.1. Synthèse et conclusion	11
CHAPITRE (2) : ETUDE NUMERIQUE DE L'ECOULEMENT DANS L'ENCEINTE	13
2.1. Définition de la problématique.....	13
2.2. Analyse dimensionnelle du problème	14
2.1. Description de l'outil numérique.....	17
2.1.1. Modèle mathématique	17
2.1.2. Prise en main du logiciel	18
2.2. Fichier Input et maquette numérique	19
2.2.1. Rédaction du fichier input	19
2.2.2. Mise en évidence de la symétrie du problème	25
2.3. Identification numérique des régimes d'écoulement	26
2.4. Résultats numériques.....	34
2.4.1. Etude de l'influence du paramètre géométrique H_s sur les régimes d'écoulement	34
2.4.2. Etude de l'influence de la masse volumique d'injection.....	35
2.5. Traitement et exploitation des données numériques	37
2.5.2. Cas général : étude de l'effet des paramètres H_s/H et $\Delta\rho/\rho$	41
CHAPITRE (3) : ETUDE EXPERIMENTALE	45
3.1. Configuration expérimentale étudiée	45

3.2. Descriptif du dispositif expérimental	45
3.3. Techniques de mesure et de contrôle	46
3.3.1. Mesure du débit	46
3.3.2. Visualisation.....	47
3.4. Protocole expérimental.....	48
3.5. Résultats obtenus.....	48
3.6. Comparaison avec les résultats numériques et interprétation	52
CONCLUSION GENERALE	56
PERSPECTIVES.....	58
RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....	59
ANNEXE	61

Introduction



Introduction

Au temps des Bâd-gîr¹ qui ornent les paysages iraniens jusqu'à ce jour, les architectes persans exploitaient déjà le phénomène de refroidissement grâce à un jeu de pression -en plus des propriétés de la terre crue de faible conductivité thermique- afin de rafraîchir les espaces bas dans les mosquées et les maisons en pleine journée, avant même l'avènement des sciences des transferts de chaleur et de la chimie.

Dans la Rome antique et jusqu'au Moyen-Age², les fenêtres, à l'époque sont de simples trous d'aération, dotés de volets opaques, assurent la circulation de l'air dans les bâtiments grâce aux différences de pression dues au vent, et aux gradients de températures. La nécessité de se protéger du froid a conduit à l'utilisation d'éléments translucides en guise de fenêtres afin d'assurer une meilleure isolation et de laisser la lumière pénétrer dans les espaces intérieurs. C'est à ce moment-là que les bâtiments sont devenus des espaces confinés, nécessitant un renouvellement d'air efficace. En Angleterre, prisons, navires, mines et casernes qui ont été les sièges d'épidémies de Typhus (ou « fièvre des prisons ») dues à de mauvaises conditions d'hygiène et de fortes densités humaines, ont attiré l'attention des scientifiques, ce qui a mené à l'invention des ancêtres des systèmes de ventilation modernes, tels que les ventilateurs à soufflet inventé par Stephen Hales au XVIII^e siècle [1], ou les ventilateurs rotatifs actionnés par des moulins à vent, ou des balanciers.

En 1767, Léopold de Genneté [2] met en évidence les inconvénients d'une ventilation mécanique dans les hôpitaux, et propose de reproduire la ventilation par appel d'air pratiqué à Liège (Belgique) dans les mines. Le courant hygiéniste³ qui a provoqué une prise de conscience générale quant à la nécessité de lutter contre l'insalubrité des lieux publics et privés a donné un important tremplin au développement de la ventilation, en tandem avec l'apparition des lois de transfert thermique. En France, les grands espaces sont ventilés mécaniquement en utilisant des machines à vapeur, et l'usage de ventilateurs domestiques est obligatoire dans les appartements, particulièrement là où des équipements à gaz sont utilisés. Après l'apparition de la climatisation moderne (début du XX^e siècle) qui a connu son essor aux Etats-Unis sous le dénominateur HVAC, suivie du choc pétrolier de 1973, économie d'énergie et isolation thermique sont les

¹ Élément traditionnel de l'architecture persane.

² Période de l'histoire européenne, s'étendant du Ve siècle au XVe siècle.

³ Courant de pensée du milieu du XIX^e siècle réattribuant leur importance à l'air respiré, au travail, au repos, et à la propreté, s'appuyant sur les découvertes de Louis Pasteur en microbiologie.

mots d'ordre des décideurs mondiaux. Les bâtiments devenus très étanches, nécessitent plus que jamais la ventilation et la déshumidification. Le protocole de Kyoto⁴ signe le début d'une ère d'optimisation énergétique des bâtiments [3] qui deviennent des entités de haute technicité.

Le XXI^{ème} siècle où la CFD trouve son essor, et où tous les regards sont portés vers le développement durable, la ventilation naturelle intéresse les laboratoires du monde entier. Et pour cause, les applications qui en découlent sont innombrables, dont le désenfumage d'espaces clos, le refroidissement de dispositifs électroniques, l'évacuation de gaz toxiques, la météorologie, l'océanographie, en plus du conditionnement d'air.

Mais la grande complexité et l'imprévisibilité de certains phénomènes de ventilation naturelle fait que les modèles physiques proposés jusqu'à ce jour par la communauté scientifique, ne solutionnent que certains cas particuliers et ne parviennent pas encore à établir des lois analytiques générales. Le recours à la résolution numérique d'un problème type semble être la première étape vers une appréciation à la fois qualitative et quantitative du phénomène physique. Cette première étape servira de base de données pour d'éventuelles expérimentations, et d'éventuels modèles analytiques.

Le présent projet consiste en l'étude du phénomène de ventilation naturelle apparaissant lors de l'injection d'une source de flottabilité (un mélange d'air et d'Hélium) à l'intérieur d'une enceinte parallélépipédique munie d'une ouverture basse, et d'une ouverture haute. L'étude sera à vocation numérique, quantitative mais aussi qualitative, et aura pour but de déterminer les différents régimes d'écoulement pouvant exister dans l'enceinte, ainsi que les conditions d'injection (débit massique et volumique) et les paramètres géométriques (hauteur des ouvertures) permettant la transition entre un régime d'écoulement et un autre. La résolution du problème se fera moyennant le logiciel FDS [4] et son programme de visualisation Smokeview [5]. Ce document sera donc structuré de la manière suivante : le premier chapitre contiendra une bibliographie rassemblant les progrès effectués dans le domaine, le deuxième chapitre à l'analyse dimensionnelle du phénomène, ainsi qu'à la description de l'outil numérique, la procédure suivie, et les résultats numériques. Le troisième chapitre rassemblera les résultats expérimentaux obtenus, et leur comparaison avec les résultats numériques. Le document sera clôturé par une conclusion qui servira de synthèse et de base à d'éventuelles perspectives de recherche.

⁴ Accord international visant à la réduction des émissions de gaz à effet de serre (1997).

Chapitre 1 :

Etat de l'art



Chapitre1 : Etat de l'art

L'étude des écoulements dans des espaces clos fut le premier pas vers la théorisation de la ventilation, mais pas seulement. En effet, la convection induite par ces écoulements en espaces confinés trouve application dans divers domaines, que ce soit dans le secteur industriel ou domestique. Ces applications ont toutes pour point commun la nécessité d'évacuer un excès de chaleur (refroidissement), et de produits nocifs (humidité, fumée d'incendie ...etc.). Ainsi, les pertinents travaux antérieurs se sont articulés autour de ces deux thèmes principaux : le transfert de chaleur (aspect thermique des écoulements), et le renouvellement d'air (l'aspect cinématique). Voici un récapitulatif retraçant les avancées majeures dans le domaine.

1.1. Aspect thermique

Afin de refroidir des bâtiments ou des dispositifs électroniques ou téléphoniques souvent placés en espaces confinés, les scientifiques se sont penchés sur le phénomène de convection (naturelle, mixte, ou forcée, selon les écarts de température en jeu). Ces derniers sont parvenus à modéliser les phénomènes obtenus dans diverses configurations par des corrélations, moyennant les nombres adimensionnels du transfert thermique (nombre de Rayleigh, nombre de Prandtl, nombre de Nusselt...etc.), et les paramètres géométriques de leurs modèles.

1.1.1. Etude de la convection dans un compartiment fermé

a- Parois horizontales chauffées (convection de Rayleigh-Bénard)

Dans la configuration de la figure (1.1), un gradient de température est obtenu par chauffage de la paroi horizontale basse de l'enceinte, et refroidissement de la paroi horizontale haute de celle-ci. Selon Ostrach et al. [6] il existe un nombre de Rayleigh critique au-dessus duquel l'écoulement devient instable, ce qui se traduit par l'apparition de rouleaux dans les champs de vitesse. Le rapport $\frac{H}{L}$ (où H est la hauteur de l'enceinte, et L sa largeur) détermine quant à lui la valeur du nombre de Rayleigh critique, mais aussi l'étendue de l'instabilité (soit le nombre de rouleaux). Un autre résultat majeur est la forme de la relation qui relie le nombre de Rayleigh au nombre de Nusselt. Selon Chavanne et al. [7], l'évolution du nombre de Nusselt serait proportionnelle à la racine carrée du nombre de Rayleigh pour des valeurs du nombre de Rayleigh dépassant 10^7 .

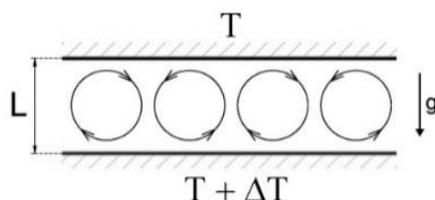


Figure 1.1: Schéma d'un écoulement Rayleigh-Bénard

a- Parois verticales différentiellement chauffées

La configuration de la figure (1.2) est le siège d'une grande circulation d'air à l'intérieur de l'enceinte par effet de flottabilité. En effet, l'air chaud monte au voisinage de paroi chauffée, longe le plafond de l'enceinte, et redescend une fois refroidi au contact de la paroi froide pour rejoindre la paroi chaude par le bas, ce qui permet à des couches limites se développer au contact des parois, ainsi que l'apparition de zones de recirculations au centre de l'enceinte selon Penot et al. [8].

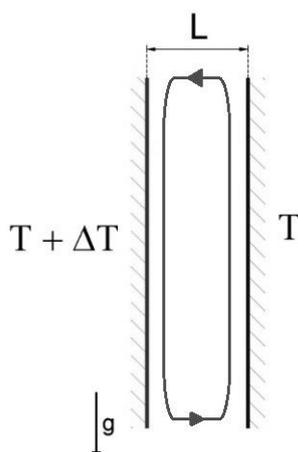


Figure 1.2: Schéma d'un écoulement entre deux parois verticales différentiellement chauffées

1.1.2. Source de chaleur à l'intérieur d'une enceinte fermée

De multiples configurations ont été traitées dans le but de quantifier l'effet de la taille et de la puissance de la source de chaleur sur le phénomène de convection. Des études ont été menées en utilisant une ou plusieurs sources de chaleur sous forme de cylindre de section carrée [9], [10] ou circulaire [11], dans des enceintes parallélépipédiques (dont la plupart ont des parois adiabatiques). Ces sources de chaleurs ont tantôt été placées sur une paroi de l'enceinte, tantôt au sol de celle-ci. Les principaux résultats de ces études montrent que la puissance de la convection qui prend place dans l'enceinte dépend fortement de la puissance de

la source ainsi que de sa taille [12], et que les régimes d'écoulement dépendaient de la position de cette source, à la géométrie de l'enceinte, ainsi que du nombre de Rayleigh [13].

1.1.3. Source de chaleur à l'intérieur d'une enceinte ouverte

Les études faites autour de la convection (naturelle ou mixte) dans des espaces confinés connectés au milieu extérieur par des ouvertures ont montré que les principaux paramètres influant sur le phénomène sont encore le nombre de Grashof, le nombre de Rayleigh, mais aussi l'emplacement et la taille des ouvertures. Ces études essentiellement numériques se sont ainsi focalisées sur l'effet de largeur et de la position de ces ouvertures sur les champs de vitesse et de pression dans l'enceinte, pour différentes configurations : ouvertures horizontales et source de chaleur au sol [14], ouverture verticales et source de chaleur au sol [15]...etc. Il a été observé que le fluide environnant pouvait pénétrer à l'intérieur de l'espace clos verticalement ou horizontalement, selon la disposition des ouvertures. En outre, il a été découvert que dans ce type de configurations, la transition entre convection naturelle et forcée était régie par un nombre adimensionnel, décrit comme le rapport des forces de flottabilité sur les forces d'inertie, et appelée « nombre d'Archimède », dont la formule est la suivante : $\frac{Ra}{Re^2 Pr}$ [16].

1.2. Aspect cinématique

Si l'aspect thermique de la convection en espaces confinés accorde une attention particulière à la distribution de la température et de la puissance thermique, l'aspect cinématique de la ventilation concerne la dynamique de ces écoulements, en l'occurrence les régimes d'écoulement, et les différents paramètres physiques qui influent sur ces derniers. Cela passe par l'étude de la physique du remplissage et de la vidange des espaces confinés, des panaches de fluides, de la stratification ...etc.

1.2.1. Etude des panaches de fluide à l'intérieur d'espaces clos

L'effet d'une source de flottabilité à l'intérieur d'un espace clos a été étudié et qui des solutions permettant de décrire la cinématique d'un panache de fluide pour des sources ponctuelles et linéaires ont été proposées, dans un milieu stratifié, en portant une attention particulière aux panaches circulaires axisymétriques [17]. Les différentes expériences et observations ont permis de considérer l'hypothèse selon laquelle la géométrie des panaches et les propriétés de l'environnement dépendent directement et uniquement de la géométrie et de l'intensité de la source de flottabilité.

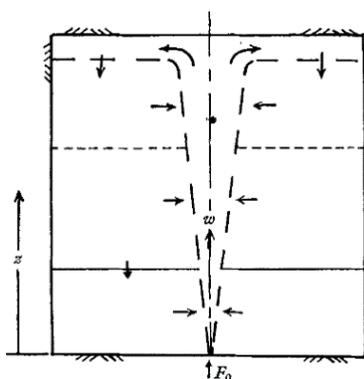


Figure 1.3: Modélisation d'un panache plan par Baines et Turner (1968)

1.2.2. Etude du remplissage (expérience du « filling box », 1969)

Baines et Turner [18] se sont également penchés sur le phénomène de remplissage d'espaces clos, en s'intéressant au cas d'une source de flottabilité à l'intérieur d'une enceinte fermée, afin d'observer l'éventuelle stratification résultante. Il a été déduit de cette étude que pour une enceinte dont la hauteur est inférieure à la largeur, le panache s'étale au niveau du plafond et forme une couche stratifiée de température supérieure. La hauteur de l'interface de délimitation de cette couche chaude par rapport au reste de l'environnement (de moindre température) varie alors avec le temps selon la relation :

$$\frac{z_0}{H} = \frac{4\alpha}{5} \left(\frac{18\alpha}{5\pi} \right)^{\frac{1}{3}} \frac{tH^{\frac{2}{3}}B_0^{\frac{1}{3}}}{R^2} + 1 \quad (1.1)$$

Avec B_0 le flux de flottabilité, $\alpha=0,083$ (le coefficient d'entraînement), R et H le rayon et la hauteur de l'enceinte respectivement.

1.2.3. Ventilation dans une enceinte ouverte

Les mécanismes de la ventilation naturelle se produisant en présence d'une source de flottabilité à l'intérieur d'un espace confiné, dans le but de fournir aux ingénieurs du bâtiment des outils de développement de systèmes de ventilation naturelle efficaces ont été étudiés [19]. Pour ce faire, leurs recherches se sont axées sur l'influence des différentes ouvertures, leurs tailles, leurs emplacements, et le débit de l'écoulement résultant (ou le renouvellement d'air).

Ainsi, selon cette même étude, dans une enceinte connectée au milieu extérieur par une ouverture basse et une ouverture haute, deux régimes d'écoulement en ont été identifiés : la ventilation par mélange qui se produit quand les fluides de densités différentes se mélangent, notamment quand le fluide de forte densité pénètre dans l'enceinte par l'orifice du haut,

figure(1.4.a), et le régime de déplacement, qui correspond à un état de forte stratification qui se produit quand le fluide le plus dense pénètre dans l'enceinte par l'orifice du bas, figure 1.4(b). En régime de déplacement, deux zones de densités supposées homogènes apparaissent, et la hauteur de celles-ci et de l'interface qui les sépare ont fait l'objet d'une attention particulière. En effet, moyennant les équations bilan de la mécanique des fluides, cette hauteur a pu être modélisée en régime permanent.

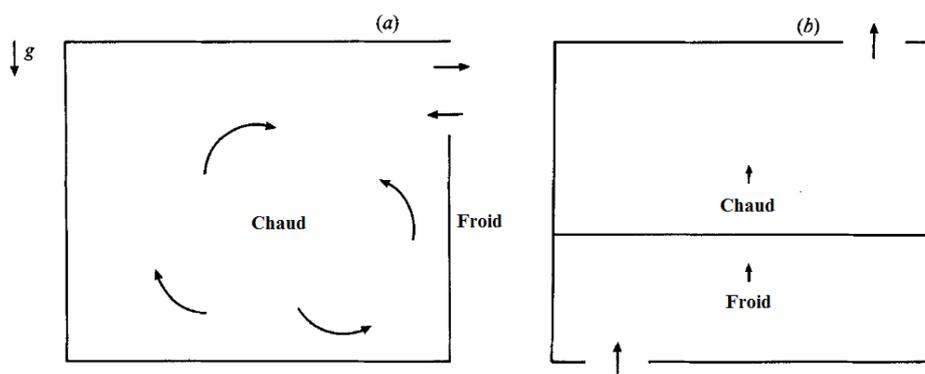


Figure 1.4 :(a) Régime de mélange. (b) Régime de déplacement

Les deux régimes d'écoulement cités précédemment ont été étudiés de plus près [18] dans le but d'offrir aux constructeurs des outils permettant de dimensionner les différents bâtiments dans une optique de confort et de qualité de vie. En effet, les designers modernes qui répondent à des exigences croissantes en éclairage et en ergonomie, usent de matériaux et de formes nouvelles qui représentent un défi pour les mécaniciens des fluides spécialisés dans la ventilation naturelle. Une partie de l'étude a été consacrée aux effets de la forme des bâtiments, de la proximité des bâtiments environnants et de la direction du vent sur la différence de pression causée par ce dernier. L'effet de la différence de température entre le milieu environnant et l'intérieur, ou entre les différents compartiments à l'intérieur a aussi été sujet de réflexion, ainsi que la position et la taille des orifices reliant l'espace confiné au milieu extérieur.

Il a été observé que si un seul orifice été placé en haut de l'enceinte, un régime bidirectionnel (ou de mélange) s'établit. Tandis qu'avec deux ouvertures dont l'une basse et l'autre haute, un régime de déplacement caractérisé par un fort gradient de température prend place. Différentes configurations ont été considérées dans cette même étude, notamment celles de deux enceintes connectées par un conduit, d'une enceinte avec deux sources de flottabilité positives, et avec une seule source de flottabilité positive. Dans chaque cas, la stratification a

été caractérisée par le niveau de neutralité (ou l'interface séparant les deux zones de faible et forte densité) moyennant des équations bilan.

Le modèle d'une enceinte ventilée par une source de flottabilité a par ailleurs été extrapolé à celui de deux enceintes reliées l'une à l'autre par des ouvertures [20]. Une application directe est celle de deux pièces reliées l'une à l'autre à l'intérieur d'un bâtiment. Il a été montré que l'interaction entre les deux enceintes dépend du temps, et que cette dépendance est directement reliée à la taille de la plus grande enceinte. Dans le cas d'une petite enceinte munie d'une source de chaleur connectée à une grande enceinte non chauffée par une ouverture basse, et une ouverture haute, un régime de déplacement s'établit, et la stratification est telle que deux régions de densités différentes et homogènes s'établissent. Il a été observé que pour des ouvertures de tailles égales, le fluide chaud pénètre dans l'enceinte froide par l'orifice du haut, et le fluide froid pénètre dans l'enceinte chaude par l'orifice du bas. Cela dit, un autre régime existe quand l'orifice du haut est bien plus grand que l'orifice du bas, où l'échange est bidirectionnel. Le résultat de l'étude est que les deux enceintes se retrouvent en régime de déplacement, que la densité dans l'enceinte froide évoluait en deux étapes : une rapide, qui dépend de la taille de celle-ci ainsi que des surfaces des orifices, et une plus lente, qui dépend de l'état de stratification de cette dernière (l'interface de séparation des deux zones stratifiées descendant avec le temps).

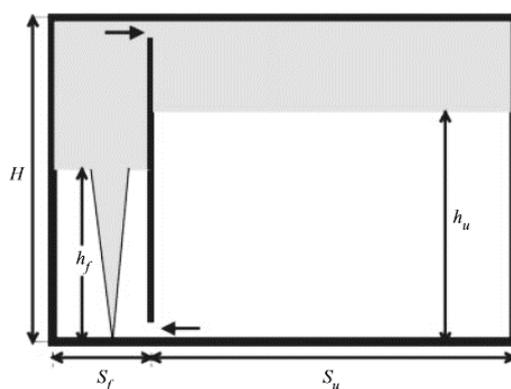


Figure 1.5: Ecoulement dans deux enceintes connectées

1.2.4. Modélisation physique des régimes d'écoulements

L'analyse, la visualisation et la mesure de la pression différentielle d'un écoulement à l'intérieur d'une enceinte ventilée par un panache 2D provenant d'une source placée au sol de celle-ci a été faite [21]. L'enceinte étant ventilée à travers une ouverture haute et une ouverture basse.

Ces travaux ont permis de modéliser par des équations du second degré le phénomène moyennant un certain nombre d'hypothèses (hauteurs des ouvertures négligeables, écoulement unidirectionnel à travers celles-ci, fluide incompressible, faible variations de densité ...etc.). Ainsi, l'application de l'équation de Bernoulli et de la distribution de pression aérostatique à la « boîte de Paranthoën » ont permis d'aboutir aux solutions analytiques suivantes :

$$q_e = \frac{1 - (1 + \alpha^2 \left(1 - \frac{Fr}{2}\right))^{\frac{1}{2}} \sqrt{\frac{2}{Fr}}}{1 + \alpha^2} \quad (1.2)$$

$$q_s = \frac{-\alpha^2 + (1 + \alpha^2 \left(1 - \frac{Fr}{2}\right))^{\frac{1}{2}} \sqrt{\frac{2}{Fr}}}{1 + \alpha^2} \quad (1.3)$$

Où q_e et q_s sont respectivement le débit adimensionnel à l'entrée et le débit adimensionnel à la sortie, Fr le nombre de Froude densitométrique à la sortie, α le rapport des coefficients de décharge.

Ces équations analytiques ont permis d'identifier les conditions (au niveau de la sortie) de passage du régime naturel au régime intermédiaire, et du régime intermédiaire au régime bloqué. L'étude fut complétée par une expérience qui a révélé trois régimes (naturel, intermédiaire et bloqué).

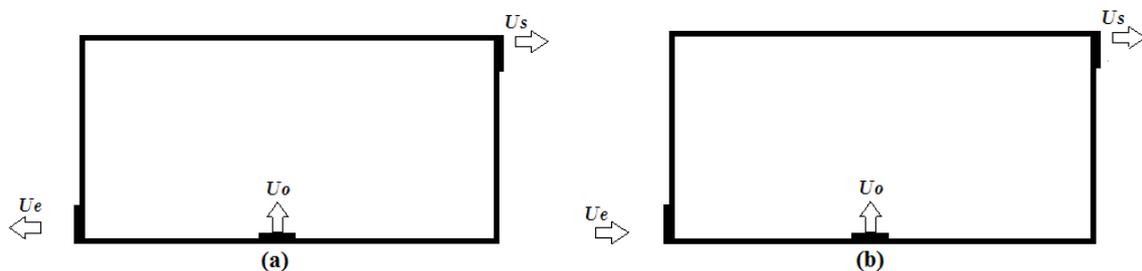


Figure 1.6: (a) Régime bloqué, (b) Régime naturel

1.3. Ventilation et incendies

Dans le domaine de l'incendie, les enjeux prennent de l'importance en même temps que la dangerosité des situations étudiées augmente. En effet, dans ce cadre les fluides en question sont toxiques, opaques et instables. Le but est donc de prévoir le comportement de ces écoulements, afin d'améliorer la réactivité du milieu environnant pour en minimiser le danger.

Le feu et la combustion qui sont au cœur du domaine ont fait l'objet d'une étude [22] selon laquelle le feu passe par une phase d'allumage, une phase de croissance, puis des phases d'embrasement généralisé et de feu pleinement développé, et enfin une phase de décroissance. Par ailleurs, le développement d'un feu en espace confiné a fait l'objet d'autres travaux [23] qui sont arrivés à la conclusion suivante : une flamme dans un espace clos est de plus en plus puissante, et forme un panache qui entraîne l'air environnant. Les gaz chaud produits montent par effet de flottabilité, forment une couche stratifiée au niveau du plafond, puis redescendent au contact des parois. Dans une enceinte sans exutoires, la couche stratifiée s'épaissit au cours du temps, jusqu'à ce qu'elle soit assez large pour provoquer un embrasement général de l'enceinte.

La combustion en milieu confiné et incendié étant un problème de grand nombre de degrés de liberté est très difficile à théoriser, et à modéliser par des équations. Mais il est possible d'en comprendre les rouages à travers le calcul numérique et l'expérimentation.

1.3.1. Approches numériques

Une approche numérique sur la base d'un modèle à une zone pour un feu en phase de post embrasement généralisé a déjà été utilisée [24] afin de calculer le débit volumique du fluide sortant par l'exutoire. Il en a déduit que celui-ci dépendait de la section de cet exutoire, ainsi qu'à la hauteur de l'enceinte. En d'autres termes, que le débit volumique est proportionnel à $A\sqrt{H}$.

Par ailleurs, un modèle à deux zones qui considère l'enceinte en feu comme divisible en deux zones homogènes en températures et en densités a été introduit [25], ce qui a permis à de calculer les vitesses des fumées et de l'air entrants et sortants par les exutoires [22].

Enfin, les modèles à champ sur lesquels la plupart des logiciels de CFD sont basés, ont permis de résoudre les équations fondamentales de la mécanique des fluides (soit les équations de la conservation de la masse, de la quantité de mouvement et de l'énergie), en adoptant un modèle

de turbulence adéquat. FDS, SMARTFIRE, ISIS et FIRE ROAM en sont les programmes phares.

1.3.2. Approche expérimentale

Le phénomène de feu en espace confiné est facilement reproduit en laboratoire à de moindres échelles. De nombreuses expériences ont été faites afin d'étudier les profils de pression et de température dans des enceintes en feu, ainsi que l'effet de la puissance et la position de la source sur ces derniers. Une expérience a été réalisée sur une enceinte dotée d'ouvertures verticales en feu (dont la source était d'une puissance de 30 à 500kW), afin de mesurer les vitesses et les températures au niveau de l'exutoire dans le but de calculer les débits massiques sortants et entrants [26]. La même expérience a été reprise mais en utilisant cette fois-ci les champs de vitesse de l'air pénétrant dans l'enceinte [27].

En outre, la situation où l'enceinte en question est dotée d'orifices horizontaux a été expérimentée [28], ce qui a mené à la conclusion selon laquelle avec un exutoire au plafond, le fluide était sortant uniquement si une certaine pression critique était dépassée, et qu'avec un exutoire au plancher, le fluide était sortant si la pression intérieure était supérieure à la pression extérieure.

1.1. Synthèse et conclusion

Les différentes études citées ci-dessus prouvent l'intérêt de la communauté scientifique pour les écoulements en espaces confinés, de par la diversité des situations étudiées (enceintes ouvertes ou fermées, en présence d'une source de chaleur, de flottabilité, ou de feu ...), mais aussi les apports majeurs dans le domaine, et les lacunes en attente d'être comblées.

En effet, les expériences effectuées dans les études antérieures ont permis de mesurer et de visualiser les champs de vitesse et de pression à l'intérieur d'enceintes chauffées et ventilées, mais aussi de prendre connaissance des différents régimes d'écoulement qui peuvent exister à l'intérieur de celles-ci, et des paramètres physiques qui peuvent influencer sur ces derniers. Le but étant d'optimiser le phénomène de ventilation en contrôlant les écoulements pour évacuer et refroidir les espaces confinés.

Ce qui se rapproche le plus d'une modélisation de ces écoulements sont les travaux de Paranthoen et Gonzalez (2010), mais ceux-ci ont eu pour but d'étudier ces régimes d'écoulement sur la base des vitesses au niveau de l'exutoire, ce qui ne permet pas de prévoir

ces régimes d'écoulement à priori étant donné que ces dernières sont un paramètre de sortie de l'expérience. Une étude complémentaire dont le but serait de tenter de relier ces régimes d'écoulement à des paramètres à priori connus par l'expérimentateur (tels que les caractéristiques de la source, ou les paramètres géométriques de la maquette) serait donc pertinente, et permettrait de connaître le régime d'écoulement susceptible de s'établir. C'est l'objectif que nous nous sommes fixé dans la présente étude.

Chapitre 2 :

Etude numérique de
l'écoulement dans l'enceinte

Chapitre 2 : Etude numérique de l'écoulement dans l'enceinte

2.1. Définition de la problématique

S'appuyant sur les travaux et les expériences effectués autour du thème (voir Chapitre 1), les régimes d'écoulement pouvant exister dans une enceinte à deux ouvertures ventilée moyennant l'injection d'une source de flottabilité sont bien connus : le régime naturel, où le fluide injecté sort par l'ouverture haute, entraînant l'air ambiant qui entre par l'ouverture basse, un régime bloqué, où le fluide injecté s'échappe par les deux ouvertures à la fois, et un régime intermédiaire où le fluide s'échappe par l'ouverture du haut et par la partie haute de l'ouverture du bas, et où l'air ambiant est entraîné à l'intérieur par la partie basse de l'ouverture du bas, figure (2.1).

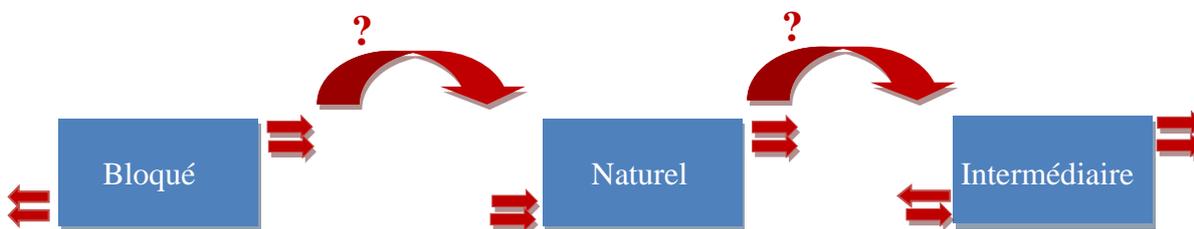


Figure 2.1: Les régimes d'écoulement existants dans l'enceinte

Le but de l'étude est de déterminer les conditions d'injection qui permettent le passage du régime naturel au régime intermédiaire, et du régime intermédiaire au régime bloqué, dans une enceinte parallélépipédique à deux ouvertures rectangulaires, ventilée par injection d'un mélange air-hélium par une buse rectangulaire placée au sol, figure (2.2).

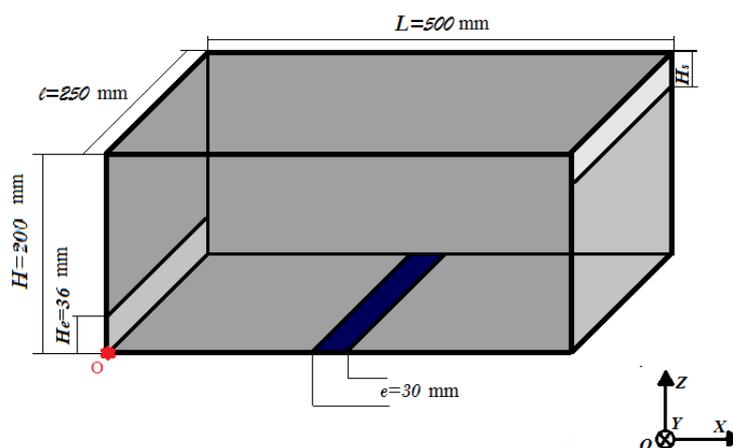


Figure 2.2: Maquette physique et système d'axes utilisé

La connaissance des conditions d'existence de ces différents régimes permettrait éventuellement de résoudre des problèmes d'évacuation, en ajustant par exemple la largeur des orifices. Sur la figure (2.2), le repère absolu (OX, OY, OZ) utilisé dans la description des différents résultats d'origine O, est située au coin le plus bas de l'ouverture basse.

2.2. Analyse dimensionnelle du problème

En pratique, les solutions analytiques aux problèmes de mécanique des fluides sont rarement satisfaisantes. Et pour cause, elles sont souvent issues d'une série d'hypothèses parfois peu réalistes. Cela dit, il existe une méthode alternative qui permet de dériver des corrélations reliant ces différents paramètres, se basant directement sur les résultats expérimentaux (ou numériques). Cette méthode n'est autre que l'analyse dimensionnelle.

En effet, si tous les paramètres physiques pertinents influant sur un phénomène sont a priori connus (par observation ou expérimentation), la méthode de l'analyse dimensionnelle permet de déterminer les nombres adimensionnels qui régissent ce dernier, et donc d'extraire une relation qualitative décrivant le phénomène. Une fois cette relation qualitative établie, il restera à déterminer la forme de la loi quantitative qui relie les paramètres précédents, grâce à un protocole expérimental. En d'autres termes, l'analyse dimensionnelle répond à la question : quel est le nombre de paramètres adimensionnels qui suffisent à décrire le phénomène physique et quels sont ces paramètres ?

Cette procédure offre le double avantage de l'adimensionnel qui permet d'un côté de s'affranchir des conditions en laboratoire, et de réduire le nombre de degrés de liberté du problème. Dans la problématique exposée au paragraphe 2.1 du présent chapitre, les grandeurs impliquées sont H_s , H_e , H , l , L , e , V , $\Delta\rho$, g , μ , ρ . Les paramètres géométriques peuvent être regroupés dans les groupements adimensionnels géométriques suivants :

$$\frac{H_s}{H}; \frac{H_e}{H}; \frac{l}{H}; \frac{L}{H}$$

Il reste à déterminer les groupements adimensionnels possibles faisant intervenir les paramètres e , V , $\Delta\rho$, g , μ , ρ . Le tableau 2.1 exprime les différentes dimensions intervenant dans les unités des paramètres ci-dessus.

Tableau 2.1 : Matrice dimensionnelle des grandeurs physiques

Dimension	e	V	$\Delta\rho$	G	μ	ρ
Masse	0	0	1	0	1	1
Longueur	1	1	-3	1	-1	-3
Temps	0	-1	0	-2	-1	0

Ces différentes unités faisant intervenir 3 dimensions physiques, le théorème de Vaschy-Buckingham [29] stipule qu'il existe 6-3 groupements adimensionnels indépendants π_1 , π_2 , et π_3 régissant le phénomène, tels que :

$$F(\pi_1, \pi_2, \pi_3) = 0 \quad (2.1)$$

$$\pi_i = e^{a_i} V^{b_i} (\Delta\rho)^{c_i} g^{d_i} \mu^{e_i} \rho^{f_i} \quad (2.2)$$

Avec $i = 1$ à 3

Ainsi, pour exprimer que les groupements π_i sont sans dimension, on fait appel à la matrice dimensionnelle ci-dessus pour écrire le système d'équations suivant :

$$\begin{cases} c_i + e_i + f_i = 0 \\ a_i + b_i - 3c_i + d_i - e_i - 3f_i = 0 \\ -b_i - 2d_i - e_i = 0 \end{cases} \quad (2.3)$$

Choisissons comme grandeurs fondamentales, les variables ρ , e et V et formons chacun des trois groupements π_i . Les grandeurs restantes g , μ et $\Delta\rho$ seront donc traitées comme des grandeurs dépendantes. Ainsi, pour former le groupement π_1 , où nous faisons intervenir seulement g comme grandeur dépendante, posons $d_1 = -1$; $f_1 = 0$ et $e_1 = 0$.

Le système d'équations (2.3) devient :

$$\begin{cases} c_1 = 0 \\ a_1 + b_1 - 1 = 0 \\ -b_1 + 2 = 0 \end{cases} \quad (2.4)$$

La solution du système donne $b_1 = 2$ et $a_1 = -1$; ce qui définit le premier groupement :

$$\pi_1 = \frac{v^2}{ge} \quad (2.5)$$

qui est le nombre de Froude (Fr) basé sur la largeur de la buse d'injection e .

Pour former le deuxième groupement, dans lequel nous faisons intervenir uniquement la viscosité μ comme grandeur dépendante, posons $e_2 = -1$; $c_2 = 0$ et $d_2 = 0$

Le système d'équations (2.3) devient dans ce cas :

$$\begin{cases} -1 + f_2 = 0 \\ a_2 + b_2 + 1 - 3f_2 = 0 \\ -b_2 + 1 = 0 \end{cases} \quad (2.6)$$

Ce système a comme solution $f_2 = 1$; $b_2 = 1$ et $a_2 = 1$ qui correspond au groupement de l'équation (2.7) suivant:

$$\pi_2 = \frac{\rho e V}{\mu} \quad (2.7)$$

qui est le nombre de Reynolds (Re) basé sur la largeur de la buse d'injection e . Finalement, pour l'adimensionnement de ρ_0 , la variable $\Delta\rho$ suffit, et le troisième groupement sera :

$$\pi_3 = \frac{\Delta\rho}{\rho} \quad (2.8)$$

Ce groupement représente la différence de masse volumique (entre l'air et le mélange) relative (par rapport au mélange).

Ainsi, l'équation régissant la problématique est de la forme :

$$F(\text{Re}, \text{Fr}, \frac{\Delta\rho}{\rho}, \frac{H_s}{H}, \frac{H_e}{H}, \frac{1}{H}, \frac{L}{H}) = 0 \quad (2.9)$$

▪ Le nombre de Reynolds à l'injection

Il n'existe pas de critère explicite pour se placer dans un régime particulier (laminaire ou turbulent) en se basant sur le nombre de Reynolds au niveau de la buse pour la géométrie particulière de la problématique en question. Dans le cadre de notre étude, il est de l'ordre de 100 à 900. Mais les expériences et les simulations faites précédemment montrent le caractère tourbillonnaire de l'écoulement. Pour cette raison nous nous affranchissons de l'influence du nombre de Reynolds à l'injection, en considérant le régime totalement turbulent.

En fixant les paramètres géométriques $\frac{H_e}{H}$, $\frac{1}{H}$, $\frac{L}{H}$ dans le cadre de notre étude, le nombre de Froude devient uniquement fonction des paramètres $\frac{H_s}{H}$ et $\frac{\Delta\rho}{\rho}$.

$$\text{Fr} = f\left(\frac{H_s}{H}, \frac{\Delta\rho}{\rho}\right) \quad (2.10)$$

Comme mentionné au paragraphe 2.1, nous nous intéresserons dans ce projet aux nombres de Froude auxquels il y a basculement de régime (du régime naturel au régime intermédiaire, et du régime intermédiaire au régime bloqué). De ce fait, les relations qualitatives sur lesquelles nous nous baserons afin d'extraire des corrélations sont les suivantes :

$$\begin{cases} Fr_{NI} = f\left(\frac{H_s}{H}, \frac{\Delta\rho}{\rho}\right) \\ Fr_{IB} = f\left(\frac{H_s}{H}, \frac{\Delta\rho}{\rho}\right) \end{cases} \quad (2.11)$$

Où Fr_{NI} et Fr_{IB} sont les nombres de Froude pour le passage du régime naturel à l'intermédiaire, et pour le passage du régime intermédiaire au régime bloqué respectivement.

Afin de traiter un tel problème à 3 degrés de liberté, il est commode de fixer tour à tour deux variables et de faire varier la troisième afin d'en apprécier les effets.

2.1. Description de l'outil numérique

Le logiciel utilisé dans le présent projet est la sixième version d'un logiciel de CFD créée en 2000 par des développeurs du NIST en collaboration avec des chercheurs du VTT, spécialisé dans la modélisation des écoulements induits par des feux. Le programme résout numériquement une forme des équations de Navier et Stokes qui convient aux écoulements induits par des sources de chaleur en général, et aux écoulements de fumée en particulier, dans le but de décrire l'évolution de ces derniers.

Depuis sa création, FDS a été adopté par les designers de dispositifs de gestion de fumée, notamment pour l'étude de l'activation des détecteurs de fumée. Mais il s'est également avéré utile dans l'étude générale des feux et de la combustion. Le logiciel est accompagné du programme Smokeview, doté d'une interface souple qui permet de visualiser les résultats sur l'écran de l'ordinateur sous forme d'animation.

2.1.1. Modèle mathématique

L'algorithme de résolution du logiciel FDS est basé sur une modélisation mathématique de la turbulence utilisée par de nombreux logiciels de CFD appelée LES (Large Eddy Simulation), ou par traduction, Simulation des Grandes Echelles. Ce modèle créé en 1963 par le météorologiste américain Joseph Smagorinsky est principalement basé sur le « Low-pass filtering », ou la considération d'un filtre passe-bas fictif qui permet de ne prendre en compte que les parties non négligeables de la solution, afin d'économiser le coût de calcul. Ainsi, dans ce modèle les plus grands tourbillons sont calculés (ils sont physiquement visibles dans le domaine de calcul), et les plus petits sont pris en compte en introduisant une viscosité supplémentaire.

Une fois les équations fondamentales de la mécanique des fluides modifiées au sens du modèle LES, la résolution se fait par une méthode des différences finies du second ordre. Dans une optique d'adaptabilité aux applications de lutte contre le feu, et de l'évacuation des fumées

en bâtiments où les maquettes sont souvent parallélépipédiques, le logiciel exige l'utilisation d'une grille de mailles linéaires et de préférence uniformes (c'est-à-dire des mailles cubiques ou parallélépipédiques dans un cas à trois dimensions, carrées ou rectangulaires dans un cas à deux dimensions). Le choix des différentes dimensions de la grille revient à l'utilisateur. Le programme FDS étant destiné aux applications sur les écoulements induits par des sources de chaleur, des approximations simplificatrices correspondant aux faibles nombres de Mach ont aussi été ajoutées à son algorithme principal.

2.1.2. Prise en main du logiciel

Afin qu'il puisse procéder à la résolution il est nécessaire de transmettre au logiciel certaines informations indispensables, telles que la géométrie du problème, les conditions aux limites, la durée du calcul, ainsi que les paramètres physiques que nous souhaitons mesurer. L'extraction de la valeur numérique d'un paramètre physique se traduit sur FDS par le placement d'un capteur (ponctuel, linéique ou surfacique) au point désiré.

Il est à noter que la résolution des équations principales se fait en chaque point du domaine étudié, mais que seuls les points de l'espace auxquels des capteurs sont affectés sont mémorisés. Certains calculs pouvant atteindre des jours, voire des semaines, il est primordial de savoir à priori de quelles valeurs a-t-on besoin, et en quel point de l'espace. Toutes ces informations sont rassemblées dans un fichier texte : le fichier Input. Ce document est un fichier d'extension « .txt » ou « .fds » sur lequel l'utilisateur rédige ses instructions dans un langage propre à FDS. Il est exécuté moyennant l'invite de commande.

Une fois le calcul terminé, les résultats obtenus sont exploitables à travers le fichier Output. Ce fichier d'extension « .csv » ouvrable sur Excel ou OpenOffice, rassemble les valeurs numériques des différents paramètres désirés. Dans ce fichier, la première colonne correspond aux différents instants auxquels les calculs ont été faits. Chacune des colonnes suivantes correspond aux valeurs mesurées par un capteur à des instants différents. La première ligne rassemble les unités de mesure dans lesquelles les différents paramètres sont donnés, et la seconde représente les noms que nous avons attribués à chacun d'eux (le premier étant « time » par défaut pour le paramètre temps).

Enfin, les résultats obtenus sont également exploitables par visualisation sur le logiciel Smokeview sous forme d'animation en 2D (sur des plans préalablement définis sur le fichier Input) , ou sous forme de capture en 3D, à des instants précisés dans le fichier Input.

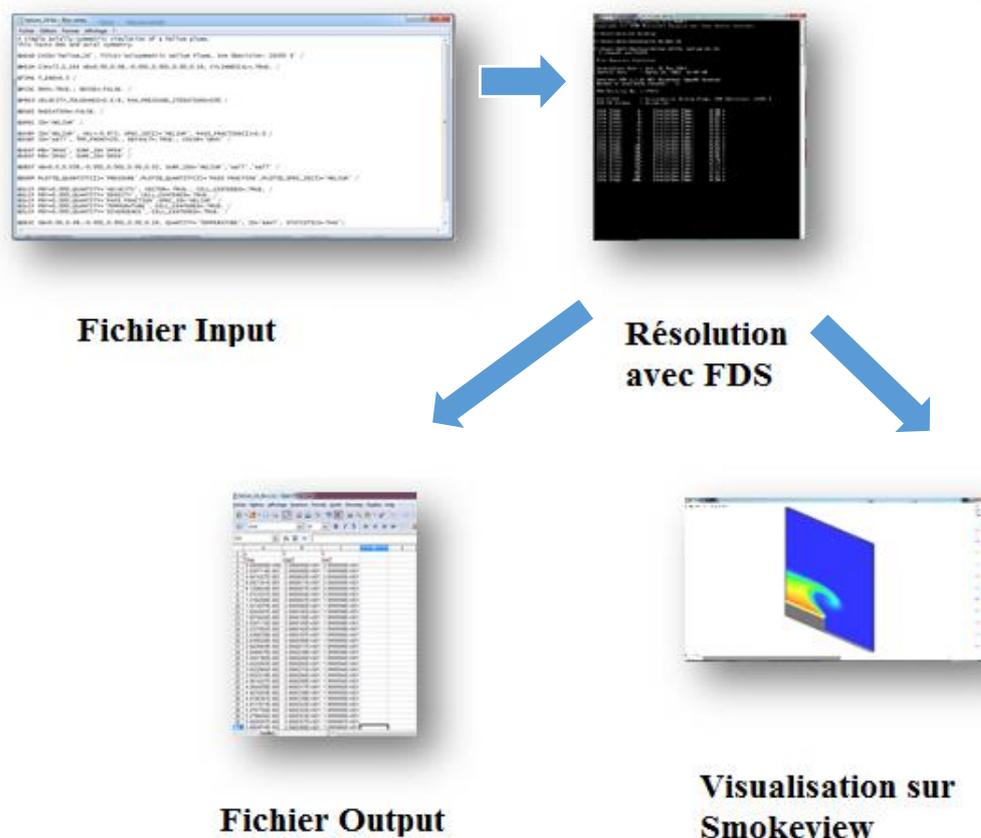


Figure 2.3: Procédure d'exploitation du logiciel FDS

2.2. Fichier Input et maquette numérique

2.2.1. Rédaction du fichier input

L'enjeu de la partie numérique est de reproduire fidèlement la réalité physique du phénomène, et ce en un temps de calcul minimum. Ce dernier dépend d'un côté de la finesse du maillage, du volume du domaine spatial choisi, et du pas de temps utilisé. Le but est donc de minimiser le temps de calcul sans altérer les résultats numériques. Un exemple de fichier input est donné par l'ANNEXE.

a- Choix du domaine de calcul

Le choix du domaine de calcul qui est la première étape dans la création d'un fichier Input FDS, n'est pas anodin. En effet, cette barrière virtuelle représente la frontière avec le milieu extérieur, siège des conditions aux limites (conditions ambiantes dans notre cas). Plus celui-ci

sera grand, plus ces conditions aux limites seront vraies. Inversement, si celui-ci est trop petit, ceci peut influencer fortement sur l'écoulement et le dénaturer comme le montrent les résultats sur les vitesses à l'orifice d'entrée sur la figure 2.4 (c). Les courbes décrivent l'évolution de la vitesse moyenne au niveau de l'orifice d'entrée, pour deux configurations : celles du domaine de référence de la figure 2.4(a), et celle d'un domaine plus petit de la figure 2.4(b).

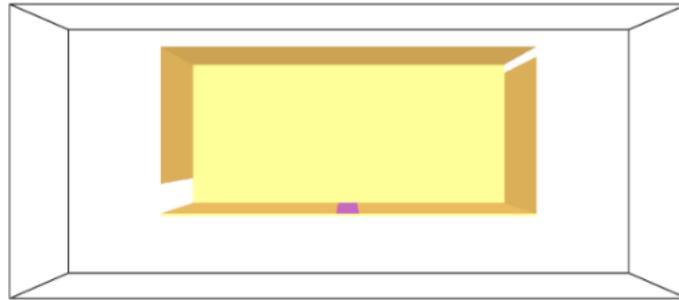


Figure 2.4 (a) : Le domaine de référence



Figure 2.4 (b) : Domaine réduit

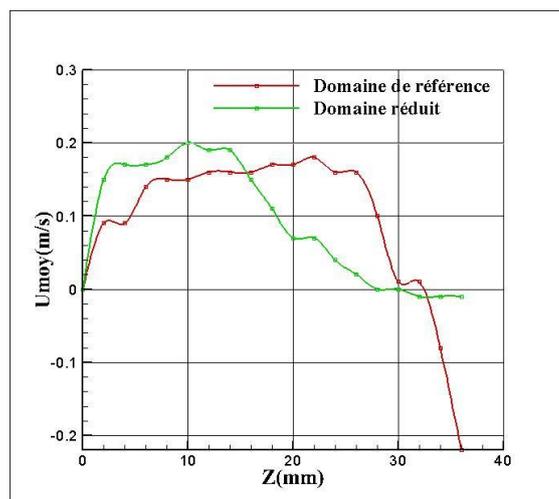


Figure 2.4(c): Profils de vitesse moyenne à l'orifice d'entrée pour un domaine réduit et le domaine de référence

Afin de palier au problème, nous avons fait le calcul avec un domaine assez large d'un volume de 80600000 mm^3 (domaine de référence de la figure 2.4 (a)), et avons testé d'autres cas de domaines plus petits, afin de trouver le domaine optimal qui reproduit fidèlement la physique du problème.

En subdivisant le domaine en trois sous-domaines (figure ci-dessous) dans le but de garder uniquement les zones actives, c'est-à-dire les zones où un écoulement se produit, et qui sont observées dans la simulation de référence, le domaine obtenu est le domaine optimal représenté par la figure (2.5). La zone 1 est celle contenant l'enceinte, la zone 2 celle contenant l'orifice de sortie, et la zone 3, celle contenant l'orifice d'entrée.

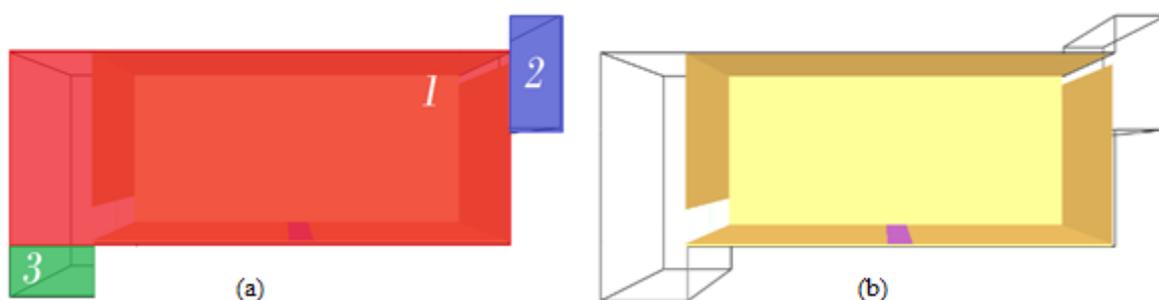


Figure 2.5: (a) schéma des sous-domaines de maillage, (b) aspect du domaine obtenu sur Smokeview

Dans les figures (2.6) et (2.7) nous montrons les profils de vitesse moyenne obtenus au niveau de l'orifice d'entrée et l'orifice de sortie respectivement, pour le cas de référence, et le cas au domaine optimal :

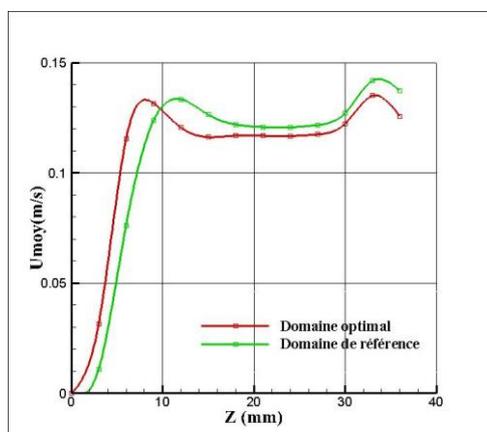


Figure 2.6 : Profils de vitesse moyenne au niveau de l'entrée pour le domaine optimal et le domaine de référence

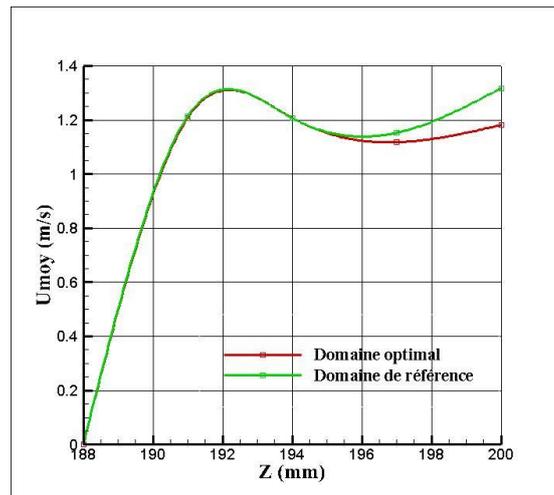


Figure 2.7 : Profils de vitesse moyenne au niveau de la sortie pour le domaine optimal et le domaine de référence

Entre les résultats du cas de référence et ceux du cas du domaine optimal, une erreur de 6% est observée sur la vitesse horizontale au niveau de l'orifice d'entrée et de 3% pour la vitesse horizontale au niveau de l'orifice de sortie. Ces taux étant acceptables par rapport aux marges d'erreurs autorisées dans la suite du travail, il est raisonnable d'adopter le second domaine, qui permet un gain de volume (et donc de temps de calcul) considérable de près de 58%.

b- Choix et validation du maillage

Le choix de la taille du maillage est crucial pour le bon déroulement de la simulation. Des mailles de petites tailles engendrent des temps de calcul trop importants. Un maillage grossier engendre dans le meilleur des cas des erreurs importantes, et dans le pire des cas, une instabilité numérique. Il est également important d'adapter la taille des mailles aux différentes dimensions de la géométrie du problème traité, afin d'avoir un nombre de mailles acceptable sur chaque singularité de la maquette (obstacle, ouverture, buse ...), tout en s'assurant que chaque arête et sommet de ses singularités (à priori de forme rectangulaire) coïncide avec un nœud de la grille de maillage.

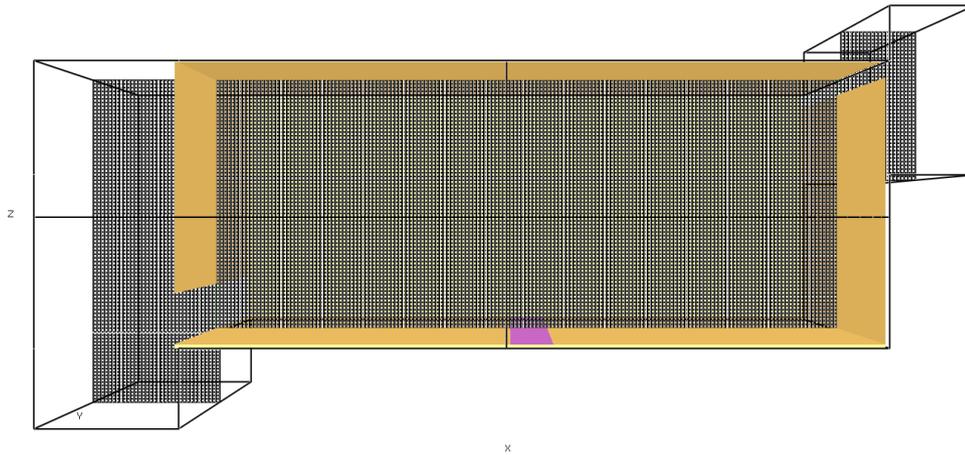


Figure 2.8: Aspect de la grille de maillage sur Smokeview

Le tableau (2.2) illustre les dimensions des grilles de maillage pour chaque domaine :

Tableau 2.2 : Tailles et nombre des mailles dans les trois dimensions de l'espace pour les trois sous-domaines

Axe	X			Y			Z		
Domaine	1	2	3	1	2	3	1	2	3
Taille de la maille (mm)	3	3	3	3	3	3	3	3	3
Nombre de mailles	201	20	34	83	83	83	63	40	21
Nombre de mailles	1 176 691								

Le maillage décrit dans le tableau (2.2) est le maillage le plus fin que les capacités informatiques de la machine utilisée ont pu assumer. En outre, des mailles de tailles plus importantes ont engendré de grandes différences dans les résultats, ce qui prouve la sensibilité au maillage du phénomène physique.

Des données expérimentales fournies par l'établissement d'accueil ont montré que pour une hauteur de l'orifice de sortie de 13mm, il y a passage du régime intermédiaire au régime bloqué pour une vitesse de 1 m/s, la valeur obtenue numériquement pour une hauteur de 12mm étant de 1.2 m/s. Comme ces résultats se rapprochent dans les limites des erreurs numériques et expérimentales, ce modèle de maillage a été conservé. En outre, en calculant la somme des débits entrants dans l'enceinte, et la somme des débits sortants, il est possible d'estimer l'erreur

produite par le logiciel sur ce dernier. A travers ce calcul apparait qu'une erreur moyenne de l'ordre de 6% a été commise sur le débit massique (figure (3.8)).

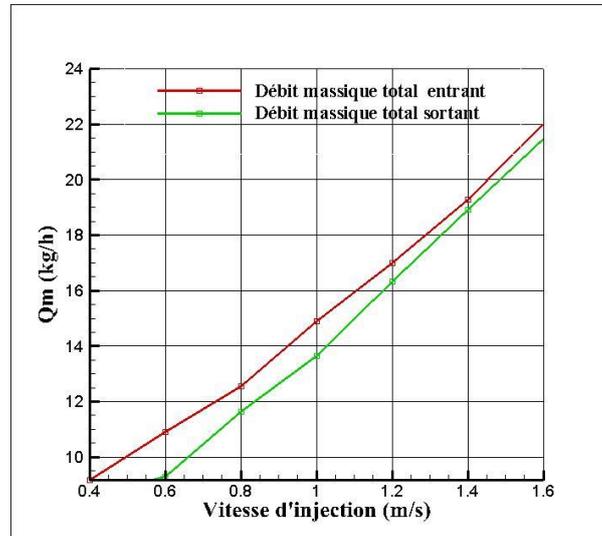


Figure 2.9: Courbes comparatives entre le débit massique total sortant et le débit massique total entrant et leur évolution en fonction de la vitesse d'injection

c- Les capteurs

Avant d'effectuer un calcul sur FDS, l'utilisateur doit connaître à priori les grandeurs pertinentes qu'il souhaite recueillir. Dans notre cas, ces grandeurs sont les composantes horizontales des vitesses au niveau des orifices, ainsi que les masses volumiques. Les figures (2.10) et (2.11) représentent les capteurs ponctuels placés au niveau de l'orifice d'entrée et de l'orifice de sortie respectivement, à des intervalles de 3mm. Ces capteurs sont placés sur le plan médian $y=125\text{mm}$, qui sera aussi le principal plan de visualisation dans la suite de l'étude, et plan de symétrie de la maquette.

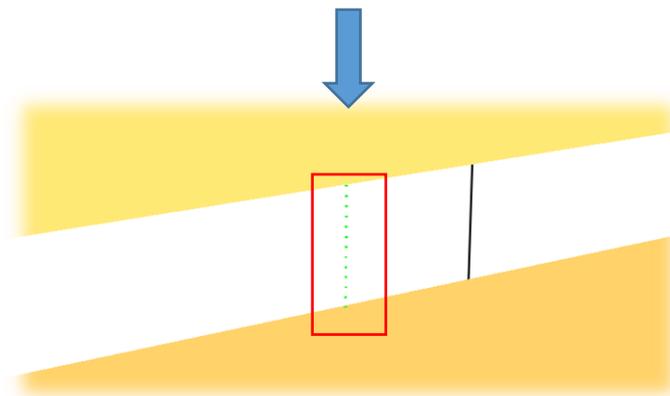


Figure 2.10 : Capteurs de vitesse et de masse volumique à l'orifice d'entrée

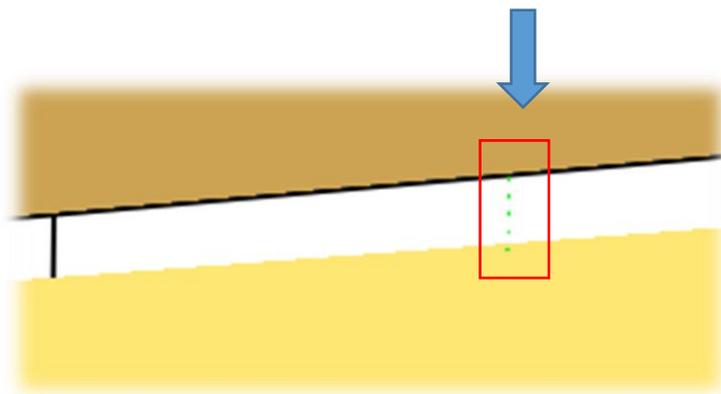


Figure 2.11 : Capteurs de vitesse et de masse volumique à l'orifice de sortie

2.2.2. Mise en évidence de la symétrie du problème

Avant de prendre le plan $y = 125\text{mm}$ comme plan de référence pour la mesure et la visualisation du phénomène physique, il est nécessaire de vérifier que quel que soit le plan selon l'axe y choisi, les résultats obtenus sont les mêmes. Dans les figures (2.12) et (2.13), on montre les profils de vitesse horizontale moyenne au niveau de l'orifice d'entrée et de l'orifice de sortie respectivement, sur différents plans suivant l'axe y . Ces courbes montrent que les profils de vitesse moyenne au niveau de l'entrée et au niveau de la sortie sont pratiquement les mêmes, quel que soit le plan de mesure suivant l'axe Y .

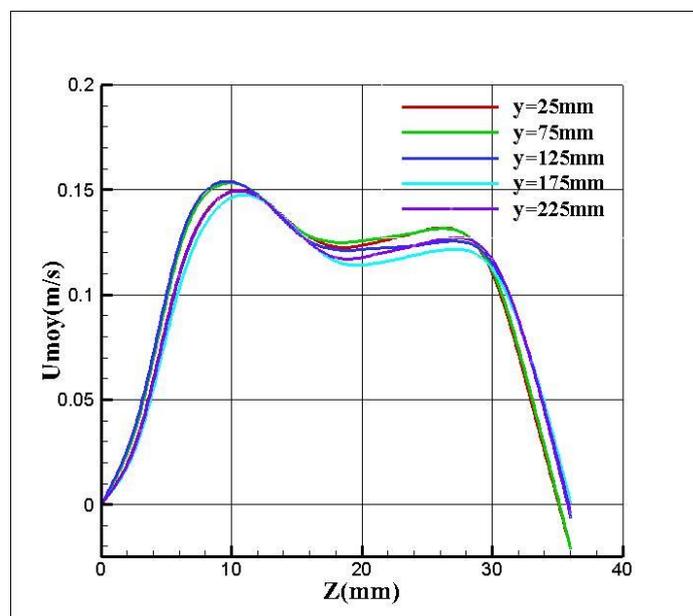


Figure 2.12 : Profils de vitesses horizontales moyennes au niveau de l'orifice d'entrée sur différents plan Y

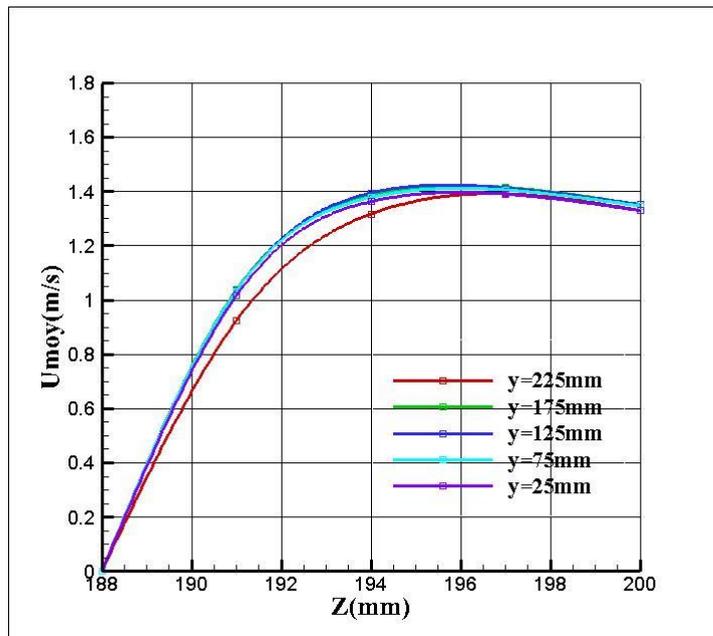


Figure 2.13 : Profils de vitesses horizontales moyennes au niveau de l'orifice de sortie sur différents plan Y

2.3. Identification numérique des régimes d'écoulement

Afin de mettre en exergue numériquement les régimes qui se mettent en place dans l'enceinte pour différentes valeurs de vitesse d'injection (c'est-à-dire différents débits massiques d'injection) et différentes valeurs de H_s , il suffit de connaître le signe de la composante horizontale de la vitesse selon l'axe x. Ainsi, au niveau de l'orifice du bas, quand celle-ci est positive, le fluide est entrant, et quand elle est négative, le fluide est sortant. Inversement pour l'orifice du haut : quand celle-ci est positive, le fluide est sortant, et quand elle est négative, le fluide est entrant. C'est pourquoi les capteurs de vitesse «U-VELOCITY» ont été placés tout au long des ouvertures, afin de pouvoir tracer les profils des vitesses horizontales moyennes au niveau des ouvertures et de déterminer les régimes d'écoulement. Cela dit, ces régimes peuvent être aussi directement visualisés sur Smokeview, figures (2.16) à (2.18), (2.21) à (2.22) et (2.26) à (2.28).

Comme le montrent les profils de vitesse des figures (2.14), (2.19) et (2.24), la valeur de la vitesse horizontale moyenne au niveau de l'entrée est :

- Positive sur toute l'ouverture d'entrée en régime naturel (fluide entrant).
- Négative sur toute l'ouverture d'entrée en régime bloqué (fluide sortant).

- Positive sur la partie basse, et négative sur la partie haute de l'ouverture d'entrée en régime intermédiaire.

Il est à noter que la composante horizontale de la vitesse étant toujours positive à la sortie, le fluide est toujours sortant par l'orifice du haut, quel que soit le régime d'écoulement, figure (2.15), (2.20) et (2.25).

- Le régime naturel

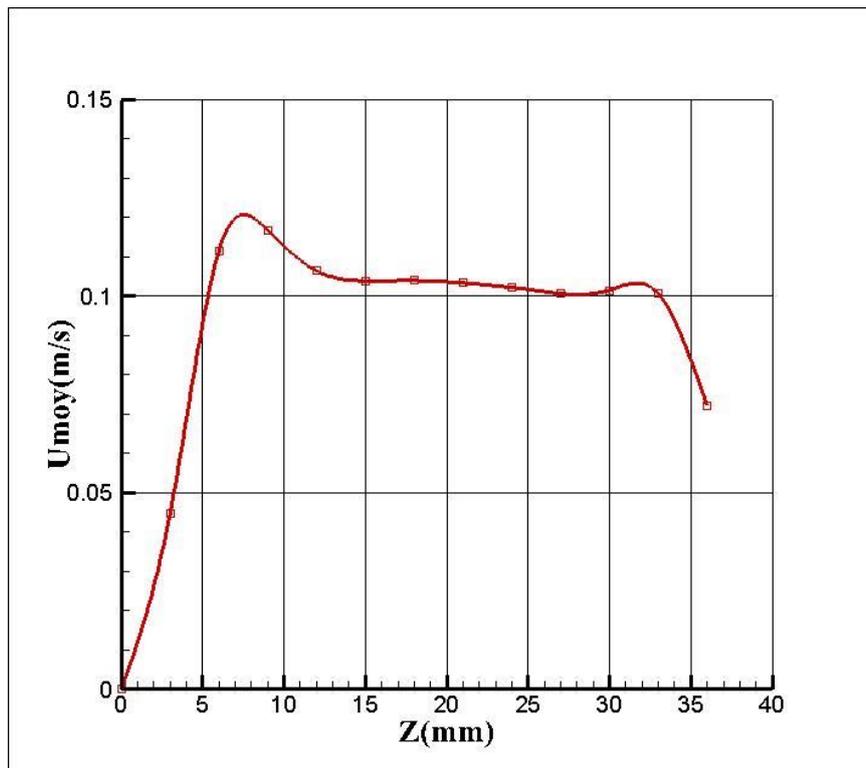


Figure 2.14: profil de vitesse horizontale moyenne au niveau de l'entrée en régime naturel

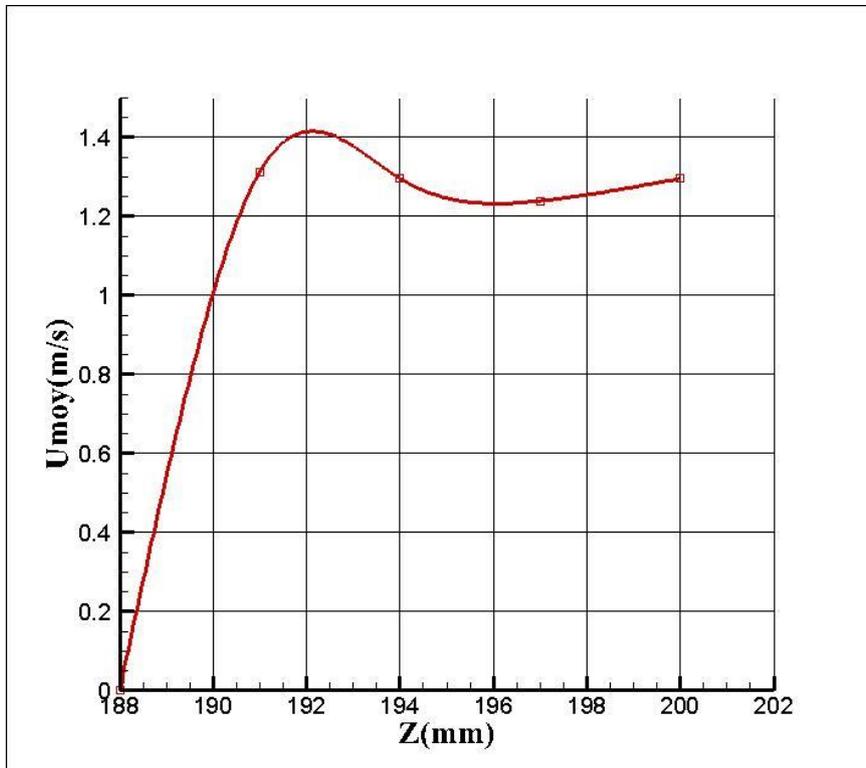


Figure 2.15: profil de vitesse horizontale moyenne au niveau de la sortie en régime naturel

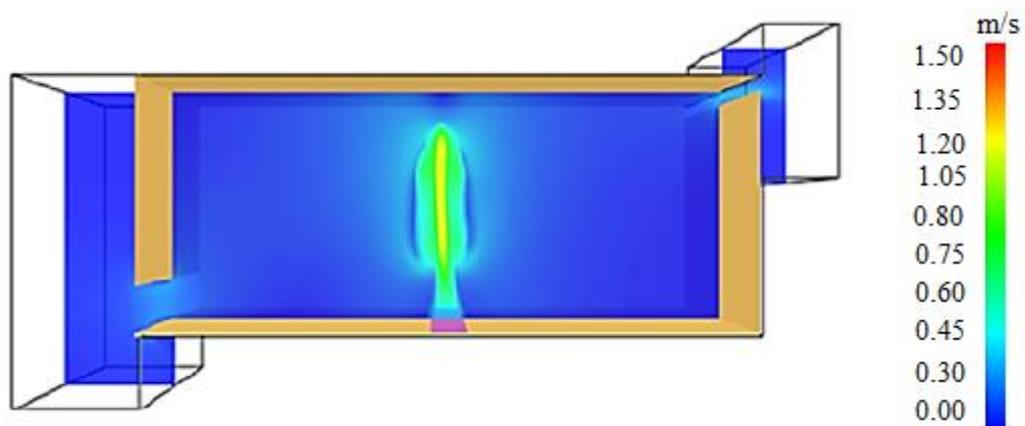


Figure 2.16 : Champs de vitesse en régime naturel à $t=1\text{s}$

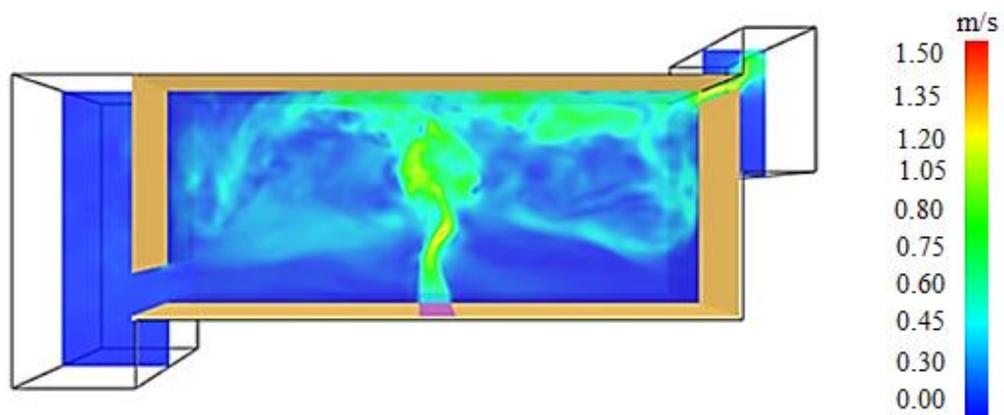


Figure 2.17 : Champs de vitesse en régime naturel à $t=5\text{s}$

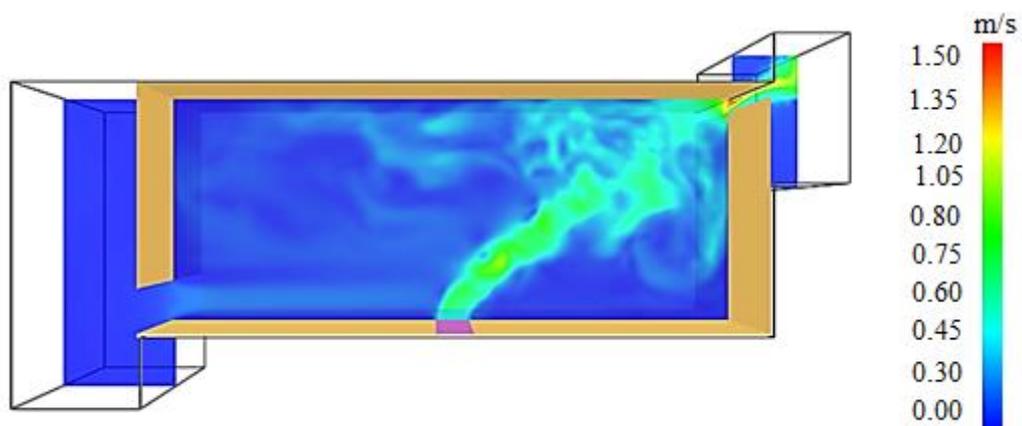


Figure 2.18 : Champs de vitesse en régime naturel à $t=16\text{s}$

▪ Le régime intermédiaire

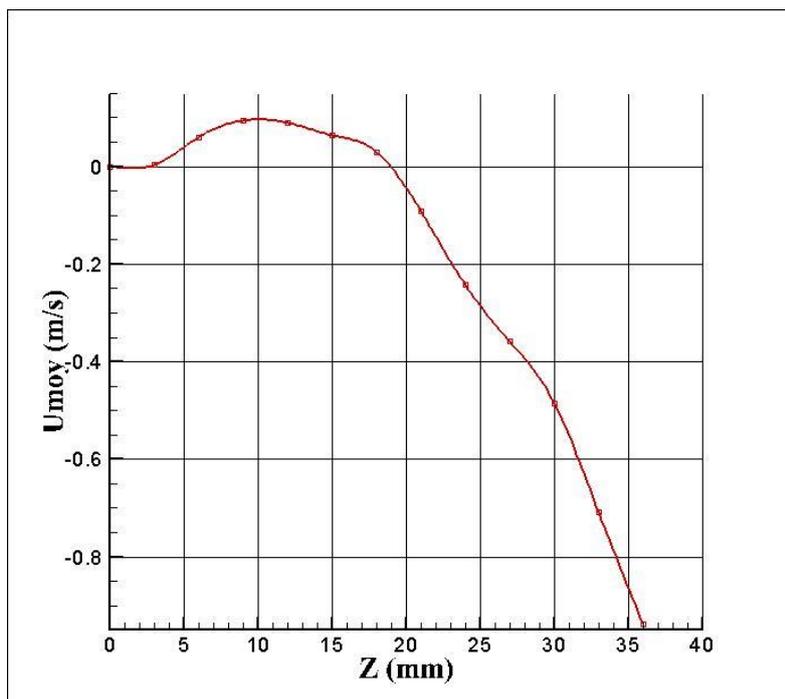


Figure 2.19 : profil de vitesse horizontale moyenne au niveau de l'entrée en régime intermédiaire

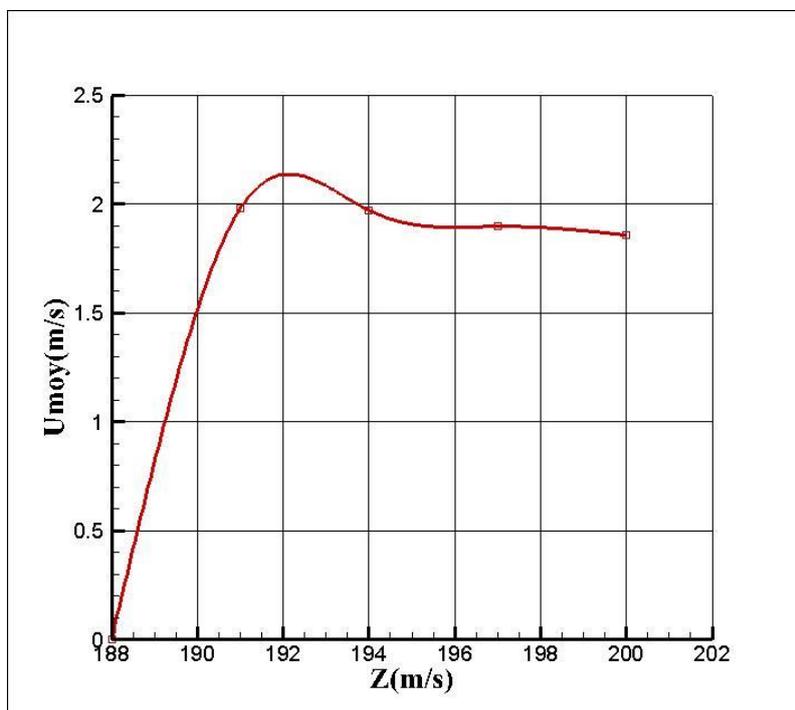


Figure 2.20 : profil de vitesse horizontale moyenne au niveau de la sortie en régime intermédiaire

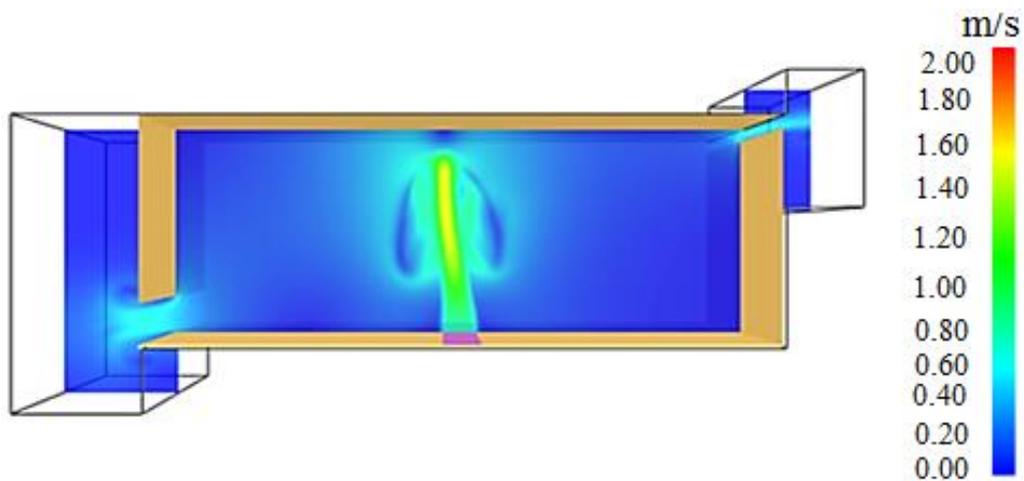


Figure 2.21 : Champs de vitesse en régime intermédiaire à $t=0,8s$

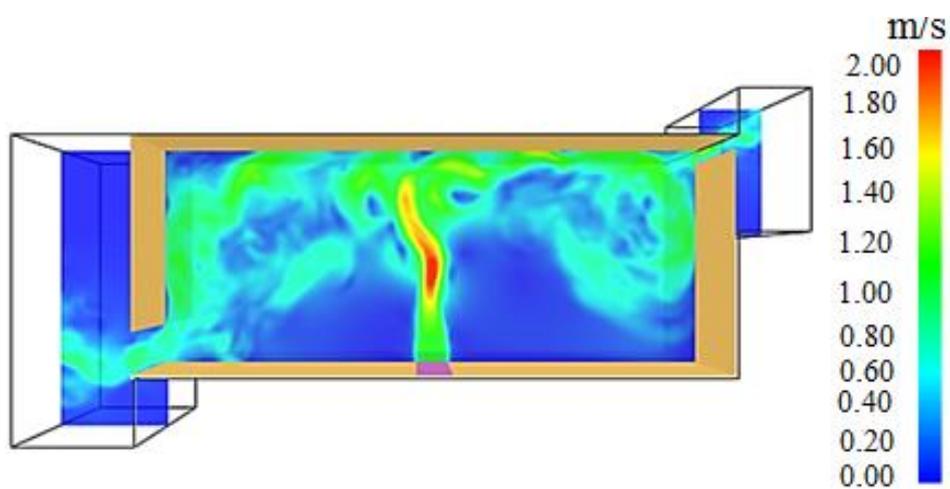


Figure 2.22 : Champs de vitesse en régime intermédiaire à $t=4s$

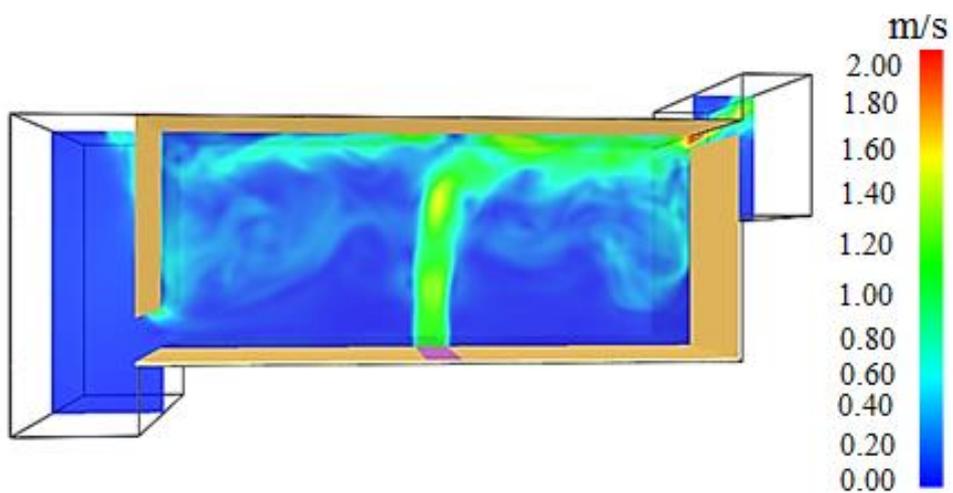


Figure 2.23 : Champs de vitesse en régime intermédiaire à $t=11s$

- Le régime bloqué

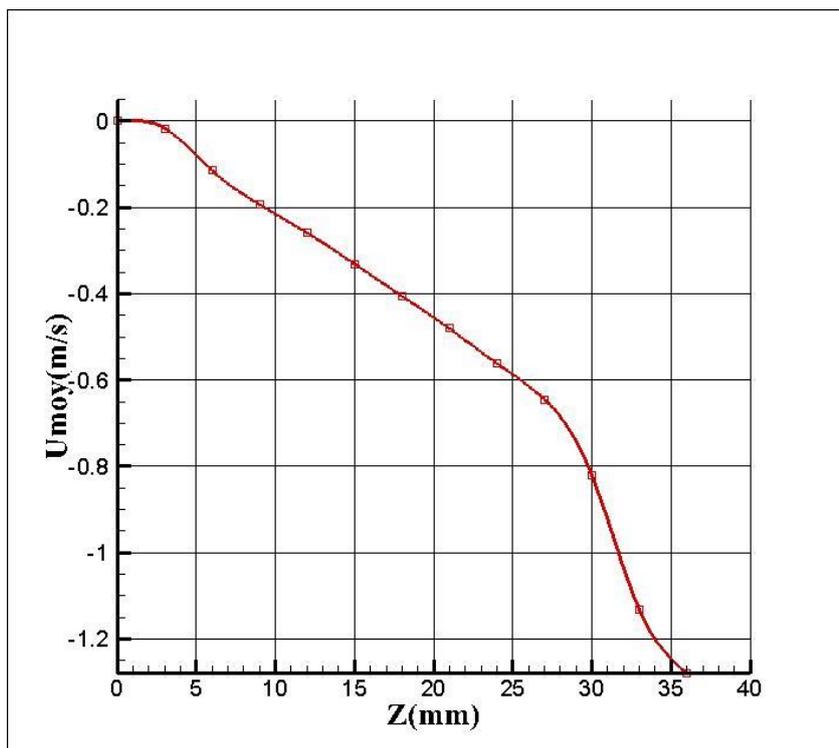


Figure 2.24 : profil de vitesse horizontale moyenne au niveau de l'entrée en régime bloqué

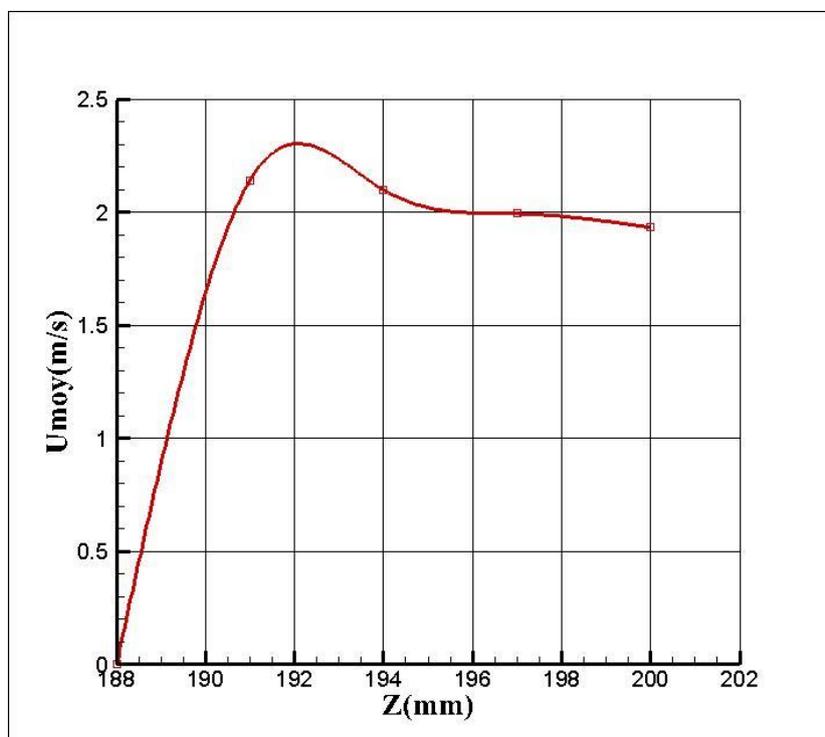


Figure 2.25 : profil de vitesse horizontale moyenne au niveau de la sortie en régime bloqué

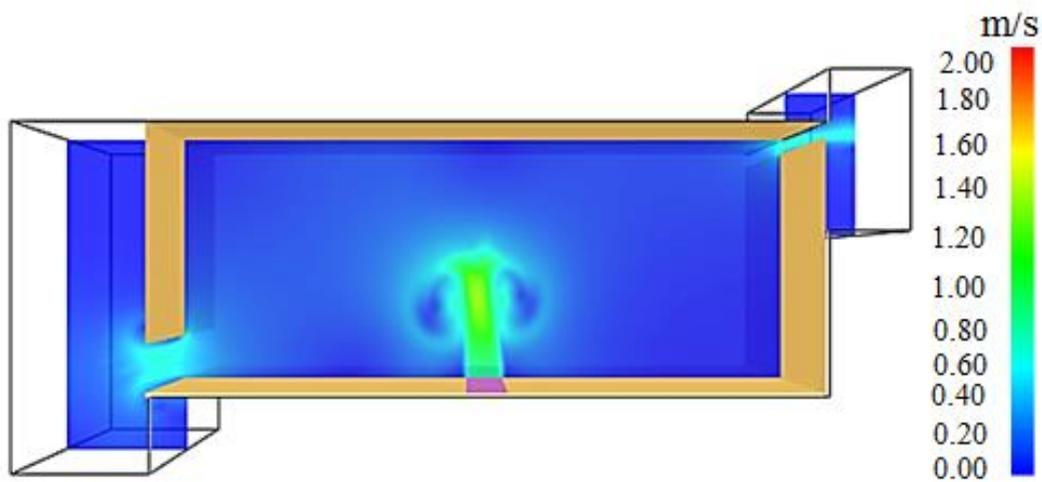


Figure 2.26 : Champs de vitesse en régime bloqué à $t=0,6s$

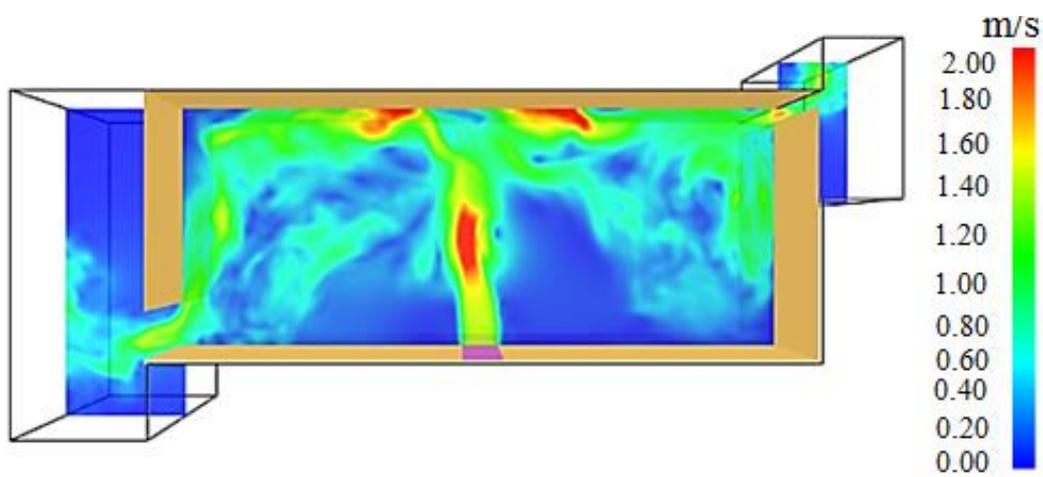


Figure 2.27 : Champs de vitesse en régime bloqué à $t=2s$

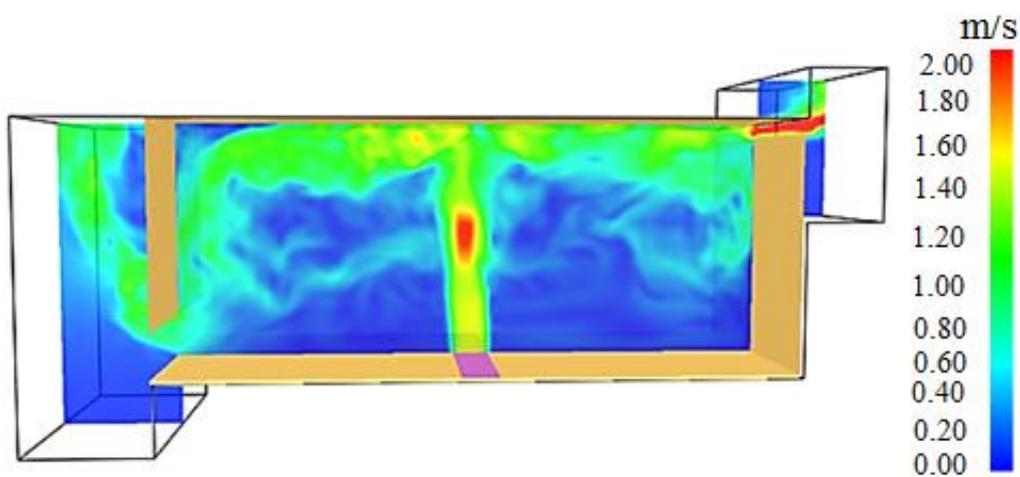


Figure 2.28 : Champs de vitesse en régime bloqué à $t=5s$

▪ Remarque

Nous constatons que les vitesses horizontales moyennes au niveau de l'orifice d'entrée et au niveau de l'orifice de sortie ne sont pas nulles sur les bords des ouvertures. Cela peut s'expliquer par l'effet du maillage sur le calcul. En effet, si les arêtes et les sommets des mailles ne sont pas confondus avec les arêtes et les sommets de la maquette, les mesures affichées par FDS et les mesures vraies ne sont pas les mêmes. Etant donné que les dimensions de l'enceinte et de ses ouvertures ne permettent pas cette concordance, il existe une incertitude spatiale d'une valeur maximale de 3mm.

2.4. Résultats numériques

2.4.1. Etude de l'influence du paramètre géométrique H_s sur les régimes d'écoulement

Dans la série d'essais suivante, nous avons fixé la masse volumique du fluide injecté à 0.97kg/m^3 et la hauteur de l'orifice du haut H_s à 12mm et nous avons varié la vitesse d'injection (donc le nombre de Froude à l'injection) afin de repérer les vitesses auxquelles il y a passage d'un régime à un autre.

▪ Série de simulations n°1

- $\frac{H_s}{H} = 0,06$
- $\frac{\Delta\rho}{\rho} = \frac{\rho_0 - \rho}{\rho} = 0,23$ / Avec ρ_0 la masse volumique du milieu ambiant.
- Fr variable

Tableau 2.3 : Tableau des différents régimes obtenus pour différentes vitesses (nombres de Froude) d'injection pour la 1^{ère} série de simulations

V_i ($m.s^{-1}$)	0,4	0,6	0,8	1,0	1,2	1,4	1,6
Fr	0,5	1,2	2,2	3,4	4,9	6,7	8,7
Régime	Naturel	Intermédiaire	Intermédiaire	Intermédiaire	Intermédiaire	Bloqué	Bloqué

Le tableau (2.3) montre les conditions d'apparition des différents régimes d'écoulement. Il apparaît qu'il y a transition entre le régime naturel et le régime intermédiaire pour une vitesse se situant dans l'intervalle [0.4 ; 0.6] (correspondant à l'intervalle [0.5 ; 1.2] pour le nombre de Froude) et transition entre le régime intermédiaire et le régime bloqué pour une vitesse se situant dans l'intervalle [1.2 ; 1.4] (correspondant à l'intervalle [4.9, 6.7] pour le nombre de

Froude). Nous considérons les moyennes arithmétiques de chacune de ces deux valeurs limites comme vitesses (ou nombre de Froude) de transition, c'est à dire : 0.5 m/s pour le passage du régime naturel au régime intermédiaire (ce qui correspond à un nombre de Froude de 0.85) et 1.3m/s pour le passage du régime intermédiaire au régime bloqué (ce qui correspond à un nombre de Froude de 5.8).

La même démarche est répétée pour différentes valeurs de la hauteur de l'orifice de sortie H_s entre 12 et 36mm. Les résultats sont résumés dans le tableau récapitulatif (3.4).

Tableau 2.4: Tableau récapitulatif des nombres de Froude de changement de régime pour différentes valeurs de H_s/H

$\frac{\Delta\rho}{\rho} = 0,23$		
$\frac{H_s}{H}$	Fr_{NI}	Fr_{IB}
0,06	0,9	5,7
0,075	1,7	7,7
0,09	2,8	9,8
0,12	5,7	15,00
0,135	7,65	21,26
0,15	9,83	24,80
0,165	12,28	32,69
0,18	15,00	41,67

2.4.2. Etude de l'influence de la masse volumique d'injection

Dans la série d'essais suivante, nous avons fixé la vitesse d'injection à 0.8 m/s et la hauteur de l'orifice du haut H_s à 24mm et nous avons varié la masse volumique du fluide injecté d'injection (donc le rapport $\frac{\Delta\rho}{\rho}$) afin de repérer les rapports $\frac{\Delta\rho}{\rho}$ auxquels il y a passage d'un régime à un autre.

- Série de simulations n°2

- $\frac{H_s}{H} = 0,12$
 - $Fr = 2,2$
-

- $\frac{\Delta\rho}{\rho}$ variable

Tableau 2.5 : Tableau des différents régimes obtenus pour différentes masses volumiques d'injection pour la 1^{ère} série de simulations

% volumique <i>Hélium</i>	0%	5%	10%
$\frac{\Delta\rho}{\rho}$	0	0,006	0,014
<i>Régime</i>	Bloqué	Intermédiaire	Naturel

Le tableau (2.5) montre les différents régimes d'écoulement obtenus pour chaque masse volumique d'injection. Il apparaît qu'il y a transition entre le régime naturel et le régime intermédiaire pour $0 < \frac{\Delta\rho}{\rho} < 0.006$ et entre le régime intermédiaire et le régime bloqué pour $0.006 < \frac{\Delta\rho}{\rho} < 0.014$. Nous considérons les valeurs médianes comme points de transition. C'est-à-dire 0.003 pour le passage du régime naturel au régime intermédiaire, et 0.01 pour le passage du régime intermédiaire au régime bloqué.

La même démarche est répétée pour différentes valeurs de la hauteur de l'orifice de sortie H_s . Les résultats sont résumés dans le tableau récapitulatif (2.6) :

Tableau 2.6 : Tableau récapitulatif des nombres des valeurs de $\Delta\rho/\rho$ de changement de régime pour différentes valeurs de vitesse d'injection

$\frac{H_s}{H} = 0,12$		
<i>Fr</i>	$\frac{\Delta\rho}{\rho}_{NI}$	$\frac{\Delta\rho}{\rho}_{IB}$
26,7	Froude élevé → régime naturel impossible	0,089
13,6	0,197	0,026
6,7	0,046	0,017
4,9	0,03	0,01
3,4	0,026	0,006
2,2	0,01	0,003

2.5. Traitement et exploitation des données numériques

3.5.1. Effet de la vitesse d'injection sur les vitesses moyennes aux orifices

La figure (3.28) représente les courbes d'évolution des vitesses horizontales moyennes à l'orifice d'entrée et à l'orifice de sortie, en fonction de la vitesse d'injection. A travers ces variations, il apparait que la vitesse de l'air entrant par l'orifice du bas est très faible devant la vitesse du fluide sortant par l'orifice du haut (courbe verte), ce qui montre que l'entraînement de l'air par le panache d'hélium est peu important. La vitesse au niveau de l'orifice du haut semble converger jusqu'à une valeur limite de 2m/s, ce qui représente sa capacité maximale (courbe rouge). La vitesse de sortie par l'orifice du bas continue quant à elle d'augmenter en valeur algébrique (courbe bleue).

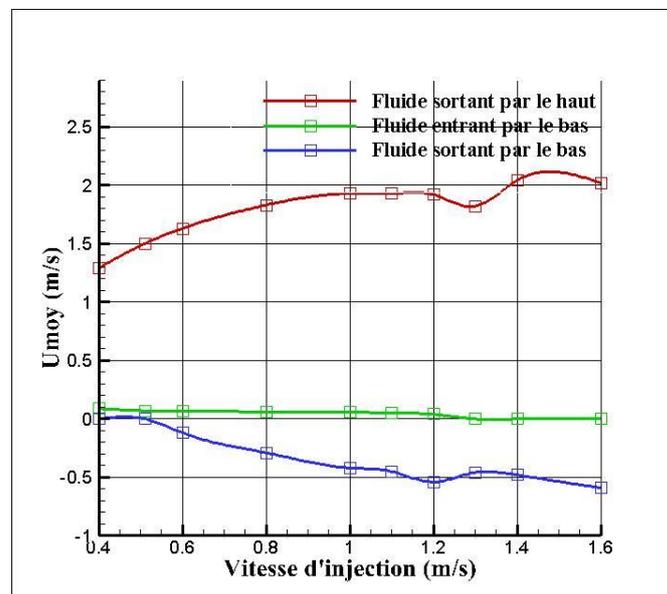


Figure 2.29 : Evolution des vitesses horizontales moyennes aux orifices en fonction de la vitesse d'injection

La figure (2.30) représente les profils de vitesse horizontale moyenne à l'entrée pour différentes valeurs de la vitesse d'injection. Cela confirme que les vitesses positives qui sont de l'ordre de 0.1m/s sont faibles comparées aux vitesses négatives qui atteignent 1.3m/s.

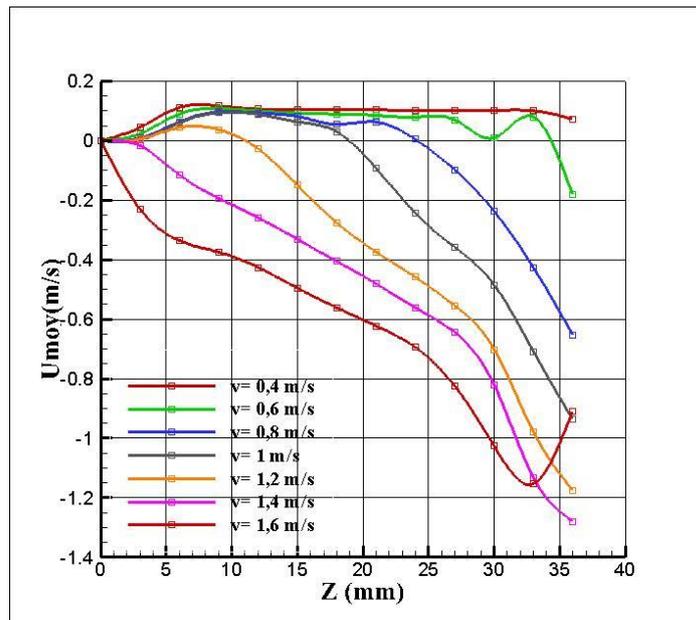


Figure 2.31 : Champs de vitesse horizontale moyenne à l'entrée pour différentes vitesses d'injection

Les profils de vitesse horizontale à l'orifice de sortie que représente la figure (2.31) montrent que les courbes de vitesse ont tendance à se rapprocher à mesure que la vitesse d'injection augmente, jusqu'à ce qu'elles deviennent pratiquement confondues. Ce qui confirme l'existence d'une vitesse d'injection limite au-delà de laquelle il y a saturation dans l'écoulement, ce qui engendre une surpression dans l'enceinte et l'impossibilité d'augmenter cette vitesse d'injection.

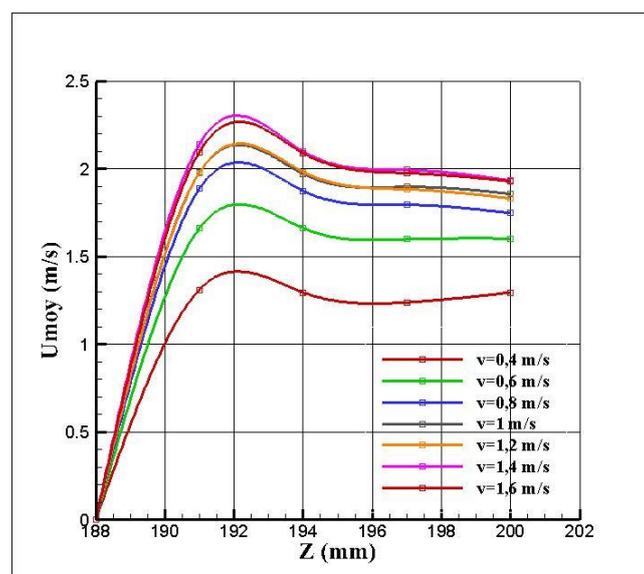


Figure 2.31: Champs de vitesse horizontale moyenne à la sortie pour différentes vitesses d'injection

2.5.2. Iso-surfaces de masse volumique et de vitesse

Il est également possible de visualiser sur Smokeview des images en 3D des iso-surfaces, ce qui permet d'avoir des informations supplémentaires notamment pour confirmer la symétrie du problème par rapport à l'axe y. Les figures (2.32) et (2.33) représentent les iso-surfaces de masse volumique pour les valeurs $0.54 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ et $0.75 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ respectivement, et les figures (2.34) et (2.35) représentent les iso-surfaces de vitesse pour les valeurs $1.3 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ et $1.9 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ respectivement. A travers ces dernières, il apparaît qu'en termes de masse volumique ou de vitesse, la symétrie par rapport à l'axe y est globalement conservée.

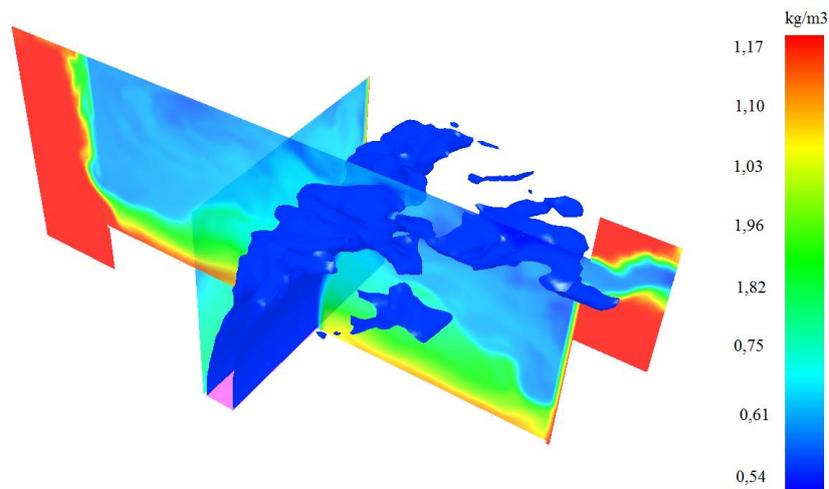


Figure 2.32: Iso-surface de masse volumique pour la valeur $0.54 \text{ kg}/\text{m}^3$

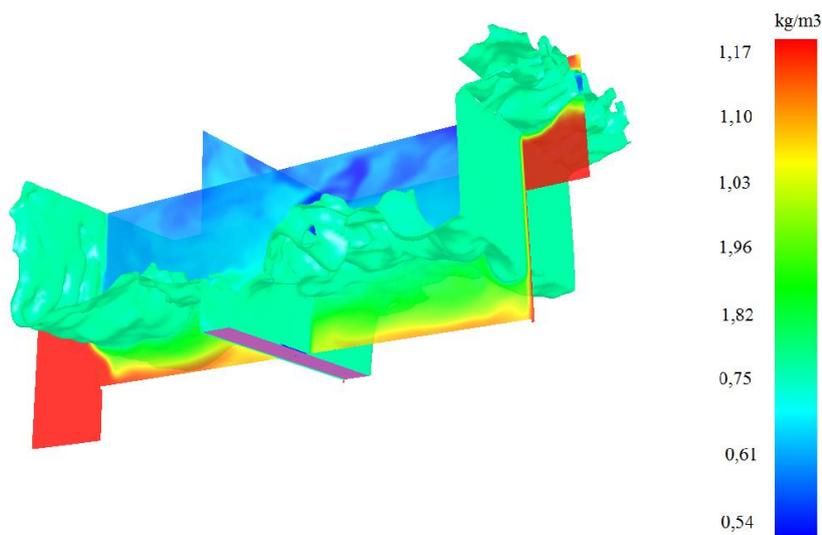


Figure 2.33: Iso-surface de masse volumique pour la valeur $0.75 \text{ kg}/\text{m}^3$

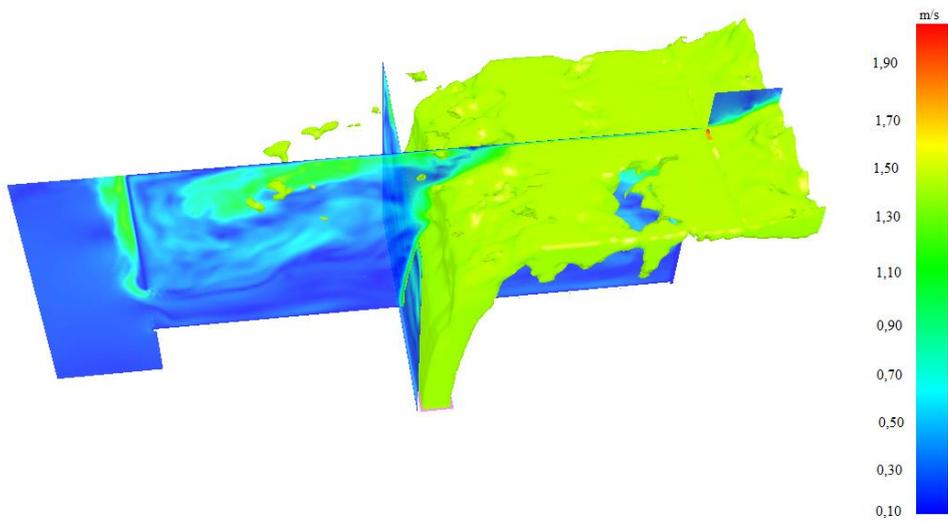


Figure 3.34: Iso-surface de vitesse pour la valeur 1.3 m/s

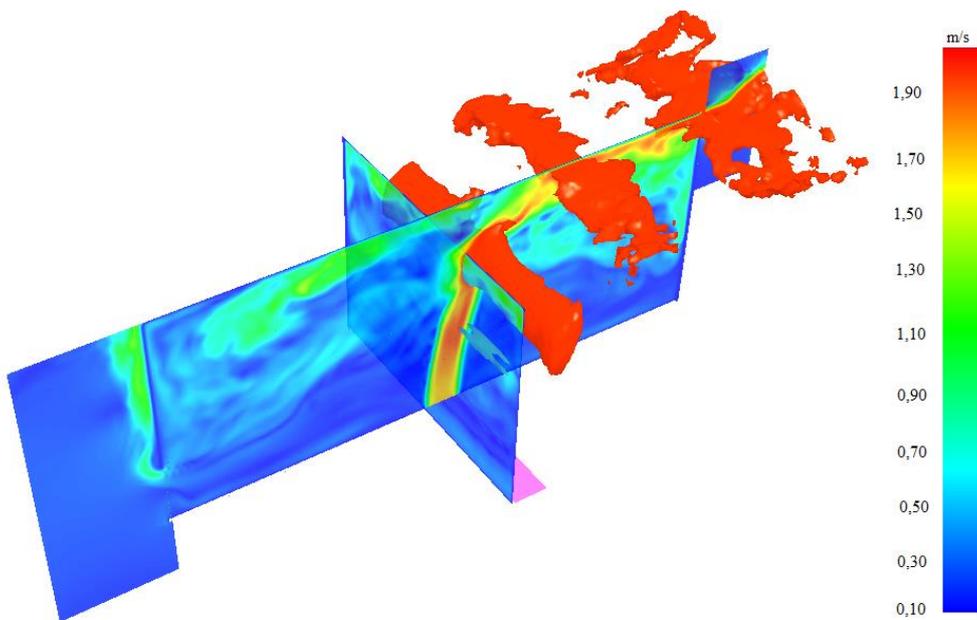


Figure 3.35: Iso-surface de vitesse pour la valeur 1.9 m/s

2.5.2. Cas général : étude de l'effet des paramètres $\frac{H_s}{H}$ et $\frac{\Delta\rho}{\rho}$

2.5.2.1. Relation fonctionnelle du nombre de Froude d'injection avec le paramètre $\frac{H_s}{H}$

Les courbes d'évolution des nombres de Froude de passage du régime naturel au régime intermédiaire et du régime intermédiaire au régime bloqué en fonction du paramètre géométrique adimensionnel $\frac{H_s}{H}$ de la figure (2.36) sont tracées à partir des résultats du tableau (2.6).

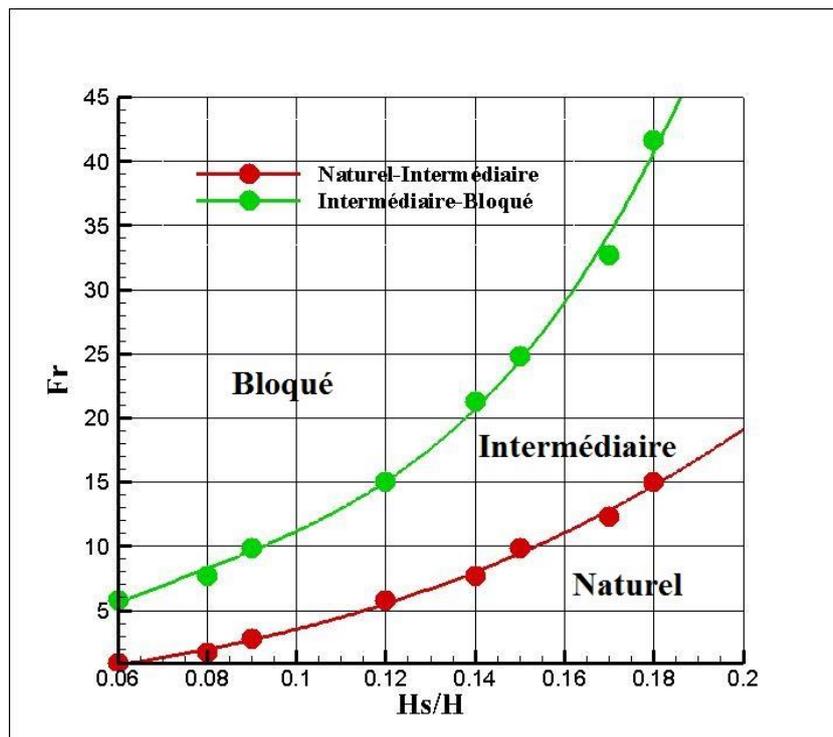


Figure 2.36 : Evolution du nombre de Froude de passage du régime naturel au régime intermédiaire et de l'intermédiaire au bloqué en fonction du paramètre de forme $\frac{H_s}{H}$

En passant à une échelle logarithmique, les courbes prennent la forme de droites comme le montre la figure (2.37).

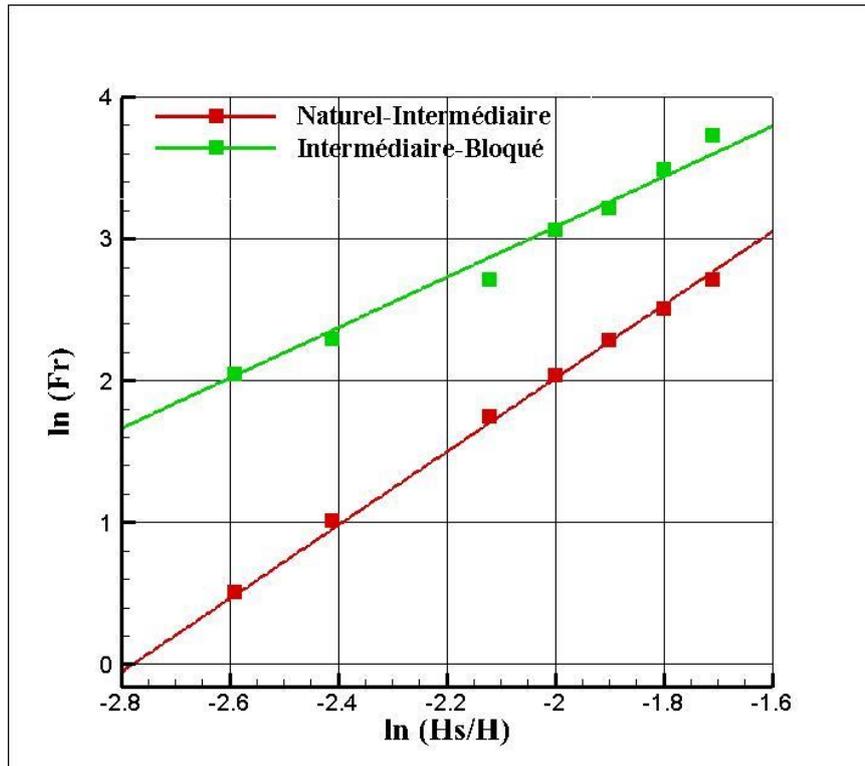


Figure 2.37 : Evolution du logarithme népérien du nombre de Froude de passage du régime naturel au régime intermédiaire et de l'intermédiaire au bloqué en fonction du logarithme népérien de H_s/H

Ceci se traduit par des relations fonctionnelles sous la forme :

$$Fr_{NI} = A * \left(\frac{H_s}{H}\right)^a \quad (3.1)$$

$$Fr_{IB} = B * \left(\frac{H_s}{H}\right)^b \quad (3.2)$$

Où a, b, A et B sont des constantes à déterminer.

Les équations des droites de la figure (3.36) étant :

$$\ln(Fr_{NI}) = 2,6 * \ln\left(\frac{H_s}{H}\right) + 7,2 \quad (3.3)$$

Et

$$\ln(Fr_{IB}) = 1,8 * \ln\left(\frac{H_s}{H}\right) + 6,6 \quad (3.4)$$

C'est-à-dire :

$$Fr_{NI} = e^{7,2} * \left(\frac{H_s}{H}\right)^{2,6} \quad (3.5)$$

$$Fr_{IB} = e^{6,6} * \left(\frac{H_s}{H}\right)^{1,8} \quad (3.6)$$

Ceci implique pour la plage de valeurs étudiée (c'est-à-dire $0.09 < \frac{H_s}{H} < 0.18$) les deux équations suivantes :

$$Fr_{NI} = 1339 * \left(\frac{H_s}{H}\right)^{2,6} \quad (3.7)$$

$$Fr_{IB} = 735 * \left(\frac{H_s}{H}\right)^{1,8} \quad (3.8)$$

2.5.2.2. Effet du paramètre $\frac{\Delta\rho}{\rho}$ sur les régimes d'écoulement

Les courbes d'évolution du nombre de Froude de passage du régime naturel au régime intermédiaire et du régime intermédiaire au régime bloqué en fonction de $\frac{\Delta\rho}{\rho}$ des figures (2.38) et (2.39) sont tracées à partir des résultats du tableau (2.5) :

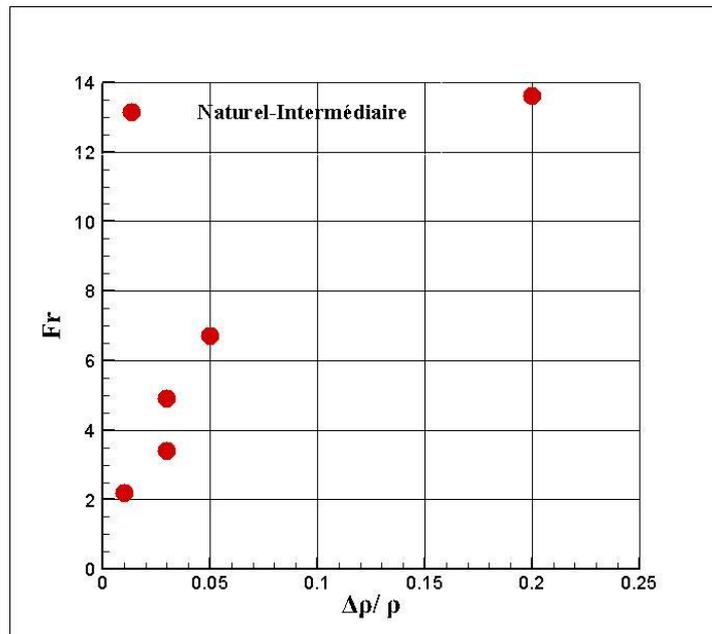


Figure 2.38 : Evolution du nombre de Froude de passage du régime naturel au régime intermédiaire en fonction de $\Delta\rho/\rho$

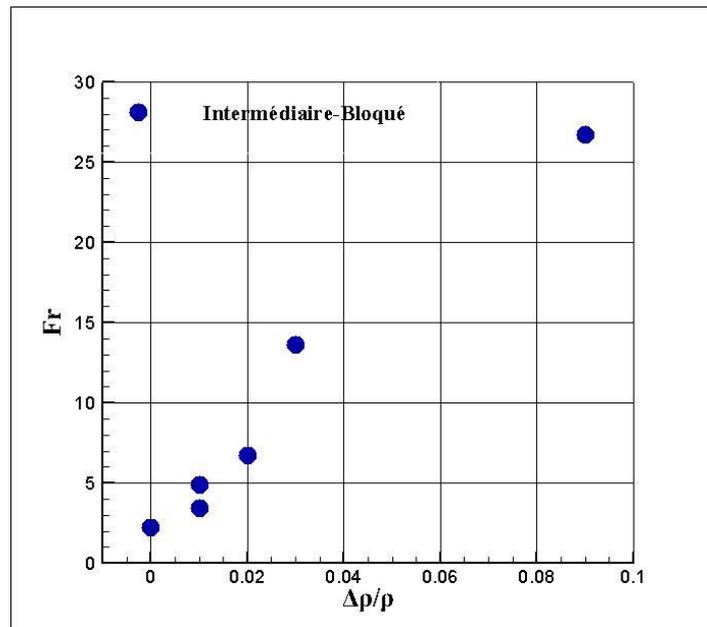


Figure 2.40 : Evolution du nombre de Froude de passage du régime intermédiaire au régime bloqué en fonction de $\Delta\rho/\rho$

Les points numériques obtenus n'étant pas assez nombreux pour établir une corrélation précise, nous nous limitons à une analyse qualitative de ces résultats. Il apparaît à travers les figures (2.38) et (2.39) que plus $\frac{\Delta\rho}{\rho}$ augmente et plus l'effet de la flottabilité devient important, ce qui empêche le mélange de sortir par l'orifice du bas. Ainsi, plus $\frac{\Delta\rho}{\rho}$ augmente, plus il faut augmenter la vitesse d'injection (c'est-à-dire le nombre de Froude d'injection) pour passer du régime naturel au régime intermédiaire, et du régime intermédiaire au régime bloqué.

Chapitre 3 :

Etude expérimentale

Chapitre 3 : Etude expérimentale

Une étude expérimentale a été effectuée au sein du laboratoire de l'établissement d'accueil d'Aix-Marseille université (Marseille) dont le but est de valider les résultats numériques obtenus.

3.1. Configuration expérimentale étudiée

La maquette utilisée dans l'expérience est de dimensions similaires à la maquette numérique. Il s'agit d'une enceinte parallélépipédique ($L \times l \times H$), disposant de deux ouvertures rectangulaires de largeurs H_e et H_s . La première ouverture effleure le sol, la seconde effleure le plafond. L'enceinte est alimentée en mélange air-hélium par une buse rectangulaire de largeur e située au sol et de débit variable. Comme pour la partie numérique, le but de l'expérience est d'identifier les différents régimes d'écoulement et les transitions entre ces derniers en fonction du nombre de Froude.

3.2. Descriptif du dispositif expérimental

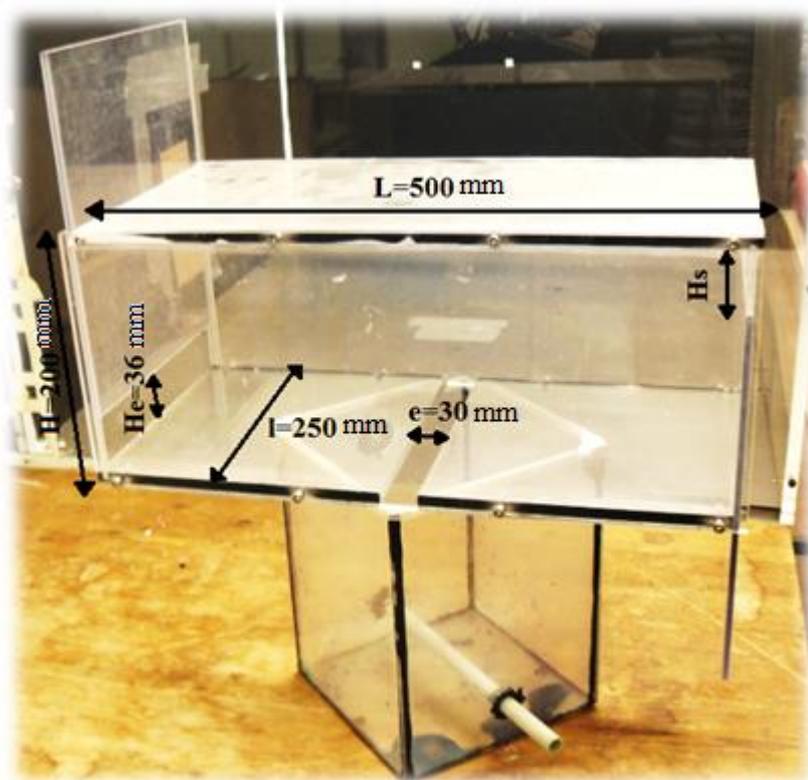


Figure 3.1 : Maquette expérimentale

C'est une enceinte parallélépipédique figure (3.1) d'une longueur $L=500$ mm, une largeur $l=250$ mm et une hauteur $H=200$ mm. Les faces latérales les plus petites sont dotées d'ouvertures rectangulaires. L'une d'entre elles est munie d'une ouverture basse effleurant le sol, d'une largeur $l=250$ mm et d'une hauteur de $H_e=36$ mm. La face opposée est munie d'une ouverture haute effleurant le plafond, d'une largeur $l=250$ mm et d'une hauteur de H_s variable grâce à un système approprié de glissière coulissante. Les parois latérales de 250 mm x 200 mm et celles de 500 mm x 200 mm sont en plexiglas de 5 mm et de 8 mm d'épaisseur respectivement.

Cette maquette est alimentée avec un mélange air-hélium, dont l'air provient du circuit d'air comprimé du laboratoire et l'hélium de bouteilles de stockage (présümées à 120 bars). Les deux gaz arrivent dans deux tuyaux séparés, puis se croisent dans une canalisation où ils se chargent de particules d'ensemencement. La canalisation est connectée à un tuyau troué qui traverse une chambre tampon qui permet une injection uniforme au niveau de la buse d'alimentation de largeur $e=30$ mm, et de longueur $l=250$ mm.

3.3. Techniques de mesure et de contrôle

3.3.1. Mesure du débit

Les débits volumiques de l'air et de l'hélium sont réglables grâce à un système de vannes, et sont mesurés grâce à des débitmètres de marque Bronkhorst placés en amont de la conduite commune et en aval des vannes de régulation, figure (3.2).

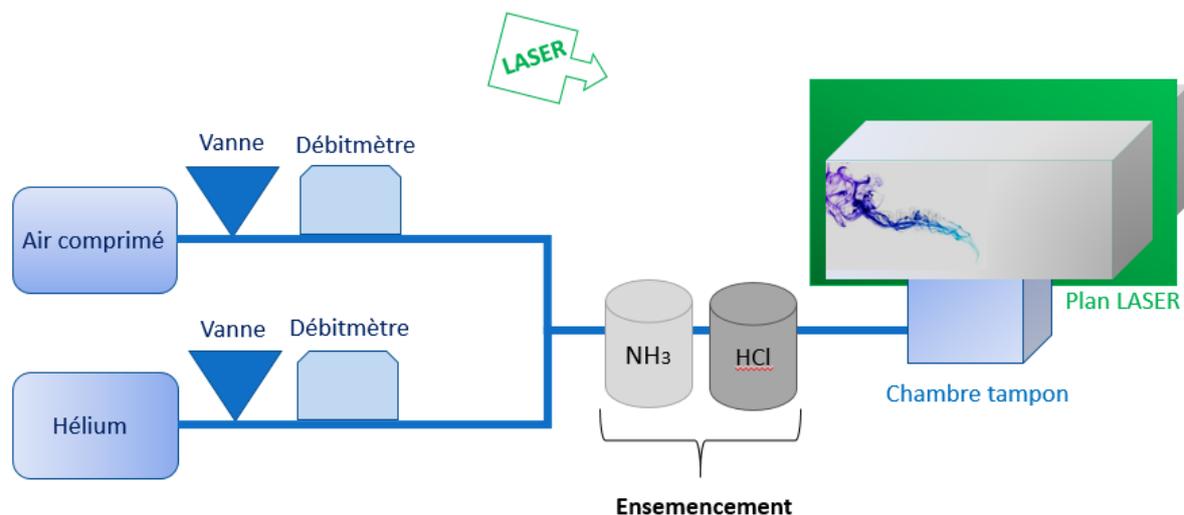


Figure 3.2 : Schéma du dispositif expérimental

3.3.2. Visualisation

Le mélange air-hélium étant transparent, il est nécessaire de l'ensemencer de particules afin de pouvoir le visualiser. Dans le cas présent, le mélange est chargé de particules d'acide chlorhydrique (HCL) et d'ammoniac (NH_3) dans le but de former des sels d'ammonium, avant qu'il ne soit injecté dans une chambre tampon. Cette chambre sert à ralentir les jets provenant du tube d'injection, pour que le panache à l'injection ne soit conditionné que par la forme de la buse d'injection. L'écoulement est ensuite éclairé par un plan LASER, permettant une visualisation en 2D du plan médian.

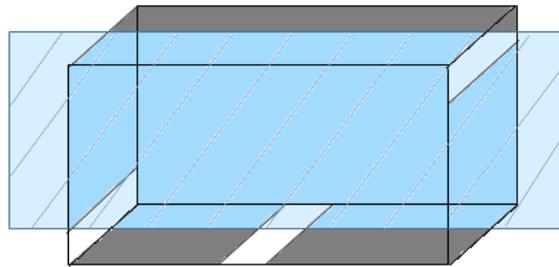


Figure 3.3 (a) : Schéma du plan LASER de visualisation

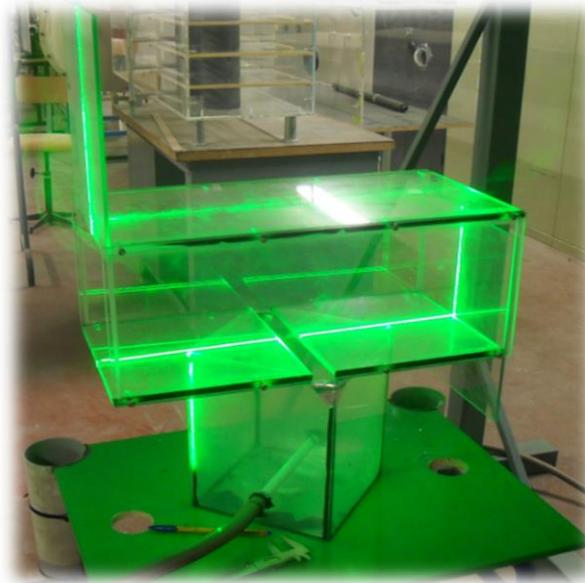


Figure 3.4 (b) : Image réelle du plan LASER de visualisation



Figure 3.5 : Ensemencement du mélange air hélium par des sels d'ammonium

3.4. Protocole expérimental

Dans cette expérience, les paramètres d'entrée connus par l'expérimentateur sont les débits volumiques de l'air, et de l'hélium. Ceux-ci permettent d'obtenir la fraction volumique de l'hélium, et donc la masse volumique du mélange moyennant la formule :

$$\rho_{\text{mélange}} = \chi_{\text{He}} * \rho_{\text{He}} + (1 - \chi_{\text{He}}) * \rho_{\text{Air}} \quad (3.1)$$

où χ_{He} est la fraction massique de l'hélium, $\rho_{\text{He}} = 0.17 \text{ kg.m}^{-3}$ la masse volumique de l'hélium, $\rho_{\text{Air}} = 1.2 \text{ kg.m}^{-3}$ la masse volumique de l'air, et $\rho_{\text{mélange}}$ la masse volumique du mélange.

Partant du principe que les régimes d'écoulement dans l'enceinte dépendent des deux paramètres qui sont le nombre de Froude densitométrique à l'injection donné par la formule :

$$\text{Fr}^* = \frac{V^2}{\frac{\Delta\rho}{\rho} eg} = \frac{Q_o^2}{\frac{\Delta\rho}{\rho} eg A_o^2} \quad (3.2)$$

Avec, Q_o et A_o le débit volumique et la section de la buse d'injection respectivement.

Et $\frac{H_s}{H}$ rapport de la hauteur de l'orifice de sortie sur la hauteur de l'enceinte.

L'expérience se fait en fixant le débit volumique d'entrée (donc le nombre de Froude densitométrique) et en variant la hauteur H_s jusqu'à atteindre celle où il y a transition d'un régime à un autre. Cette dernière est identifiée visuellement.

3.5. Résultats obtenus

Les tableaux (4.1) et (4.2) donnent pour chaque valeur de débit volumique d'injection, la masse volumique du mélange, le nombre de Froude densitométrique d'injection, ainsi que le rapport $\frac{H_s}{H}$ auquel il y a respectivement passage du régime naturel au régime intermédiaire, et du régime intermédiaire au régime bloqué.

Tableau 3.1 : Résultats expérimentaux pour le passage du régime naturel au régime intermédiaire

Q_0 (l/min)	$\rho_{Mélange}$ ($kg.m^{-3}$)	Fr^*	$(\frac{H_s}{H})_{NI}$
100	0,17	0,03	0,06
150	0,51	0,28	0,08
200	0,17	0,11	0,07
200	0,68	0,91	0,12
250	0,37	0,48	0,11
250	0,79	2,05	0,16
300	0,51	1,14	0,13
300	0,86	3,86	0,19
300	0,17	0,24	0,09
331	0,26	0,52	0,1
350	0,61	2,16	0,16
350	0,90	6,52	0,21
350	0,31	0,74	0,11
400	0,68	3,62	0,18
400	0,42	1,49	0,15
450	0,74	5,60	0,21
450	0,51	2,56	0,17
500	0,58	3,99	0,2
550	0,64	5,83	0,2
600	0,68	8,15	0,21
635	0,17	1,10	0,13
650	0,72	10,98	0,23
700	0,76	14,38	0,29

Tableau 3.2 : Résultats expérimentaux pour le passage du régime intermédiaire au régime bloqué

Q_0 (l/min)	$\rho_{Mélange}$ (kg.m ⁻³)	Fr^*	$(\frac{H_s}{H})_{IB}$
100	0,17	0,03	/
150	0,51	0,28	/
200	0,17	0,11	/
200	0,68	0,91	0,02
250	0,37	0,48	0,01
250	0,79	2,05	0,06
300	0,51	1,14	0,03
300	0,86	3,86	0,09
300	0,17	0,24	/
331	0,26	0,52	/
350	0,61	2,16	0,07
350	0,90	6,52	0,13
350	0,31	0,74	0,01
400	0,68	3,62	0,09
400	0,42	1,49	0,05
450	0,74	5,60	0,14
450	0,51	2,56	0,07
500	0,58	3,99	0,09
550	0,64	5,83	0,12
600	0,68	8,14	0,14
635	0,17	1,1	0,25
650	0,72	10,98	0,17
700	0,76	14,38	0,23

Ainsi, il est possible de tracer une courbe expérimentale décrivant l'évolution du nombre de Froude densitométrique de passage du régime naturel au régime intermédiaire, et du régime intermédiaire au régime bloqué :

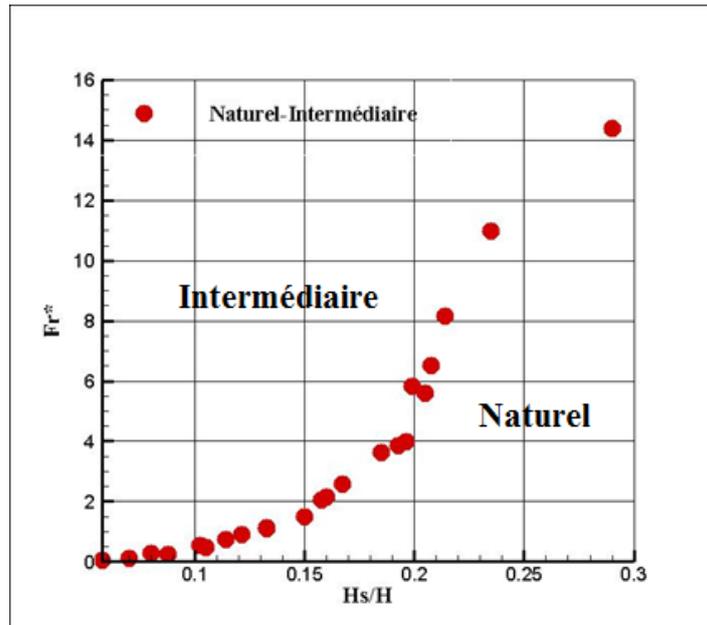


Figure 3.6 : Courbe expérimentale pour l'évolution du nombre de Froude densitométrique du passage du régime naturel au régime intermédiaire en fonction de H_s/H

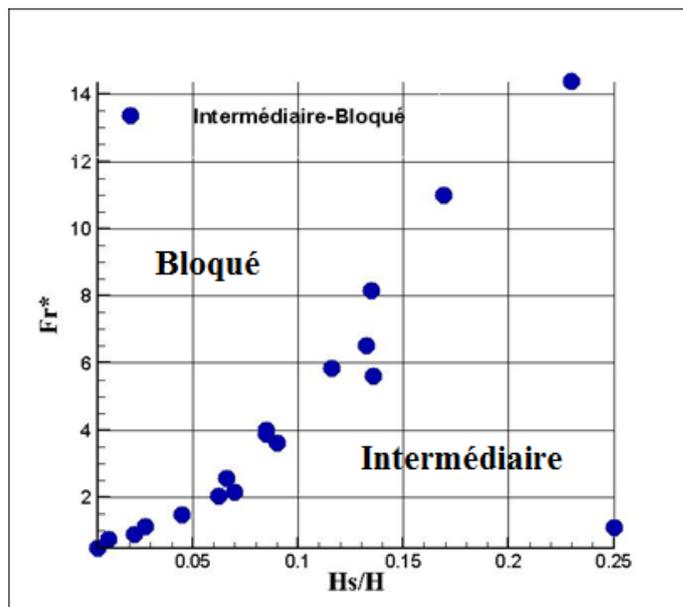


Figure 3.7 : Courbe expérimentale pour l'évolution du nombre de Froude densitométrique du passage du régime intermédiaire au régime bloqué en fonction de H_s/H

L'expérience pour le passage du régime intermédiaire au régime bloqué donne des points plus dispersés, étant donné que les vitesses d'injection en jeu sont plus importantes, ce qui donne lieu à une plus grande turbulence et une moindre maîtrise des points de transition entre un régime à un autre.

3.6. Comparaison avec les résultats numériques et interprétation

Dans la partie numérique de l'étude, nous avons obtenu une corrélation décrivant le nombre de Froude de passage du régime naturel au régime intermédiaire et le nombre de Froude de passage du régime intermédiaire au régime bloqué en fonction du paramètre $\frac{H_s}{H}$. Le protocole expérimental étant basé sur la variation du débit volumique d'air et d'hélium, c'est-à-dire la variation du nombre de Froude et la de la masse volumique à la fois, ceci qui ne permet pas d'apprécier l'effet de la variation de la masse volumique sur les régimes d'écoulement. Cela dit, il est possible de comparer l'effet du paramètre $\frac{H_s}{H}$ obtenu par la méthode expérimentale et par la méthode numérique.

En effet, en s'intéressant uniquement aux points testés numériquement ($0,06 < \frac{H_s}{H} < 0,18$) afin de comparer les résultats numériques aux résultats expérimentaux, les deux courbes tronquées obtenues sont les suivantes :

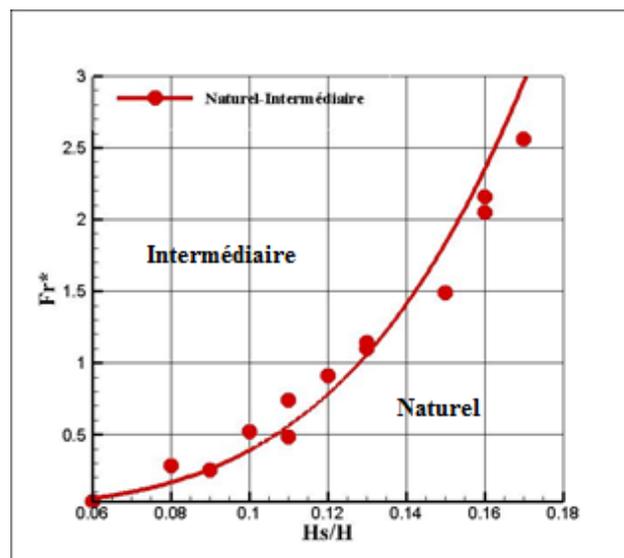


Figure 3.8 : Courbe expérimentale pour l'évolution du nombre de Froude densitométrique du passage du régime naturel au régime intermédiaire en fonction de H_s/H pour $0,06 <$

$$H_s/H < 0,18$$

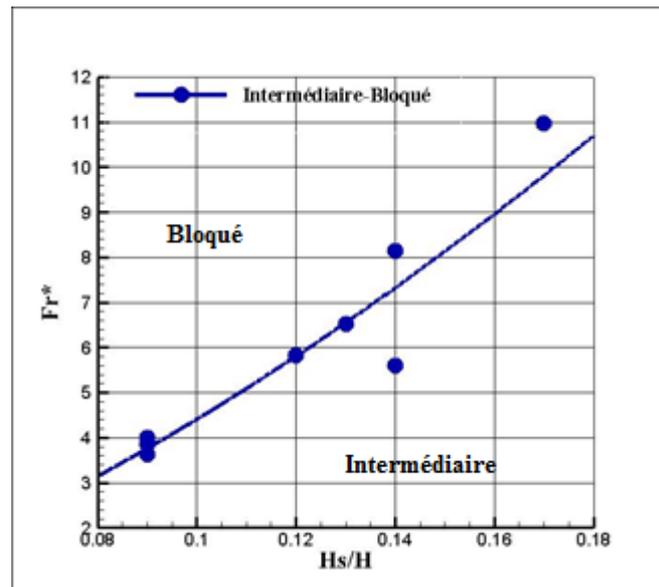


Figure 3.9 : Courbe expérimentale pour l'évolution du nombre de Froude densitométrique du passage du régime intermédiaire au régime bloqué en fonction de H_s/H pour $0,06 < H_s/H < 0,18$

En passant en échelle logarithmique, les deux courbes suivantes sont obtenues :

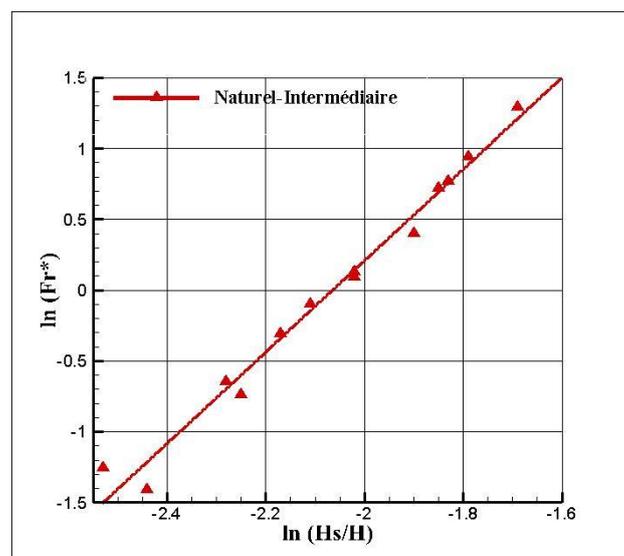


Figure 3.10: Courbe expérimentale pour l'évolution du logarithme népérien du nombre de Froude densitométrique du passage du régime naturel au régime intermédiaire en fonction du logarithme de H_s/H pour $0,06 < H_s/H < 0,18$

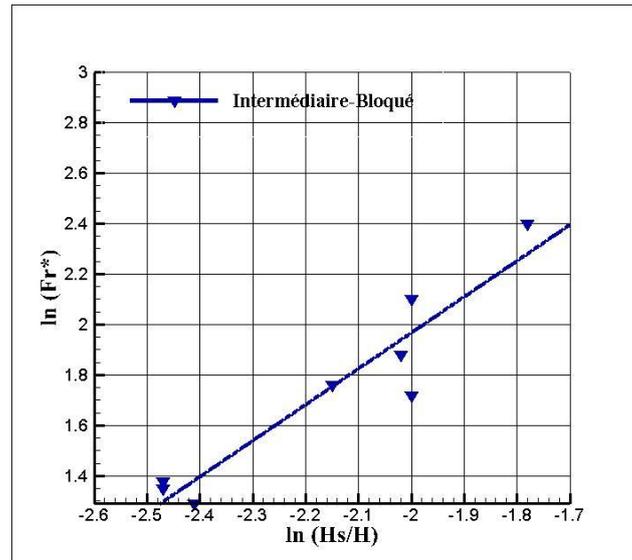


Figure 3.11: Courbe expérimentale pour l'évolution du logarithme du nombre de Froude densitométrique du passage du régime intermédiaire au régime bloqué en fonction du logarithme de H_s/H pour $0,06 < H_s/H < 0,18$

Les droites de tendance de la figure (3.10) et de la figure (3.11) ont pour équations respectives :

$$\ln(Fr^*) = 3 * \ln\left(\frac{H_s}{H}\right) + 7 \quad (3.3)$$

$$\ln(Fr^*) = 1,4 * \ln\left(\frac{H_s}{H}\right) + 5 \quad (3.4)$$

Ainsi, selon les résultats expérimentaux, les corrélations donnant les nombres de Froude de passage du régime naturel au régime intermédiaire et du régime intermédiaire au régime bloqué sont :

$$\begin{cases} Fr_{NI}^* = 1997 * \left(\frac{H_s}{H}\right)^3 \\ Fr_{IB}^* = 148 * \left(\frac{H_s}{H}\right)^{1,4} \end{cases} \quad (3.5)$$

$$\text{Pour } 0,06 < \frac{H_s}{H} < 0,18$$

Tableau 3.3 : bilan comparatif des résultats numériques et résultats expérimentaux

$0,06 < \frac{H_s}{H} < 0,18$		
Corrélation	Naturel-Intermédiaire	Intermédiaire-Bloqué
Numérique	$Fr_{NI} \sim \left(\frac{H_s}{H}\right)^{2,6}$	$Fr_{IB} \sim \left(\frac{H_s}{H}\right)^{1,8}$
Expérimental	$Fr_{NI}^* \sim \left(\frac{H_s}{H}\right)^3$	$Fr_{IB}^* \sim \left(\frac{H_s}{H}\right)^{1,4}$

A travers le tableau ci-dessus, il apparaît que les exposants du paramètre $\frac{H_s}{H}$ obtenus par la voie numérique et par la voie expérimentale diffèrent d'environ 13% pour le passage du régime naturel au régime intermédiaire, et d'environ 22% pour le passage du régime intermédiaire au régime bloqué.

En effet, que ce soit dans le calcul numérique ou la procédure expérimentale, de multiples facteurs sont susceptibles d'engendrer des erreurs et des décalages entre ces deux résultats :

- 1- Le fait que la partie numérique soit sujette aux erreurs dues aux dimensions de la grille de maillage, ainsi qu'au modèle mathématique et physique adopté par le logiciel FDS qui est plus ou moins fidèle à la réalité physique.
- 2- La différence entre la maquette expérimentale et la maquette numérique rend les situations physiques non exactement identiques. En l'occurrence, l'épaisseur des parois qui a été négligée dans la partie numérique, la présence d'une chambre tampon et d'un tuyau d'injection dans la partie expérimentale, avec les pertes de charges que ces derniers engendrent... etc.
- 3- Toutes les erreurs de mesure systématiques et aléatoires propres à l'expérience, particulièrement quand la procédure d'expérimentation est basée sur une visualisation à l'œil nu. De plus, le passage du régime intermédiaire au régime bloqué nécessitant des débits importants, et donc difficiles à maîtriser en pratique est difficilement repérable avec rigueur expérimentalement.

Conclusion générale



Conclusion générale

Dans ce projet, nous avons étudié le phénomène de ventilation naturelle qui se produit en présence d'une source de flottabilité (en l'occurrence un panache d'air-hélium) à l'intérieur d'une enceinte parallélépipédique à une ouverture haute, et une ouverture basse. Une analyse dimensionnelle a été faite afin de définir les paramètres physiques sur lesquels l'étude paramétrique doit être basée.

Ainsi, il a été déduit que dans le cadre de la problématique en question, seuls le nombre de Froude (Fr), le paramètre géométrique $\frac{H_s}{H}$ et le rapport de masse volumique $\frac{\Delta\rho}{\rho}$ influent sur le phénomène physique, c'est-à-dire sur les régimes d'écoulement qui sont au nombre de 3 :

- 1- Le régime naturel pour de faibles vitesses, correspondant au cas où le panache de gaz injecté provoque un entrainement d'air par le bas, et s'évacue par le haut (soit un écoulement entrant par l'orifice du bas et sortant par l'orifice du haut).
- 2- Le régime intermédiaire pour des vitesses un peu plus importantes, où l'écoulement est à la fois entrant et sortant par l'orifice du bas, mais toujours sortant par l'orifice du haut.
- 3- Le régime bloqué, pour des vitesses très importantes, où l'écoulement est sortant par les deux orifices.

Afin d'étudier l'influence des paramètres physiques Fr , $\frac{H_s}{H}$ et $\frac{\Delta\rho}{\rho}$, deux groupes de séries de simulations numériques ont été réalisés : D'abord en gardant $\frac{\Delta\rho}{\rho}$ fixe, et en faisant varier les paramètres Fr et $\frac{H_s}{H}$ afin de déterminer la relation fonctionnelle entre ces deux derniers. Ensuite en gardant $\frac{H_s}{H}$ fixe, et en faisant varier les paramètres Fr et $\frac{\Delta\rho}{\rho}$ dans le but d'observer l'influence de la masse volumique sur les régimes d'écoulement.

Cette étude paramétrique a permis d'extraire des corrélations reliant le nombre de Froude d'injection pour lequel il y a passage d'un régime à un autre (c'est-à-dire du régime naturel au régime intermédiaire, et du régime intermédiaire au régime bloqué) sous la forme :

$$Fr_{NI} = 1339 * \left(\frac{H_s}{H}\right)^{2,6}$$

$$Fr_{IB} = 735 * \left(\frac{H_s}{H}\right)^{1,8}$$

$$\text{Avec } 0.09 < \frac{H_s}{H} < 0.18 \text{ et } \frac{\Delta\rho}{\rho} = 0.23$$

Par la suite, il a été possible de confronter une partie de ces résultats numériques à des résultats expérimentaux, effectués sur une maquette expérimentale similaire au sein de l'établissement d'accueil. Il a été constaté que pour le passage du régime naturel au régime intermédiaire, et pour le passage du régime intermédiaire au régime bloqué les résultats se rapprochent en terme d'ordre de grandeur, mais restent assez éloignés. Cette différence étant due aux multiples sources d'erreur présentes au cours du calcul numérique et de l'expérimentation. Ainsi, les corrélations obtenues expérimentalement sont les suivantes :

$$\begin{cases} Fr_{NI}^* = 1997 * \left(\frac{H_s}{H}\right)^3 \\ Fr_{IB}^* = 148 * \left(\frac{H_s}{H}\right)^{1,4} \end{cases}$$

Avec $0,06 < \frac{H_s}{H} < 0,18$

Il est important de ne pas perdre en vue le fait que les résultats obtenus numériquement et expérimentalement sont à prendre avec précaution, étant donné l'importante incertitude qui les accompagne de par la subjectivité du critère de passage d'un régime à un autre (par dichotomie dans la partie numérique, et par visualisation dans la partie expérimentale). L'étude faite doit d'abord être considérée dans sa globalité qualitative, puis comme point de départ pour une étude quantitative plus rigoureuse. Cela dit, ces résultats qualitatifs ont permis de tirer d'intéressantes conclusions dont la plus importante est que la loi qui relie le nombre de Froude de passage d'un régime à un autre et le paramètre géométrique $\frac{H_s}{H}$ est une loi de puissance.

Perspectives

Perspectives

Les contours du travail effectué au cours de ce projet ont été limités par des plages de valeurs bien précises ($0.06 < \frac{H_s}{H} < 0.18$) en vue des délais à respecter. Ainsi, les corrélations trouvées peuvent servir de point de départ à un travail de recherche visant à établir des corrélations plus complètes, pour des valeurs de $\frac{H_s}{H}$ allant de 0 à 1. Ceci étant fait, il serait pertinent de compléter l'étude en se penchant sur les paramètres géométriques qui ont été fixés au cours de l'étude, paramètres tels que la largeur de l'enceinte, la longueur de l'enceinte, la hauteur de l'orifice d'entrée H_e ...etc. Il serait par la suite intéressant en se basant sur les principes de similitude, d'appliquer les résultats trouvés à des maquettes de tailles plus importantes dans le but de modéliser des bâtiments et d'améliorer leur réactivité à des situations d'incendie. Ceci pourrait se faire par exemple, en concevant un système d'ouvertures asservi qui s'adapterait au débit de fumée dans la pièce pour en optimiser l'évacuation (en faisant en sorte d'être toujours en régime naturel), ou à la vitesse du vent dans le cadre d'une ventilation naturelle.

NB : l'influence du paramètre géométrique H_e sera évoquée dans la partie « master » du projet.

Références bibliographiques

- [1] Harris, F., (1916), *Stephen Hales, The Pioneer in the Hygiene of Ventilation*, published by American Association for the Advancement of Science.
- [2] Genneté, L., (1767), *Purification de l'air croupissant dans les hôpitaux, les prisons, et les vaisseaux de mer, par le moyen d'un renouvellement continuél d'air pur et frais*, éditions Permissifion.
- [3] *Les nouvelles réglementations thermique, acoustique et aération propres aux départements d'outre-mer*. Rapport annuel ,Batiments d'habitation neufs (2009), Ministère de l'Écologie et du développement durable.
- [4] McGrattan, K., (2013), *Fire Dynamics Simulator (FDS), Technical Reference Guide and Fire Dynamics Simulator User's Guide*, National Institute Of Science and Technology (USA).
- [5] Forney, G. P., (2013), *Smokeview, a tool for vizualising Fire Dynamics Simulation Data*, version 6.1.10, National Institute Of Science and Technology (USA).
- [6] Ostrach, S., (1972), *Natural Convection in Enclosures. Journal of Advances in Heat Transfer*, n°8, pp.161-227.
- [7] Chavanne X., (1997), *Observation of the Ultimate Regime in Rayleigh*, Physical Review Letters, n °79, issue 19, pp. 3648-3650.
- [8] Penot, F., (1996), *Natural Convection in a Differentially Heated Square Cavity*, Int. J. Heat Mass Transfer, n° 39, part 3, pp.563-574.
- [9] Ménard V., (2005), *Convection naturelle dans une cavité contenant une source de chaleur*, Thèse de Doctorat, Ecole Supérieure de l'Aeronotique et de l'Espace.
- [10] 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.
- [11] Dong S. F., Li Y. T. (2004), *Conjugate of natural convection and conduction in a complicated enclosure*.Int. J. Heat Mass Transfer, vol. 50, pp.3599-3615.
- [12] Kang, B. H., and Jaluria, Y., (1990), *Natural convection heat transfer characteristics of a protruding thermal source located on horizontal and vertical surfaces*.Int. Journal Heat Mass Transfer vol. 33, pp.1347-1357.
- [13] Desrayaud G., Lauriat G., (1993), *Unsteady confined buoyant plumes*, Journal of Fluid Mechanics, vol. 252, pp. 617–646.
- [14] Saha S., Saha G., Ali M., Islam M.Q., (2006), *Combined free and forced convection inside a 2D multiple ventilated rectangular enclosure*, ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences, vol.1, Issue 3, pp. 23-35.
- [15] 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, vol. 35, pp. 9218-9231.
-

- [16] 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, vol. 32, Issue 5, pp.847-1082.
- [17] Baines W. D.-f, Turner J. S., (1969), *Turbulent buoyant convection from a source in a confined region*. J. Fluid Mech., vol. 37. Issue 1, pp. 51-80.
- [18] Linden P. F., Lane-Serff G. F., Smeed.D. A., (1990), *Emptying filling boxes:the fluid mechanics of natural ventilation*. J. Fluid Mech, vol. 212. pp. 309-335.
- [19] Linden P. F., (1999), *The Fluid Mechanic Of Natural Ventilation*, annu.Rev.Fluid.Mech.1999.31:201-238.
- [20] Lin Y. J. P., and Linden P. F., (2002), *Buoyancy-driven ventilation between two chambers*, J. Fluid Mech,vol.463, pp.293-312.
- [21] Paranthoen P., Gonzalez.M., (2010), *Mixed Convection in a Ventilated Enclosure*, International Journal Of Heat and Fluid Flow,vol.31, Issue 2, pp.172-178.
- [22] Karlsson B., Quintiere J.G.,(2000), *Enclosure Fire Dynamics*, published by CRC Press LLC.
- [23] Cooper L.Y., (1998), *Compartment fire-generated environment and smoke filling. SFPE Handbook of Fire ProtectionEngineering, National Fire Protection Association, Quincy, MA*, vol 2, pp.116 -2.138.
- [24] Kawagoe K., (1958).*Fire Behaviour in Rooms.Report of the Building Research Institute, N°.* 27.
- [25] Zukoski E.E., (1978) Development of a stratified ceiling layer in the early stages of a closed-room fire Fire and Materials, vol.2, pp.54-62.
- [26] 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, pp.913-920.
- [27] Bryant R.A., (2009), *The application of stereoscopic PIV to measure the flow of air into an enclosure containing a fire*Exp. Fluids47, pp.295–308.
- [28] Jaluria Y., Chiu W.K.S., Lee H.K, (1995), *Flow of Smoke and Hot Gases across HorizontalVents in Room Fires*, Combustion Science and Technology pp.110-111, 1, pp.197-208.
-

ANNEXE

```

&HEAD CHID='my_simulation', TITLE='my_simulation'/
&MESH ID= 'mesh1',IJK=201,83,68, XB= -0.1 , 0.503, 0.00 , 0.252, -0.003 , 0.201/
&MESH ID= 'mesh2',IJK=20,83,40, XB= 0.503 , 0.563 , 0.00 , 0.252, 0.120 , 0.240/
&MESH ID= 'mesh3',IJK=34,83,21, XB= -0.1 , 0.002 , 0.00 , 0.252, -0.003 , -0.06/
&TIME T_END= 25/
&MISC RESTART=.TRUE./
#####définition de l'enceinte parallélépipédique #####
#####mur de gauche, hauteur de l'ouverture inférieure: 36mm#####
&OBST XB= -0.001, 0.000, 0.00, 0.250 ,0.00, 0.20 /
&HOLE XB= -0.001, 0.000, 0.00, 0.250 ,0.00, 0.036/
#### mur de droite, ouverture supérieure 12mm #####
&OBST XB= 0.500, 0.501, 0.00 , 0.250, 0.000, 0.2/
&HOLE XB= 0.500, 0.501, 0.00 , 0.250, 0.188, 0.2/
#####mur latéral#####
&OBST XB=0.0, 0.5, 0.25, 0.25,0.0,0.2/
##### plafond #####
&OBST XB=0.0, 0.5, 0.0, 0.25, 0.2, 0.2/
##### sol #####
&OBST XB=0.0, 0.5, 0.0, 0.25, 0.0, -0.003/
##### conditions aux limites #####
&VENT MB='XMAX', SURF_ID='OPEN'/
&VENT MB='XMIN', SURF_ID='OPEN'/
&VENT MB='YMAX', SURF_ID='OPEN'/
&VENT MB='ZMAX', SURF_ID='OPEN'/
&VENT MB='ZMIN', SURF_ID='OPEN'/
##### source de masse #####
&SPEC ID='HELIUM'/
&SURF ID='injection', VEL= -0.4, SPEC_ID(1)= 'HELIUM', MASS_FRACTION(1)= 0.2234,
COLOR= 'ORCHID'/
#####buse d'injection#####
&VENT XB= 0.235,0.265,0.0,0.25,0.0,0.0, SURF_ID= 'injection' /
#### output #####
&SLCF PBY=0.125, QUANTITY='DENSITY', SPEC_ID='HELIUM', VECTOR=.TRUE. /

```

```

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

##### capteurs #####

### capteurs ponctuels entrée ###

&DEVC XB=0.00,0.00,0.125,0.125,0.000,0.000, QUANTITY='U-VELOCITY', ID='U00',
STATISTICS='MEAN'/

&DEVC XB=0.00,0.00,0.125,0.125,0.003,0.003, QUANTITY='U-VELOCITY', ID='U03',
STATISTICS='MEAN'/

&DEVC XB=0.00,0.00,0.125,0.125,0.006,0.006, QUANTITY='U-VELOCITY', ID='U06',
STATISTICS='MEAN'/

&DEVC XB=0.00,0.00,0.125,0.125,0.009,0.009, QUANTITY='U-VELOCITY', ID='U09',
STATISTICS='MEAN'/

&DEVC XB=0.00,0.00,0.125,0.125,0.012,0.012, QUANTITY='U-VELOCITY', ID='U12',
STATISTICS='MEAN'/

&DEVC XB=0.00,0.00,0.125,0.125,0.015,0.015, QUANTITY='U-VELOCITY', ID='U15',
STATISTICS='MEAN'/

&DEVC XB=0.00,0.00,0.125,0.125,0.018,0.018, QUANTITY='U-VELOCITY', ID='U18',
STATISTICS='MEAN'/

&DEVC XB=0.00,0.00,0.125,0.125,0.021,0.021, QUANTITY='U-VELOCITY', ID='U21',
STATISTICS='MEAN'/

&DEVC XB=0.00,0.00,0.125,0.125,0.024,0.024, QUANTITY='U-VELOCITY', ID='U24',
STATISTICS='MEAN'/

&DEVC XB=0.00,0.00,0.125,0.125,0.027,0.027, QUANTITY='U-VELOCITY', ID='U27',
STATISTICS='MEAN'/

&DEVC XB=0.00,0.00,0.125,0.125,0.030,0.030, QUANTITY='U-VELOCITY', ID='U30',
STATISTICS='MEAN'/

&DEVC XB=0.00,0.00,0.125,0.125,0.033,0.033, QUANTITY='U-VELOCITY', ID='U33',
STATISTICS='MEAN'/

&DEVC XB=0.00,0.00,0.125,0.125,0.036,0.036, QUANTITY='U-VELOCITY', ID='U36',
STATISTICS='MEAN'/

&DEVC XB=0.00,0.00,0.125,0.125,0.000,0.000, QUANTITY='DENSITY', ID='U00',
STATISTICS='MEAN'/

&DEVC XB=0.00,0.00,0.125,0.125,0.003,0.003, QUANTITY='DENSITY', ID='U03',
STATISTICS='MEAN'/

&DEVC XB=0.00,0.00,0.125,0.125,0.006,0.006, QUANTITY='DENSITY', ID='U06',
STATISTICS='MEAN'/

&DEVC XB=0.00,0.00,0.125,0.125,0.009,0.009, QUANTITY='DENSITY', ID='U09',
STATISTICS='MEAN'/

&DEVC XB=0.00,0.00,0.125,0.125,0.012,0.012, QUANTITY='DENSITY', ID='U12',
STATISTICS='MEAN'/

&DEVC XB=0.00,0.00,0.125,0.125,0.015,0.015, QUANTITY='DENSITY', ID='U15',
STATISTICS='MEAN'/

&DEVC XB=0.00,0.00,0.125,0.125,0.018,0.018, QUANTITY='DENSITY', ID='U18',
STATISTICS='MEAN'/

```

```

&DEVC XB=0.00,0.00,0.125,0.125,0.021,0.021, QUANTITY='DENSITY', ID='U21',
STATISTICS='MEAN'/

&DEVC XB=0.00,0.00,0.125,0.125,0.024,0.024, QUANTITY='DENSITY', ID='U24',
STATISTICS='MEAN'/

&DEVC XB=0.00,0.00,0.125,0.125,0.027,0.027, QUANTITY='DENSITY', ID='U27',
STATISTICS='MEAN'/

&DEVC XB=0.00,0.00,0.125,0.125,0.030,0.030, QUANTITY='DENSITY', ID='U30',
STATISTICS='MEAN'/

&DEVC XB=0.00,0.00,0.125,0.125,0.033,0.033, QUANTITY='DENSITY', ID='U33',
STATISTICS='MEAN'/

&DEVC XB=0.00,0.00,0.125,0.125,0.036,0.036, QUANTITY='DENSITY', ID='U36',
STATISTICS='MEAN'/

#####capteurs ponctuels sortie#####

&DEVC XB= 0.50, 0.50, 0.125,0.125, 0.200, 0.200, QUANTITY='U-VELOCITY' , ID='U200',
STATISTICS='MEAN'/

&DEVC XB= 0.50, 0.50, 0.125,0.125, 0.197, 0.197, QUANTITY='U-VELOCITY' , ID='U197',
STATISTICS='MEAN'/

&DEVC XB= 0.50, 0.50, 0.125,0.125, 0.194, 0.194, QUANTITY='U-VELOCITY' , ID='U194',
STATISTICS='MEAN'/

&DEVC XB= 0.50, 0.50, 0.125,0.125, 0.191, 0.191, QUANTITY='U-VELOCITY' , ID='U191',
STATISTICS='MEAN'/

&DEVC XB= 0.50, 0.50, 0.125,0.125, 0.188, 0.188, QUANTITY='U-VELOCITY' , ID='U188',
STATISTICS='MEAN'/

&DEVC XB= 0.50, 0.50, 0.125,0.125, 0.200, 0.200, QUANTITY='DENSITY' , ID='U200',
STATISTICS='MEAN'/

&DEVC XB= 0.50, 0.50, 0.125,0.125, 0.197, 0.197, QUANTITY='DENSITY' , ID='U197',
STATISTICS='MEAN'/

&DEVC XB= 0.50, 0.50, 0.125,0.125, 0.194, 0.194, QUANTITY='DENSITY' , ID='U194',
STATISTICS='MEAN'/

&DEVC XB= 0.50, 0.50, 0.125,0.125, 0.191, 0.191, QUANTITY='DENSITY' , ID='U191',
STATISTICS='MEAN'/

&DEVC XB= 0.50, 0.50, 0.125,0.125, 0.188, 0.188, QUANTITY='DENSITY' , ID='U188',
STATISTICS='MEAN'/

##### capteurs buse #####

&DEVC XB=0.235,0.265,0.0,0.25,0.000,0.003, QUANTITY='DENSITY' , ID='DENS_INJ',
STATISTICS='MEAN'/

&DEVC XB=0.235,0.265,0.0,0.25,0.000,0.003, QUANTITY='VELOCITY' , ID='VEL_INJ',
STATISTICS='MEAN'/

&DEVC XB=0.235,0.265,0.0,0.25,0.000,0.003, QUANTITY='TEMPERATURE' , ID='TEMP_INJ',
STATISTICS='MEAN'/

&TAIL/

```