

P0009/  
/05A

République Algérienne démocratique et populaire  
Ministre de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique

**Ecole Nationale Polytechnique d'Alger**

**Département de Génie Mécanique**



## **Mémoire de fin d'études**

pour l'obtention du diplôme  
d'ingénieur en Génie Mécanique

### **THEME**

# **Modélisation expérimentale de la propagation des fumées d'incendie d'un local « source » vers un local « cible » ventilé mécaniquement**

Encadré par :

M. Ph. BOURNOT  
M. A. BOUHDIJAR  
M. B. BENKOUSSAS

Présenté par :

A. BOUADEM

Réalisé sous la direction de Mr Philippe BOURNOT, au Centre inter universitaire de Mécanique et de technologie Mécanique UNIMECA – Université de la Méditerranée – Aix-Marseille II, Marseille.

Promotion 2004 – 2005

E.N.P 10, Avenue Hassen-Badi, EL HARRACH, ALGER

## Remerciements

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

Je remercie monsieur A. Bouhdjar et monsieur B. Benkoussas, enseignants à l'E.N.P., pour m'avoir sélectionné pour ce stage, pour avoir cru en moi et pour leur soutien et leurs conseils.

Je tiens à exprimer ma gratitude envers Monsieur Philippe Bournot, Professeur à UNIMECA, qui a bien voulu m'accueillir dans son laboratoire et qui a assuré la direction scientifique de ce travail. Je le remercie pour son attention, ses précieux conseils, ainsi que la confiance qu'il m'a toujours témoigné, je veux qu'il trouve ici l'expression de ma gratitude et toute ma sympathie.

Je remercie particulièrement monsieur O. Vauquelin, pour son aide et son expérience, pour tous ses conseils opportuns et pour toute sa disponibilité tout au long de ce travail.

Je remercie encore monsieur Philippe Caminat, pour tout l'intérêt qu'il a porté à ce travail pour ses conseils utiles, sa patience et sa disponibilité lors des travaux pratiques d'instrumentation.

Je remercie les techniciens d'UNIMECA, Philippe Giraud et tous les autres pour la rapidité avec laquelle nous avons toujours pu avoir les pièces nécessaires à notre dispositif expérimental.

Je remercie également monsieur J. Stéphanini, de la société T.S.I. pour sa précieuse et indispensable aide sur les mesures optiques PIV et LDV.

Enfin, je remercie tous mes enseignants et tous ceux qui m'ont permis de faire avancer mon travail.

## Dédicace

A mon père que je remercie pour son éternel et infatigable soutien, toujours présent depuis ma naissance à ce jour.

A ma mère, ma grande amie qui m'a protégé, soutenu et encouragé à regarder l'avenir avec confiance.

A mes sœurs pour leur compassion et tendre affection.

A mes frères auxquels j'espère la même réussite sinon plus.

A toute ma famille et mes amis.

A tous mes enseignants du primaire, moyen, secondaire et supérieur.

A. BOUADEM

هذا العمل هو دراسة تجريبية لانتشار دخان النار من غرفة المصدر نحو غرفة مجاورة و مكيفة. أقيمت هذه الدراسة على نموذجين ذو مقياس مصغر لغرفة توجد في المعهد النووي. دراسة الجريان الديناميكي بين الغرفتين عمل على النموذج 20/1. أما دراسة حرارة الدخان و سرعة استهلاك الوقود عملت على النموذج 5/1. سمحت هذه الدراسة بمقارنة النتائج مع البرنامج المعلوماتي FDS. هذه الدراسات سمحت لنا بملاحظة، وصف و فهم حركة الدخان في المكان.

**الكلمات المفتاحية:** الدخان، خليط، النار، الحريق، التفاعل، الجريان، TPH، LDV، PIV.

## **Résumé**

Ce travail, est une étude expérimentale de la propagation des fumées d'incendie d'un local source vers un local cible ventilé mécaniquement. Les investigations ont été menées sur deux maquettes à l'échelle réduites d'un local d'IRSN. L'étude de l'écoulement aérodynamique dans les deux enceintes a été réalisée sur la maquette 1/20. L'étude de la température des fumées et la vitesse de perte de masse du combustible a été réalisée sur la maquette 1/5. Elles ont permis de comparer les résultats avec le code FDS. Elle a par la suite, permis de critiquer les résultats des calculs. Des simulations de propagation de fumées d'incendie ont été menées par l'injection de fumées froides de faible densité reproduisant les forces de flottabilité. Des simulations des températures des fumées d'incendie et la pertes de masse de combustible ont été menées par des fumées réelles. Ces simulations ont permis d'observer, de décrire et de comprendre le mouvement des fumées dans la structure.

**Mots clés :** fumées, panache, incendie, combustion, feu, écoulement, fumées froides, TPH, LDV, PIV.

## **Abstract**

This work is an experimental study of the propagation of the fume of fire of a room source towards a mechanically ventilated target room. The investigations were carried out on two reduced models on the scale of a room of IRSN. The study of the streamline flow in the two enclosures was carried out on the model 1/20. The study of the temperature of the fume and the speed of loss of mass of fuel were carried out on model 1/5. They made it possible to compare the results with code FDS. It thereafter, made it possible to criticize the results of calculations. Simulations of propagation of fume of fire were carried out by the injection of cold fume of low density reproducing the forces of buoyancy. Simulations of the temperatures of the fume of fire and the losses of fuel mass were carried out by real fume. These simulations made it possible to observe, describe and include/understand the movement of the fume in the structure.

**Key words:** fume, plume, fire, combustion, set fire to, flow, cold fume, TPH, LDV, PIV.

**Table des matières**

**1. Problématique**.....5

**2. Introduction**.....7

**3. Description du dispositif opérationnel**.....8

**4. Incendie et feu de nappe**.....10

**4.1. Incendie**.....10

        4.1.1. Feu et combustion.....10

        4.1.2. Evolution de l'incendie.....10

        4.1.3. Caractéristiques d'un feu confiné.....11

        4.1.4. Paramètres de l'incendie.....12

            4.1.4.1. Pouvoir calorifique.....12

            4.1.4.2. Potentiel calorifique.....12

            4.1.4.3. Débit calorifique.....12

        4.1.5. Feux en espace confiné.....12

        4.1.6. Dégagement de fumées.....13

**4.2. Feu de nappe**.....15

        4.2.1. Définition.....15

        4.2.2. Rappel succinct sur le phénomène.....16

        4.2.3. Processus de combustion pour un feu de nappe.....16

            4.2.3.1. Combustibles liquides.....16

            4.2.3.2. Emission de vapeurs.....16

            4.2.3.3. Domaine d'inflammabilité.....17

            4.2.3.4. Energie d'inflammation.....17

            4.2.3.5. Conditions d'inflammation d'un liquide combustible.....17

        4.2.4. Flamme.....18

        4.2.5. Effets d'un incendie.....19

            4.2.5.1. Convection.....19

            4.2.5.2. Conduction.....20

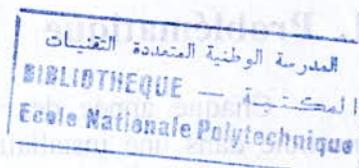
            4.2.5.3. Rayonnement.....20

**5. Similitude**.....21

<b>5.1. Similitude géométrique</b>	21
<b>5.2. Similitude cinématique</b>	21
<b>5.3. Similitude dynamique</b>	22
5.3.1. Identité des échelles des forces d'inertie	23
5.3.2. Identité des échelles des forces de pression et des forces d'inertie	23
5.3.3. Identité des échelles des forces de gravité et des forces d'inertie	24
5.3.4. Identité des échelles des forces de viscosité et des forces d'inertie	24
<b>6. Les instruments de mesure</b>	26
<b>6.1. La vélocimétrie Laser à effet doppler (LDV)</b>	26
6.1.1. Introduction	26
6.1.2. Fréquence Doppler	26
6.1.3. Franges d'interférence	27
6.1.4. Caractéristiques du volume de mesure	27
6.1.5. L'ambiguïté de signe	30
6.1.6. La sécurité Laser	31
6.1.7. Ensemencement	31
6.1.8. Conclusion	32
<b>6.2. La vélocimétrie par image de particule PIV</b>	32
<b>6.3. Thermocouples</b>	35
<b>6.4. La sonde de concentration</b>	36
<b>7. Maquette thermique (feu)</b>	38
<b>7.1. Combustion de TPH dans l'air ambiant</b>	38
<b>7.2. Combustion de TPH dans une enceinte confinée (avec toit ou non)</b>	41
<b>7.3. Combustion de TPH dans une enceinte fermée et ventilée</b>	43
7.3.1. Débit d'entrée inférieur au débit de sortie	45
7.3.2. Débit d'entrée égale au débit de sortie	47
7.3.3. Débit d'entrée supérieur au débit de sortie	48
<b>7.4. Le feu dans une enceinte fermée et ventilée avec déviation de l'air</b>	50
<b>7.5. Conclusion</b>	54
<b>8. Maquette adiabatique</b>	56
<b>8.1. Description de la maquette</b>	56
<b>8.2. Visualisation par la tomographie</b>	57
<b>8.3. Mesure PIV</b>	59

8.3.1. Injection d'hélium pur.....	60
8.3.2. Injection un mélange air-hélium.....	67
<b>8.4. Mesure LDV.....</b>	<b>69</b>
8.4.1. Injection d'hélium pur.....	69
8.4.2. Injection un mélange air-hélium.....	70
<b>8.5. Mesure de la concentration d'hélium.....</b>	<b>71</b>
<b>9. Simulation des expériences avec le code FDS.....</b>	<b>74</b>
<b>9.1. Introduction.....</b>	<b>74</b>
<b>9.2. Le Code Fire Dynamics Simulator (FDS).....</b>	<b>74</b>
<b>9.3. Principe et objectifs du modèle.....</b>	<b>74</b>
<b>9.4. Simulation de la maquette thermique avec FDS.....</b>	<b>74</b>
9.4.1. Objectifs des calculs.....	74
9.4.2. Calcul de la température dans le local avec FDS.....	75
9.4.2.1. Géométrie et maillage.....	75
9.4.2.2. Définition des conditions aux limites.....	75
9.4.2.3. Résultats de calculs.....	75
9.4.3. Conclusion.....	78
<b>9.5. Simulation de la Maquette adiabatique avec FDS.....</b>	<b>78</b>
9.5.1. Objectifs des calculs.....	79
9.5.2. Calcul de la vitesse à la sortie de la porte avec FDS.....	79
9.5.2.1. Géométrie et maillage.....	79
9.5.2.2. Définition des conditions aux limites.....	79
9.5.2.3. Résultats de calculs.....	80
9.5.3. Conclusion.....	85
<b>10. Conclusions.....</b>	<b>87</b>
<b>11. Perspectives.....</b>	<b>89</b>
<b>Bibliographie.....</b>	<b>90</b>
<b>Table des figures.....</b>	<b>92</b>
<b>Annexes.....</b>	<b>95</b>

## Symboles



$f$  : fréquence [Hz]

$F_d$  : distance focale [mm]

$Fr$  : nombre de Froude

$g$  : accélération de pesanteur [ $m/s^2$ ]

$i$  : l'interfrange [ $\mu m$ ]

$k_d$  : échelle des distances ou échelle géométrique

$k_v$  : échelle des vitesses ou échelle cinématique

$k_t$  : échelle des temps ou échelle temporelle

$k_p$  : échelle des pressions ou échelle dynamique

$N_{FR}$  : nombre de franges

$m$  : masse [g]

$p$  : pression [Pa]

$q_v$  : débit volumique [ $m^3/h$ ]

$q_{v-ext}$  : débit d'extraction des fumées

$q_{v-inj}$  : débit d'injection d'air

$Q$  : puissance du feu [KW]

$R$  : constant des gaz parfaits

$S$  : section [ $m^2$ ]

$t$  : temps [s]

$T$  : température [K]

$TR_m$  : taux de renouvellement échelle maquette [ $h^{-1}$ ]

$TR_p$  : taux de renouvellement échelle prototype [ $h^{-1}$ ]

$V$  : vitesse [m/s]

$u, v, w$  : les composantes de la vitesse

### symboles grecs :

$\alpha$  : facteur de réduction d'échelle

$\rho$  : masse volumique [ $kg/m^3$ ]

$\rho_{air}$  : densité de l'air à 20°C

$\rho_{hélium}$  : densité d'hélium à 20 °C

$\rho_{mélange}$  : densité du mélange air-hélium

$\lambda$  : longueur d'onde [nm]

## 1. Problématique

Chaque année des incendies surviennent dans des installations industrielles. Un incendie dans une installation nucléaire (réacteur, laboratoire, usine) peut conduire à une dégradation du niveau de sûreté de l'installation et menacer le confinement des matières radioactives. C'est une voie possible de contamination de l'environnement.

Dans une installation nucléaire, le feu peut se déclencher dans un local fermé et ventilé. Ce local peut lui-même être constitué de pièces reliées entre elles et à l'atmosphère extérieure par un réseau de ventilation, ou tout simplement par une ventilation naturelle (cas de portes de communication par exemple).

L'ampleur des conséquences d'un incendie dans une installation nucléaire dépend de nombreux paramètres : nature des combustibles, puissance du foyer, conception des locaux, conduite de la ventilation, nature et quantité des matières radioactives, présence d'équipements importants pour la sûreté...

Les combustibles présents dans une installation nucléaire sont très variés (câbles, armoires électriques, huiles, solvants, etc.). Dans notre cas c'est le solvant Tétra-Propylène Hydrogéné (TPH) de formule chimique  $C_{12}H_{26}$  (voir annexe 1).

L'incendie est un phénomène complexe qui engendre dans le local où il a pris naissance des élévations de température, des variations de pression ainsi que la production de fumées et d'aérosols de combustion qui peuvent jouer le rôle d'agresseurs secondaires, y compris en dehors du local en feu, du fait de leur caractère corrosif.

De plus, si l'incendie a pris naissance ou se propage dans un local où se trouvent des matières radioactives, il peut entraîner la dispersion d'une fraction de ces matières radioactives.

Les dommages causés montrent qu'une évaluation particulièrement précise de la protection contre l'incendie des installations nucléaires doit être réalisée, en raison des rejets radioactifs que les incendies pourraient entraîner, et corrélativement des recherches doivent être poursuivies pour mieux apprécier les risques.

Les recherches menées sur les feux visent à améliorer la compréhension des phénomènes physico-chimiques mis en jeu lors d'un incendie et la détermination des conséquences d'un feu sur les équipements et les installations par une approche expérimentale accompagnée du développement de modélisations (codes de calcul).

Les outils de calcul mis au point peuvent être utilisés afin:

- D'appréhender, pour un scénario donné, les marges disponibles avant d'atteindre la rupture ou le dysfonctionnement des équipements ;
- De déterminer la meilleure manière de conduire la ventilation en cas d'incendie, compte tenu des compromis éventuellement nécessaires entre le maintien du confinement dynamique (permettant d'assurer la maîtrise des rejets de matières radioactives), la maîtrise de l'incendie et le risque de surpression (voire d'explosion) de l'installation.

L'amélioration des connaissances sur la phénoménologie des incendies et sur leurs conséquences doit permettre de mieux étayer les évaluations de sûreté et d'adapter, le cas échéant, les exigences de sûreté.

La plupart des résultats de ces recherches pourraient bénéficier à d'autres secteurs de l'industrie puisque l'incendie n'est pas en soi un phénomène lié à l'activité nucléaire.

L'évaluation des risques technologiques liés aux incendies d'installations industrielles exige une connaissance approfondie des phénomènes de transfert de chaleur et de masse entre une flamme et les surfaces et les cibles extérieur. La naissance, la vitesse de propagation, la puissance de combustion du combustible lors de la mise en régime d'un feu, dans un bac de TPH à l'air libre ou confinés dans un local, sont les différentes étapes à étudier.

## 2. Introduction

S'inscrivant dans le cadre du programme de recherche PRISME-SOURCE de l'IRSN : (Institut de Radioprotection et de Sûreté Nucléaire) de Cadarache, notre projet de fin d'étude réalisé à l'institut UNIMECA a pour objet de modéliser expérimentalement et numériquement la propagation des fumées d'incendie d'un local « Source » vers un local « Cible » ventilé. Le programme PRISME a pour objectif d'une part, de comprendre les mécanismes de propagation d'un incendie pour des scénarios multi-locaux élémentaires, et d'autre part, de décrire et de quantifier les mécanismes de propagation des fumées et de la chaleur d'un local source vers un ou des locaux adjacents.

Ce travail est une approche principalement expérimentale. L'objectif est de visualiser les écoulements induits dans le local feu et le local cible (re-circulation, phénomènes de stratification, etc.) et mesurer les champs de vitesse, de température, de perte de masse et de concentration dans ces locaux à partir de deux types de dispositifs expérimentaux (échelle réduite 1/5 et 1/20).

Les essais à échelle réduite se font sur deux maquettes différentes, la maquette thermique 1/5 et la maquette isotherme 1/20. Pour représenter un phénomène identique à ce que l'on observerait dans la réalité, il faut s'assurer de la conservation de grandeurs adimensionnelles de façon à garder le même système d'équations pour les essais en grandeur réelle et ceux à échelles réduites.

Le dispositif à échelle réduite 1/20 s'appuie sur un modèle dit « densimétrique » utilisant un mélange air-hélium pour reproduire la dualité entre les forces d'inertie et les forces de flottabilité et utilise des techniques de mesures fines de types PIV (Particule Image Velocimetry) et LDV (Laser Doppler Velocimetry).

Le dispositif à échelle 1/5 permet d'étudier les feux dans l'air ambiant ou confiné. On détermine les profils de températures et de vitesses sur la flamme, et la vitesse de perte de masse du combustible TPH selon la puissance du feu et le taux de renouvellement.

L'utilisation de code FDS dans la simulation des expériences avait pour but de se familiariser avec ce nouveau code de calcul en essayant de reproduire les résultats expérimentaux trouvés durant les essais réalisés sur l'échelle réduite.

Le rapport de cette étude se compose des éléments suivants:

- Présentation et description du dispositif réel ;
- Feu de nappe et incendie ;
- Conditions de similitude ;
- Mesure de vitesse par les méthodes optiques ;
- Etude du comportement du feu dans le local source ;
- Etude de la propagation des fumées d'incendie d'un local source vers un local cible ventilé ;
- Simulation numérique avec le code FDS ;
- Conclusions ;
- Perspectives.

### 3. Description du dispositif opérationnel

Le dispositif est constitué de deux locaux semblables de forme parallélépipédique: le local SOURCE (dans lequel l'incendie se déclare) et le local CIBLE (Figure 3.1). Ces deux locaux peuvent échanger masse et /ou chaleur par une porte de communication ouverte entre les deux locaux (mode PORTE) ou par une gaine de ventilation (mode GAINÉ) débouchant en partie haute dans le local CIBLE après que l'air qui y circule ait été réchauffé dans le local SOURCE.

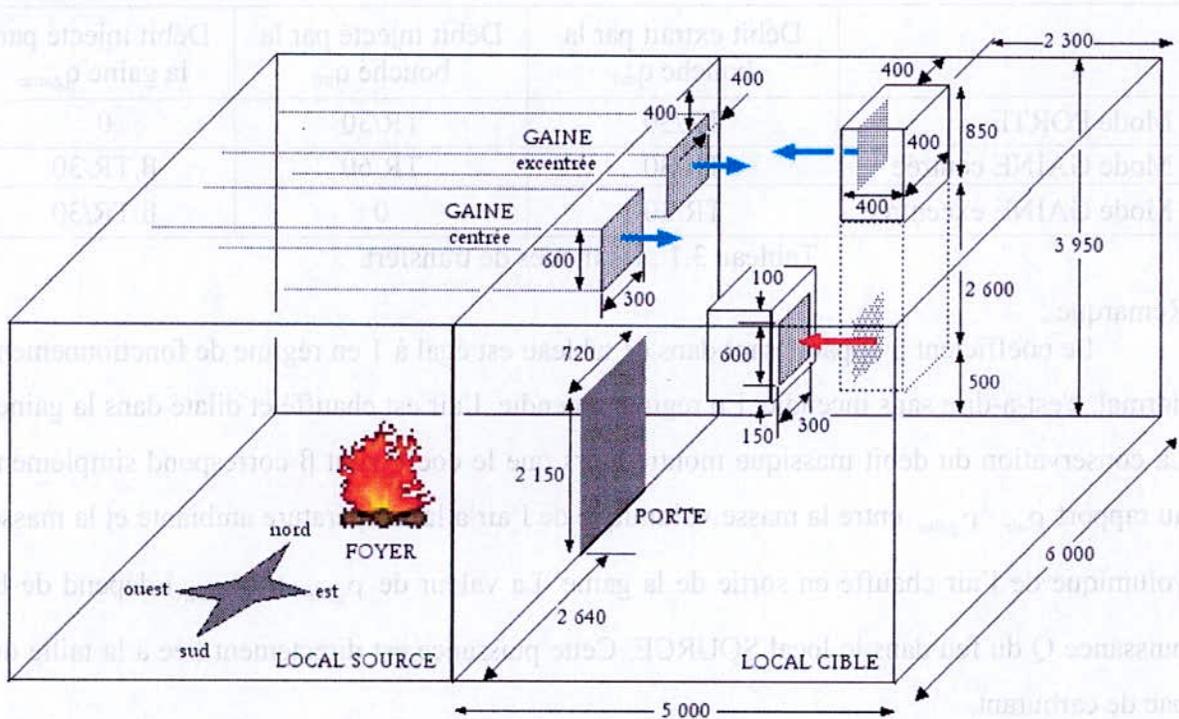


Figure 3.1 : Vue en perspective du dispositif opérationnel à Cadarache

Quelque soit le mode de transfert (PORTE ou GAINÉ) et qu'il y ait présence ou non d'un feu dans le local SOURCE, le local CIBLE est ventilé en continu par une extraction et une injection équivalente de façon à assurer un renouvellement de l'air. L'extraction est réalisée par une bouche située au sud en partie haute alors que l'injection peut être assurée par une gaine (centrée ou excentrée sur la paroi ouest du local CIBLE) et/ou par une bouche située au nord en partie haute ou en partie basse. On définit le taux de renouvellement TR du local (exprimé en  $h^{-1}$ ) par la relation suivante :

$$TR = 3600 \frac{\text{débit}_{\text{extrait}}}{\text{volume}_{\text{du}_{\text{local}}}} = 3600 \frac{\text{débit}_{\text{injecté}}}{\text{volume}_{\text{du}_{\text{local}}}} \quad 3.1$$

Le volume du local étant de  $120 \text{ m}^3$  environ, les débits volumiques d'extraction et d'injection dans le local seront donc donnés, en fonction du taux de renouvellement TR par :

$$q_{\text{ext}} = q_{\text{inj}} = \frac{TR}{30} \quad 3.2$$

La section des gaines et des bouches sont identiques, rectangulaires et de surface  $0,3 \times 0,6 = 0,18 \text{ m}^2$  avec un taux d'encombrement (grillage) estimé à 20%, soit donc une section effective de  $0,144 \text{ m}^2$ . Les gaines débouchent directement sur la paroi ouest du local CIBLE alors que les bouches sont découpées sur des colonnes dont les dimensions et la position sont précisées sur la **figure 3.1**.

Pour les différents modes de transfert, les régimes de ventilation envisagés sont les suivants:

	Débit extrait par la bouche $q_{\text{ext}}$	Débit injecté par la bouche $q_{\text{inj}}$	Débit injecté par la gaine $q_{\text{gaine}}$
Mode PORTE	TR/30	TR/30	0
Mode GAINÉ centrée	TR/30	TR/60	$\beta \cdot \text{TR}/30$
Mode GAINÉ excentrée	TR/30	0	$\beta \cdot \text{TR}/30$

Tableau 3.1 : les modes de transfert.

Remarque :

Le coefficient  $\beta$  apparaissant dans ce tableau est égal à 1 en régime de fonctionnement normal, c'est-à-dire sans incendie. En régime incendie, l'air est chauffé et dilaté dans la gaine. La conservation du débit massique montre alors que le coefficient  $\beta$  correspond simplement au rapport  $\rho_{\text{air}} / \rho_{\text{gaine}}$  entre la masse volumique de l'air à la température ambiante et la masse volumique de l'air chauffé en sortie de la gaine. La valeur de  $\rho_{\text{gaine}}$  (ou  $T_{\text{gaine}}$ ) dépend de la puissance  $Q$  du feu dans le local SOURCE. Cette puissance est directement liée à la taille du bac de carburant.

En récapitulatif, les principaux paramètres du problème sont :

- Le mode de transfert : P (PORTE), GC (GAINÉ centrée) et GE (GAINÉ excentrée) ;
- La position de la bouche d'injection : haute ( ) ou basse (\*) ;
- Le taux de renouvellement TR du local CIBLE (compris entre 1 et 10) ;
- La puissance du feu  $Q$  (comprise entre 0 et 500 KW).

Les configurations d'essais seront référencées par le mode de transfert (étoilé ou non suivant la position de la bouche d'injection), la valeur du taux de renouvellement et la valeur de la puissance du feu (Kw). Par exemple, en mode porte avec une bouche d'injection en partie basse, un taux de renouvellement de 3 et une puissance de 10 KW, on notera : P\*/TR3/Q10.

Les simulations expérimentales seront réalisées sur des maquettes à l'échelle réduites (1/20 et 1/5). Les fumées produites par l'incendie ou les gaz chauds issus de la gaine seront représentés par une injection continue d'air et d'hélium dont la masse volumique et le débit seront ajustés en fonction de la puissance à reproduire.

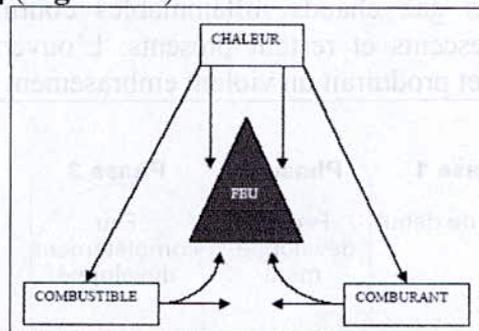
# **Partie théorique**

## 4. Incendie et feu de nappe

### 4.1. Incendie

#### 4.1.1. Feu et combustion

Un feu est un phénomène physico-chimique. Il est basé sur la réaction d'un combustible avec un comburant. Dans la grande majorité des cas, le comburant est de l'oxygène présent à 21% dans l'air. Pour que la réaction soit possible, une quantité d'énergie, appelée énergie d'activation doit être apportée. Très souvent le phénomène de combustion est illustré par le triangle du feu [1] (**Figure 4.1**).



**Figure 4.1** : Triangle du feu (Source : INERIS-DRA-25430) [1]

Composantes du triangle du feu [2] :

- **Combustible** : corps qui a la particularité de brûler, ce sont généralement des composés du carbone et de l'hydrogène.
- **Comburant** : corps simple qui, mis en présence d'un combustible, permet puis entretient la combustion. Le plus répandu est l'oxygène.
- **Source d'énergie** : quantité de chaleur nécessaire pour démarrer la combustion.

La maîtrise du risque d'incendie nécessite l'intégration de tous ses paramètres dans la conception des installations et des établissements, dans la construction et l'aménagement des locaux et dans leur exploitation. L'incendie reste un risque majeur pour l'homme et pour les activités économiques. Diminuer ce risque nécessite d'agir dans deux domaines d'action :

- la prévention, ensemble d'actions ayant pour objectif la diminution de la probabilité de naissance d'un incendie ;
- la protection, ensemble d'actions ayant pour objectif la diminution des conséquences d'un incendie.

Pour que les actions entreprises soient efficaces, il faut connaître les origines et les causes des incendies, mais aussi les conséquences réelles pour les hommes, pour les biens et pour la société en général.

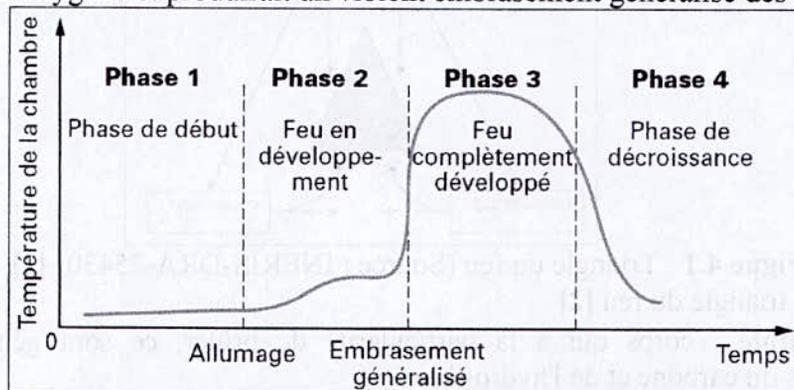
#### 4.1.2. Evolution de l'incendie

D'une manière générale, un feu passe par les phases suivantes : allumage suivi soit d'une combustion lente ou directement d'une combustion vive, émission de flammes, développement du foyer d'incendie, embrasement et extinction ou épuisement du combustible. Le passage par ces états plus ou moins successifs est lié à la quantité et au type de combustible ainsi qu'à l'apport d'oxygène [3].

Il est généralement admis qu'un feu suit trois phases [4] (**Figure 4.2**) :

- a) Feu couvant ou naissant : l'ignition est amorcée par une source de chaleur, probablement un dysfonctionnement électrique provoquant une surchauffe d'un circuit. Il peut se produire un dégagement important de fumée sans émission de flammes. Cette phase peut durer quelques minutes, voire plusieurs heures.

- b) Développement et propagation de l'incendie : l'apparition de flammes entraîne un dégagement important de chaleur, une grande consommation d'oxygène et génère de forts courants de convection. L'augmentation de la température et par conséquent l'expansion volumique des fluides et l'augmentation de la pression en milieu confiné peuvent être à l'origine de phénomènes explosifs. Notons qu'une fois le feu déclaré, il sera attisé par la ventilation. Il serait donc judicieux de prévoir l'extinction automatique des ventilateurs dès la détection de la fumée afin de ne pas accélérer sa propagation. Ceci, à condition que l'arrêt de la fonction de refroidissement qu'ils assument, ne produise pas d'avantage de dommages.
- c) La troisième phase commence lorsque le feu a consommé tout l'oxygène, la chaleur diminue mais des gaz chauds inflammables continuent à être dégagés par les matériaux incandescents et restent présents. L'ouverture du système fournirait un apport d'oxygène et produirait un violent embrasement généralisé des gaz (Backdraft).



**Figure 4.2** : Evolution de l'incendie [source Techniques de l'Ingénieur] [4].

Nous nous intéresserons dans cette étude uniquement à la deuxième phase.

La sévérité du feu et la durée de ces phases dépendent de plusieurs paramètres :

- quantité et répartition des matériaux combustibles (charge incendie) ;
- vitesse de combustion de ces matériaux ;
- conditions de ventilation ;
- géométrie du compartiment ;
- propriétés physiques des parois du compartiment ;
- Confinement de l'environnement et disponibilité de l'oxydant.

Remarque :

L'échauffement ou l'inflammation d'un élément va émettre vers les éléments voisins un rayonnement qui sera susceptible de les enflammer à leur tour.

#### 4.1.3. Caractéristiques d'un feu confiné

Un feu confiné présente les caractéristiques suivantes :

- Le confinement réduit la quantité d'oxydant disponible à l'intérieur de l'enceinte et limite ainsi l'ampleur d'un éventuel incendie. Lorsque l'oxygène présent dans la l'unité tend à diminuer, la réaction de combustion ralentit fortement jusqu'à extinction du feu. Cependant la pyrolyse des matériaux continue sous l'effet de la chaleur produite par l'incendie [5]. Une combustion lente peut également se poursuivre. Les fumées sont alors denses et riches en monoxyde de carbone.
- Les gaz libérés par la combustion sont emprisonnés dans le volume clos, à la différence des feux en plein air où ils se dissipent. Du fait de la quantité limitée d'oxygène, beaucoup de ces gaz sont incomplètement oxydés, donc combustibles, donc potentiellement dangereux.

- La chaleur s'accumule dans le volume ce qui accélère la combustion et contribue à dégrader les matériaux inflammables présents dans l'enceinte par pyrolyse (ou distillation).
- Une Surpression dans l'enceinte, causée par la dilatation des gaz chauds.

#### 4.1.4. Paramètres de l'incendie

Le principal effet de l'incendie est évidemment de dégager de la chaleur ; la quantité de chaleur dégagée est fonction de trois paramètres [2]:

- le pouvoir calorifique ;
- le potentiel calorifique ;
- le débit calorifique.

##### 4.1.4.1. Pouvoir calorifique

Le pouvoir calorifique d'un combustible est la quantité de chaleur dégagée par la combustion complète de 1 kg de ce combustible s'il est solide ou liquide, de 1 m<sup>3</sup> s'il est gazeux.

##### 4.1.4.2. Potentiel calorifique

Le potentiel calorifique (ou charge calorifique) d'un local est la quantité de chaleur totale susceptible de se dégager par la combustion de l'ensemble des éléments combustibles se trouvant dans ce local, ramenée à l'unité de surface.

Le potentiel calorifique s'exprime donc en MJ/m<sup>2</sup>. On ramène parfois cette mesure à l'équivalent de la quantité de chaleur dégagée par 1 kg de bois et on exprime alors le potentiel calorifique en kg de bois/m<sup>2</sup>.

##### 4.1.4.3. Débit calorifique

C'est la quantité de calories produite par unité de temps par la quantité de masse d'une matière combustible. Le débit calorifique est l'élément essentiel caractérisant l'élévation de température.

Il dépend de différents facteurs qui permettent d'analyser le risque d'incendie :

- L'alimentation en comburant du combustible (ventilation des locaux) ;
- L'état de division des matériaux combustibles ;
- Le mode de rangement des combustibles.

#### 4.1.5. Feux en espace confiné

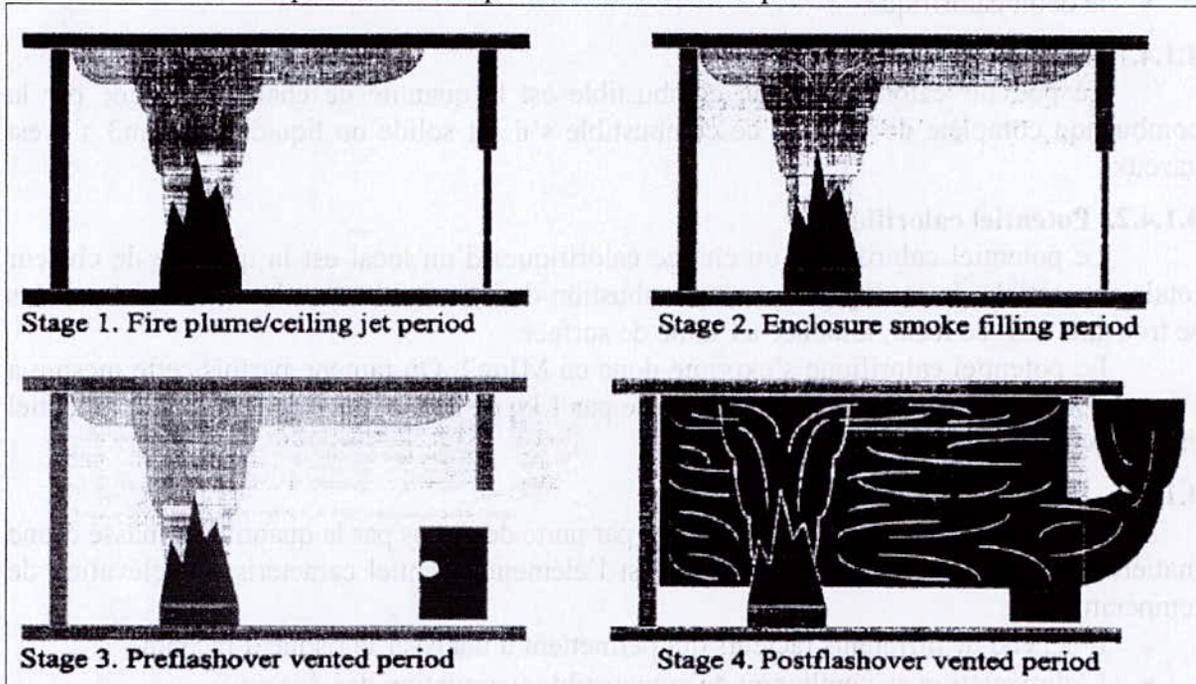
La complexité de l'ensemble de ces phénomènes est nettement accentuée lorsque l'on considère un feu en espace clos car un grand nombre d'objets et d'interactions doivent être pris en compte pour étudier les transferts de matière et les transferts thermiques. La difficulté vient du fait qu'en espace clos, la quantité d'air et plus spécifiquement la quantité d'oxygène disponible est un paramètre fondamental qui va gouverner le développement ou non du feu. Ainsi, selon la ventilation, la combustion peut être ralentie voire s'arrêter et on parle alors de feux sous ventilé.

Ces feux peuvent être décomposés en 4 étapes [1] dans le temps (**Figure 4.3**) :

- **Etape 1** : Le feu commence à se développer. Lors de cette étape, le panache constitué par les gaz chauds issus de la combustion montent au plafond sous l'effet des forces d'Archimède. De l'air frais est entraîné dans cette montée et attise le foyer. L'entraînement d'air dans le panache augmente le volume de fumées. Dès que ces gaz ont atteint le plafond, ils s'étalent radialement formant ainsi une mince couche appelée le jet de plafond.
- **Etape 2** : La fumée constituée de particules fines commence à descendre du plafond sous l'effet de la gravité car sa température a diminué. Elle occupe peu à peu la pièce. Si

la pièce n'est pas bien ventilée la température dans l'enceinte peut être très importante. De plus, le manque d'oxygène rend la combustion incomplète et la quantité de gaz imbrûlés importante. L'atmosphère peut devenir alors explosive.

- **Etape 3** : Ces fumées s'étendent à d'autres pièces par l'intermédiaire des minces ouvertures. Si les portes sont fermées, la combustion peut cesser et la température lentement diminuer. Cependant, même si la réaction de combustion est arrêtée, un apport d'oxygène peut enflammer les gaz imbrûlés car la température est suffisamment élevée. Si par exemple une porte s'ouvre, alors il y a un phénomène de flashover et l'ensemble de ces gaz dispersés dans toute la pièce réagit fortement et l'incendie se généralise.
- **Etape 4** : Le feu est complètement généralisé à toute la pièce grâce au contact de l'air frais. On atteint le pic de chaleur qui va diminuer très rapidement.



**Figure 4.3** : étapes d'un feu en espace confiné (Source INERIS-DRA-25430) [1]

Le flashover est une étape de transition rapide entre la croissance et le plein développement du feu, ce qui provoque un incendie généralisé.

Un phénomène apparenté est le backdraft ou retour de flamme qui concerne les milieux très confinés. Dans ce cas, le contact des imbrûlés contenus dans une pièce avec de l'oxygène par l'ouverture brutale d'une ventilation provoque une explosion.

Le flashover comme le backdraft sont des phénomènes qui sont très redoutés par les pompiers car ils sont à l'origine de nombreux accidents mortels.

#### 4.1.6. Dégagement de fumées

En plus des effets thermiques ou lumineux induits par la flamme, les réactions de combustion s'accompagnent généralement d'émissions de fumées. Ces dernières contiennent en particulier des suies, particules produites en quantité plus ou moins importante selon les produits en feu et les caractéristiques de la combustion,

La dispersion de ces fumées représente une source de danger potentielle pour l'environnement du site de par [6] :

- La toxicité des produits de combustion ;
  - La gêne visuelle occasionnée, sur les voies de communication à proximité.
- Quelque soit le type d'incendie, on peut dire que les fumées sont caractérisées par :
- une opacité ;

- une température élevée ;
- une densité inférieure à celle de l'air ;

La fumée produite au cours d'un incendie est une combinaison des trois états de la matière : l'état solide (particules solides imbrûlées riches en carbone), l'état gazeux (gaz de combustion, hydrocarbures, etc.) et l'état liquide en suspension dans la phase gazeuse (aérosols, condensats divers, vapeur d'eau, etc.). La taille des particules de fumée peut varier entre 0,01 et 50  $\mu$ . La couleur résultante nous renseigne sur la composition : fumée blanche révélatrice d'aérosols et de vapeur d'eau, fumée grise pour les mélanges d'aérosols et de particules solides, enfin fumée noire pour les grosses particules solides. Le débit des fumées dépend de l'étendue du feu, de la température et de la hauteur des flammes, et de la nature du combustible. La vitesse horizontale du front de fumées est de l'ordre de 0,20 m/s à 1 m/s. Les fumées ont tendance à occuper le maximum de volume et à créer une légère surpression dans le local incendié.

Dans le cas d'un combustible carboné, les principales espèces constituant le panache sont [7] :

- Dioxyde de carbone ( $\text{CO}_2$ ) ;
- Monoxyde de carbone (CO). Sa formation est particulièrement importante dans les feux couverts, par manque d'oxygène ;
- Particules de carbone (C) sous forme de suies (aérosols particules de 0,001 à 2 $\mu\text{m}$  et des morceaux de dimension supérieure à 10 $\mu\text{m}$ ) ;
- Vapeur d'eau ( $\text{H}_2\text{O}$ ) ;
- Hydrocarbures... ;
- HCl : gaz chlorhydrique produit par la combustion des PVC (polychlorures de vinyle), des matériaux ignifugés ;
- HCN : gaz cyanhydrique produit par la combustion des matériaux azotés (polyamide, butadiène, polyuréthane, etc.). Émis à partir de 250°C ;
- NOx : divers gaz formés par la combustion des composés azotés.

La proportion des différentes espèces dépend fortement de la richesse de la combustion, comme le montre la Figure 4.4.

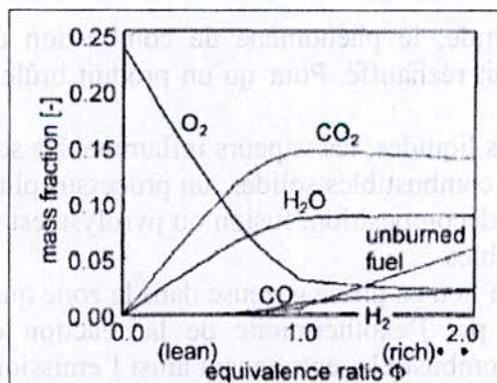


Figure 4.4 : Produits de la combustion de Propane en fonction de la richesse. [Source NISTIR 6588]

Les fumées sont aussi un facteur important de propagation de l'incendie en raison de leur température qui favorise la pyrolyse et l'inflammation des matériaux combustibles.

Certains matériaux produisent des fumées plus denses lorsqu'ils se consomment d'un feu couvant que lorsque le feu est pleinement développé avec émission de flamme. Les matières plastiques notamment, fondent sous l'effet de la chaleur et produisent de la fumée par pyrolyse (Le polypropylène, qui est une variété de plastiques à température de fusion est

de 160°C). Le dysfonctionnement d'un circuit électrique entraînera donc la surchauffe des matières plastiques, leur fonte et l'émission de vapeurs.

## 4.2. Feu de nappe

### 4.2.1. Définition

Le terme « feu de nappe », ou « feu de flaque », décrit un incendie résultant de la combustion d'une nappe de combustible liquide. Ce phénomène implique principalement la surface de la nappe en contact avec l'air.

Les dimensions et la géométrie de la nappe peuvent être tout à fait variables. Il convient ainsi de distinguer [6] :

- Les feux de réservoir : le feu est alors contenu dans une enceinte dont la surface est déterminée par les dimensions du réservoir,
- Les feux de cuvette (de rétention) : l'extension de la nappe peut alors être limitée par une cuvette de rétention dont le dimensionnement est imposé notamment par les exigences réglementaires applicables au stockage,
- Les feux de flaque libre, en l'absence de moyens physiques prévus pour limiter l'extension de la nappe ou lorsque la cuvette de rétention n'est pas complètement envahie ; l'extension de la nappe est alors principalement fonction des caractéristiques du terrain, des conditions météorologiques et des conditions de rejet du combustible.

La formation d'une nappe au sol peut être observée suite à l'épandage d'une substance liquide ou à la fusion de corps solides susceptibles de se liquéfier sous l'effet de la chaleur (ex. certains plastiques, bitumes..).

De plus, le domaine d'application défini ci-dessus peut être étendu, dans une certaine mesure, aux liquides ou aux solides fusibles stockés à l'intérieur de bâtiments, tels que des entrepôts par exemple. Dans une telle configuration, le comportement de la flamme peut être significativement modifié par la présence de structures matérielles. Par ailleurs, l'apport d'oxygène, indispensable à la combustion, peut être limité en milieu confiné.

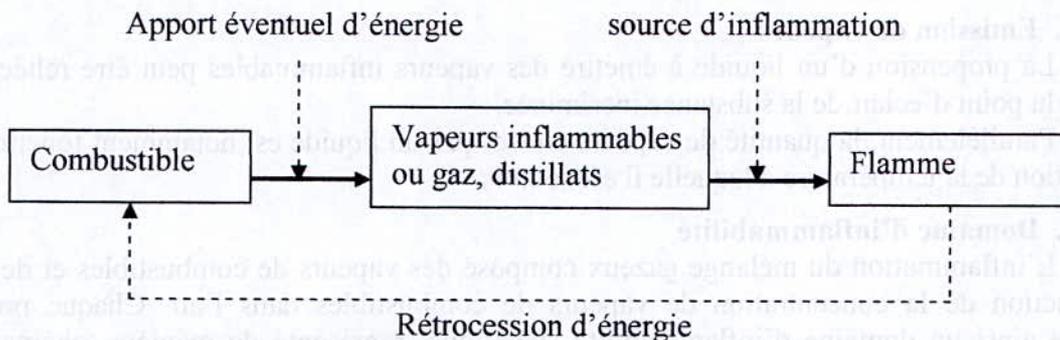
### 4.2.2. Rappel succinct sur le phénomène

D'une manière générale, le phénomène de combustion d'un produit intéresse les vapeurs émises par le produit réchauffé. Pour qu'un produit brûle, il faut donc qu'il émette des vapeurs inflammables.

Pour les combustibles liquides, les vapeurs inflammables sont émises par évaporation de la phase liquide. Pour les combustibles solides, un processus plus complexe mettant en jeu notamment des réactions de décomposition, fusion ou pyrolyse est indispensable à l'émission de gaz ou distillats inflammables.

La combustion a ainsi lieu en phase gazeuse dans la zone qualifiée de « flamme ». Une partie de l'énergie libérée par l'exothermicité de la réaction de combustion est cédée (rétrocession d'énergie) au combustible, entretenant ainsi l'émission de gaz inflammables. Le feu de nappe est donc un phénomène de combustion auto-entretenu [6].

Ce mécanisme est représenté de manière très schématique dans la **Figure 4.5** ci après.



**Figure 4.5 :** Schéma du mécanisme de combustion auto-entretenue

Un feu de nappe se caractérise le plus souvent par l'émission de lumière, de chaleur et de fumées.

Ce type de sinistre peut représenter une agression pour l'homme, les équipements et l'environnement à plusieurs niveaux :

- **Flammes, chaleur** : les flammes, dont la température est variable selon la nature du combustible et les conditions de la combustion, ont été à l'origine de brûlures graves et de rayonnements destructeurs pour les structures,
- **Fumées, gaz** : les principaux effets identifiés sont :
  - Les brûlures par inhalation ;
  - L'agression due à la toxicité des produits de combustion ;
  - La gêne visuelle occasionnée ;
  - En milieu confiné, une raréfaction de la concentration en oxygène consommé au cours de la combustion.
- **Liquides combustibles, eaux d'extinction** : La perte de confinement sous l'effet de la chaleur affectant des réservoirs de substances polluantes ou l'épandage des eaux d'extinction chargées en produits toxiques pour l'environnement ont été à l'origine de pollutions au niveau local voire régional.

En effet, si ces volumes pollués ne peuvent être confinés sur le site au moyen de bassins de rétention par exemple, ils sont susceptibles de s'infiltrer dans le sol ou de s'écouler et se déverser finalement dans une rivière, un canal, une station d'épuration à proximité du site.

#### 4.2.3. Processus de combustion pour un feu de nappe

Rappelons au préalable que, quel que soit l'état du combustible en présence, la combustion se fait à l'état gazeux. Dans le cadre de l'étude des feux de nappe, la description du phénomène sera limitée aux seuls cas des combustibles liquides.

##### 4.2.3.1. Combustibles liquides

La combustion des produits liquides (par ex. le T.P.H.) intéresse les vapeurs émises par le produit réchauffé et non le liquide lui-même.

De manière schématique, le combustible émet une certaine quantité de vapeurs à une température donnée. Cette émission de vapeurs conduit à la formation d'une zone riche en combustible au dessus de la nappe. Au fur et à mesure de son élévation, le combustible entraîne de l'air froid extérieur.

Lorsque le mélange air-combustible se trouve dans le domaine d'inflammabilité et en présence d'une source d'inflammation, il s'enflamme.

Les gaz brûlés sont ensuite évacués vers le haut tout en continuant à entraîner l'air ambiant. L'essentiel de l'air entraîné (environ 90%) depuis la base de la flamme jusqu'à son sommet dilue les produits de la combustion tout en les refroidissant [8].

#### 4.2.3.2. Emission de vapeurs

La propension d'un liquide à émettre des vapeurs inflammables peut être reliée à la valeur du point d'éclair de la substance incriminée.

Parallèlement, la quantité de vapeurs émises par un liquide est notamment fonction de l'élévation de la température à laquelle il est soumis.

#### 4.2.3.3. Domaine d'inflammabilité

L'inflammation du mélange gazeux composé des vapeurs de combustibles et de l'air est fonction de la concentration de vapeurs de combustibles dans l'air. Chaque produit possède ainsi un domaine d'inflammabilité spécifique, représenté de manière schématique dans la **Figure 4.6** ci-après. Ce domaine est délimité par [9]:

- La Limite Inférieure d'Inflammabilité (L I I) s'exprimant en % de gaz en volume dans l'air. En-dessous de cette limite, le mélange est trop pauvre en combustible (ou trop riche en oxygène) pour que la flamme puisse se propager dans le milieu gazeux ;
- La Limite Supérieure d'Inflammabilité (L S I) s'exprimant en % de gaz en volume dans l'air. Au-dessus de cette limite, le mélange est trop riche en combustible (ou trop pauvre en oxygène) pour que la flamme puisse se propager dans le milieu gazeux ;
- La courbe de condensation dans la partie gauche ;
- La courbe d'auto-inflammation, qui correspond à une inflammation « spontanée » du mélange.

Il convient de signaler que les valeurs des L I I et L S I sont déterminées pour chaque produit de manière expérimentale. Il est ainsi souvent difficile de comparer les domaines d'inflammabilité de deux substances, ces derniers ayant pu être établis dans des conditions d'essais différentes.

A titre d'information, les limites d'inflammabilité d'un produit sont entre autres fonction de la température et de la pression.

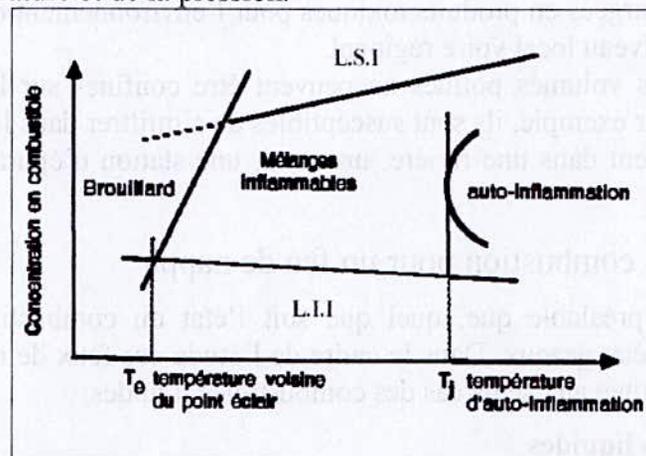


Figure 4.6 : Domaine d'inflammabilité (représentation schématique)  
(INERIS\_DRA\_25427)[6]

#### 4.2.3.4. Energie d'inflammation

Lorsque le mélange inflammable formé ne se trouve pas à sa température d'auto-inflammation, il est nécessaire de lui fournir une petite quantité d'énergie pour déclencher l'inflammation. Cette énergie, appelée énergie d'inflammation, peut être d'origine diverse (étincelles, flamme, foudre...) et varie selon les propriétés de la substance inflammable considérée [9].

L'énergie d'inflammation d'une substance dépend en outre de la concentration en gaz, vapeurs du mélange inflammable. Elle présente ainsi un minimum, l'énergie minimale d'inflammation, pour le mélange le plus susceptible de s'enflammer. L'énergie minimale d'inflammation correspond sensiblement à un mélange à la stœchiométrie.

#### 4.2.3.5. Conditions d'inflammation d'un liquide combustible

En conclusion, pour qu'il y ait inflammation d'un liquide combustible, il faut que les trois facteurs suivants soient réunis :

- Une température  $T$  supérieure au point d'éclair, afin de disposer d'une quantité suffisante de vapeurs inflammables,
- Un mélange air-vapeurs dont la concentration se situe dans les limites d'inflammabilité,
- Une énergie d'inflammation suffisante.

Ces trois conditions s'appliquent d'ailleurs aussi bien :

- Aux gaz, distillats dégagés par les combustibles solides et provenant de réactions de distillation ou pyrolyse,
- Aux vapeurs dégagées par les combustibles liquides et provenant du phénomène d'évaporation.

#### 4.2.3. Flamme

La flamme est définie comme la zone où a lieu la combustion en phase gazeuse. La flamme peut ainsi être assimilée à un volume de gaz ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{O}_2$  ...), de combustible non brûlé et de suies résultant d'une combustion incomplète. Elle correspond sensiblement à la partie lumineuse de la zone de combustion [10].

De manière simple, une flamme est composée essentiellement de trois parties [6] (Figure 4.7) :

- En partie basse, une zone dite « persistante » de géométrie quasi constante dans le temps et l'espace. Cette zone se distingue par des températures particulièrement élevées et en conséquence, un pouvoir émissif important.
- Dans le reste de la partie lumineuse, une zone qualifiée « d'intermittente » pour laquelle la position et la géométrie de la flamme varient fortement au cours du temps. Les températures associées sont sensiblement inférieures aux températures de la zone persistante,
- En partie haute, la zone des fumées constituées des produits issus de la combustion.

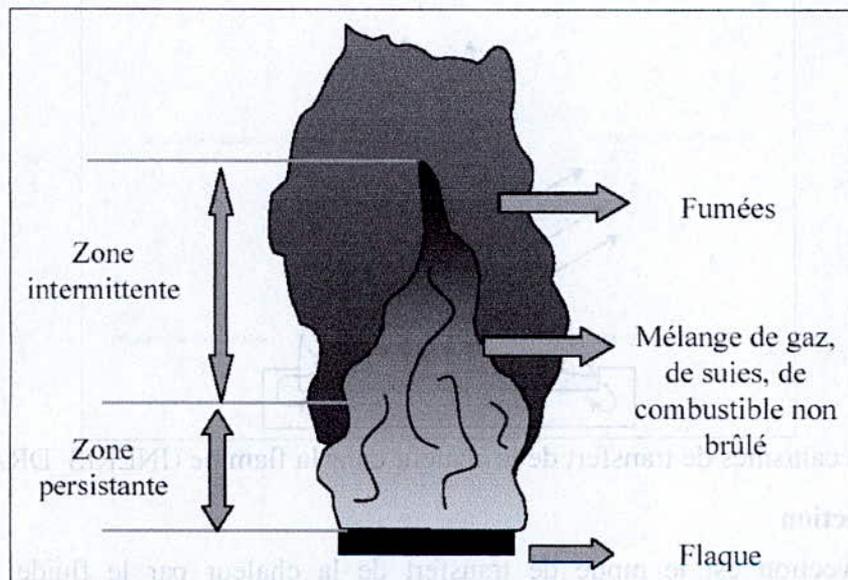


Figure 4.7 : Représentation schématique de la flamme (INERIS\_DRA\_25427) [6]

Par ailleurs, les flammes peuvent être caractérisées par la façon dont se mélangent le combustible et le comburant (avec mélange préalable ou non de l'air et du gaz de

combustion), ainsi que par le régime d'écoulement gazeux. Les quatre familles qui en découlent sont :

- Les flammes de diffusion en régime laminaire ;
- Les flammes de diffusion en régime turbulent ;
- Les flammes de prémélange en régime laminaire ;
- Les flammes de prémélange en régime turbulent.

Dans le cas des feux de nappe de taille industrielle, il s'agit de flammes de diffusion qui correspondent généralement à des zones de mélange turbulent.

#### 4.2.4. Effets d'un incendie

Lorsque les réactions de combustion sont déclenchées, d'importantes quantités de chaleur sont libérées. Ceci est traduit par la notion de potentiel calorifique associé à un combustible, pondérée par le rendement de combustion qui définit le rapport entre la quantité de chaleur disponible théoriquement dans l'incendie et celle effectivement libérée [6].

La quantité d'énergie ainsi émise sous forme de chaleur est notamment transférée :

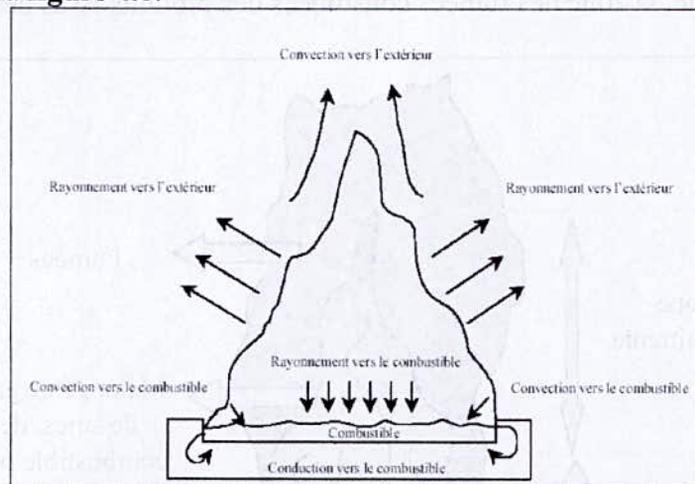
- Vers l'environnement extérieur de la flamme pouvant entraîner ainsi une propagation de l'incendie ;
- Vers la nappe de combustible au sol. Cette rétro-cession d'énergie entretient l'émission de vapeurs inflammables.

Trois mécanismes fondamentaux du transfert de chaleur à partir de la flamme coexistent :

- La convection,
- La conduction,
- Le rayonnement.

Ces trois modes de transfert, ainsi que le transport de brandons incendiaires pour les feux de produits solides, participent à l'éventuelle propagation d'un incendie.

Ces différents mécanismes de transfert de la chaleur sont représentés de manière schématique dans la **figure 4.8**.



**Figure 4.8** : Mécanismes de transfert de la chaleur dans la flamme (INERIS\_DRA\_25427) [6]

##### 4.2.5.1. Convection

La convection est le mode de transfert de la chaleur par le fluide présent dans l'environnement de la flamme (ex. air). Ce mécanisme, impliquant des mouvements ascendants de masses d'air chaud, est principalement à l'origine de la propagation verticale de l'incendie.

La convection peut être libre ou forcée selon ce qui gouverne le mouvement du fluide en question : différences de densité entre les gaz chauds et l'air froid, action mécanique extérieure telle ventilation, ou désenfumage mécanique.

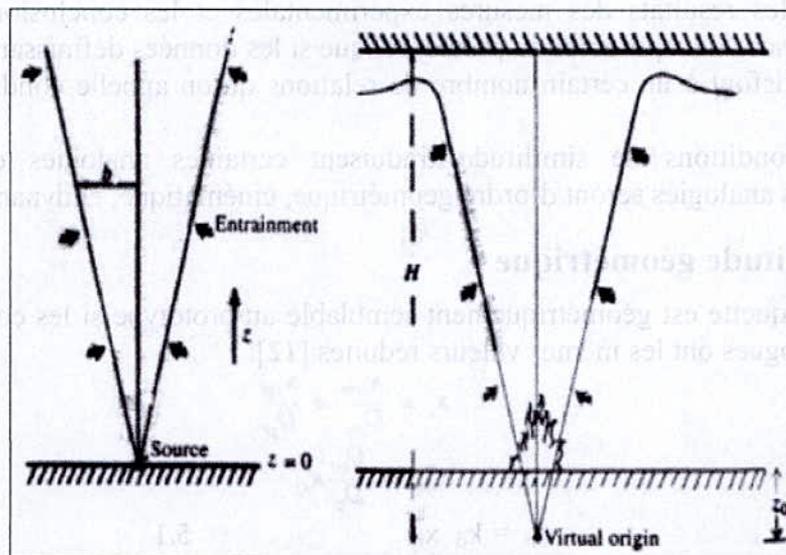
#### 4.2.5.2. Conduction

La conduction est le mode de transfert de la chaleur à travers un corps solide conducteur en contact avec une source chaude, par transfert de calories (exemple, propagation d'un bâtiment à l'autre par échauffement des cloisons mitoyennes).

#### 4.2.5.3. Rayonnement

Le rayonnement thermique est le mode de transfert isotrope de la chaleur dégagée par les corps solides, liquides ou gazeux portés à haute température. Le transfert de l'énergie thermique est assuré par ondes électromagnétiques. N'exigeant ainsi pas de support matériel, c'est un processus d'échange d'énergie quasi-immédiat entre deux corps distants.

La consommation d'oxygène (présent dans l'air) et la production de chaleur génère également d'autres phénomènes et en particulier un écoulement au-dessus de la source combustible qui constitue le panache. La température est plus importante et sous l'effet des forces d'Archimède, il y a une montée des produits de la réaction (fumées, gaz imbrûlés, suie) créant ainsi un mouvement d'entraînement d'air qui alimente le feu en oxygène (**Figure 4.9**).



**Figure 4.9** : entraînement d'air dans le panache d'un feu (Source : INERIS-DRA-25430)

## 5. Similitude

Les équations fondamentales de la mécanique des fluides et de la thermique sont le plus souvent difficiles à résoudre. Les solutions analytiques sont même rares et les solutions numériques sont parfois lourdes de mise en œuvre et coûteuses en temps de calcul. On peut alors avoir recours à l'étude expérimentale soit en vraie grandeur, soit par l'intermédiaire de maquettes. On peut aussi remplacer la résolution des équations de base, qui donne des informations locales, par des modélisations plus globales du problème. Ces modèles font appel à des corrélations semi-empiriques déduites d'expérimentations réalisées dans des conditions particulières, mais dont le résultat doit être extrapolable à d'autres conditions qui seront dites semblables [11].

Que les études expérimentales soient faites dans un but de connaissance d'une situation particulière ou pour établir des corrélations valables de manière plus générale, le nombre d'expériences à réaliser doit toujours être réduit au maximum. Pour cela, il est important de savoir quels paramètres caractérisent le phénomène étudié et comment ils interviennent.

Dans tous les cas ces essais sur maquettes donnent des informations utiles sinon indispensables, car elle permettent :

- De vérifier les calculs ;
- De trouver des solutions que les théories actuelles sont impuissantes à fournir.

Mais les résultats des mesures expérimentales et les conclusions établies sur ces maquettes ne sont transposables au prototype, que si les données définissant chacune des deux problèmes satisfont à un certain nombre de relations qu'on appelle conditions de similitude mécanique.

Les conditions de similitude traduisent certaines analogies entre prototype et maquette : ces analogies seront d'ordre géométrique, cinématique, et dynamique.

### 5.1. Similitude géométrique

La maquette est géométriquement semblable au prototype si les coordonnées de deux points homologues ont les mêmes valeurs réduites [12]:

$$x'_i = \frac{x_{im}}{D_m} = \frac{x_{ip}}{D_p}$$
$$x_{im} = \frac{D_m}{D_p} x_{ip}$$

$$x_{im} = k_d x_{ip} \quad 5.1$$

Où  $D$  est une dimension caractéristique de l'écoulement choisi arbitrairement.

$k_d$  est appelé échelle des distances ou échelle géométrique. Si  $k_d$  est une constante, tous les points d'un système ont leurs homologues dans l'autre système. La similitude géométrique est respectée. Notons que cette similitude conserve les angles dans le passage de la maquette au prototype.

La similitude géométrique nécessite le respect de l'échelle des distances  $k_d$  en tout point et dans toutes les directions y compris pour les limites du problème.

Cependant, dans certains problèmes, il n'est pas possible de respecter la condition :

$k_d = \text{constante}$

dans toutes les directions. Il y a alors « distorsion » géométrique.

### 5.2. Similitude cinématique

La maquette est cinématiquement semblable au prototype, si en deux points homologues les vitesses réduites sont identiques [12]:

$$v'_i = \frac{v_{im}}{V_m} = \frac{v_{ip}}{V_p}$$

$$v_{im} = \frac{V_m}{V_p} v_{ip}$$

$$v_{im} = k_v V_{ip} \quad 5.2$$

Où  $V$  est une vitesse caractéristique (ou de référence) en un point.

$k_v$  est l'échelle des vitesses ou échelle cinématique. Si  $k_v$  est constante, la similitude cinématique est respectée.

Les temps réduits doivent également être identiques, ce qui impose :

$$t'_i = \frac{t_m}{D_m/V_m} = \frac{t_p}{D_p/V_p}$$

$$t_m = \frac{D_m}{D_p} \frac{V_p}{V_m} t_p$$

$$t_m = k_t t_p$$

$k_t = \frac{k_d}{k_v}$  est l'échelle des temps ou échelle temporelle qui doit être constante pour que la similitude temporelle soit respectée.

La relation entre l'échelle des temps et les échelles géométrique et cinématique est dite condition cinématique de similitude.

La cinématique met en jeu les masses, les distances, le temps et la vitesse. Pour un écoulement, l'équation cinématique fondamentale est l'équation de la conservation de la masse (13) qui s'écrit :

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \text{div } \rho \mathbf{v} = 0$$

ou encore :

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial \rho v_i}{\partial x_i} = 0$$

En notant que, entre la maquette et le prototype, on doit avoir :

$\rho_m = k_\rho \rho_p$  ;  $v_{im} = k_v v_{ip}$  ;  $x_{im} = k_d x_{ip}$  ;  $t_m = k_t t_p$   
la conservation de la masse pour la maquette s'écrit, en utilisant les paramètres du prototype :

$$\frac{k_\rho}{k_t} \frac{\partial \rho_p}{\partial t_p} + \frac{k_\rho k_v}{k_d} \frac{\partial \rho_p v_{ip}}{\partial x_{ip}} = 0$$

Pour le prototype on a :

$$\frac{\partial \rho_p}{\partial t_p} + \frac{\partial \rho_p v_{ip}}{\partial x_{ip}} = 0$$

Ainsi, il faut que :

$$\frac{k_\rho}{k_t} = \frac{k_\rho k_v}{k_d}$$

soit :

$$\frac{k_v k_t}{k_d} = 1 \quad 5.3$$

C'est la condition cinématique de similitude qui lie les échelles des temps, des distances et des vitesses. On retrouve le résultat mentionné auparavant.

L'échelle des accélérations  $\gamma = \frac{Dv}{dt}$  est également liée à ces échelles par :

$$k_\gamma = \frac{k_v}{k_t} = \frac{k_d}{k_t^2} = \frac{k_v^2}{k_d} \quad 5.4$$

### 5.3. Similitude dynamique

Enfin, les pressions doivent également respecter la relation :

$$P^* = \frac{P_p^*}{P_{\text{réf } p}^*} = \frac{P_m^*}{P_{\text{réf } m}^*}$$

$$P_m^* = \frac{Eu_m}{Eu_p} \frac{\rho_m}{\rho_p} \left(\frac{V_m}{V_p}\right)^2 P_p^*$$

Où  $P_{\text{réf}}^*$  est la pression caractéristique.

soit, du fait de l'identité des nombres d'Euler :

$$P_m^* = k_p k_v^2 P_p^* = k_p P_p^*$$

$k_p = k_p k_v^2$  est l'échelle des pressions ou échelle dynamique. La relation entre les échelles des pressions, des masses volumiques et des vitesses est la condition dynamique de similitude.

Ainsi, deux écoulements qui respectent toutes ces conditions sur  $x_i$ ,  $v_i$ ,  $t$  et  $P^*$  sont semblables bien que différents. On peut transposer les résultats de l'un à l'autre.

La dynamique relie le mouvement à ses causes. La relation fondamentale est celle de Newton :

$$\mathbf{F} = m \vec{\gamma}$$

Que ce soit pour la maquette ou pour le prototype, cette relation doit être respectée. Ainsi, en transcrivant comme précédemment l'équation relative à la maquette à l'aide des grandeurs relatives au prototype, compte tenu de l'échelle des forces  $k_F$ , de celles des masses  $k_m$  et des accélérations  $k_\gamma$ , on a :

$$k_F \mathbf{F}_p = k_m m_p k_\gamma \vec{\gamma}_p ; \mathbf{F}_p = m_p \vec{\gamma}_p$$

soit :

$$k_F = k_m k_\gamma$$

Comme  $k_m = k_p k_d^3$ , on peut également écrire :

$$k_F = k_p k_d^2 k_v^2 = k_p k_d^2 \frac{1}{k_t^2} \quad 5.5$$

La similitude dynamique impose ainsi, outre la constance de  $k_p$  (qui peut être considérée comme l'échelle dynamique de base) dans tout l'écoulement, le respect de ces diverses relations entre les échelles. C'est la condition dynamique de similitude, qui peut avoir diverses variantes d'écriture dont certaines sont développées ci-dessous.

D'après l'équation 5.5 on peut exprimer l'identité de l'échelle de toutes les forces qui sont ici des forces volumiques : 5.6

$$k_{F_v} = \frac{k_p k_v^2}{k_d} = \frac{k_p k_d}{k_t^2} = \frac{k_p k_v}{k_t} \quad 5.6$$

### 5.3.1. Identité des échelles des forces d'inertie

$$k_p \frac{k_v}{k_t} = k_p \frac{k_v^2}{k_d} \Rightarrow \frac{k_v k_t}{k_d} = 1$$

On retrouve la condition de similitude cinématique.

### 5.3.2. Identité des échelles des forces de pression et des forces d'inertie

$$k_p \frac{k_v^2}{k_d} = \frac{k_p}{k_d} \Rightarrow \frac{k_p}{k_p k_v^2} = 1 \quad 5.7$$

Si on considère la maquette et le prototype, cette relation peut encore s'écrire :

$$Eu_m = \frac{P_m}{\rho_m v_m^2} = \frac{P_p}{\rho_p v_p^2} = Eu_p \quad 5.8$$

avec  $Eu$  le nombre d'Euler.

Ainsi, l'identité des échelles des forces implique l'égalité des nombres d'Euler de chaque écoulement. Le nombre d'Euler est une mesure du rapport entre les forces de pression et les forces d'inertie d'un écoulement.

### 5.3.3. Identité des échelles des forces de gravité et des forces d'inertie

Le raisonnement établi ci-dessus demeure :

$$k_p k_d = k_v k_g \Rightarrow \frac{k_v^2}{k_d k_g} = 1 \quad 5.9$$

Entre la maquette et le prototype, il faut que :

$$Fr_m = \frac{v_m}{\sqrt{g_m D_m}} = \frac{v_p}{\sqrt{g_p D_p}} = Fr_p \quad 5.10$$

C'est l'égalité des nombres de Froude  $Fr$  qui mesure le rapport entre les forces d'inertie et les forces de gravité d'un écoulement.

### 5.3.4. Identité des échelles des forces de viscosité et des forces d'inertie

La relation entre ces échelles s'écrit :

$$k_p k_d = \frac{k_v k_\mu}{k_g^2} \Rightarrow \frac{k_p k_v k_d}{k_\mu} = 1 \quad 5.11$$

Cette condition implique qu'entre la maquette et le prototype, il faut que :

$$Re_m = \frac{\rho_m v_m D_m}{\mu_m} = \frac{\rho_p v_p D_p}{\mu_p} = Re_p \quad 5.12$$

C'est l'égalité des nombres de Reynolds  $Re$  qui mesure le rapport entre les forces d'inertie et les forces de viscosité.

Dans notre études nous avons appliqué ces conditions des similitudes:

- Similitude géométrique donne :  $X_{im} = \alpha X_{ip}$

Avec :  $\alpha = 1/5$  pour la maquette thermique ;

$\alpha = 1/20$  pour la maquette isotherme.

Pour la similitude dynamique, on a égalé le nombre de Froude ( $Fr_m = Fr_p$ ). Après calcul nous avons trouvé :

Le débit :  $Q_{vm} = \alpha^{5/2} Q_{vp}$

La puissance :  $P_m = \alpha^{5/2} P_p$

A partir des données de l'échelle réelle, nous avons trouvé les correspondent à l'échelles réduites en utilisant ces formules. (Tableau 5.1, 5.2, 5.3, et 5.4)

Echelle 1/1		Echelle 1/20		Echelle 1/5	
Diamètre du bac en (cm)	Puissance convective (KW)	Diamètre d'injection en (mm)	Débit d'hélium en (l/min)	Diamètre d'injection en (cm)	Débit d'hélium en (l/min)
20	11	10	1,26	4	40
30	37	15	4,09	6	131
40	84	20	9,32	8	298
50	158	25	17,5	10	561
60	264	30	29,2	12	934
70	404	35	44,7	14	1430
80	581	40	64,4	16	2060
90	799	45	88,4	18	2830
100	1058	50	117	20	3749

Tableau 5.1 : Puissances et diamètres des bacs utilisés à l'échelle réelle et leurs correspondent à l'échelle réduit.

TR (h <sup>-1</sup> )	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Q <sub>v</sub> (m <sup>3</sup> /h)	119	241	360	479	601	720	839	961	1080	1199
Q <sub>v</sub> (l/min)	1980	4021	6001	7981	10019	11999	13979	16020	18000	19980

Tableau 5.2 : débit d'extraction et d'injection utilisés à l'échelle réelle.

TR <sub>p</sub> (h <sup>-1</sup> )	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Q <sub>v</sub> (m <sup>3</sup> /h)	2.13	4.32	6.44	8.57	10.76	12.88	15.01	17.20	19.32	21.45
Q <sub>v</sub> (l/min)	35.42	71.93	107.4	142.8	179.22	241.6	250.1	286.57	322.0	357.4

Tableau 5.2 : Débit d'extraction et d'injection de la maquette 1/5 correspondent aux TR réels.

TR <sub>p</sub> (h <sup>-1</sup> )	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Q <sub>v</sub> (m <sup>3</sup> /h)	0.066	0.135	0.201	0.268	0.336	0.403	0.469	0.537	0.604	0.670
Q <sub>v</sub> (l/min)	1.10	2.48	3.35	4.47	5.6	6.72	7.82	8.95	10.07	11.17

Tableau 5.4 : Débit d'extraction et d'injection de la maquette 1/20 correspondent aux TR réel.

Echelle 1/20	Diamètre du d' injection en (mm)	Débit d' injection en (l/min)	Echelle 1/5	Diamètre du d' injection en (cm)	Débit d' injection en (l/min)	Echelle 1/1	
						Diamètre du d' injection en (cm)	Puissance corrective (CV)
100	20	117	20	20	3749	1078	
90	18	88.3	18	18	2830	799	
80	16	64.4	16	16	2060	581	
70	14	44.7	14	14	1430	404	
60	12	29.2	12	12	934	261	
50	10	17.3	10	10	561	158	
40	8	9.32	8	8	398	84	
30	6	4.09	6	6	131	37	
20	4	1.24	4	4	40	11	

Tableau 5.1 : Puissances et diamètres des buses utilisés à l'échelle réelle et leurs correspondent à l'échelle réduite.

## 6. Les instruments de mesure

### 6.1. La vélocimétrie Laser à effet doppler (LDV)

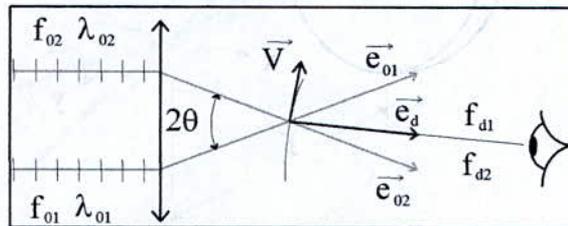
#### 6.1.1. Introduction

La Vélocimétrie Laser Doppler est une méthode non intrusive de mesure instantanée et ponctuelle de la vitesse d'un écoulement.

Ce vélocimètre bicomposante s'appuie sur un faisceau laser continu (Argon) en utilisant le vert, soit  $\lambda = 514.5$  nm et le bleu, soit  $\lambda = 488$  nm.

#### 6.1.2. Fréquence Doppler

Dans cette configuration, la particule est illuminée, comme sur la **figure 6.1**, par deux ondes lumineuses planes, de fréquences  $f_{01}$  et  $f_{02}$ , de mêmes intensités et de directions incidentes  $\vec{e}_{01}$  et  $\vec{e}_{02}$  fixées par une optique d'émission.



**Figure 6.1** : Doppler différentiel [14]

Chaque onde incidente est diffusée (Voir Annexe 1) par la particule dans la direction d'observation  $\vec{e}_d$  et l'observateur fixe perçoit ces deux ondes aux fréquences  $f_{d1}$  et  $f_{d2}$ , [14]

$$\text{où : } f_{d1} = f_{01} + \frac{\vec{V}}{\lambda_0} \cdot (\vec{e}_d - \vec{e}_{01}) \quad \text{et} \quad f_{d2} = f_{02} + \frac{\vec{V}}{\lambda_0} \cdot (\vec{e}_d - \vec{e}_{02}) \quad \text{avec} \quad \lambda_{01} \approx \lambda_{02} \approx \lambda_0 \quad 6.1$$

La combinaison des deux signaux par hétérodynage optique conduit à un signal oscillant à la fréquence :  $f_{d2} - f_{d1} = f_{02} - f_{01} + \frac{\vec{V}}{\lambda_0} \cdot (\vec{e}_{01} - \vec{e}_{02}) = f_s + F_D$  6.2

$$f_s = f_{02} - f_{01} \quad \text{et} \quad F_D = \frac{\vec{V}}{\lambda_0} \cdot (\vec{e}_{01} - \vec{e}_{02}) \quad 6.3$$

où  $f_s$  est la différence de fréquence constante déterminée par les fréquences des faisceaux incidents et  $F_D$  est la différence des décalages Doppler.

Par construction, le système peut présenter une fréquence de décalage  $f_s$ . Pour notre équipement,  $f_s$  est égale à 40 MHz, car les faisceaux éclairants sont obtenus par dédoublement du faisceau laser qui est un faisceau de lumière monochromatique, cohérent, de fréquence  $f_0$ , dont un des deux faisceaux est légèrement décalé en fréquence au moyen d'une cellule de Bragg.

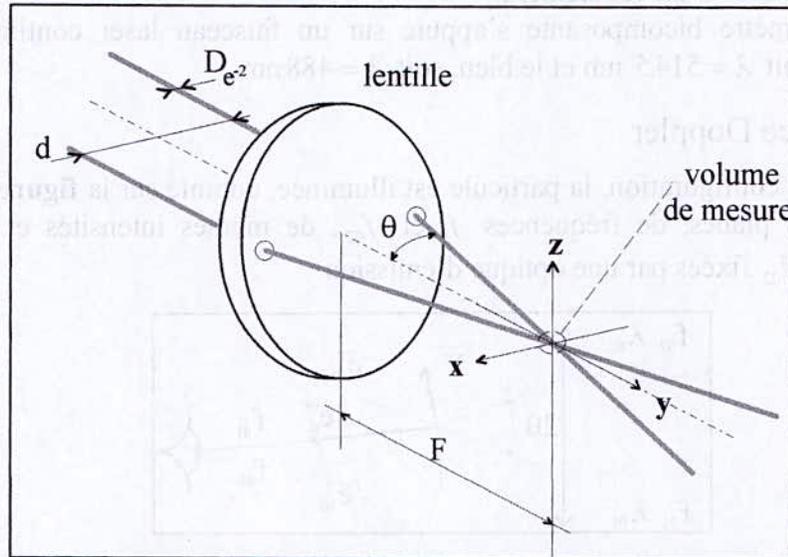
Par ailleurs, le plus important est que  $F_D$  est totalement indépendante de la direction d'observation. En effet, seules la longueur d'onde  $\lambda_0$ , la direction des faisceaux incidents  $\vec{e}_{01}$ ,  $\vec{e}_{02}$  et  $\vec{V}$  interviennent dans la détermination de  $F_D$ . La fréquence  $F_D$  est donc directement proportionnelle à la composante de la vitesse dans une direction figée par l'optique d'émission.

Ce dispositif optique consistant à faire converger deux faisceaux incidents issus d'une même source de lumière laser, dont la cohérence spatiale et temporelle est respectée, génère

un volume d'intersection ellipsoïdal appelé volume de mesure où des franges d'interférence apparaissent.

### 6.1.3. Franges d'interférence

Les deux faisceaux incidents parallèles sont dirigés par une lentille convergente de distance focale  $F$  pour interférer au point focal comme le montre la figure 6.2.



**Figure 6.2** : Réalisation du volume de mesure [15]

Les franges d'interférence, alternativement sombres et brillantes, autorisent une interprétation différente de l'anémométrie laser. En effet, lorsque des particules de petites dimensions (inférieures à l'interfrange) capables de suivre les filets fluides, traversent le volume de mesure, elles diffusent une onde lumineuse dont l'intensité suit celle des franges rencontrées (une oscillation sur une enveloppe gaussienne). Cette diffusion de la lumière conduit à un scintillement dont la fréquence  $f_{sct}$  dépend uniquement de la valeur de l'interfrange  $i$  et de la vitesse  $\vec{V}$  des particules.

L'interfrange  $i$  séparant une frange sombre d'une frange brillante est fixé par la connaissance de la longueur d'onde  $\lambda_0$  de l'onde incidente, du demi-angle de convergence  $\theta$  des deux faisceaux et de l'indice de réfraction  $n$  entourant le volume de mesure suivant la

formule [16] :

$$i = \frac{\lambda_0}{2n \sin \theta} \quad 6.4$$

Où  $n = 1$  dans l'air.

La particule, entraînée par l'écoulement à une vitesse  $\vec{V}$ , scintillera à la fréquence  $f_{sct}$

qui a pour expression :

$$f_{sct} = \frac{V}{i} = \frac{2V \sin \theta}{\lambda_0} = F_D \quad 6.5$$

### 6.1.4. Caractéristiques du volume de mesure

Nous avons vu que les caractéristiques optiques et géométriques du dispositif d'émission qui fixent la valeur de l'interfrange sont intéressantes à connaître tout comme d'autres grandeurs concernant le volume de mesure.

La figure 6.2 et la figure 6.3 montrent les paramètres qui définissent les grandeurs caractéristiques du réseau de franges.

Ce réseau de franges est orienté dans le plan perpendiculaire au plan des faisceaux incidents. La vitesse mesurée est la projection de la vitesse sur l'axe qui appartient au plan des

faisceaux et qui est perpendiculaire à leur bissectrice. C'est la fréquence Doppler qui permet, par la connaissance de la valeur de l'interfrange, de calculer cette vitesse.

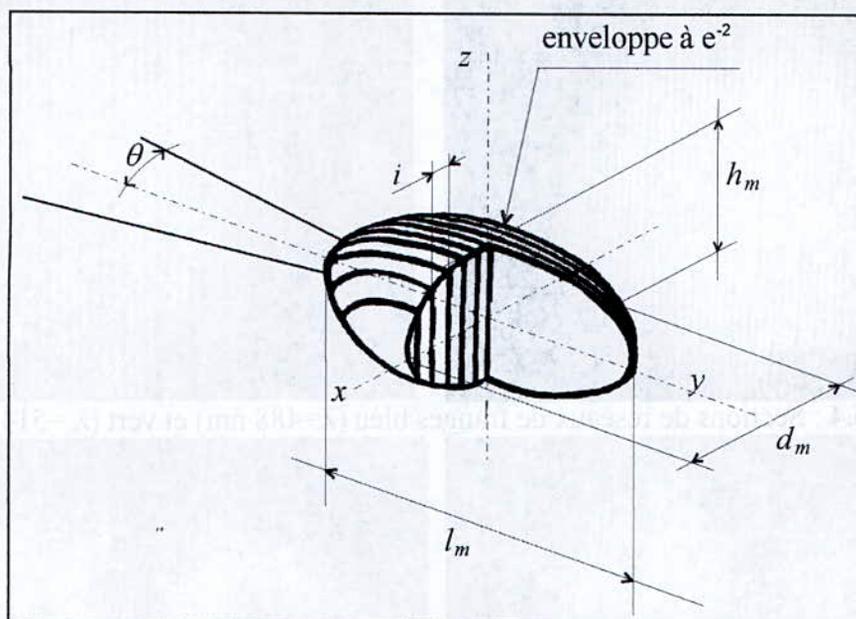


Figure 6.3 : Volume de mesure [15]

Les dimensions caractéristiques du volume de mesure ellipsoïdal [15] sont :

$$\text{sur } x : d_m = \frac{d_{e^{-2}}}{\cos \theta} \quad 6.6$$

$$\text{sur } y : l_m = \frac{d_{e^{-2}}}{\sin \theta} \quad 6.7$$

$$\text{sur } z : h_m = d_{e^{-2}} = \frac{4\lambda_0 F}{\pi D_{e^{-2}}} \quad 6.8$$

où  $d_{e^{-2}}$  est le diamètre de l'enveloppe à  $e^{-2}$  des faisceaux à la distance focale. Le diamètre  $D_{e^{-2}}$  est le diamètre de l'enveloppe des faisceaux avant l'optique d'émission (la lentille convergente).

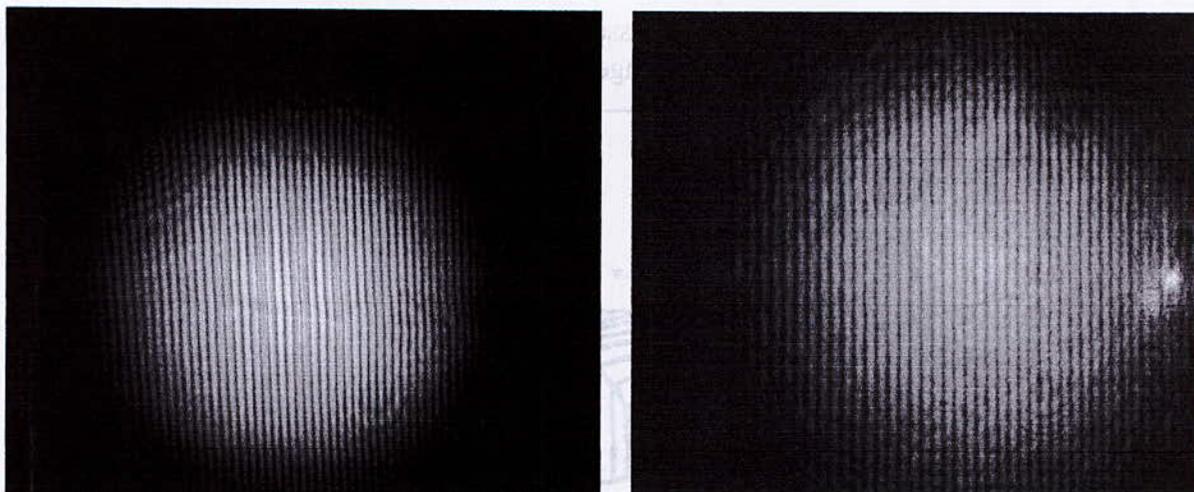
L'écartement entre les deux faisceaux parallèles est  $d$  et comme  $\theta$  est très petit, nous avons, pour le demi-angle de convergence, la relation :

$$\text{tg} \theta \approx \theta = \frac{d}{2F} \quad 6.9$$

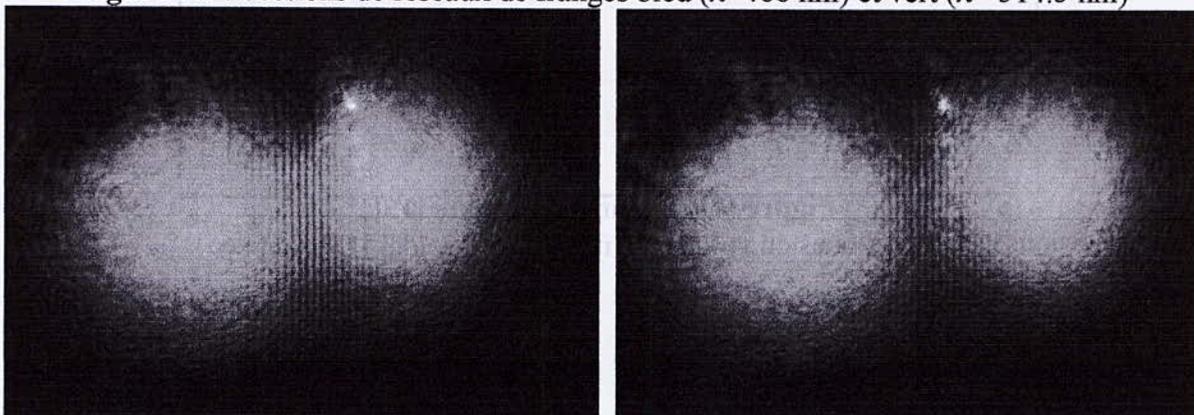
Le nombre de franges est le rapport entre la largeur  $d_m$  du volume de mesure suivant l'axe (O, x) et la valeur de l'interfrange  $i$  ; ainsi nous obtenons :

$$N_{FR} = \frac{4d}{\pi D_{e^{-2}}} \quad 6.10$$

Nous venons de voir qu'un réseau de franges produit par deux faisceaux incidents issus d'une même source fournit la mesure d'une seule composante de la vitesse. En superposant un second réseau de franges au premier, (la bissectrice étant commune aux deux réseaux), il est possible, comme dans le cas de notre équipement, de recueillir de manière simultanée deux composantes. Enfin, pour obtenir la troisième composante de la vitesse d'une particule, il est nécessaire de placer au même point focal un troisième réseau selon une bissectrice différente.



**Figure 6.4** : Sections de réseaux de franges bleu ( $\lambda=488$  nm) et vert ( $\lambda=514.5$  nm)



**Figure 6.5** : Sections de réseau de franges vert ( $\lambda=514.5$  nm) avant le croisement parfait

La réception du signal diffusé par les particules traversant le volume de mesure s'effectue au travers de la même lentille sur une fibre optique centrée dans la torche (voir annexe 2) qui possède un cône d'acceptance suffisamment important pour capter le maximum d'énergie.

Les faisceaux émis par le laser sont acheminés vers la torche (voir Annexe 3) par des fibres optiques qui s'ajustent dans le bâti pour donner quatre faisceaux parallèles de diamètre  $D_{e-2} = 2.63$  mm écartés de  $d = 50$  mm. La lentille convergente a une focale  $F = 362.6$  mm donnant un demi angle de convergence  $\theta = 3.95^\circ$  qui nous permet, selon les formules 6.4, 6.6, 6.7, 6.8 et 6.10, de calculer les paramètres dimensionnels du volume de mesure en fonction de la longueur d'onde incidente.

Le tableau 6.1 suivant récapitule toutes ces données.

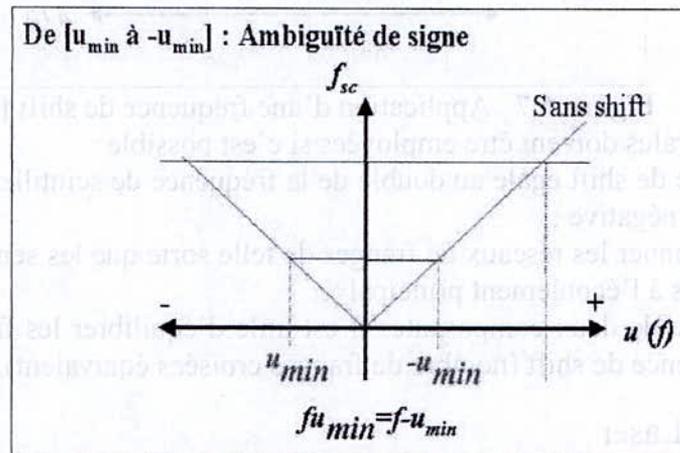
Longueur d'onde $\lambda$ [nm]	514.5 (vert)	488 (bleu)
Distance focale [mm]	362.6	362.6
Ecartement [mm]	50	50
$d_m$ [ $\mu\text{m}$ ]	90.7	86.1
$l_m$ [mm]	1.31	1.24
$h_m = d_{e-2}$ [ $\mu\text{m}$ ]	90.5	85.9
interfrange $i$ [ $\mu\text{m}$ ]	3.74	3.54
nombre de franges	24	24

**Tableau 6.1** : Dimensions caractéristiques du volume

### 6.1.5. L'ambiguïté de signe

Une particule, qui transite à la vitesse  $\vec{V}$ , dans un sens produit la même fréquence qu'une autre particule qui évolue en sens opposé à la même vitesse (**figure 6.6**).

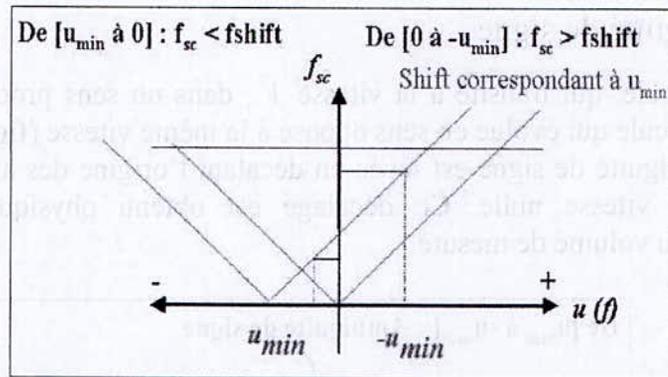
Cette ambiguïté de signe est levée en décalant l'origine des axes de la fréquence qui correspond à la vitesse nulle. Ce décalage est obtenu physiquement au niveau des caractéristiques du volume de mesure.



**Figure 6.6 : Ambiguïté de signe [15]**

Physiquement, en imposant à l'un des deux faisceaux une fréquence additionnelle connue et appelée fréquence de 'shift'  $f_{sh}$ , le réseau de franges défile. Supposons que les deux faisceaux qui se croisent aient des fréquences  $n_0$  et  $n_1$  légèrement différentes. La vitesse de défilement des franges est alors  $u_d = (n_0 - n_1) \cdot i$ , où  $i$  est l'interfrange. Cette vitesse  $u_d$  se compose algébriquement avec la vitesse réelle de l'écoulement. La vitesse résultante obtenue par diffusion de la lumière,  $u_r$ , qui est mesurée, doit toujours être positive pour lever l'ambiguïté. Elle est de la forme :  $u_r = u_d + u_{écoulement} > 0$ . Le choix important de la fréquence de décalage sera donc égale ou supérieure à la fréquence qui serait renvoyée par les particules qui évoluent avec la vitesse maximale négative [15].

La fréquence  $f_{sh}$  décale l'origine des vitesses (vitesse réelle nulle) à la valeur de cette fréquence, **figure 6.7**. Ainsi, toutes les particules qui scintillent à une fréquence inférieure à  $f_{sh}$  évoluent dans le même sens que les franges soit le sens négatif de l'écoulement. De même, toutes les particules qui scintillent à une fréquence supérieure à  $f_{sh}$  évoluent dans le sens opposé des franges soit le sens positif de l'écoulement. Une particule qui fournit une fréquence de scintillement égale à la fréquence de décalage est immobile dans le volume de mesure. Pour réaliser un changement de fréquence optique, divers procédés peuvent être employés. Le principe général consiste à moduler périodiquement la phase de l'onde lumineuse afin de changer la fréquence de la lumière. L'élément le plus couramment utilisé est la cellule de Bragg précédemment décrite. Cependant, pour obtenir la fréquence de shift utile, il faut positionner une cellule de Bragg sur chaque faisceau en choisissant leur fréquence et leur mode de fonctionnement.



**Figure 6.7 :** Application d'une fréquence de shift [15]

Quelques règles générales doivent être employées si c'est possible :

Choisir une fréquence de shift égale au double de la fréquence de scintillement correspondant à la vitesse maximale négative ;

Physiquement, positionner les réseaux de franges de telle sorte que les sens de défilement des franges soient opposés à l'écoulement principal ;

pour la mesure de deux composantes il est utile d'équilibrer les fréquences mesurées au moyen de la fréquence de shift (nombre de franges croisées équivalent).

### 6.1.6. La sécurité Laser

Les Lasers continus utilisés pour la vélocimétrie laser sont de classe IV (puissance supérieure à 0.5 W). Le danger pour l'altération de la peau et de la vision sont importants, de même que les risques d'incendie. De nombreuses précautions sont à prendre pour éviter tout contact avec le faisceau direct ou avec tout ou une partie d'un faisceau réfléchi. Les yeux doivent être protégés par des lunettes spécifiques, les trajets optiques ne doivent pas être à la hauteur des yeux, les réflexions doivent être bloquées, l'accès à la zone doit être délimité, limité et réservé aux personnes averties, l'expérience doit être faite à la puissance minimale nécessaire, etc. [17].

Les normes sont très contraignantes et parfois difficiles à mettre en œuvre. Les précautions liées au bon sens évitent souvent l'accident.

La concentration doit être maintenue en permanence, c'est pourquoi il devient difficile de travailler à trois (le troisième est toujours en dehors du champ de vision). Sur les expériences nécessitant un laser, travailler à deux est une bonne solution car la surveillance mutuelle est permanente. Le port d'objets réfléchissants (alliance, montre,...) est à proscrire. Les trajets optiques et leurs réflexions doivent être maîtrisés. Dans la mesure du possible, il faut travailler avec une lumière ambiante qui n'oblige pas la pupille à se dilater.

### 6.1.7. Ensemencement

La présence de particules diffusantes, en quantité et dimensions convenables, au sein de l'écoulement à étudier est une condition indispensable au bon fonctionnement de la vélocimétrie laser. L'utilisation d'ensemencement artificiel est presque toujours nécessaire pour obtenir la quantité suffisante de traceurs dont les dimensions et la masse volumique leur permettent de suivre l'écoulement.

Différents types de générateurs sont utilisés pour produire les aérosols (encens, fumée sèche de tabac, brouillard d'huile, brouillard de glycol, brouillard de spectacle, etc.). L'aérosol est injecté en amont de la zone d'exploration pour ne pas perturber l'écoulement et pour acquérir sa vitesse. Pour que les particules suivent correctement l'écoulement et qu'elles soient vues par la vélocimétrie, il faut que celles-ci soient de diamètre micronique et submicroniques (inférieur et de l'ordre du micron), de faible masse volumique et de fort indice de réfraction.

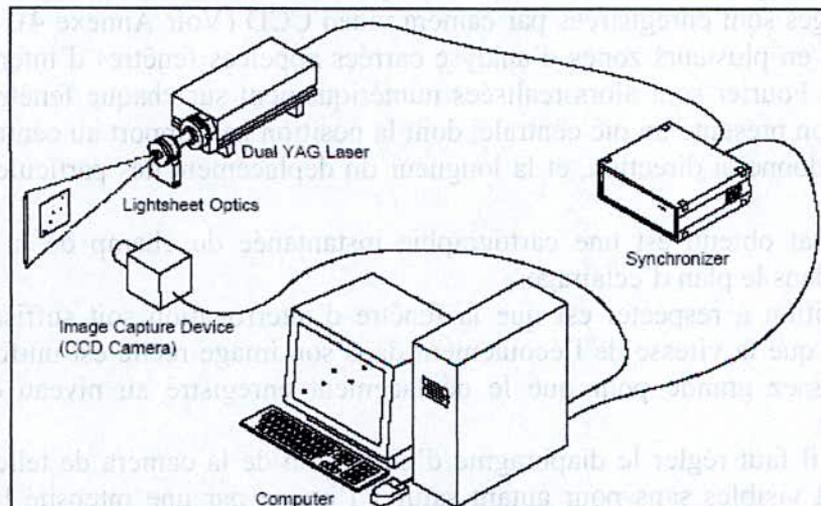
### 6.1.8. Conclusion

La Vélocimétrie Laser à Franges est une technique précise de mesure de la vitesse d'un fluide. Elle fournit des mesures de vitesses locales et instantanées par voie optique. Elle n'est pas intrusive et permet l'investigation détaillée et précise d'écoulements aérodynamiques complexes. La vélocimétrie laser utilisée permet d'obtenir simultanément deux composantes locales instantanées du vecteur vitesse.

## 6.2. La vélocimétrie par image de particule PIV

La vélocimétrie par images de particules communément appelée PIV (Particle Image Velocimetry) est une méthode optique non intrusive permettant d'obtenir des cartes de vitesses instantanées dans un plan de l'écoulement étudié. Par post-traitement, il est possible de calculer des cartes de vitesses moyennes, des cartes de vorticités instantanées ou moyennes, des cartes d'intensités de turbulence et des cartes de corrélations spatiales. Cette technique de mesure donne donc accès à des informations quantitatives très utiles pour la caractérisation des écoulements. Elle est utilisable tant en aéro qu'en hydrodynamique et la gamme de vitesse mesurable va des très basses vitesses au supersonique.

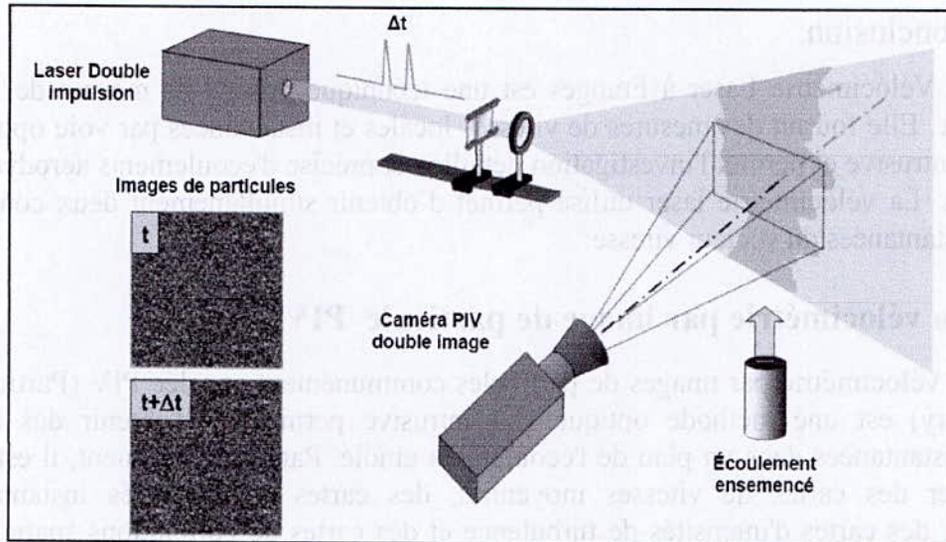
Le logiciel INSIGHT 3G permet dans un premier temps d'afficher les champs de vecteurs vitesse en deux dimensions et les photos correspondantes de l'écoulement. Puis en utilisant le logiciel TECPLOT (version 9), on peut traiter ces cartes de vitesses instantanées (on pourra décomposer les vecteurs et représenter les champs instantanés ou moyennés des vitesses horizontales ou verticales) et obtenir des cartes de vorticité instantanée ou moyenne, des cartes d'intensité de turbulence.



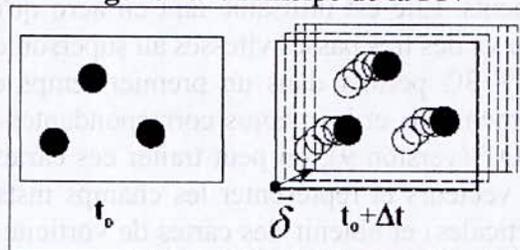
**Figure 6.8 :** Montage d'un système PIV

Une tranche d'un écoulement ensemencé est éclairée par un plan de lumière. Le mouvement des particules éclairées par ce plan, est enregistré entre deux instants successifs très courts (Figures 6.8, 6.9 et 6.10). Il suffit alors de déterminer la distance parcourue par les particules [18].

La condition essentielle est qu'entre les instants de prise de vue, la particule doit rester dans l'épaisseur du plan d'éclairage. La source laser utilisée est un laser impulsionnel Nd-YAG délivrant deux impulsions espacées d'un intervalle de temps  $\Delta t$  (réglable en fonction des vitesses à mesurer), chacune ayant une énergie de 120 milli joules.



**Figure 6.9** : Principe de la PIV



**Figure 6.10** : Déplacement des particules entre l'instant  $\Delta t$

Les images sont enregistrées par caméra vidéo CCD (Voir Annexe 4). Chaque image est décomposée en plusieurs zones d'analyse carrées appelées fenêtres d'interrogations. Les transformées de Fourier sont alors réalisées numériquement sur chaque fenêtre. La fonction d'inter corrélation présente un pic centrale, dont la position par rapport au centre de la fenêtre d'interrogation donne la direction, et la longueur du déplacement des particules dans fenêtre d'analyse.

Le résultat obtenu est une cartographie instantanée du champ de la projection du vecteur vitesse dans le plan d'éclairage.

La condition à respecter est que la fenêtre d'interrogation soit suffisamment petite pour considérer que la vitesse de l'écoulement dans son image réelle est uniforme [4], mais elle doit être assez grande pour que le déplacement enregistré au niveau du cliché soit significatif.

De plus il faut régler le diaphragme d'obturation de la caméra de telle sorte que les particules soient visibles sans pour autant saturer l'image par une intensité lumineuse trop importante. Enfin, il est nécessaire de régler la mise au point de la caméra, pour que les particules de l'ensemencement puissent être parfaitement discernables.

Le logiciel INSIGHT 3G permet dans un premier temps d'afficher les champs des vecteurs vitesse en deux dimensions et les photos correspondantes de l'écoulement. Puis en utilisant le logiciel TECPLOT, on peut traiter plusieurs grandeurs instantanées ou moyennes (module de vitesse, composantes de la vitesse, vorticité, intensité turbulente,...).

Il est possible à partir du logiciel INSIGHT 3G de contrôler pratiquement tous les paramètres de mesure (Voir Annexe 5), les principaux étant :

- la fréquence d'acquisition et nombre d'acquisitions ;
- le temps  $\Delta t$  entre deux impulsions ;
- l'intervalle de temps entre la pulsation et l'enregistrement de l'image ;
- la puissance de chaque laser ;

- la calibration ;
- la taille de la fenêtre d'interrogation ;
- le gain en luminosité ;
- le filtrage et la suppression des faux vecteurs (il est possible d'imposer un intervalle de vitesse), ainsi que divers opérations d'interpolation et de lissage ;
- la position et la taille de la zone d'analyse.

#### Limitations et erreurs du procédé :

- La principale source d'erreurs est relative au suivi des particules qui ont une composante de vitesse importante dans la direction perpendiculaire au plan laser de sorte qu'elles n'apparaissent que sur un seul cliché ;
- Les erreurs de calibration : avant toute mesure PIV il faut effectuer une calibration qui consiste à donner au logiciel de traitement l'échelle des images enregistrées, en d'autres termes, la conversion pixel-distance. La calibration doit être effectuée à chaque fois que la plan Laser ou la camera est déplacé ;
- La fréquence d'acquisition est limitée à 7.5Hz par la vitesse du bus de la carte d'acquisition de la camera CCD. Cette fréquence ne donne pas accès aux fluctuations turbulentes, mais elle est suffisante pour décrire l'instationnarité de l'écoulement ;
- L'axe de la camera doit être parfaitement normal au plan du laser, autrement, la mise au point de l'objectif de la camera ne peut se faire sur l'ensemble du plan de mesure entraînant ainsi l'apparition de faux vecteurs sur une partie du champs, là où la mise au point est incorrecte, les vitesses mesurées sur l'autre partie seront également erronées car les déplacements observés par la camera ne correspondront pas aux déplacements réels ;
- Une autre source d'erreur est induite par la mesure dans la flamme, une telle situation est générée par l'encombrement des particules. Cela a été observé sur la maquette dans la flamme, causant ainsi des réflexions importantes qui éblouissent la caméra.

#### Précautions à prendre :

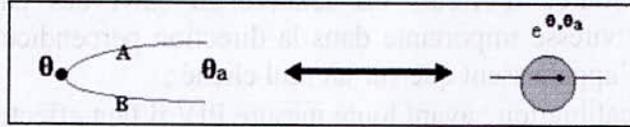
Au-delà des mesures de sécurité à prendre lors du fonctionnement du laser (des lésions irréversibles de la rétine peuvent être causées par le rayon laser), il est nécessaire de prendre les précautions suivantes :

- Une attention particulière doit être portée à la superposition des deux plans laser. Des plans décalés éclaireraient des particules différentes rendant la mesure de déplacement impossible ;
- Le diaphragme d'obturation de la caméra doit être réglé de telle sorte que les particules soient visibles sans pour autant saturer l'image par une intensité lumineuse trop importante ;
- La distance entre le laser et la zone de mesure influe sur la luminosité. Pour avoir une bonne illumination il faut soit rapprocher le laser, soit augmenter la sa puissance, mais ce dernier réglage est déconseillé car le risque de brûlure de la paroi de la maquette augmente et les réflexions deviennent très dangereuses ;
- Il est nécessaire de régler la mise au point de la caméra pour que les particules d'ensemencement puissent être parfaitement discernables entre elles et ainsi permettre que l'image soit correctement traitée.

### 6.3. Thermocouples

La température fait aujourd'hui partie des quantités physiques les plus mesurées.

Un thermocouple est constitué de deux fils métalliques de natures différentes **Figure 6.11**, soudés à l'une de leurs extrémités - appelée "soudure de mesure" ou souvent même "soudure" - et comportant à l'autre extrémité deux "bornes" de raccordement (ou "fils de raccordement"). Ces fils de raccordement sont à la même température ( $\theta_a$ ) qui est généralement la température ambiante ou celle des bornes de l'appareil de mesure.



**Figure 6.11** : Thermocouple

Lorsque  $\theta$  est différent de  $\theta_a$ , il apparaît entre les bornes de raccordement une f.e.m. qui dépend du couple métallique A/B et des températures  $\theta$  et  $\theta_a$ , sans être pour autant proportionnelle à  $(\theta - \theta_a)$  [19].

La nature des fils A et B définit la valeur et la polarité de  $e$ . Lorsque l'appareil de mesure de  $e$  est notablement éloigné de la soudure de mesure, on remplace une partie du thermocouple par un "câble de compensation", de coût moins élevé, mais qui fournit cependant, aux bornes de raccordement avec l'appareil de mesure, la même f.e.m. que le thermocouple lui-même ; la seule condition est que la température de ses connexions avec le thermocouple soit comprise dans un intervalle déterminé, fixé par le constructeur.

Un thermocouple gainé est constitué de différents éléments :

- Les matériaux thermoélectriques ;
- La gaine et l'isolant ;
- La soudure chaude ;

Le câble d'extension et le type de raccord ou de connecteur qui permettent de relier le thermocouple à l'appareil de mesure.

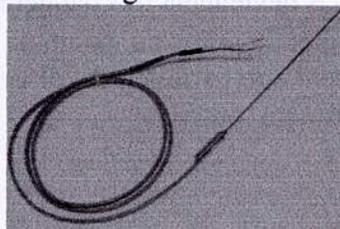
La famille des thermocouples divisée en divers types bien différents, couvre une étendue de mesure allant de  $-250$  °C à environ  $3000$  °C. Les thermocouples sont connus pour leur robustesse et leur souplesse d'utilisation.

La relation liant la tension de sortie d'un thermocouple à la température n'est pas linéaire. La méthode d'interpolation qui tient compte de ces variations fait appel à des polynômes d'approximation complexes.

De ces expressions polynomiales, il a été tiré une table de référence donnant la tension de sortie en fonction de la température de la soudure chaude. Une bonne mesure par thermocouple fait nécessairement appel, de près ou de loin, à ces tables de référence strictement normalisées (voir Annexe 6).

#### Thermocouple type K

Désignation officielle : nickel-chrome/ nickel-aluminium. Le type K est toujours le thermocouple le plus utilisé dans l'industrie **Figure 6.12**.



**Figure 6.12**: Thermocouple type K

Initialement développé pour les milieux oxydants, tous les autres milieux ne lui sont accessibles qu'au prix d'une protection soignée. La température maximale se situe vers  $1100$  °C, mais au-dessus de  $800$  °C l'oxydation provoque une dérive ; le thermocouple sort

progressivement de sa classe de tolérance. Il est toutefois possible de l'exposer brièvement à 1200 °C et sa table de référence s'étend au-delà de 1300 °C. ce thermocouple s'utilise aussi en mesure du froid jusqu'à -180°C [19].

Le couple thermoélectrique type K est très répandu en raison de sa large plage de mesure et de son prix, mais sa stabilité est moins satisfaisante que celle d'autres thermocouples courants.

Code littéral		K			
Conducteurs	Positif	Nickel-chrome Ni-Cr ; KP			
	Négatif	Nickel-Aluminium Ni-Al ; KN			
Variation approximative par degré de la F.E.M générée	Jonction de référence à 0 °C µV/°C à	100 °C	42		
		500 °C	43		
		1000 °C	39		
Tenue en température de la jonction de mesure	Usage continu °C	0 à + 1100			
	Usage intermittent °C	-180 à + 1300			
Classes de Tolérances Normes NF EN 60584-2 :1993		Domaine	Valeur de TI	Domaine	Valeur de TI
	Classe 1	- 40 à + 375 °C	± 1,5 °C	375 à 1000 °C	± 0,004 . t
	Classe 2	- 40 à + 333 °C	± 2,5 °C	333 à 1200 °C	± 0,0075 . t
	Classe 3	- 167 à + 40 °C	± 2,5 °C	-200 à -167 °C	± 0,015 . t

**Tableau 6.2** : Caractéristiques et tolérances des thermocouples type K

#### 6.4. La sonde de concentration

La sonde de concentration est un appareil de mesure du pourcentage volumique de l'oxygène dans un mélange.

Nous l'avons utilisé dans la maquette adiabatique pour mesurer la concentration de l'hélium dans le mélange Air -Hélium, et donc en déduisant la température du mélange.

##### Principe de mesure :

On a 21 % d'O<sub>2</sub> en volume dans l'air ambiante.

- Cas d'Hélium pur :

Loi des gaz parfaits : 
$$P = \rho RT \quad 6.11$$

D'après la loi des gaz parfaits on trouve :

$$\rho_{air} T_{air} = \rho_{hélium} T_{hélium} \quad \text{R et P sont constants,}$$

$$T_{hélium} = \frac{\rho_{air} T_{air}}{\rho_{hélium}} \quad 6.12$$

application numérique :

à la température ambiante T = 20 °C, on trouve

$$T_{hélium} = \frac{1.2 \times 293}{0.167} = 1832^\circ C$$

donc quand on injecte que l'hélium pur dans la maquette, ça correspond à une température des fumées d'incendie de 1832 °C.

- Cas d'un mélange d'hélium et d'air :

Pour reproduire les températures de l'échelle réelle dans l'échelle maquette, on doit varier la densité du mélange jusqu'à atteindre les températures voulues, pour cela on ajoute un pourcentage de l'air frais et on fait les mesure de concentration au niveau du plafond.

D'après la formule 6.12 on trouve :

$$T_{\text{mélange}} = \frac{\rho_{\text{air}} T_{\text{air}}}{\rho_{\text{mélange}}} \quad 6.13$$

avec  $\rho_{\text{mélange}} = X \times \rho_{\text{air}} + Y \times \rho_{\text{helium}}$

et X et Y sont respectivement le pourcentage d'air et d'hélium dans le mélange.

$$X + Y = 1$$

Application numérique :

Lorsque on injecte 50% de l'air et 50% de l'hélium on trouve :

$$\rho_{\text{mélange}} = 0.5 \times 1.2 + 0.5 \times 0.167 = 0.684 \text{ m}^3 / \text{s}$$

$$\Rightarrow T_{\text{mélange}} = \frac{1.2 \times 293}{0.684} = 241 \text{ }^\circ\text{C}$$

La on remarque bien la différence entre ces deux résultats numériques. Donc la quantité de l'air dans le mélange influe beaucoup sur l'élévation de températures dans le cas des fumées d'incendie.

Les autres appareils utilisés dans notre travail sont représentés dans l'annexe, (voir annexe 7).

Classe	Température (°C)	Précision (°C)	Précision (%)
Classe 1	-40 à 375	±1.2	±0.04
Classe 2	-40 à 375	±2.5	±0.075
Classe 3	-40 à 375	±5.0	±0.15

Tableau 6.2. Caractéristiques et tolérances des thermocouples type K

#### 6.4. La sonde de concentration

La sonde de concentration est un appareil de mesure du pourcentage volumique de l'oxygène dans un mélange.

Nous l'avons utilisé dans la machine adaptée pour mesurer la concentration de l'hélium dans le mélange Air-Hélium, et donc en déduisant la température du mélange.

Principe de mesure :

On a 21 % d'O<sub>2</sub> en volume dans l'air ambiant.

\* Cas d'hélium pur

Loi des gaz parfaits :

$$P = \rho R T$$

D'après la loi des gaz parfaits on trouve :

$$\rho_{\text{hélium}} = \frac{P}{R T_{\text{hélium}}}$$

R et P sont constants.

$$T_{\text{hélium}} = \frac{P}{\rho_{\text{hélium}} R}$$

Application numérique :

à la température ambiante T = 20 °C, on trouve :

$$T_{\text{hélium}} = \frac{1.2 \times 293}{0.167} = 1832^\circ\text{C}$$

donc quand on injecte que l'hélium pur dans la machine, ça correspondait à une température des fumées d'incendie de 1832 °C.

\* Cas d'un mélange d'hélium et d'air :

Pour reproduire les températures de l'échelle réelle dans l'échelle machine, on doit varier la densité du mélange jusqu'à atteindre les températures voulues, pour cela on mesure le pourcentage de l'air dans le mélange de concentration au niveau du plateau.

D'après la formule 6.12 on trouve

# **Partie expérimentale**

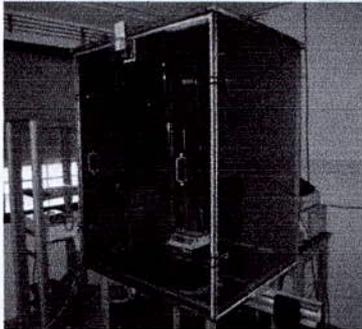
## 7. Maquette thermique (feu)

La maquette thermique ou feu est une pièce destinée à réaliser des essais d'incendies. Elle est constituée d'un seul local, c'est le local source dans lequel le feu se déclenche.

La maquette est à l'échelle 1/5. Elle est parallélépipédique de 1.16 m de long, 0.96 m de large et 1.20 m de hauteur. Elle a deux parois en bois, deux en plexiglas pour la visualisation (**Figures 7.1 et 7.2**), et un système de ventilation mécanique.

Le foyer est constitué d'une nappe de TPH (de formule chimique  $C_{12}H_{26}$ ) de  $5.7 \times 10^{-3} m^2$ , dans un bac de combustion. Il est placé au centre de l'enceinte, en partie basse.

Nous allons dans cette partie présenter les différentes mesures réalisées et étudier les résultats obtenus. Nous pourrons ainsi déterminer quels sont les facteurs les plus importants agissant sur le feu.



**Figure 7.1** : Maquette feu à l'état final



**Figure 7.2** : Intérieur de l'enceinte

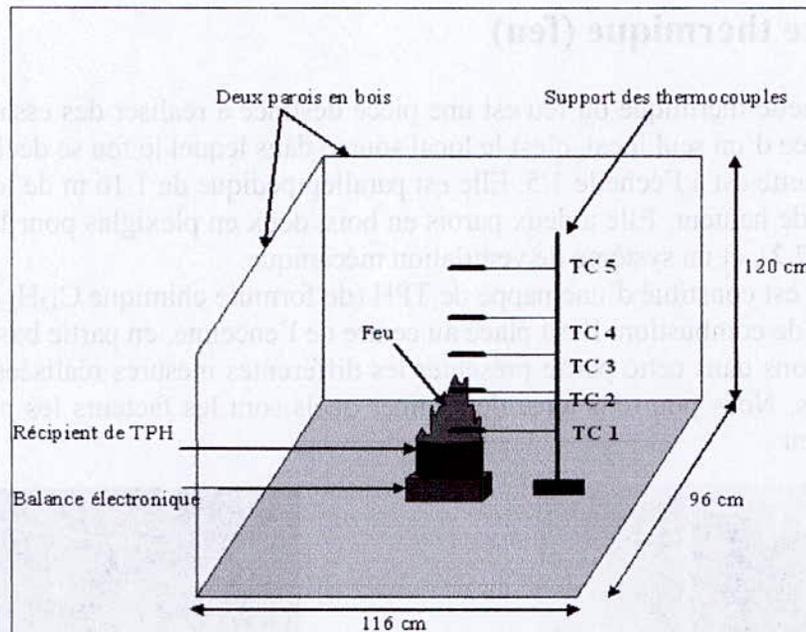
Avant d'installer le système de ventilation, nous avons réalisé plusieurs expériences nous permettant d'observer différents phénomènes.

### 7.1 Combustion de TPH dans l'air ambiant

Les premiers feux ont été réalisés dans une salle, sans protection de la flamme avec le milieu extérieur. Ceci n'était donc pas représentatif des conditions dans lesquelles devraient se dérouler notre étude, mais nous a tout de même servi à constater l'influence de certains paramètres. Le premier essai est donc une première découverte du comportement et de la réaction du feu dans un contexte général.

Dans tous ces essais la boîte est ouverte (**Figure 7.3**), deux parois en bois uniquement, pas de toit et l'extracteur (situé sur le plafond de la salle) est en marche pour évacuer les fumées vers l'extérieur.

Nous avons placé cinq thermocouples tout le long de l'axe de la flamme (**Figure 7.3**), pour mesurer la température de la flamme et des fumées, et une balance électrique pour mesurer la vitesse de la perte de masse du combustible .

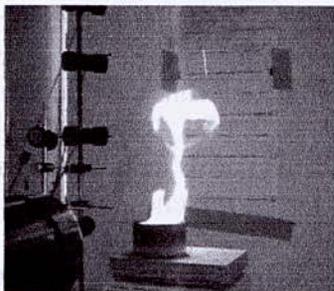


- TC 1 à 0cm
- TC 2 à 5cm
- TC = Thermocouple
- TC 3 à 10 cm
- TC 4 à 15cm
- TC 5 à 33 cm

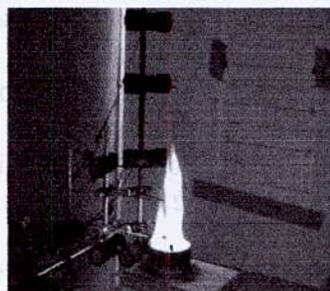
**Figure 7.3 :** Disposition des thermocouples dans l'enceinte ouverte.

Nous remarquons donc que la flamme est très sensible et très réactive à la moindre modification de l'écoulement de l'air (**Figure 7.4 et 7.5**). Par exemple, il suffit de passer devant la flamme pour la faire osciller et donc la perturber ou encore, si la porte d'entrée dans la salle d'expériences passe de la position fermée à la position ouverte (et inversement).

Nous pouvons donc en déduire une remarque importante : le feu ne conserve pas la puissance emmagasinée si les conditions dans lesquelles il évolue changent. Il est alors possible de modifier de manière conséquente un feu en agissant seulement sur la ventilation.

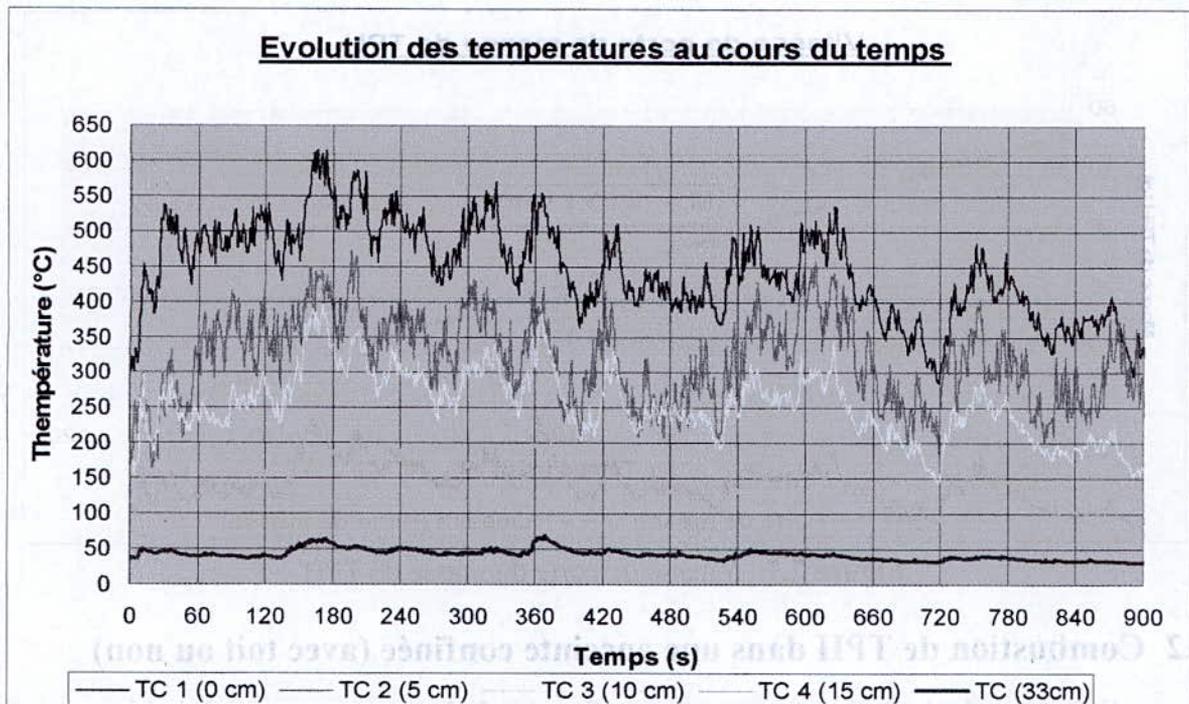


**Figure 7.4 :** Photo flamme perturbée



**Figure 7.5 :** Photo flamme normale

D'après les courbes de températures (**Figure 7.6**), nous pouvons constater que la flamme n'est pas stable; ceci est dû à la grande fluctuation de la température au cours du temps. Cette fluctuation est d'autant plus grande que la température est élevée. Nous sommes en présence d'une flamme agitée.



**Figure 7.6:** Evolution des températures au cours du temps

La deuxième remarque concerne la température élevée de la flamme par rapport aux fumées. Cette température varie fortement à l'intérieur de la flamme. La température la plus chaude se trouve en bas de la flamme (environ 550°C) pour diminuer verticalement tout le long de la flamme. (Haut de flamme à environ 200°C).

La distinction de la flamme des fumées s'est effectuée via des photos des séquences vidéos. La hauteur de flamme varie entre 15 et 25 cm.

La troisième remarque concerne la température des fumées qui reste à peu près constante au cours du temps (de l'ordre de 50°C).

La dernière constatation est que la température de la flamme est plus chaude le long de la colonne de chaleur (centre du feu) que légèrement à l'extérieur de celle-ci. En effet pour une même hauteur on peut remarquer des différences notables. Par exemple, pour la hauteur de 15 cm, on a une température au centre de la flamme de l'ordre de 350°C contre 100°C au bord de la flamme.

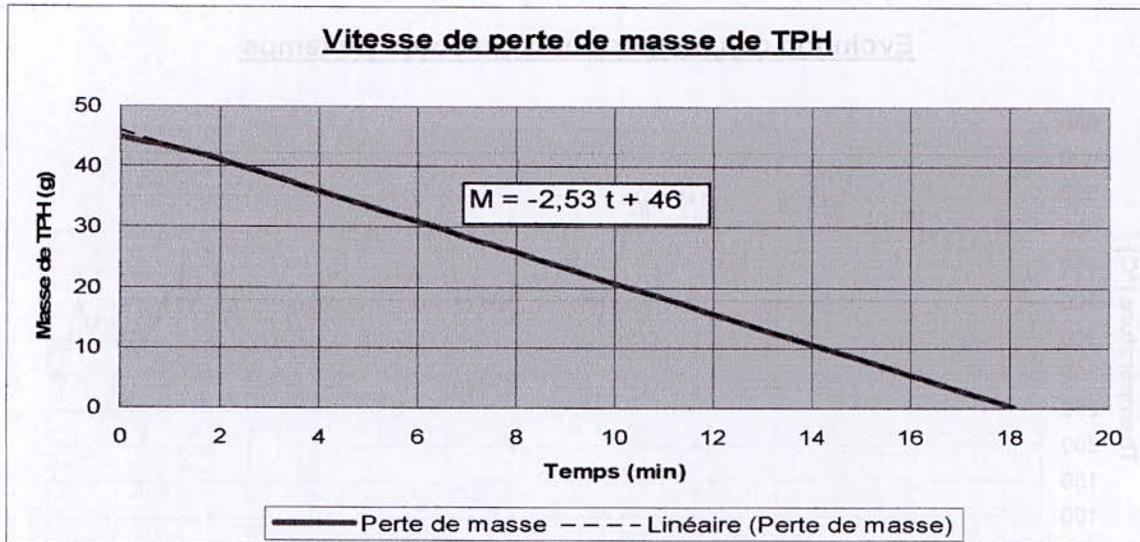
Nous avons effectué plusieurs essais de perte de masse dans les conditions énoncées précédemment. Nous découvrons dans un premier temps que la perte de masse reste sensiblement constante lors d'un essai (**Figure 7.7**). Cela se confirme aussi sur les autres essais effectués par la suite et ce, quelques soient les conditions d'expérience.

Le débit massique est de 2,53 g/min qui correspond à une puissance du feu de 1.85 KW.

Ces pertes de masse varient très peu d'un essai à l'autre. En effet, elles sont comprises entre 1.64 g/min pour le premier essai et 2.53 g/min pour le deuxième, et donc une puissance du feu de 1.20 KW à 1.85KW.

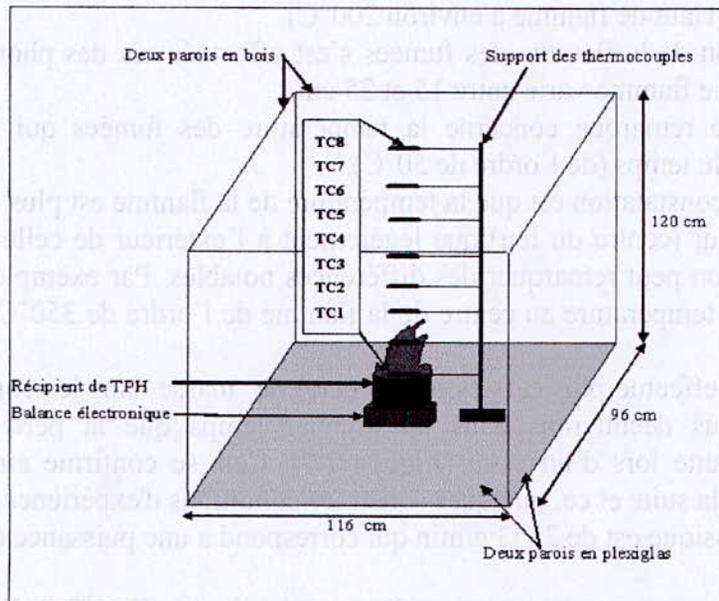
Ces différences peuvent s'expliquer par le fait que les conditions de départ sont légèrement différentes (pas tout à fait la même température ambiante d'un essai à l'autre, pas le même taux d'oxygène de l'air par exemple) ceci est dû au fait que les expériences sont réalisées à des jours différents, donc dans des conditions différentes. Ces différences s'expliquent aussi par le fait que parfois les conditions sont variables en cours d'expérience. Il est arrivé qu'il y ait apport d'oxygène par l'ouverture d'une porte ou d'une fenêtre.

Note : les vidéos sont disponibles sur le CD-ROM joint à ce document.



## 7.2 Combustion de TPH dans une enceinte confinée (avec toit ou non)

Suite aux résultats obtenus, nous avons fermé la boîte sur ses quatre côtés (deux parois en bois et les deux autres en plexiglas), et mis l'extracteur en marche pour évacuer les fumées vers l'extérieur. Nous avons placé huit thermocouples répartis sur l'axe de la flamme (**Figure 7.8**), pour mesurer l'évolution de la température au cours du temps. Et aussi les pertes de masse.



- TC1 à 0 cm
- TC2 à 15 cm
- TC3 à 30 cm
- TC4 à 45 cm
- TC5 à 60 cm
- TC6 à 75 cm
- TC7 à 90 cm
- TC8 à 100 cm.

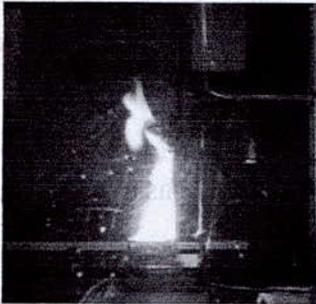
**Figure 7.8:** Disposition des thermocouples à l'intérieur de l'enceinte.

Des mesures ont également été réalisées dans l'enceinte sans le toit, mais avec une ôte (aspirante d'un débit supérieur à 1000 m<sup>3</sup>/heure juste au dessus de l'enceinte), pendant huit minutes, et après nous avons mis le toit jusqu'à l'épuisement du combustible.

Cette expérience nous a permis d'évaluer l'influence d'un écoulement d'air vertical sur la flamme et ce que cela entraîne. Nous constatons une légère élévation de la hauteur de la flamme (**Figure 7.9**) ainsi qu'une élévation de la perte de masse. La flamme est régulière dans

ses mouvements même si elle n'est jamais fine et étirée comme dans le cas de l'enceinte totalement fermée.

Il se trouve que dans une enceinte fermée, le feu est très calme et très régulier. La flamme est fine, étirée et constante (**Figure 7.10**). La hauteur de flamme ne varie presque pas ainsi que la perte de masse. La température a également une faible fluctuation aux différentes hauteurs.



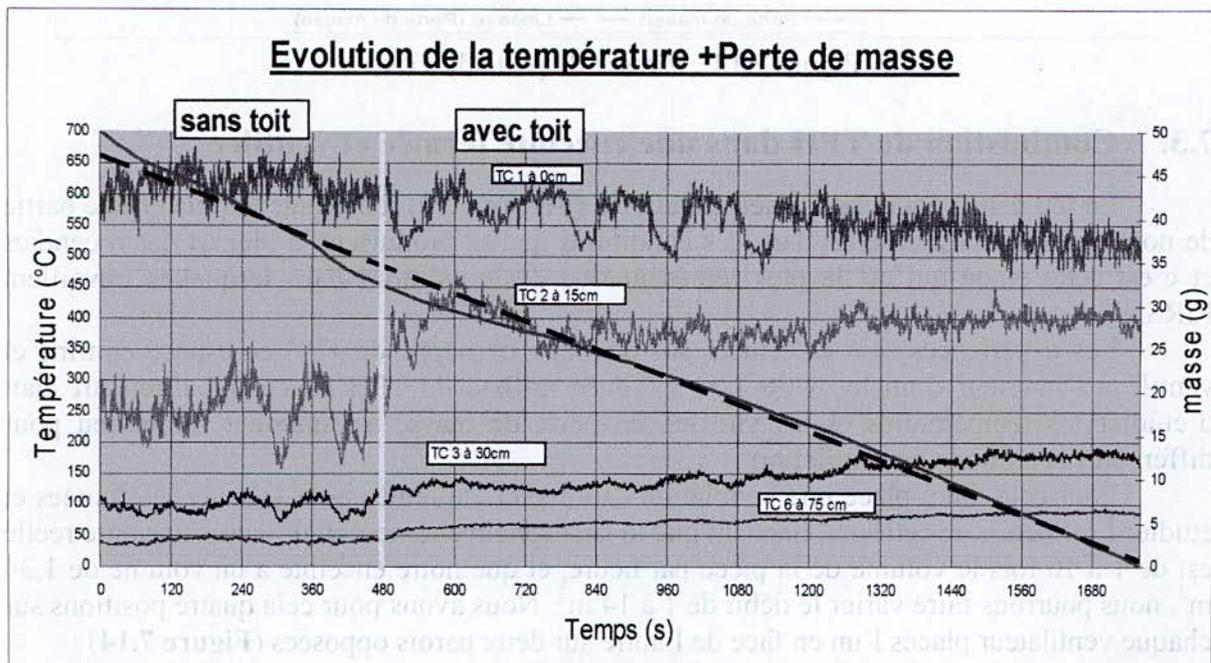
**Figure 7.9** : Flamme sans toit

**Figure 7.10** : Flamme avec toit Flamme étirée

Nous voyons très vite d'après la **Figure 7.11** l'influence du toit sur les températures et donc sur les mouvements de la flamme. Les températures varient beaucoup moins avec le toit et la température de l'enceinte a tendance à augmenter.

Les légères fluctuations de température observées proviennent sûrement du fait que l'enceinte n'est pas totalement hermétique. Nous avons en effet des ouvertures à la base de l'enceinte pour laisser passer les fils des thermocouples, et de plus le toit présente de légères ouvertures par lesquelles la fumée peut s'échapper.

La fumée dégagée est confinée dans l'enceinte et ne semble pas perturber la flamme. Elle se développe progressivement et finit par envahir l'enceinte. On remarque alors qu'elle est beaucoup plus concentrée en hauteur et que l'on en trouve seulement une fine couche en bas de l'enceinte. Nous pouvons donc supposer que la fumée suivra probablement les mouvements d'ensemble de l'air à l'intérieur d'un bâtiment.



**Figure 7.11** : Evolution de la température et la perte de masse au cours du temps

Avec une plus grande quantité de TPH, le feu aurait sûrement consommé trop d'oxygène dans la pièce pour continuer à se consumer (taux inférieur à 11% d'oxygène dans

l'air). Il se serait donc éteint mais le dégagement de vapeurs du TPH aurait continué. A ce moment là, il faut absolument éviter d'introduire à nouveau de l'oxygène sous risque que le mélange vapeur de TPH et oxygène donne lieu à une réaction chimique explosive. C'est un des paramètres qui donne lieu à des débats sur le fait qu'il faut maintenir ou non la ventilation pendant un incendie. En effet si la ventilation est maintenue, on maintient par la même l'incendie et la propagation des fumées, mais si la ventilation est stoppée, le risque d'explosion est augmenté (personnes qui rentre dans la salle incendiée, fenêtre qui se brise...).

Cette expérience nous permet donc de remarquer que la fumée a une faible importance sur la flamme, mais qu'elle a une importance sur la température ambiante de la pièce et bien sûr sur la visibilité.

Nous pouvons également ajouter que la flamme dans une enceinte fermée semble moins dangereuse car elle est bien plus régulière et ne risque donc pas d'atteindre de la « nourriture » potentielle à proximité.

Avec le changement de conditions, nous pouvons constater que la perte de masse diminue au cours du temps (par rapport aux essais précédents), et aussi la vitesse de perte de masse diminue lorsque on passe de l'état sans toit à l'état confiné **Figure 7.12**.

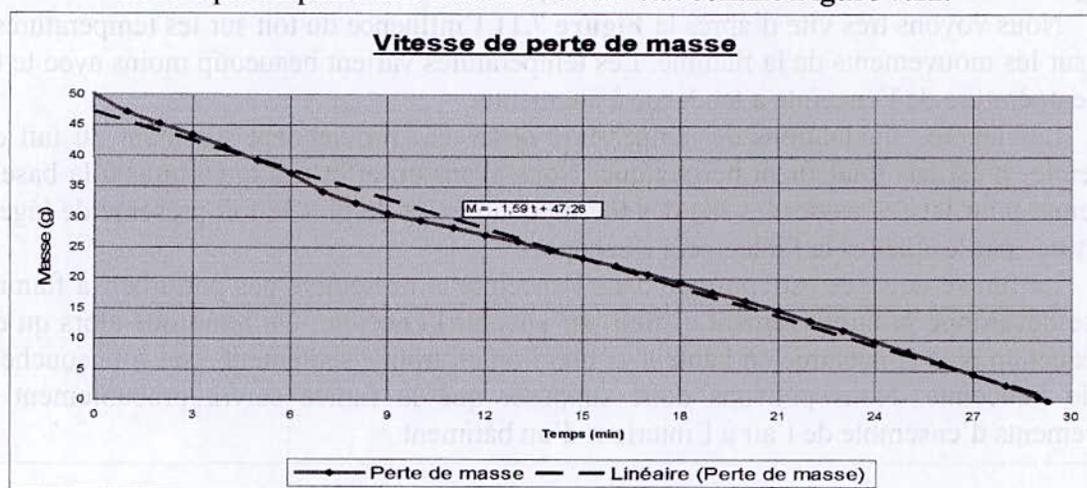


Figure 7.12: Vitesse de perte de masse

### 7.3. Combustion de TPH dans une enceinte fermée et ventilée

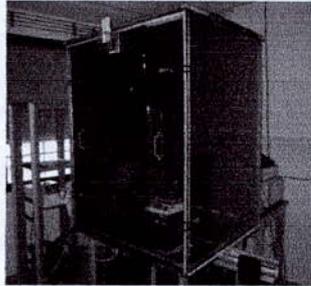
Le feu dans l'enceinte fermée et ventilée (**Figure 7.13**) représente la plus grosse partie de notre travail. C'est en effet dans ces conditions que se produisent la plupart des incendies et c'est cette étude qui est la plus représentative des conditions dans lesquelles travaillent l'IRSN.

Les expériences sont effectuées sur des feux de nappe de TPH en espace confiné et ventilé à l'intérieur d'un local de  $1,34 \text{ m}^3$  avec un bac de TPH au centre, l'objectif était d'étudier les températures et les vitesses de perte de masse à l'intérieur du milieu pour différentes conditions de ventilation.

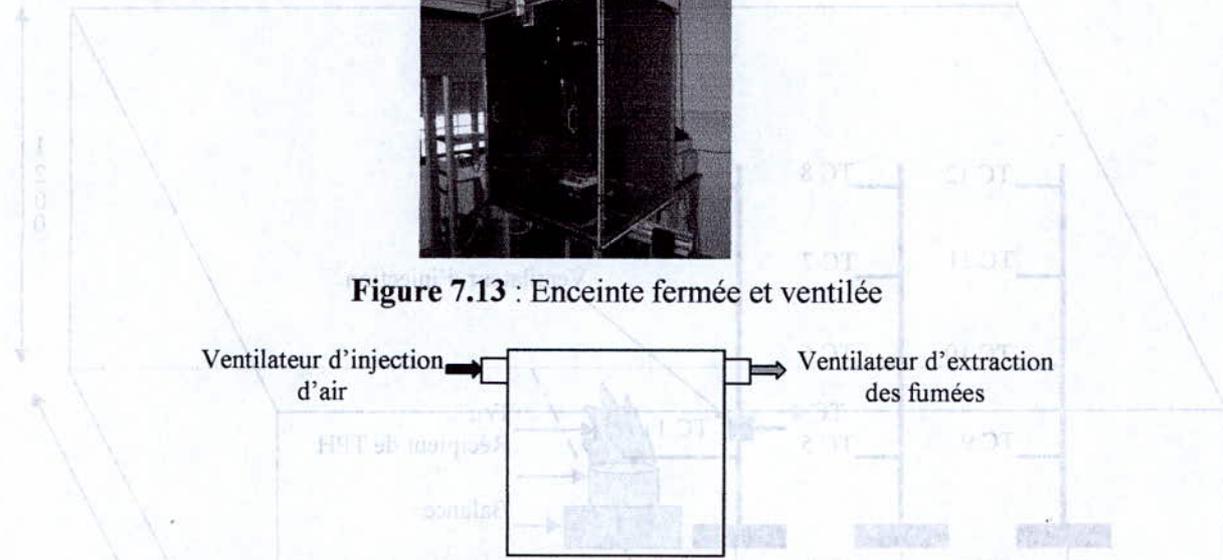
Pour cela, on a placé une ventilation calibrée et étalonnée pour évacuer les fumées et étudier l'influence de celles-ci. Sachant que le taux renouvellement d'air dans l'enceinte réelle est de 1 à 10 fois le volume de la pièce par heure, et que notre enceinte a un volume de  $1,34 \text{ m}^3$ , nous pourrions faire varier le débit de 1 à  $14 \text{ m}^3$ . Nous avons pour cela quatre positions sur chaque ventilateur placés l'un en face de l'autre sur deux parois opposées (**Figure 7.14**) :

- Position 1 :  $Q_v = 3,5 \text{ m}^3/\text{h}$  soit un Taux de Renouvellement de 3.
- Position 2 :  $Q_v = 6,4 \text{ m}^3/\text{h}$  soit un Taux de Renouvellement de 5.
- Position 3 :  $Q_v = 8,9 \text{ m}^3/\text{h}$  soit un Taux de Renouvellement de 7.
- Position 4 :  $Q_v = 11,5 \text{ m}^3/\text{h}$  soit un Taux de Renouvellement de 9.

Nous allons donc faire varier ces positions afin de trouver la meilleure condition pour limiter l'incendie.



**Figure 7.13 :** Enceinte fermée et ventilée



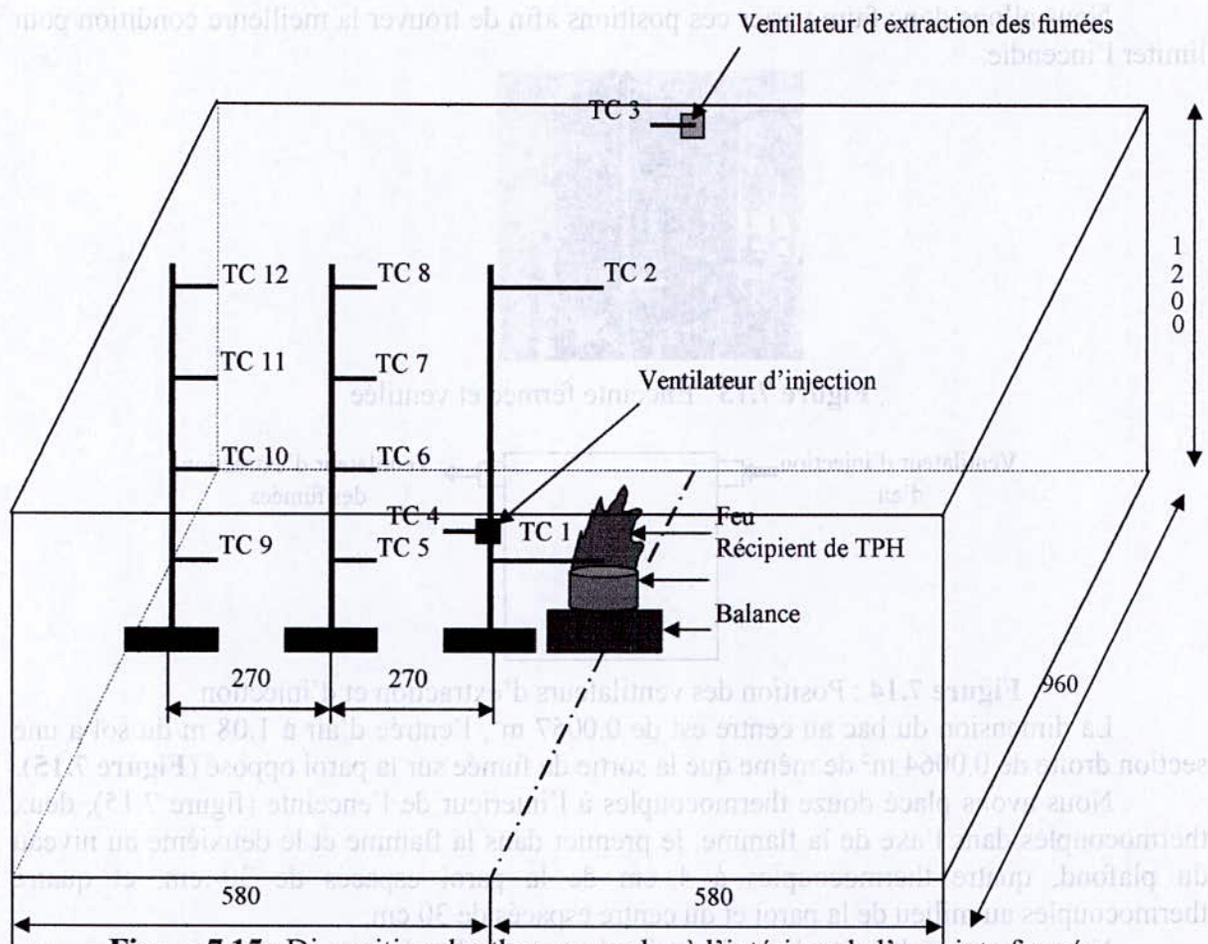
**Figure 7.14 :** Position des ventilateurs d'extraction et d'injection

La dimension du bac au centre est de  $0.0057 \text{ m}^2$ , l'entrée d'air à 1.08 m du sol a une section droite de  $0.0064 \text{ m}^2$  de même que la sortie de fumée sur la paroi opposé (**Figure 7.15**).

Nous avons placé douze thermocouples à l'intérieur de l'enceinte (figure 7.15), deux thermocouples dans l'axe de la flamme, le premier dans la flamme et le deuxième au niveau du plafond, quatre thermocouples à 4 cm de la paroi espacés de 30 cm, et quatre thermocouples au milieu de la paroi et du centre espacés de 30 cm.

Nous avons gardé cette disposition des thermocouples dans tous les essais qui suivent. Les différentes configurations sont :

- débit d'entrée inférieur au débit de sortie ;
- débit d'entrée égal au débit de sortie ;
- débit d'entrée supérieur au débit de sortie.



**Figure 7.15 :** Disposition des thermocouples à l'intérieur de l'enceinte fermée.

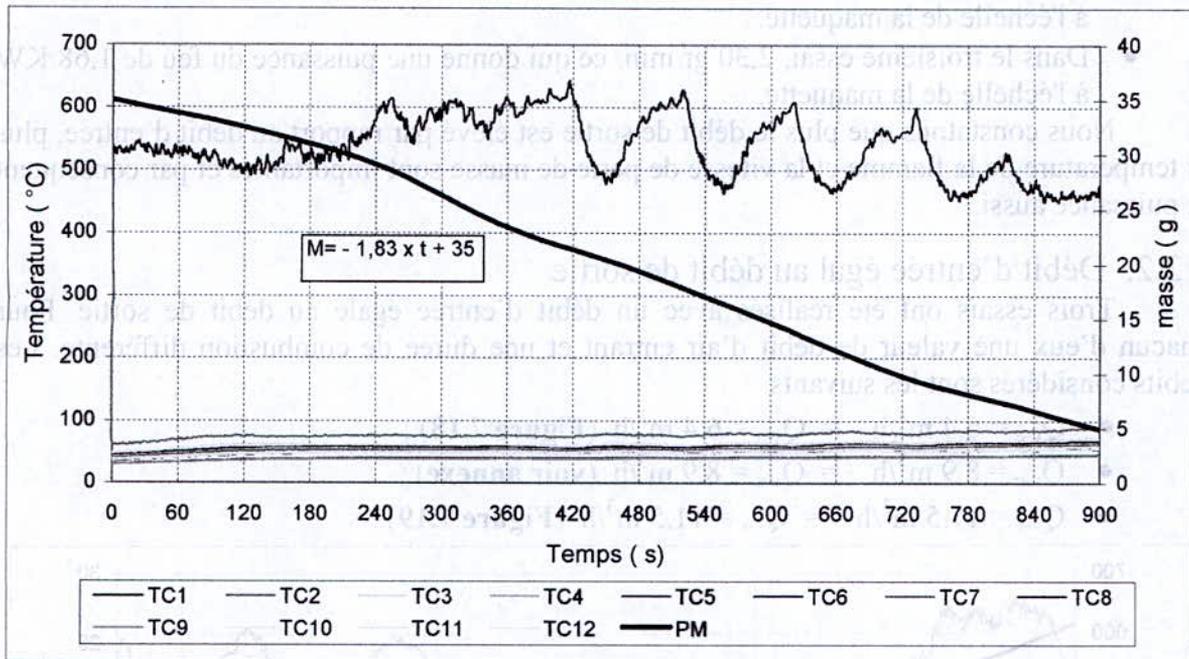
### 7.3.1. Débit d'entrée inférieur au débit de sortie

Trois essais ont été réalisés avec un débit d'entrée inférieur au débit de sortie. Pour chacun d'eux une valeur de débit d'air entrant et une durée de combustion différente. Les débits considérés sont les suivants :

- $Q_{v-e} = 6.4 \text{ m}^3/\text{h} < Q_{v-s} = 8.9 \text{ m}^3/\text{h}$  (**Figure 7.16**) ;
- $Q_{v-e} = 6.4 \text{ m}^3/\text{h} < Q_{v-s} = 11.5 \text{ m}^3/\text{h}$  (**Figure 7.17**) ;
- $Q_{v-e} = 8.9 \text{ m}^3/\text{h} < Q_{v-s} = 11.5 \text{ m}^3/\text{h}$  (**voir annexe**).

Les paramètres mesurés pour cette étude sont:

- L'évolution de la masse de combustible au cours du temps ;
- La températures dans la flamme ;
- Les températures des fumées.

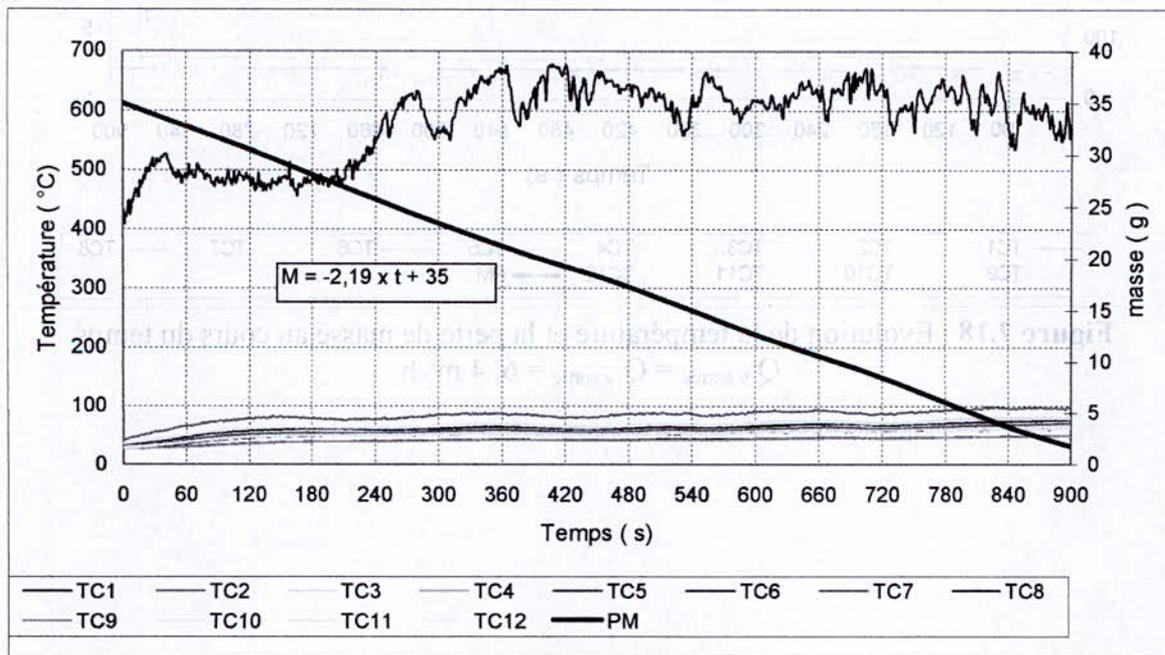


**Figure 7.16 :** Evolution de la température et la perte de masse au cours du temps

$$Q_{v \text{ entrée}} = 6.4 \text{ et } Q_{v \text{ sortie}} = 8.9 \text{ m}^3/\text{h}$$

On remarque que la température de la flamme oscille entre 460 °C et 640 °C (figure 7.16), et les températures des fumées ne dépassent pas 90 °C.

La vitesse de perte de masse est à peu près constante est égale à 1.83 g/min, ce qui correspond à une puissance maquette de 1.34 KW.



**Figure 7.17:** Evolution de la température et la perte de masse au cours du temps

$$Q_{v \text{ entrée}} = 6.4 \text{ et } Q_{v \text{ sortie}} = 11,5 \text{ m}^3/\text{h}$$

Les vitesses de pertes de masse pour les trois essais sont :

- Dans le premier essai, 1.83 gr/min. Ce qui donne une puissance du feu de 1.34 KW à l'échelle de la maquette.
- Dans le deuxième essai, 2,19 gr/min. ce qui donne une puissance du feu de 1.60 KW

à l'échelle de la maquette.

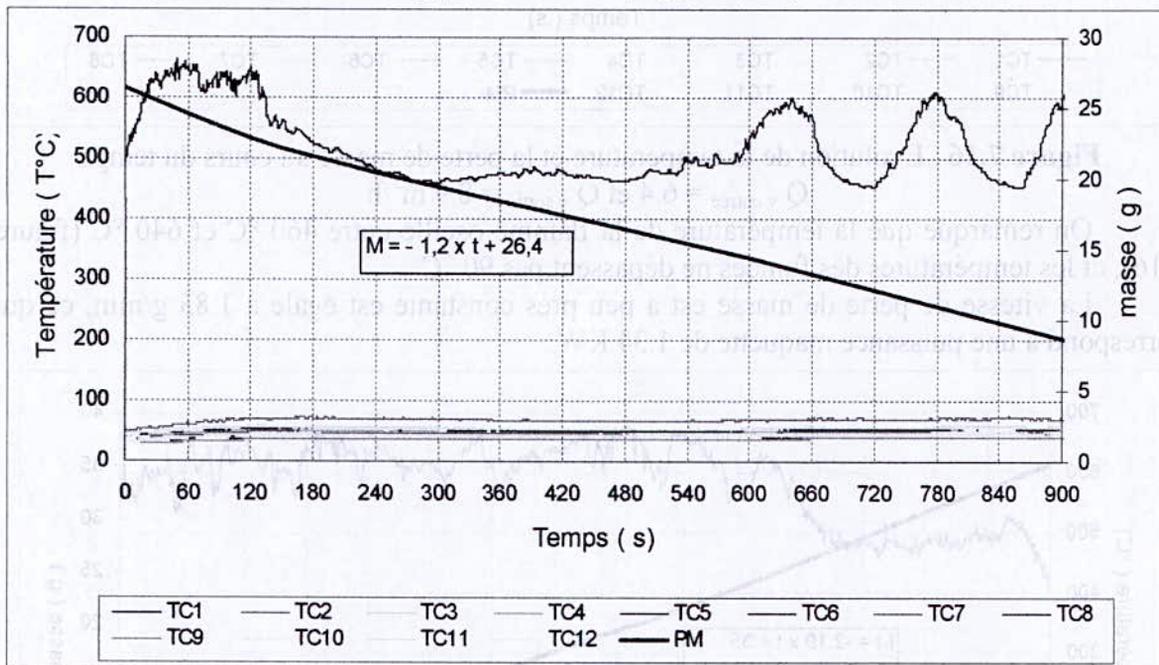
- Dans le troisième essai, 2,30 gr/min. ce qui donne une puissance du feu de 1.68 KW à l'échelle de la maquette.

Nous constatons que plus le débit de sortie est élevé par rapport au débit d'entrée, plus la température de la flamme et la vitesse de perte de masse sont importantes et par conséquent la puissance aussi.

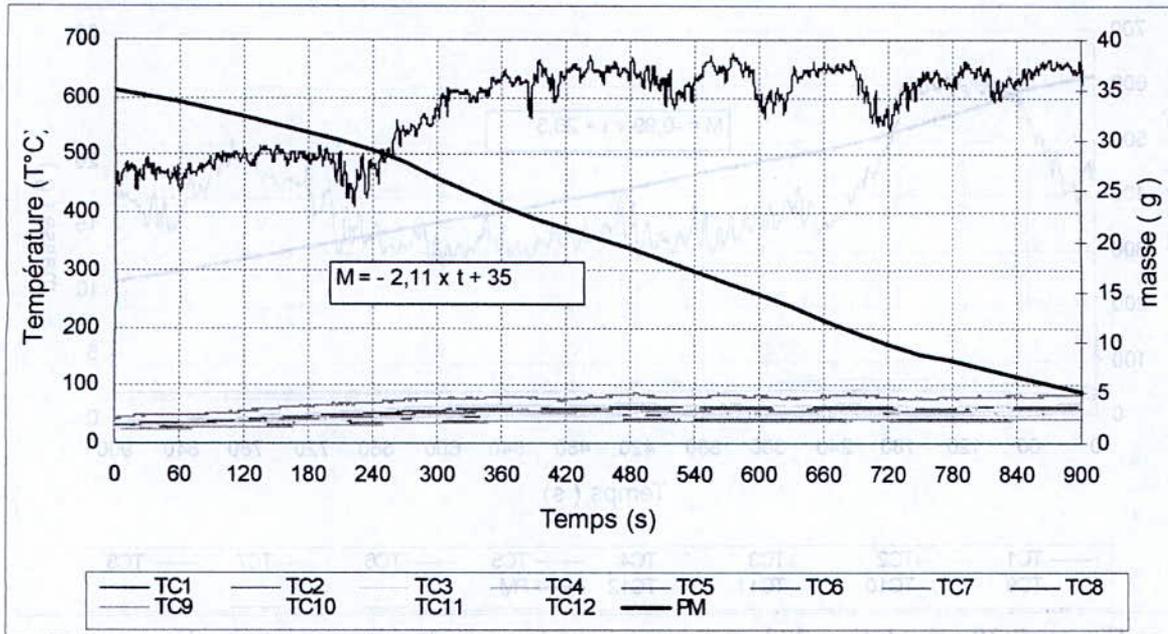
### 7.3.2. Débit d'entrée égal au débit de sortie

Trois essais ont été réalisés avec un débit d'entrée égale au débit de sortie. Pour chacun d'eux une valeur de débit d'air entrant et une durée de combustion différente. Les débits considérés sont les suivants :

- $Q_{v-e} = 6.4 \text{ m}^3/\text{h} = Q_{v-s} = 6.4 \text{ m}^3/\text{h}$  (**Figure 7.18**) ;
- $Q_{v-e} = 8.9 \text{ m}^3/\text{h} = Q_{v-s} = 8.9 \text{ m}^3/\text{h}$  (**voir annexe**) ;
- $Q_{v-e} = 11.5 \text{ m}^3/\text{h} = Q_{v-s} = 11.5 \text{ m}^3/\text{h}$  (**Figure 7.19**).



**Figure 7.18** : Evolution de la température et la perte de masse au cours du temps  
 $Q_{v \text{ entrée}} = Q_{v \text{ sortie}} = 6,4 \text{ m}^3/\text{h}$



**Figure 7.19** : Evolution de la température et la perte de masse au cours du temps

$$Q_{v \text{ entrée}} = Q_{v \text{ sortie}} = 11,5 \text{ m}^3/\text{h}$$

Les vitesses de pertes de masses pour les trois essais sont:

- Dans le premier essai, 1,2 gr/min, ce qui donne une puissance du feu de 0.88 KW à l'échelle de la maquette.
- Dans le deuxième essai, 1,68 gr/min, ce qui donne une puissance du feu de 1.23 KW à l'échelle de la maquette.
- Dans le troisième essai, 2.11 gr/min, ce qui donne une puissance du feu de 1.54 KW à l'échelle de la maquette.

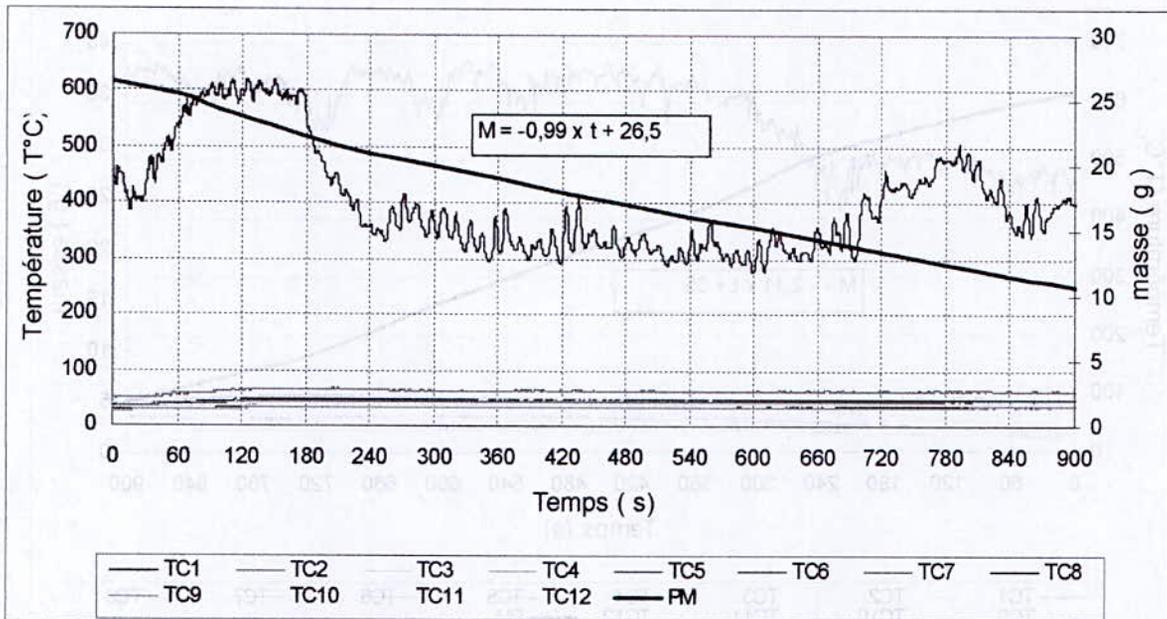
Nous constatons également une augmentation de la température et l'apparition d'un cycle de variation des températures.

Nous constatons toujours une augmentation générale de la température de l'enceinte et aussi de perte de masse, donc la puissance du feu augment quand le taux de renouvellement augment.

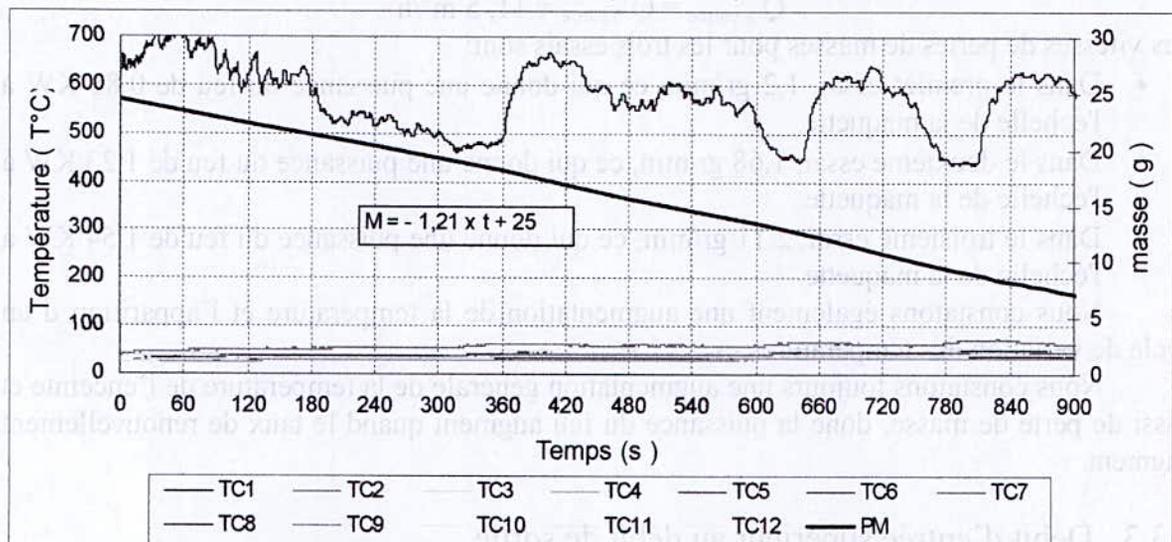
### 7.3.3. Débit d'entrée supérieur au débit de sortie

Deux essais ont été réalisés avec un débit d'entrée supérieur au débit de sortie. Pour chacun d'eux une valeur de débit d'air entrant et une durée de combustion différente. Les débits considérés sont les suivants :

- $Q_{v-e} = 11.5 \text{ m}^3/\text{h} > Q_{v-s} = 6.4 \text{ m}^3/\text{h}$  (**Figure 7.20**) ;
- $Q_{v-e} = 11.5 \text{ m}^3/\text{h} > Q_{v-s} = 8.9 \text{ m}^3/\text{h}$  (**Figure 7.21**) ;



**Figure 7.20 :** Evolution de la température et la perte de masse au cours du temps  
 $Q_{v \text{ entrée}} = 11,5$  et  $Q_{v \text{ sortie}} = 6,4 \text{ m}^3/\text{h}$



**Figure 7.21 :** Evolution de la température et la perte de masse au cours du temps  
 $Q_{v \text{ entrée}} = 11,5$  et  $Q_{v \text{ sortie}} = 8.9 \text{ m}^3/\text{h}$

Les vitesses de pertes de masses pour les deux essais sont:

- Le premier essai, 0.99 gr/min, ce qui donne une puissance du feu de 0.72 KW à l'échelle de la maquette.
- Le deuxième essai, 1.21 gr/min, ce qui donne une puissance du feu de 0.89 KW à l'échelle de la maquette.

Nous constatons que plus le débit de sortie est faible pour une même position à l'entrée plus la vitesse de perte de masse et les températures à l'intérieur de l'enceinte sont faibles.

Le cycle de variation de température est beaucoup plus long à se mettre en place et de plus il n'est pas franchement perceptible.

- **Etude de la perte de masse du carburant**

Nous remarquons que plus la ventilation est élevée (pour une même position à l'entrée qu'à la sortie) plus la vitesse de combustion est importante.

Enfin nous remarquons que lorsque le débit d'air en sortie est supérieur au débit d'air

en entrée, la vitesse de combustion est plus élevée.

- **Etude de la température au cours du temps à différentes positions**

Nous constatons que quel que soit les conditions de ventilation, la température de flamme est toujours du même ordre de grandeur. (Environ 550°C)

Cette température de flamme fluctue toujours autant mais suit parfois une oscillation périodique. En effet à certains moments la flamme a tendance à s'étirer pendant un certain temps. Ces oscillations représentées sur les graphes des températures correspondent à ces moments où la flamme s'étire puis se rallonge. Ainsi la flamme a un cycle de vie. Lors de ce cycle la flamme s'étire de son long puis devient fortement perturbée et ainsi de suite.

Nous constatons aussi que les températures des fumées sont toujours les mêmes quel que soit les conditions de ventilation. Ces températures des fumées sont presque constants; elle fluctuent très peu. (Entre 40 et 100°C).

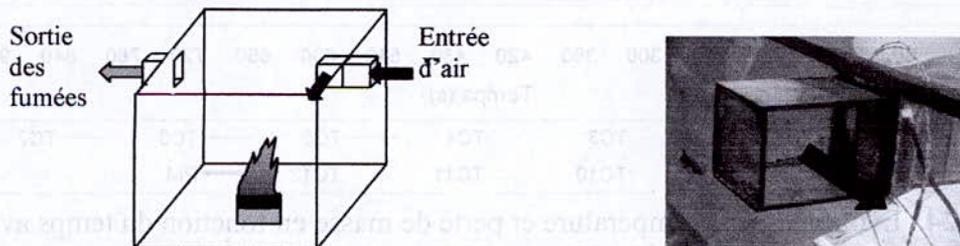
Nous constatons que la répartition des températures des fumées s'effectue toujours de la même manière quel que soit les conditions de ventilation. C'est-à-dire de la façon suivante :

- Les fumées les plus chaudes se trouvent toujours sous le toit et près du ventilateur de sortie puisqu'elles sont stoppées par le toit puis ont tendance à descendre vers le bas de la boîte. (les températures chaudes des fumées sont indiquées par les thermocouples N°2,3,8 et 12 )
- La fumée la plus chaude se trouve le long de la colonne de chaleur (thermocouple 2)
- Les fumées les plus froides se trouvent près du sol (les thermocouples N°5 et 9)
- La fumée la plus froide se trouve à la paroi au niveau de 0 cm

La température du ventilateur de sortie est toujours plus élevée que la température du ventilateur d'entrée.

#### 7.4. Le feu dans une enceinte fermée et ventilée avec déviation de l'air

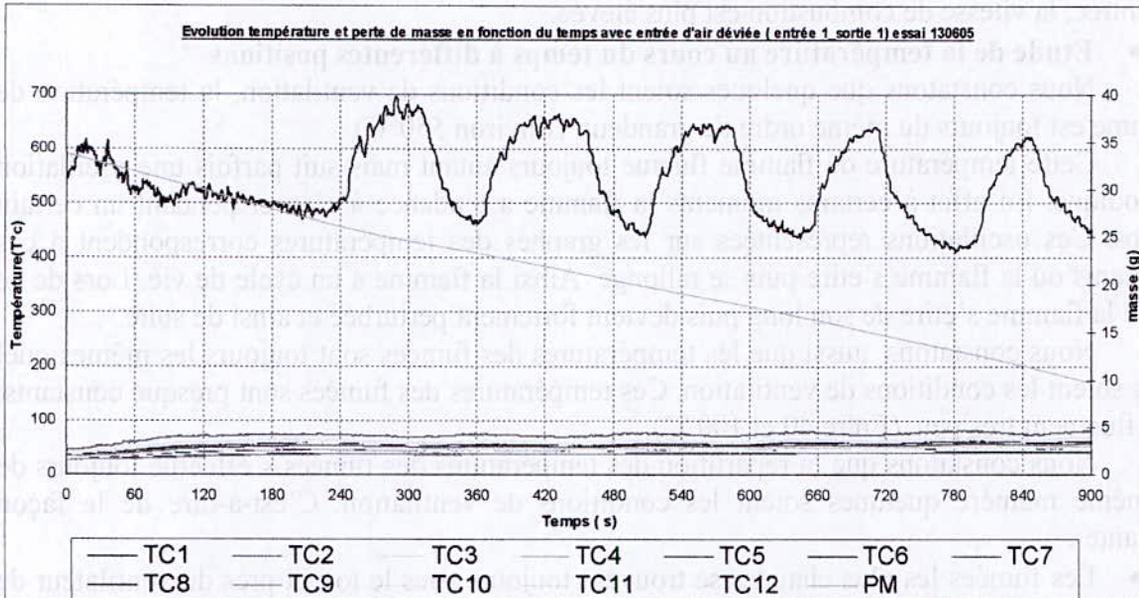
Pour empêcher le couplage entre l'entrée et la sortie d'air (les bouches sont en face à face), nous avons dévié la bouche d'entrée (soufflage) de 90° vers la gauche à l'aide d'une boîte coudée (**Figure 7.22**) à la sortie du ventilateur.



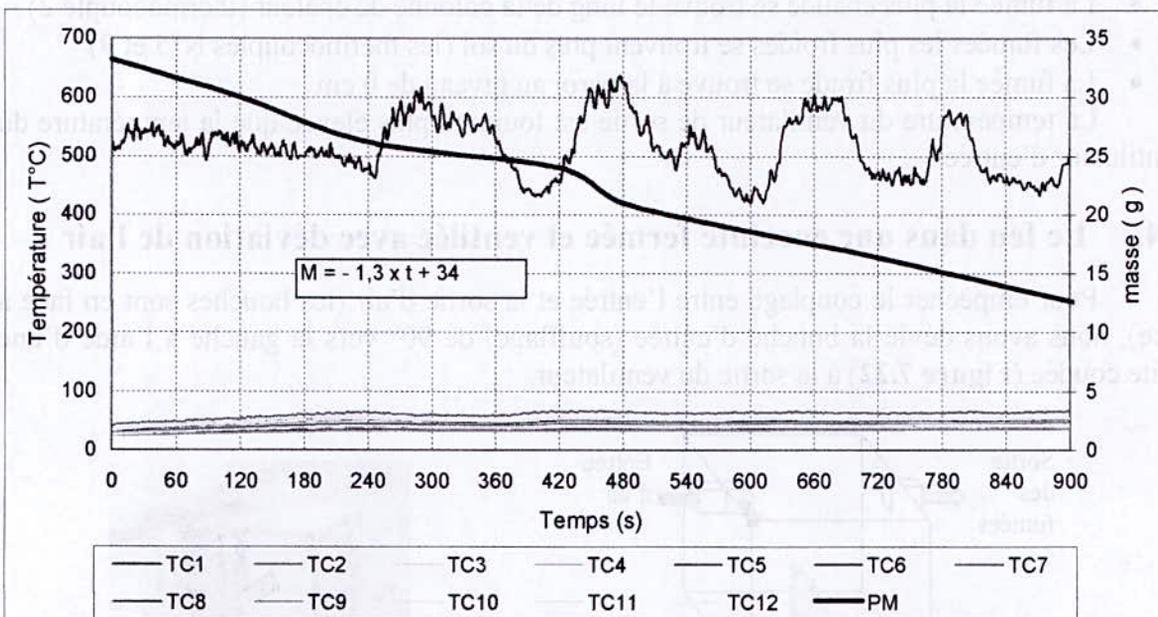
**Figure 7.22** : Bouche de déviation de l'air

Nous avons refait les mêmes essais que précédemment, dont le but est d'étudier l'influence de déviation de l'air sur la vitesse de perte de masse et les températures à l'intérieur de l'enceinte.

- $Q_{v-e} = Q_{v-s} = 6.4 \text{ m}^3/\text{h}$  (**Figure 7.23**) ;
- $Q_{v-e} = Q_{v-s} = 11.5 \text{ m}^3/\text{h}$  (**Figure 7.24**) ;



**Figure 7.23** : Evolution de la température et perte de masse en fonction du temps avec entrée d'air déviée,  $Q_{v\text{ entrée}} = Q_{v\text{ sortie}} = 6,4 \text{ m}^3/\text{h}$



**Figure 7.24** : Evolution de la température et perte de masse en fonction du temps avec entrée d'air déviée,  $Q_{v\text{ entrée}} = Q_{v\text{ sortie}} = 11,5 \text{ m}^3/\text{h}$

Les vitesses de pertes de masses pour les trois essais sont:

- Dans le premier essai, 1,59 gr/min, ce qui donne une puissance du feu de 1.16 KW à l'échelle de la maquette.
- Dans le deuxième essai, 1,56 gr/min, ce qui donne une puissance du feu de 1.14 KW à l'échelle de la maquette.
- Dans le troisième essai, 1,31 gr/min, ce qui donne une puissance du feu de 0.95 KW à l'échelle de la maquette.

On constate que plus le taux de renouvellement est important plus la consommation du combustible est moins important et les températures sont faibles (**figures 7.23 et 7.24**).

Donc la vitesse de perte de masse et les températures sont inversement proportionnelles au taux de renouvellement.

Nous avons obtenu des résultats différents des premier essais (ventilation sans déviation).

- $Q_{v-e} = 6.4 \text{ m}^3/\text{h} < Q_{v-s} = 8.9 \text{ m}^3/\text{h}$  (Figure 7.25) ;
- $Q_{v-e} = 6.4 \text{ m}^3/\text{h} < Q_{v-s} = 11.5 \text{ m}^3/\text{h}$  (Figure 7.26) ;

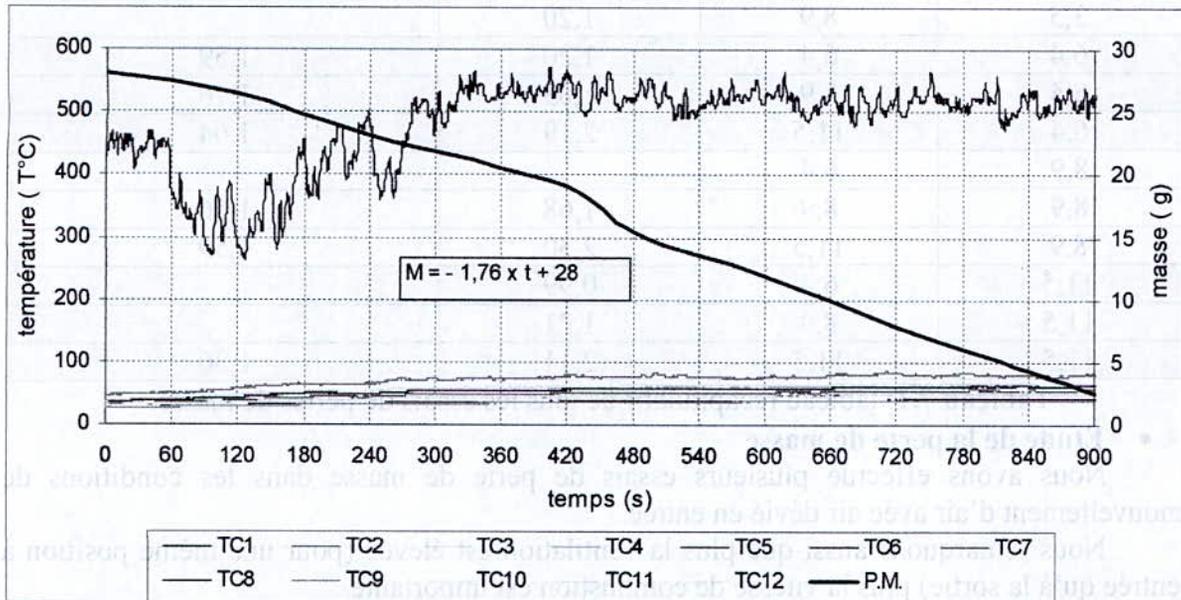


Figure 7.25 : Evolution de la température et perte de masse en fonction du temps avec entrée d'air déviée,  $Q_{v \text{ entrée}} = 6,4$  et  $Q_{v \text{ sortie}} = 8,9 \text{ m}^3/\text{h}$

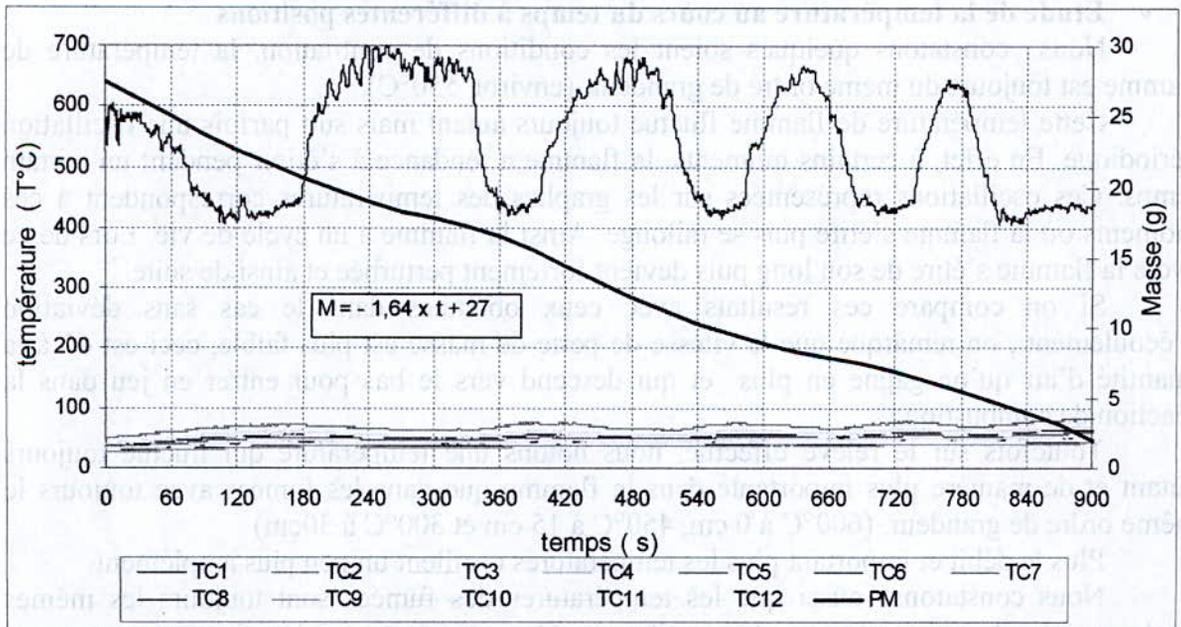


Figure 7.26 : Evolution de la température et perte de masse en fonction du temps avec entrée d'air déviée,  $Q_{v \text{ entrée}} = 6,4$  et  $Q_{v \text{ sortie}} = 11,5 \text{ m}^3/\text{h}$

- Le débit massique est de 1,77 gr/min, ce qui donne une puissance du feu de 1.30 KW.
  - Le débit massique est de 1,64 gr/min, ce qui donne une puissance du feu de 1.20 KW.
  - Le débit massique est de 1,59 gr/min, ce qui donne une puissance du feu de 1.16 KW.
- On donne ci dessous un tableau récapitulatif de tous les essais de perte de masse :

Débit d'injection de l'air (m <sup>3</sup> /h)	Débit d'extraction (m <sup>3</sup> /h)	La vitesse de perte de masse (g/min)	La vitesse de perte de masse avec déviation de l'écoulement de l'air (g/min)
3,5	3,5	1,36	
3,5	6,4	1,37	
3,5	8,9	1,20	
6,4	6,4	1,20	1,59
6,4	8,9	1,83	1,76
6,4	11,5	2,19	1,64
8,9	6,4		
8,9	8,9	1,68	1,56
8,9	11,5	2,30	1,59
11,5	6,4	0,99	
11,5	8,9	1,21	
11,5	11,5	2,11	1,30

**Tableau 7.1:** tableau récapitulatif de tous les essais de pertes de masse.

- **Etude de la perte de masse**

Nous avons effectué plusieurs essais de perte de masse dans les conditions de renouvellement d'air avec air dévié en entrée.

Nous remarquons aussi que plus la ventilation est élevée (pour une même position à l'entrée qu'à la sortie) plus la vitesse de combustion est importante.

Nous remarquons que l'apport de la déviation nous fait diminuer la vitesse de combustion du combustible comparée aux mêmes essais sans déviation.

- **Etude de la température au cours du temps à différentes positions**

Nous constatons quelques soient les conditions de ventilation, la température de flamme est toujours du même ordre de grandeur. (environ 550°C).

Cette température de flamme fluctue toujours autant mais suit parfois une oscillation périodique. En effet, à certains moments, la flamme a tendance à s'étirer pendant un certain temps. Ces oscillations représentées sur les graphes des températures correspondent à ces moments où la flamme s'étire puis se rallonge. Ainsi la flamme a un cycle de vie. Lors de ce cycle la flamme s'étire de son long puis devient fortement perturbée et ainsi de suite.

Si on compare ces résultats avec ceux obtenues dans le cas sans déviation d'écoulement, on remarque que la vitesse de perte de masse est plus faible, ceci est dû à la quantité d'air qu'on gagne en plus et qui descend vers le bas pour entrer en jeu dans la réaction de combustion.

Toutefois sur le relevé effectué, nous notons une température qui fluctue toujours autant et de manière plus importante dans la flamme que dans les fumées avec toujours le même ordre de grandeur. (600°C à 0 cm, 450°C à 15 cm et 300°C à 30cm)

Plus le débit est important plus les températures oscillent un peu plus amplement.

Nous constatons aussi que les températures des fumées sont toujours les mêmes quelques soient les conditions de ventilation. Ces températures des fumées sont assez constantes et fluctuent très peu. (entre 40 et 100°C)

Nous constatons que la répartition des températures des fumées s'effectue toujours de la même manière quelques soient les conditions de ventilation. C'est-à-dire de la façon suivante :

- Les fumées les plus chaudes se trouvent toujours sous le toit et près du ventilateur de sortie puisqu'elles sont stoppées par le toit puis ont tendance à descendre vers le bas de la boîte. ( par conséquent les températures chaudes des fumées sont indiquées par les thermocouples N°2,3,8 et 12 ).

- La fumée la plus chaude se trouve le long de la colonne de chaleur (thermocouple 2).
  - Les fumées les plus froides se trouvent près du sol (les thermocouples N°5 et 9).
  - La fumée la plus froide se trouve à la paroi au niveau de 0 cm.
- La température du ventilateur de sortie est toujours plus élevée que la température du ventilateur d'entrée.

Note : les vidéos et les photos sont disponibles sur le CD-ROM joint à ce document.

- **Etude de la taille et de l'intensité de la flamme**

Grâce à l'étude des vidéos (voir CD-ROM), nous voyons que la taille de la flamme diminue au cours du temps. En effet on voit que la taille moyenne au début est de 25 cm, puis elle diminue à 22 cm en moyenne pour arriver vers 15 cm en fin de feu.

Nous voyons aussi que la flamme est légèrement moins perturbée et turbulente grâce à la fermeture latérale de la boîte. Toutefois ce n'est toujours pas ce qu'on attendait. Il faudra sans doute envisager d'autres solutions pour limiter les perturbations. (fermeture du toit par exemple).

Note : les vidéos et les photos sont disponibles sur le CD-ROM joint à ce document.

## 7.5. Conclusion

Nous avons eu une démarche pas à pas pour aborder ce sujet ; d'abord une étude simple du sujet, puis une étude avec une boîte fermée latéralement, puis une boîte entièrement fermée et enfin l'étude de l'influence d'une ventilation au sein de la boîte.

Nous avons d'abord pu voir que la vitesse de perte de masse était constante au cours d'un essai et qu'elle variait linéairement.

Les profils de températures sont les mêmes pour les mêmes conditions extérieures (toit, surface de la nappe du combustible, taux de renouvellement d'air).

Nous remarquons également qu'il existe une grande fluctuation de température dans la flamme. C'est pourquoi la mesure de vélocimétrie n'a pas été très bonne dans les flammes. Il aurait peut être fallu trouver un autre moyen de mesurer les vitesses dans la flamme.

Plus les débits sont importants plus la fluctuation des températures sont importants.

Nous avons constaté également que les températures dans les fumées sont plus faibles que dans la flamme (les plus hautes températures se situant entre 0 et 5cm).

Dès que la flamme est confinée, la vitesse de combustion diminue.

Les fumées ont tendance à monter au plafond, à s'accumuler et donc à redescendre en direction du sol.

Nous avons également vu que la flamme n'est pas la même si elle est confinée ou non.

Si la ventilation est plus importante en sortie qu'en entrée, la perte de masse est plus importante qu'à l'ordinaire.

Lorsque nous rajoutons un coude (pour éviter le couplage entrée/sortie), à l'entrée, la vitesse de combustion diminue.

Dans tous les essais, on remarque que les températures des fumées augmentent rapidement pendant les deux premières minutes, après tend à stabiliser.

Les systèmes de ventilation peuvent en même temps alimenter le feu par apport d'oxygène, et aussi évacuer les fumées. L'impact de la ventilation sur le développement de l'incendie est donc complexe et nécessite des études plus approfondies.

Une couche de gaz chauds et de fumées se forme sous le plafond du local. Elle peut envahir tout le local si, pour une puissance de foyer donnée, la ventilation n'est pas capable d'extraire les fumées produites.

La vitesse de perte de masse est constante dans tous les essais. Elle est maximale dans le cas d'un système ouvert et aussi dans le cas où le débit de sortie est plus important que le débit d'entrée.

La zone la plus chaude se situe sur l'axe de la flamme et après sur les parois pour diminuer au fur et à mesure lorsque on descend vers le bas, ça montre bien la trajectoire de l'écoulement de l'air à l'intérieur de l'enceinte.

La puissance du foyer, proportionnelle à la surface de combustible en feu, conditionne fortement l'évolution et les conséquences du feu. Plus un feu est puissant, plus les contraintes thermiques et mécaniques qu'il génère sont importantes mais plus sa durée est courte, car il consomme rapidement l'oxygène disponible.

Parallèlement, la quantité de vapeurs émises par un liquide est notamment fonction de l'élévation de la température à laquelle il est soumis.

Grâce à l'étude des vidéos (voir l'annexe 1) nous avons pu constater que la flamme est légèrement déformée et instable grâce à la formation latérale de la poche. Toutefois ce n'est toujours pas ce qui est attendu. Il faut sans doute envisager d'autres solutions pour limiter les perturbations (fenêtres du toit par exemple).

Note : les vidéos et les photos sont disponibles sur le CD-ROM joint à ce document.

## 2.5. Conclusion

Nous avons eu une démarche pas à pas pour aborder ce sujet. D'abord une étude simple du sujet puis une étude avec une boîte fermée latéralement puis une boîte entièrement fermée et enfin l'étude de l'influence d'une ventilation au sein de la boîte.

Nous avons d'abord pu voir que la vitesse de perte de masse était constante au cours d'un essai et qu'elle variait linéairement.

Les profils de températures sont les mêmes pour les mêmes conditions extérieures (soit, sortant de la nappe de combustible, soit de renouvellement d'air).

Nous remarquons également qu'il existe une grande fluctuation de températures dans la flamme. C'est pourquoi la mesure de vitesse de déplacement n'a pas été très bonne dans les flammes. Il aurait peut-être fallu trouver un autre moyen de mesurer les vitesses dans la flamme.

Plus les débits sont importants plus la fluctuation des températures sont importantes. Nous avons constaté également que les températures dans les flammes sont plus stables que dans la flamme (les plus hautes températures se situant entre 0 et 10m).

Dès que la flamme est confinée, la vitesse de combustion diminue.

Les flammes ont tendance à monter au plafond, à s'accumuler et donc à redescendre en direction du sol.

Nous avons également vu que la flamme n'est pas la même si elle est confinée ou non.

Si la ventilation est plus importante en sortie qu'en entrée, la perte de masse est plus importante qu'à l'ordinaire.

Lorsque nous rajoutons un coude (pour éviter le couplage direct) à l'entrée, la vitesse de combustion diminue.

Dans tous les essais, on remarque que les températures des flammes augmentent rapidement pendant les deux premières minutes, après tend à stabiliser.

Les systèmes de ventilation peuvent en même temps alimenter le feu par apport d'oxygène et aussi évacuer les fumées. L'impact de la ventilation sur le développement de l'incendie est donc complexe et nécessite des études plus approfondies.

Une couche de gaz chauds et de fumées se forme sous le plafond du local. Elle peut envahir tout le local si pour une puissance de foyer donnée, la ventilation n'est pas capable d'évacuer les fumées produites.

La vitesse de perte de masse est constante dans tous les essais. Elle est maximale dans le cas d'un système ouvert et quasi constante dans le cas où le débit de sortie est plus important que le débit d'entrée.

## 8. Maquette adiabatique

### 8.1. Description de la maquette

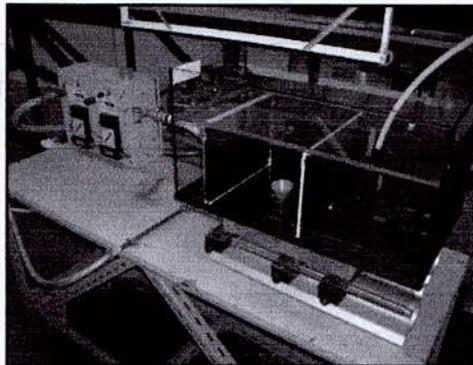
La maquette adiabatique est une pièce destinée à réaliser des essais de propagation des fumées entre deux locaux, dans lequel on injecte un mélange d'air-hélium (**figure 8.1**).

La maquette est à l'échelle 1/20. Elle est constituée de deux locaux semblables voisins : le local SOURCE (dans lequel on injecte l'hélium pur ou un mélange d'hélium et d'air) et le local CIBLE (**figure 8.2**). Ces deux locaux peuvent échanger masse par une porte de communication. Le local cible est ventilé en continu par une extraction et une injection équivalente de façon à assurer un renouvellement de l'air.

Les deux bouches d'extraction et d'injection sont placées sur le plafond.

L'injection de l'air et l'extraction des fumées sont assurées par deux ventilateurs de débits réglables par un potentiomètre (**figures 8.3 et 8.4**).

Le débit du mélange air-hélium dans le local source est réglable par un débitmètre électronique (**figure 8.5**).

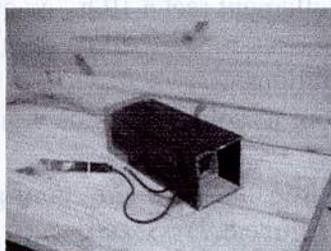


**Figure 8.1** : Vue générale de la maquette 1/20.

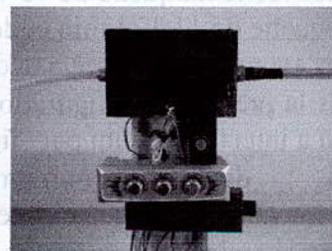
Dans le local source, nous avons laissé une petite ouverture autour du bac d'injection d'hélium pour éviter les surpressions dans la maquette.

Les matériaux constituant le volume tridimensionnel de la maquette ont été choisis de manière à obtenir une bonne qualité visuelle et ainsi pouvoir procéder à des visualisations qualitatives des comportements de fumées (plan laser) ainsi des mesures anémométriques par méthodes optiques (LDV et PIV).

Le système de ventilation qui est raccordé au volume tridimensionnel est conçu de manière à être utilisable pour les différentes configurations. Le montage exposé sur la figure 8.1 est celui qui a été fait pour reproduire le plus fidèlement possible les écoulements des différents essais de feux réels qui ont été réalisés à Cadarache.



**Figure 8.3** : Ventilateur d'injection d'air



**Figure 8.4** : Ventilateur d'extraction des fumées

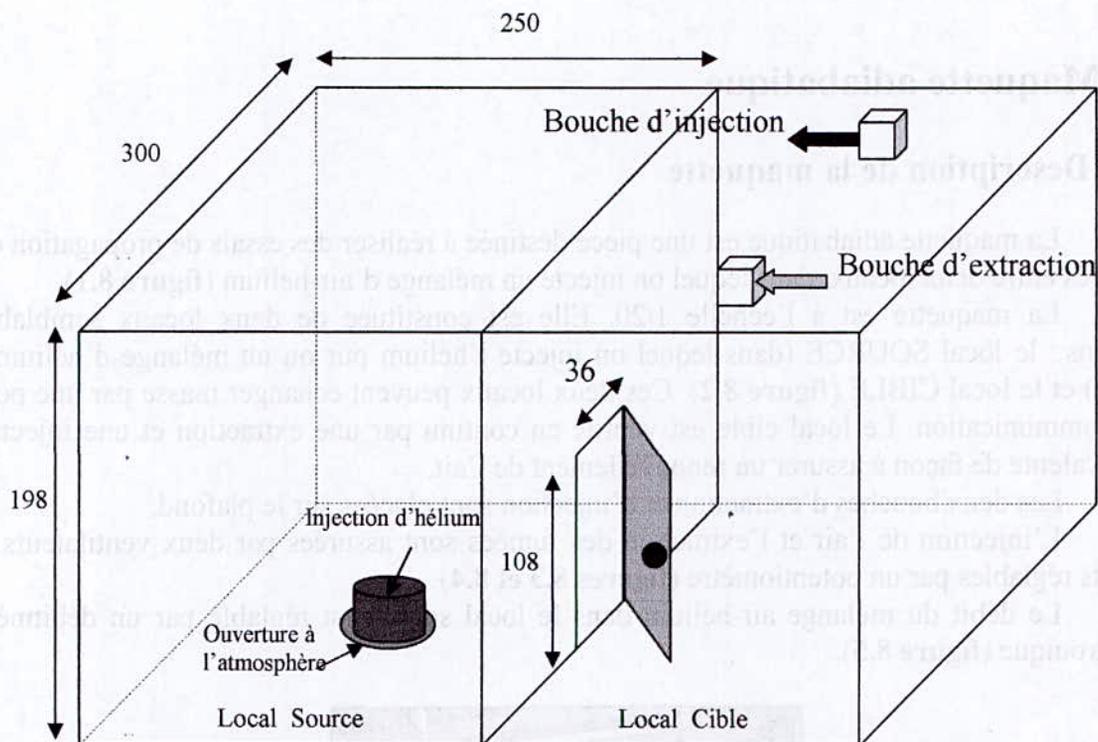


Figure 8.2 : Schéma simplifié et les principales côtes (en mm) de la maquette 1/20

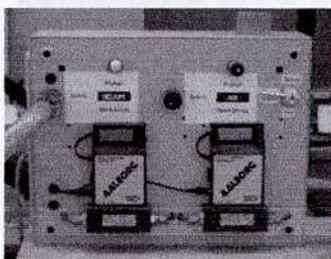


Figure 8.5 : Débitmètre électronique Air-Hélium

## 8.2. Visualisation par la tomographie

La visualisation par la tomographie est obtenue en ensemençant le mélange injecté dans le local source avec des fines particules (les traceurs) qui sont ensuite éclairées par une tranche fine de lumière laser. L'enregistrement se fait par simple caméra vidéo.

Dans un premier temps, nous avons réalisé un ensemble de visualisations sur six configurations différentes, dont le but est de savoir l'influence de celle-ci sur la propagation des fumées entre les deux locaux.

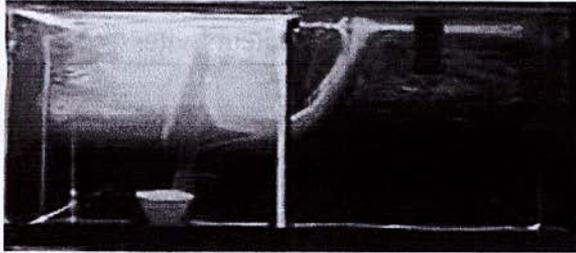
Pour cela, nous avons fixé le débit d'injection d'hélium pur à 9.5 l/min qui correspond à la puissance réelle maquette de 48 W, et le taux de renouvellement réel à  $10 \text{ h}^{-1}$  ce qui donne un débit maquette de 11.17 l/min et donc un  $\text{TR}_m$  de  $45 \text{ h}^{-1}$ .

Nous avons gardé ce réglage dans toutes les configurations.

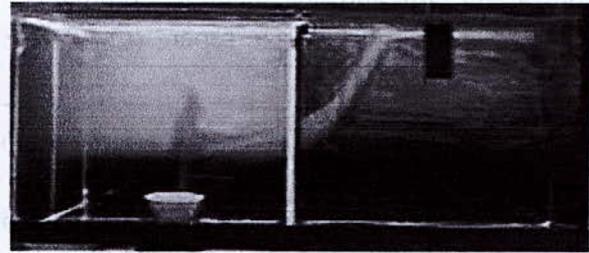
- Dans la première configuration, nous avons fermé tout le volume (pas de ventilation), et on a injecté l'hélium pur (figure 8.6).
- Dans la deuxième configuration, nous avons gardé la première configuration, seulement cette fois le volume a des fuites imposés (figure 8.7).
- Dans la troisième configuration, nous avons ouvert la bouche d'injection d'air frais (figure 8.8).
- Dans la quatrième configuration, nous avons ouvert la bouche d'extraction des fumées, et nous avons fermé la bouche d'injection d'air frais (figure 8.9).

- Dans la cinquième configuration, nous avons ouvert les deux bouches d'extraction et d'injection (position basse) (**figure 8.10**).
- Dans la sixième configuration, nous avons gardé la cinquième configuration sauf là nous avons changé la position de la bouche d'injection (partie haute) (**figure 8.11**).

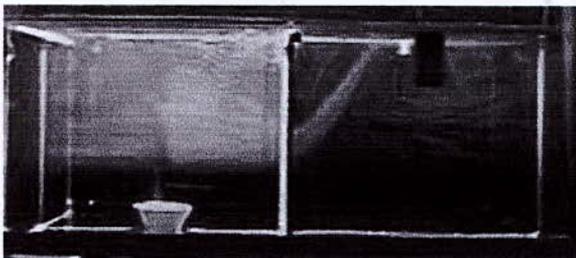
On donne ci-dessous les six visualisations recueillies de ces essais après trente seconde de début d'injection d'hélium.



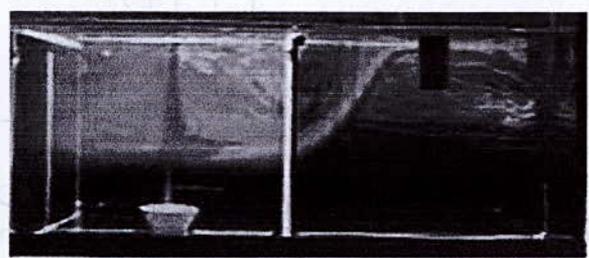
**Figure 8.6** : Tout est fermée



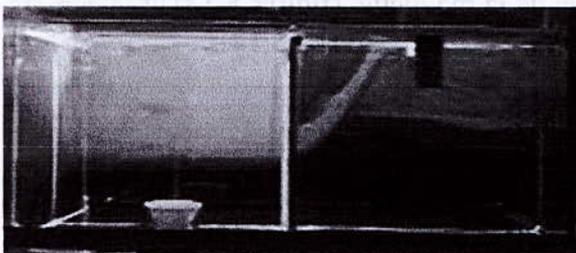
**Figure 8.7** : Fermé avec fuite imposé



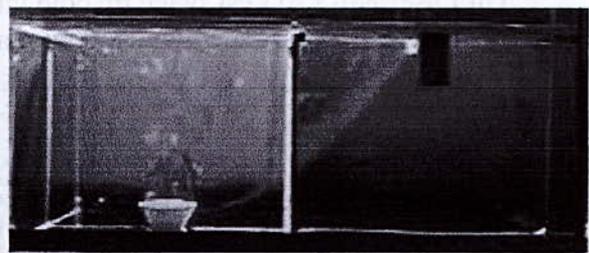
**Figure 8.8** : Extraction fermée injection  
Ouvverte



**Figure 8.9** : Extraction ouverte injection  
fermé



**Figure 8.10** : Extraction ouverte injection  
partie basse



**Figure 8.11** : Extraction ouverte injection  
partie haute

Dans la première configuration, on constate que la densité des fumées est très élevée dans le local source ainsi le temps de passage des fumées vers le local cible est trop long, et ceci à cause de forte pression à l'intérieur du local (pas de fuite). Dans la deuxième configuration (avec fuite) on remarque que les fumées sont moins dense que la première et le temps de passage par la porte de communication est un peu court que la première.

On remarque d'après la troisième configuration que les fumées sont concentrées dans le local source, ceci est dû à la fermeture de la bouche d'extraction et l'injection d'une quantité d'air dans le local cible. La concentration des fumées dans le local source, le temps de passage, et la forme du jet changent quand on inverse le mécanisme (configuration quatre) c'est-à-dire l'injection fermée et l'extraction ouverte.

Quand on change la position de la bouche d'injection d'air frais, on constate que la densité dans les deux chambres change ainsi la forme du jet et leur angle avec la cloison. Donc on peut conclure que la position de la bouche d'injection de l'air frais influe sur l'écoulement entre les deux locaux et aussi sur les temps de passage et de retour des fumées à travers la porte de communication.

Note : les vidéos et les photos sont disponibles sur le CD-ROM joint à ce document.

### 8.3. Mesure PIV

Dans un second temps, on a utilisé les procédés optiques de PIV et LDV sur la porte de communication pour mesurer la vitesse de passage des fumées. Ensuite une comparaison pourra être faite entre les résultats obtenus.

Nous définissons le repère  $(O, x, y, z)$  pour l'orientation des vecteurs vitesse  $(U, V, W)$  (Figures 8.12).

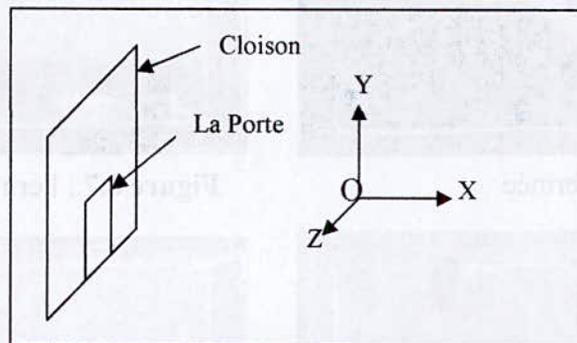


Figure 8.12 : Repère lié à la porte

On rappelle que contrairement à la LDV, la PIV a l'avantage de mesurer les vitesses d'un ensemble de points situés dans un plan en une seule acquisition.

Le plan PIV vertical à la porte donne les deux composantes  $U$  et  $V$  des vitesses à la sortie de la porte. La seule composante qui nous intéresse est la composante horizontale  $U$  qui permet de calculer le débit des fumées à la sortie de la porte.

Un Laser Nd-YAG est placé du côté latérale de la maquette, (figure 8.13) et la caméra est placée de sorte à être perpendiculaire au plan de lumière créé (figure 8.14).

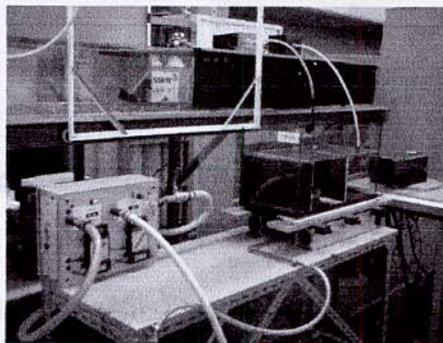


Figure 8.13 Position du laser par rapport à la maquette

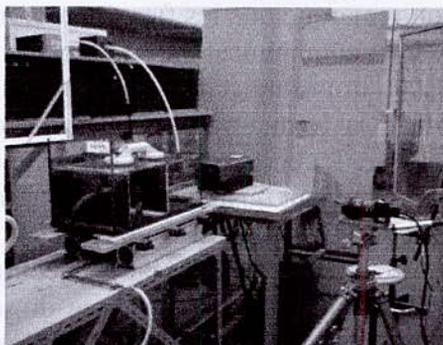


Figure 8.14 Position de la camera par rapport à la maquette

Remarques :

- Il faut noter que pour la mesure sur la porte, la focale du Laser ainsi que sa divergence doivent être modifiées afin d'obtenir le maximum d'éclairement dans la zone de mesure ;
- Les vecteurs représentés sur les champs PIV (**figures 8.15 à 8.18 et 8.21 à 8.23**) sont les vecteurs vitesse.

On a réalisé deux essais différents:

- Injection d'hélium pur ;
- Injection un mélange air-Hélium.

### 8.3.1. Injection d'hélium pur

On a fixé le débit d'injection d'hélium pur à 7.5 l/min ce qui donne une puissance maquette de 38 W, et le taux de renouvellement réel à 5 qui correspond à un TR de 22 échelle maquette.

Le but est de mesurer la vitesse des fumées à la sortie de la porte et donc la puissance convective.

Les figures 8.15 jusqu'à 8.19 représentent le champ de vitesse moyenne pendant 10s. et les figures 8.21 jusqu'à 8.24 représentent le champ de vitesse moyenne pendant 40 s.

#### Plan vertical à la sortie de la porte (Figures 8.15 à 8.24) :

Les figures 8.15, 8.16, 8.17, et 8.18 montrent un écoulement horizontal à la sortie de la porte important, ainsi que de forts gradients de vitesse particulièrement sur la composante horizontale dans les 25 premières secondes.

La vitesse horizontale est maximale à 2 cm plus loin de la porte (annexe 9). On enregistre cependant, un fort gradient pour  $x$  compris entre 0 et 20mm pendant 20 secondes après le début de passage des fumées à travers la porte. En effet, la vitesse horizontale dans cette région est positive ascendante variant ainsi, de 0.02 à 0.16m/s.

En  $x = 0$  mm l'air s'écoule horizontalement et s'accélère au fur et à mesure qu'on s'éloigne de la porte (**figures 8.15, 8.16, 8.17, 8.18, 8.20**). La composante horizontale, atteint une valeur maximale de l'ordre de 0.094 m/s dans la partie supérieure de la porte au bout de 25s, puis commence à être diminuer (**figure 8.20**).

Les champs de vitesse obtenus avec la PIV décrivent la présence d'un grand tourbillon dans le local cible, qui est généré par la composition des différents mouvement : aspiration et refoulement des ventilateurs, mouvement d'entrée et de sortie des fumées par la porte de communication ainsi que les déviations des fumées sur les parois de la maquette.

L'air refoulé par le ventilateur d'injection se dirige vers le sol du local source puis sort par la porte de communication en partie basse, et l'autre fait un mouvement de sortie des fumées à travers lui qui n'est en fait qu'un mouvement verticale à l'ouverture.

Les figures 8.15 jusqu'à 8.24 reprennent les différentes mesures de vitesse normale à la porte. Ces mesures sont pris sur toutes la hauteur de la maquette, soit  $y = 20$ mm.

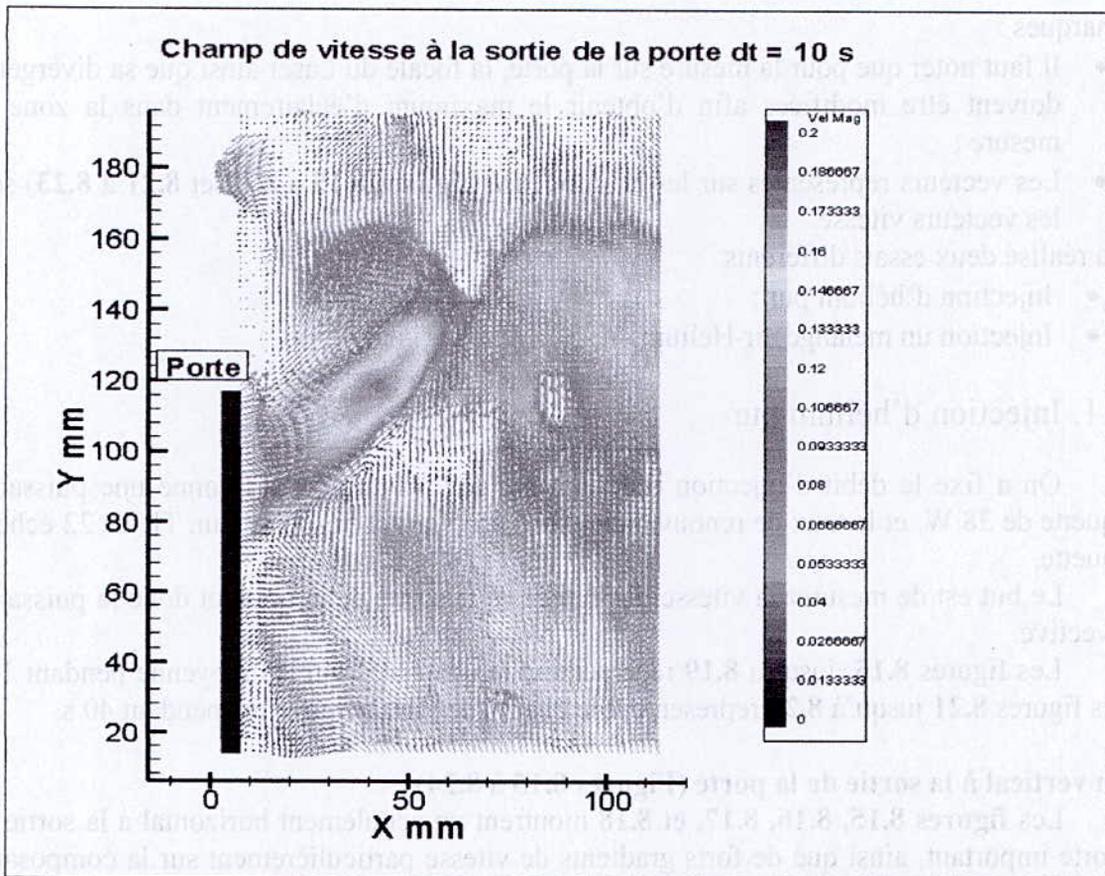


Figure 8.15 : Champ de vitesse à la sortie de la porte après 5s de début d'injection

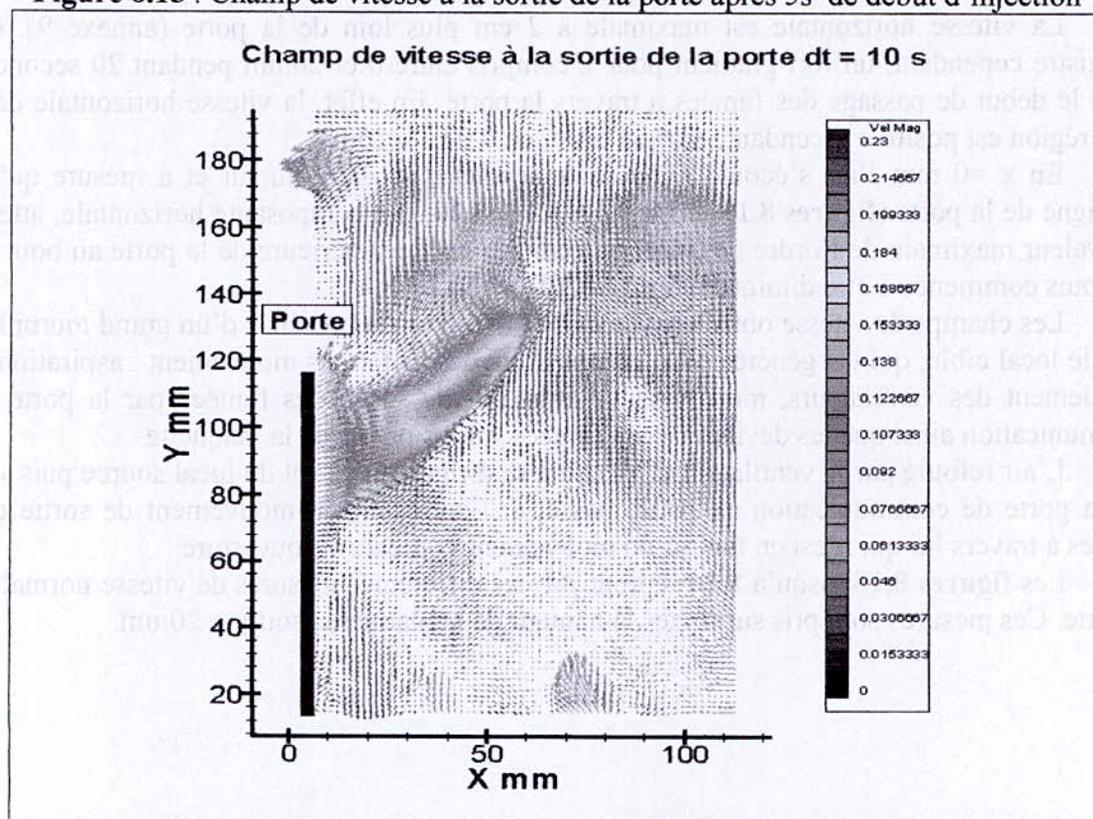


Figure 8.16 : Champ de vitesse à la sortie de la porte après 15s de début d'injection

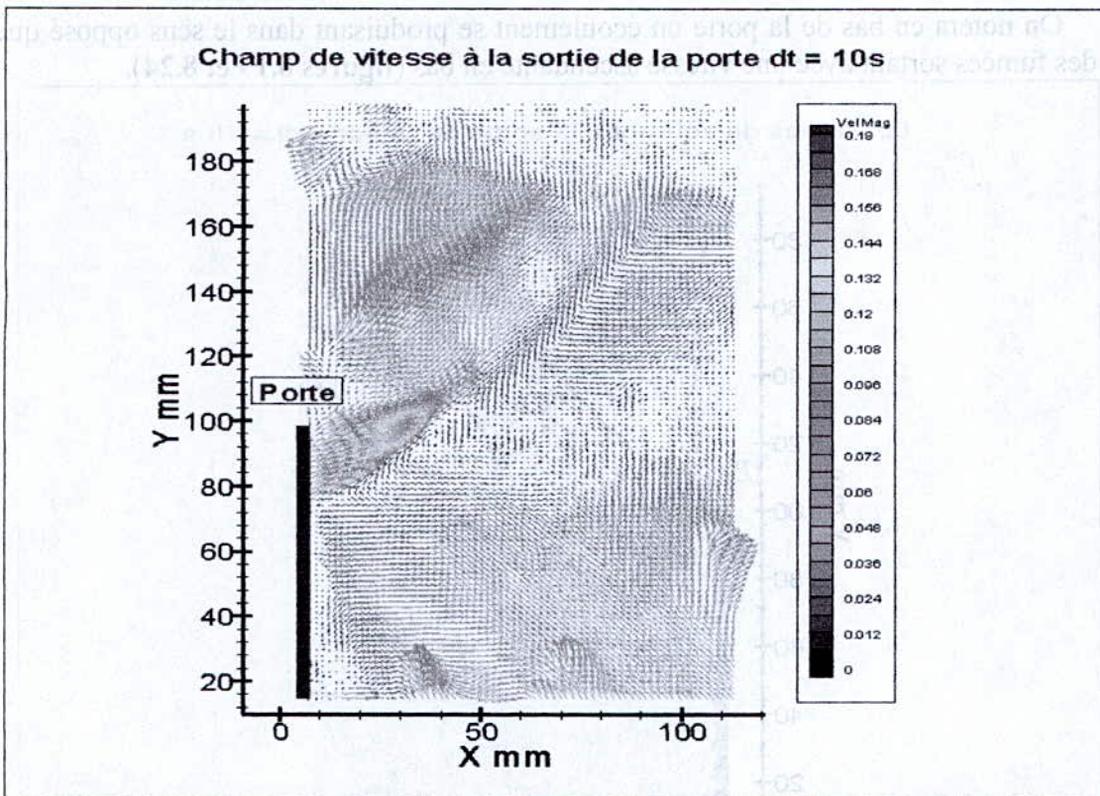


Figure 8.17 : Champ de vitesse à la sortie de la porte après 25s de début d'injection

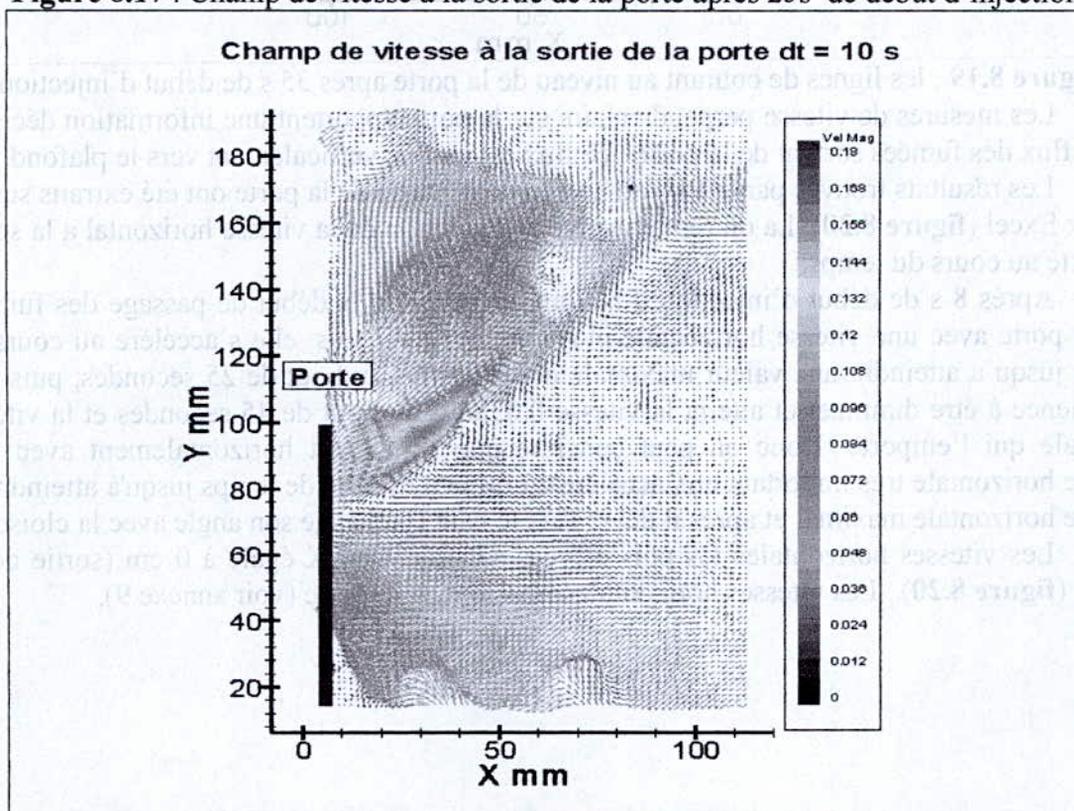
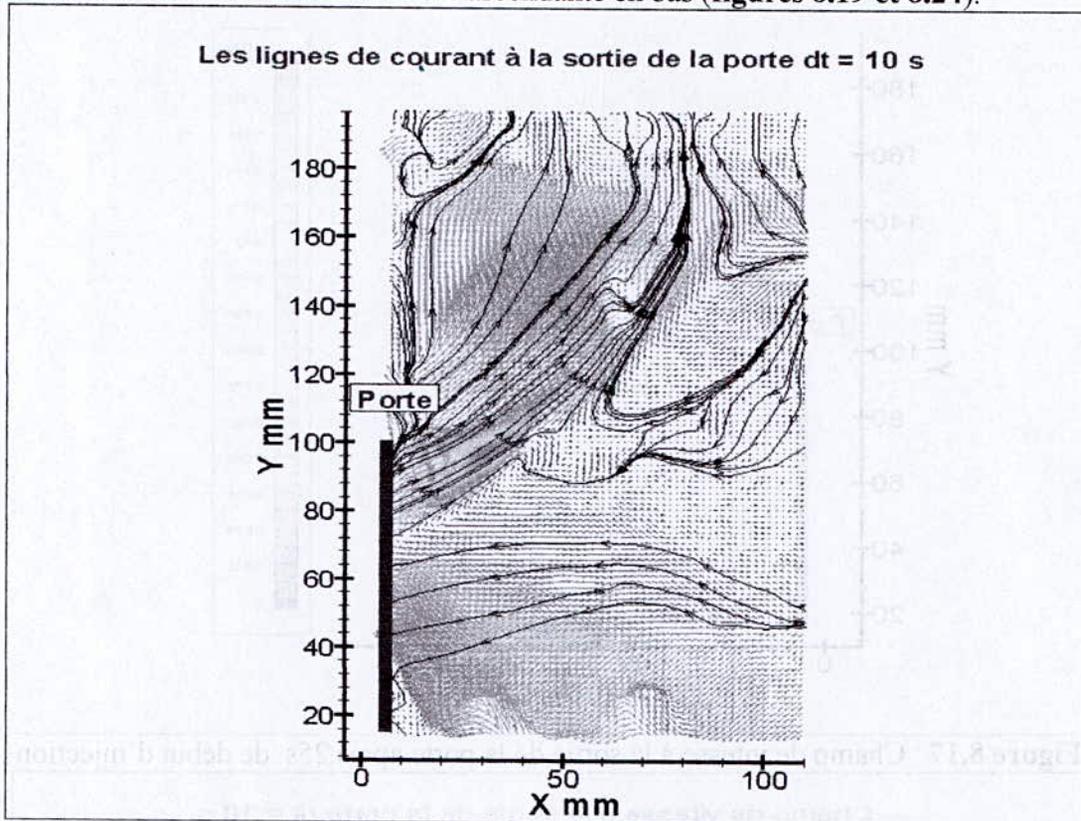


Figure 8.18 : Champ de vitesse à la sortie de la porte après 35s de début d'injection

Après 35 secondes de début d'injection d'hélium, on constate un début de retour des fumées en partie basse de la porte (figures 8.18 et 8.19).

Les lignes de courant tracées à partir des vecteurs vitesses permettent de distinguer le mouvement et la direction de l'écoulement (figures 8.19 et 8.24).

On notera en bas de la porte un écoulement se produisant dans le sens opposé que le flux des fumées sortant avec une vitesse ascendante en bas (figures 8.19 et 8.24).



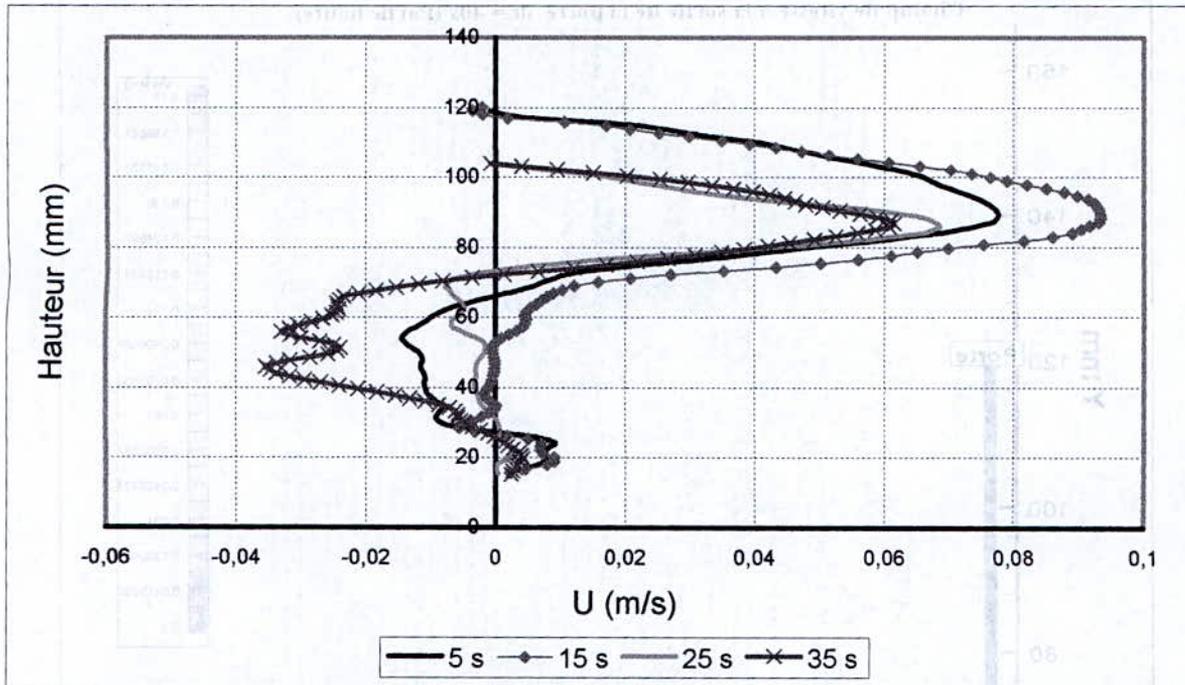
**Figure 8.19** : les lignes de courant au niveau de la porte après 35 s de début d'injection

Les mesures de vitesse perpendiculaire sur la porte apportent une information décisive sur le flux des fumées sortant de la porte : ce flux est incliné verticalement vers le plafond.

Les résultats trouvés par la PIV au niveau de la sortie de la porte ont été extraits sur un fichier Excel (**figure 8.20**). La on remarque bien l'évolution de la vitesse horizontale a la sortie de porte au cours du temps.

Après 8 s de début d'injection d'hélium, on constate le début de passage des fumées par la porte avec une vitesse horizontale moyenne de 0.047 m/s, elle s'accélère au cours de temps jusqu'à atteindre une valeur maximale de 0.062 m/s au bout de 25 secondes, puis elle commence à être diminuer et atteint la vitesse 0.038m/s au bout de 45 secondes et la vitesse verticale qui l'emporte. Donc on peut conclure que le jet sort horizontalement avec une vitesse horizontale très important et s'accélère au fur et à mesure de temps jusqu'à atteindre la vitesse horizontale maximal et après il dévie vers le haut (il change son angle avec la cloison).

Les vitesses horizontales les plus élevées se situent en X égale à 0 cm (sortie de la porte) (**figure 8.20**). Les vitesses horizontales plus loin de la porte (voir annexe 9).

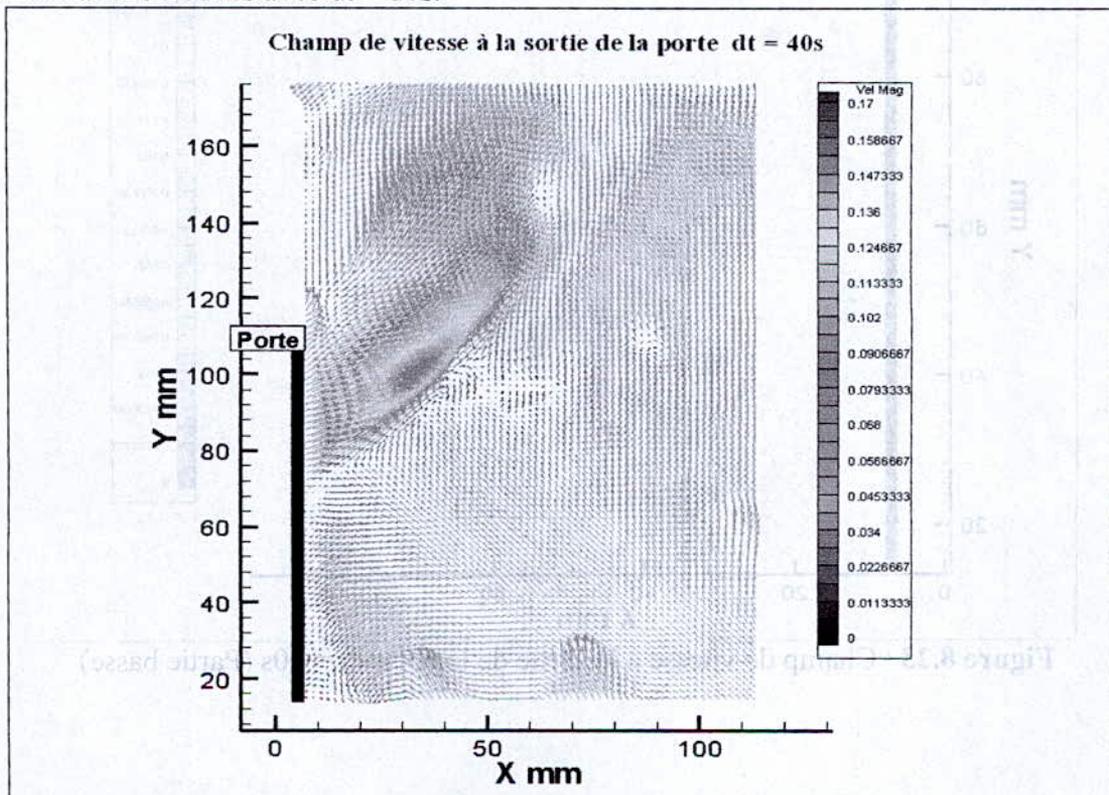


**Figure 8.20 :** Variation de la vitesse horizontale à la sortie de la porte en fonction de la hauteur au cours de temps

La vitesse horizontale moyenne calculer pendant 40 secondes après le début d'injection d'hélium pur à la sortie de la porte est 0.047 m/s.

Après, nous avons refait le même essai mais cette fois avec une moyenne de 40 secondes (figures 8.21, 8.22, 8.23, 8.24).

On constate que les résultats trouvés avec  $dt = 40s$  sont quasiment semblables à ceux que nous avons trouvés avec  $dt = 10s$ .



**Figure 8.21 :** Champ de vitesse à la sortie de la porte dt = 40s

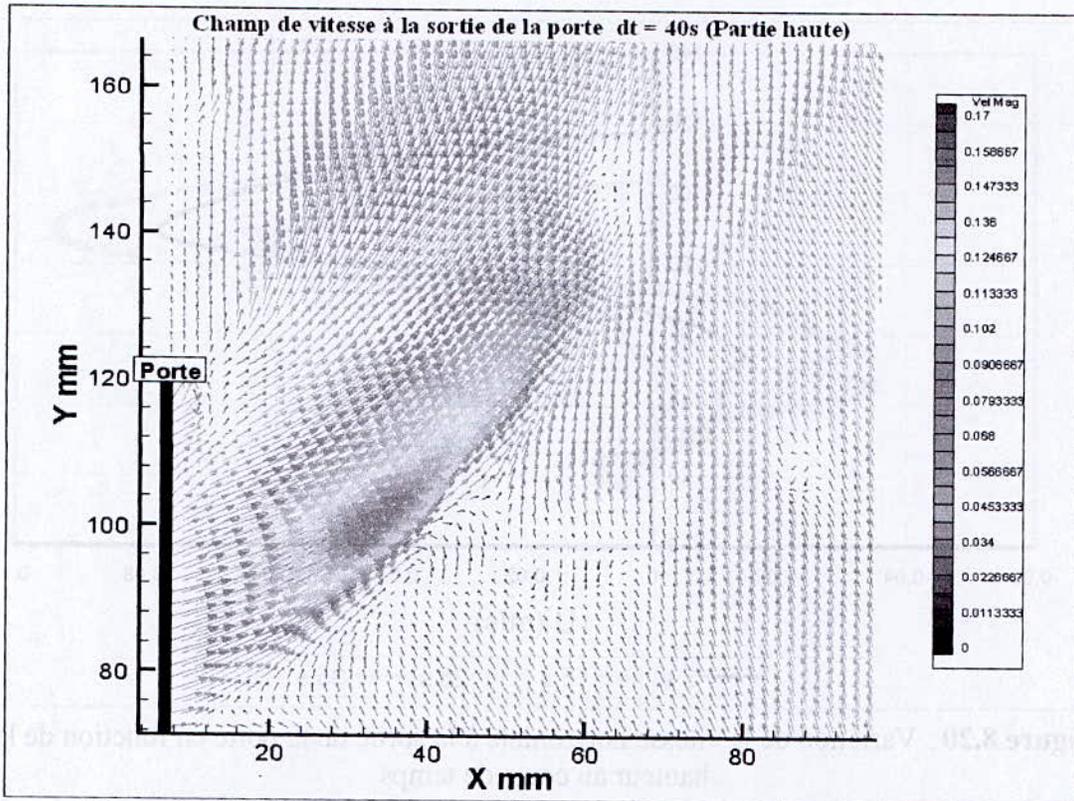


Figure 8.22 : Champ de vitesse al sortie de porte dt = 40s (Partie Haute)

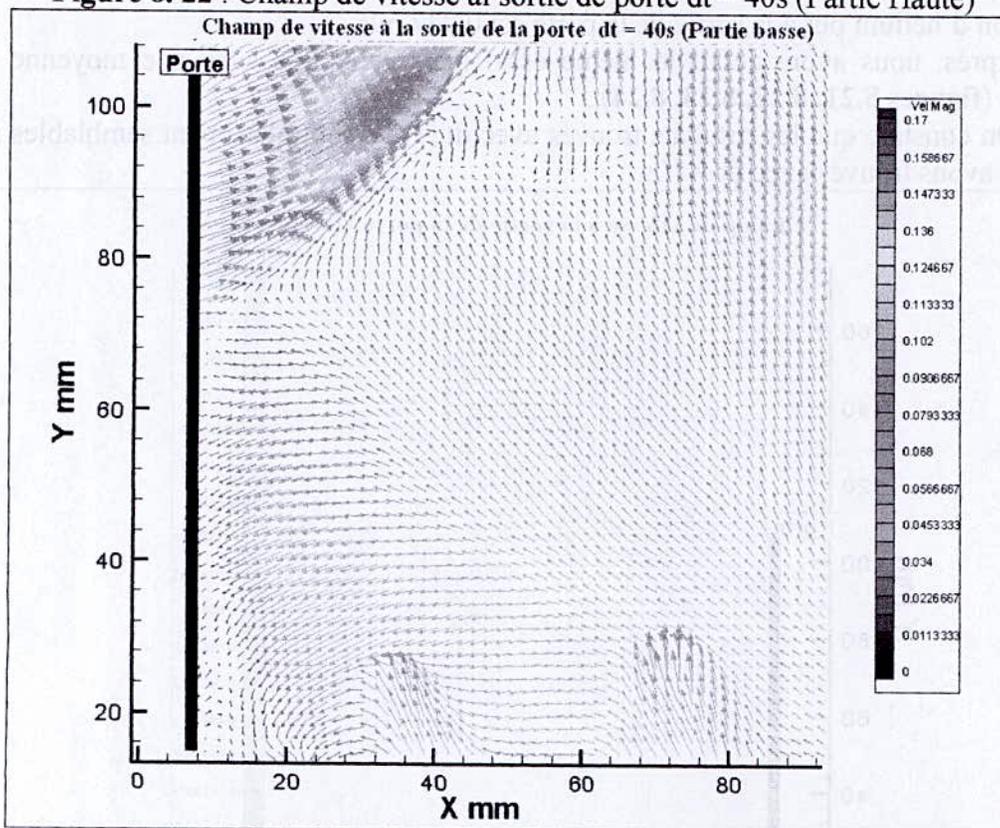


Figure 8.23 : Champ de vitesse à la sortie de la porte dt = 40s (Partie basse)

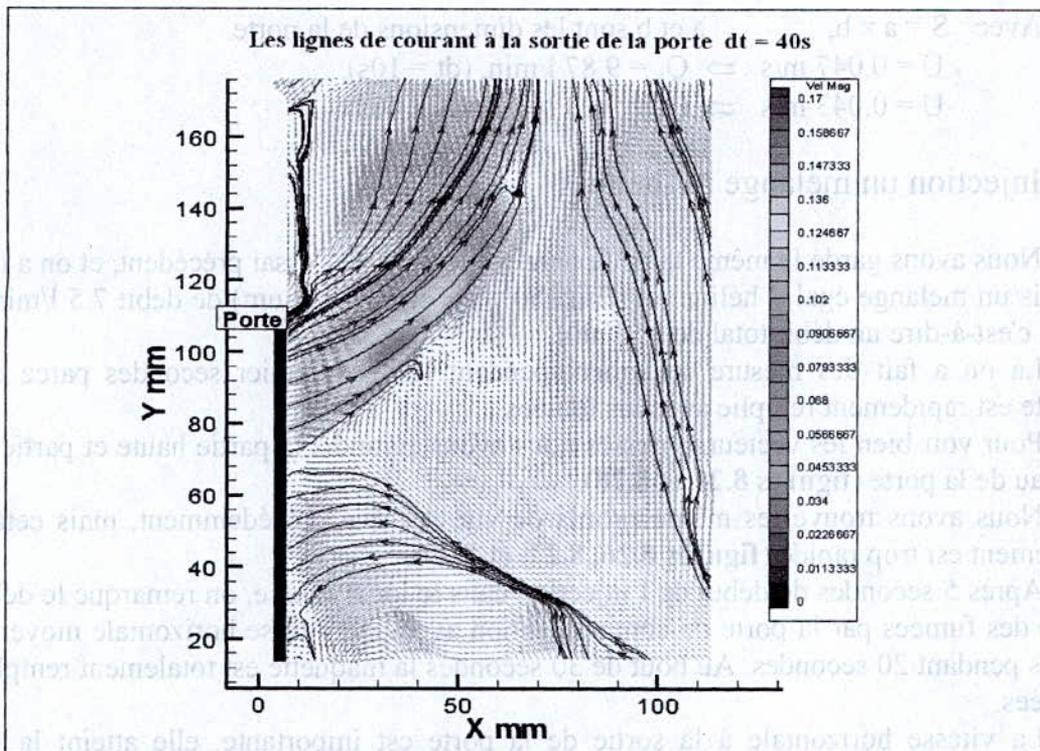


Figure 8.24 : Les lignes de courants près de la porte dt = 40s

On a extrait les valeurs de vitesses trouvées avec la PIV sur ce fichier Excel.

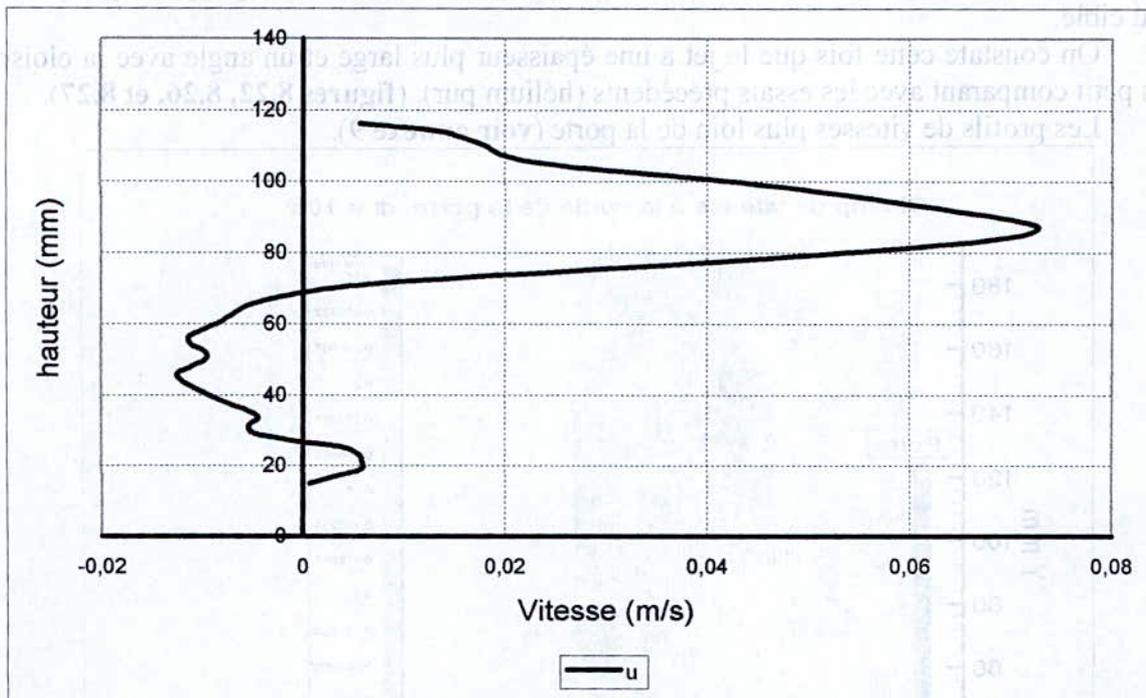


Figure 8.25 : Profil des vitesses en sortie de porte dt = 40s

La vitesse horizontale maximale est 0.073 m/s,

On constate même chose que précédemment (dt=10s). La vitesse horizontale moyenne est 0.043 m/s.

#### Calcul du débit

Le débit des fumées qui passe par la porte a été calculé à partir des mesures PIV par extraction des vitesses sur des fichiers Excel.

On a:  $Q = U \times S$

Avec :  $S = a \times b$ ,  $a$  et  $b$  sont les dimensions de la porte.

$U = 0.047 \text{ m/s} \Rightarrow Q_v = 9.87 \text{ l/min}$ , ( $dt = 10\text{s}$ ).

$U = 0.043 \text{ m/s} \Rightarrow Q_v = 9.03 \text{ l/min}$ , ( $dt = 40\text{s}$ ).

### 8.3.2. Injection un mélange air-hélium

Nous avons gardé le même taux de renouvellement de l'essai précédent, et on a injecté cette fois un mélange égal d'hélium et d'air (50% air et 50% hélium) de débit 7.5 l/min pour chacun, c'est-à-dire un débit total de 15 l/min.

Là on a fait des mesure seulement pendant les 10 premier secondes parce que la maquette est rapidement remplie avec les fumées.

Pour voir bien les vecteurs vitesses nous avons agrandis la partie haute et partie basse au niveau de la porte (**figures 8.27 et 8.28**).

Nous avons trouvé les même profils de vitesses que précédemment, mais cette fois l'écoulement est trop rapide (**figures 8.26, 8.27, et 8.29**).

Après 5 secondes de début de l'injection dans le local source, on remarque le début de passage des fumées par la porte de communication avec une vitesse horizontale moyenne de 0.09 m/s pendant 20 secondes. Au bout de 30 secondes la maquette est totalement remplie par les fumées.

La vitesse horizontale à la sortie de la porte est importante, elle atteint la valeur maximale de 0.148 m/s (**figure 8.29**).

Le jet à la sortie de la porte est laminaire (**figure 2.26**), il monte jusqu'au plafond du local cible.

On constate cette fois que le jet a une épaisseur plus large et un angle avec la cloison plus petit comparant avec les essais précédents (hélium pur). (**figures 8.22, 8.26, et 8.27**).

Les profils de vitesses plus loin de la porte (**voir annexe 9**).

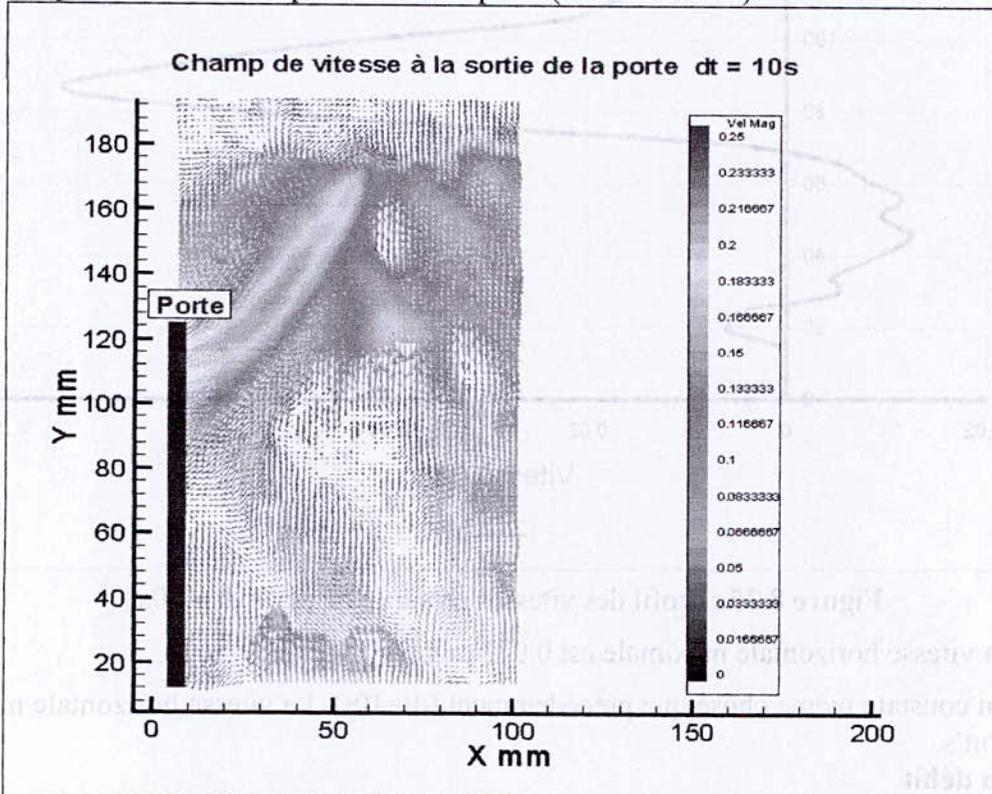
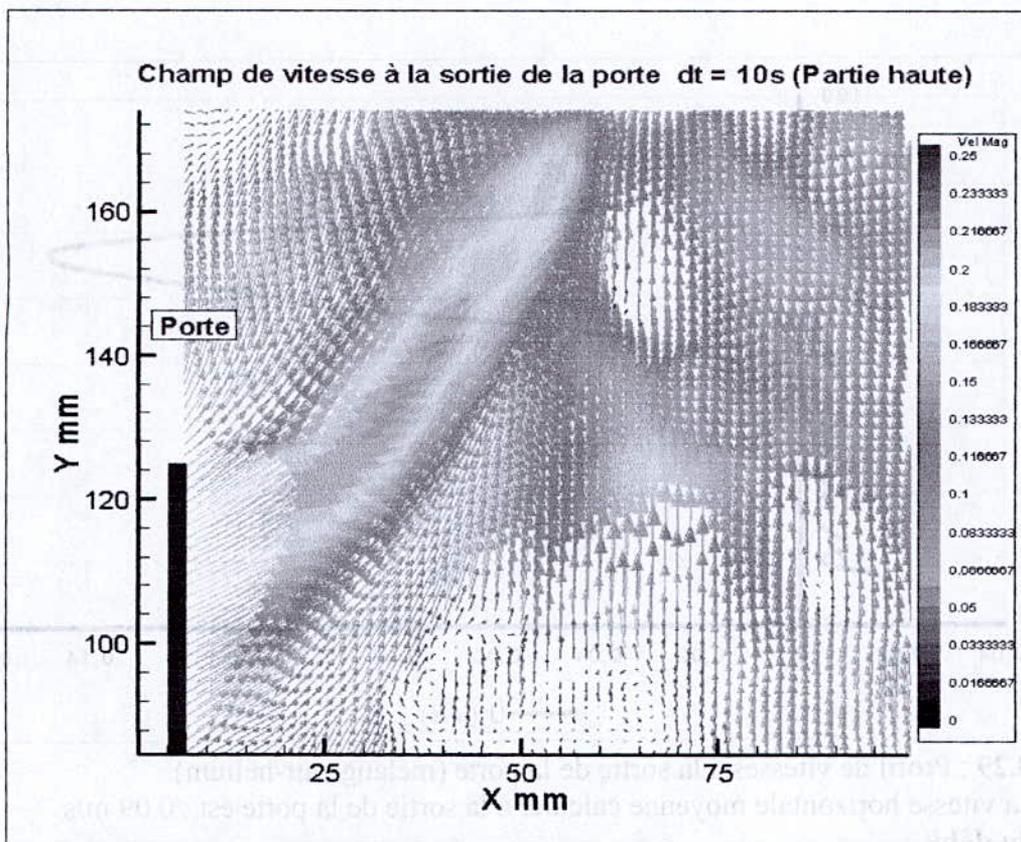
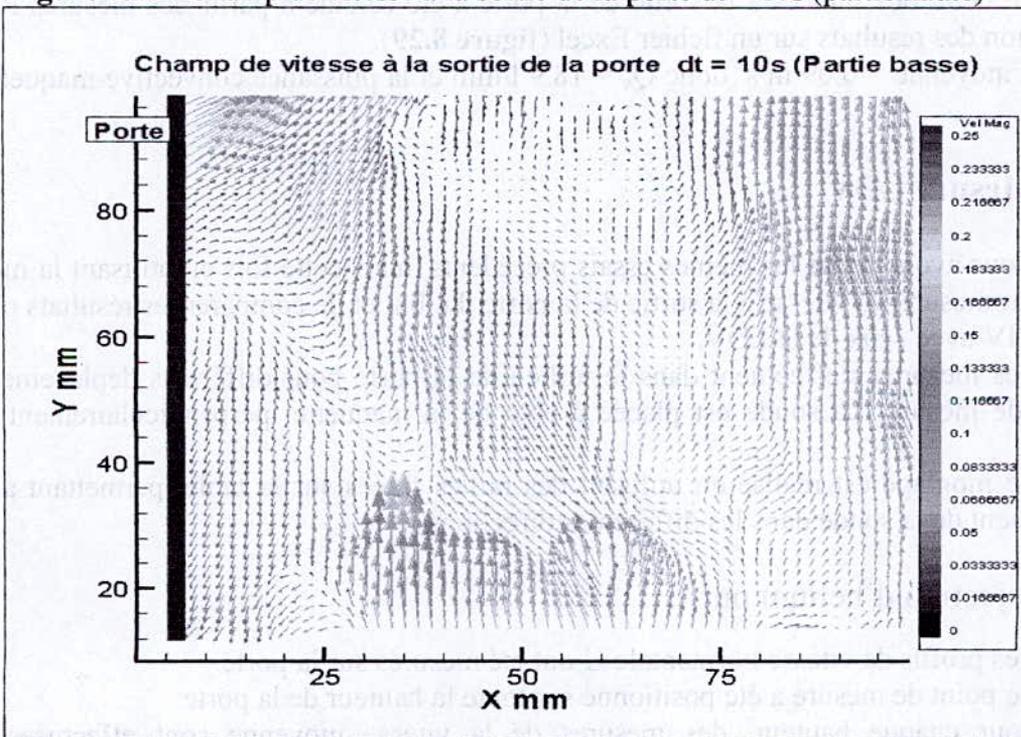


Figure 8.26 : Champ de vitesse à la sortie de la porte  $dt = 10\text{s}$



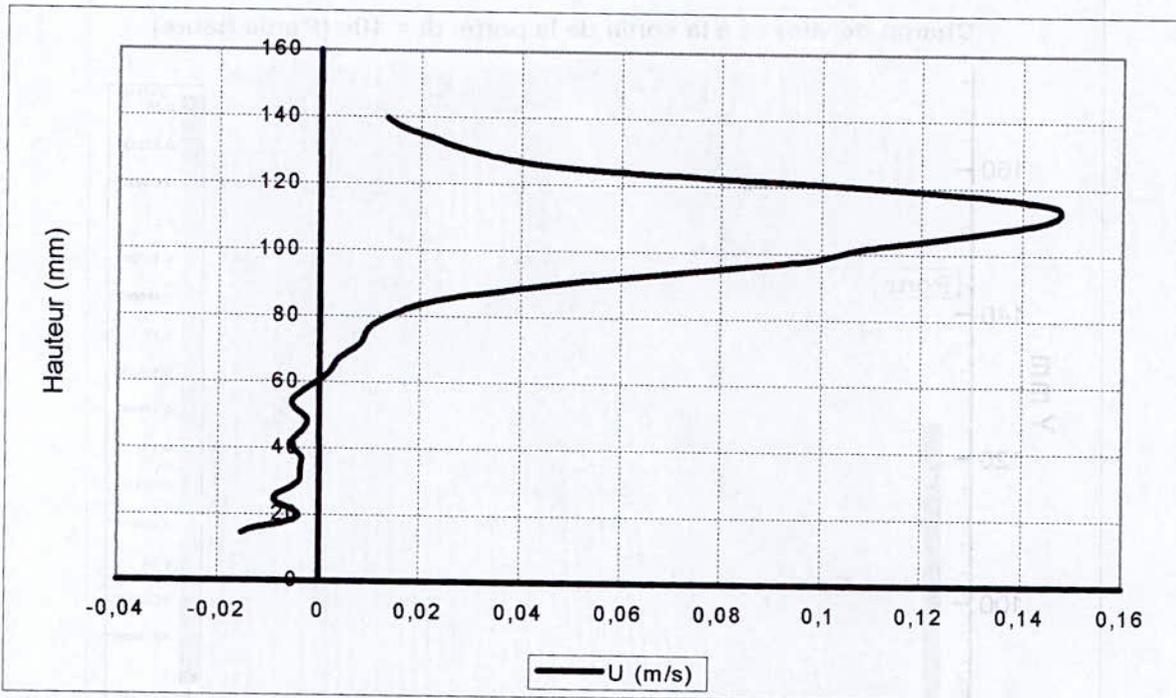
**Figure 8.27** : Champ de vitesse à la sortie de la porte dt = 10s (partie haute)



**Figure 8.28** : Champ de vitesse à la sortie de porte dt = 10s (partie basse)

Les résultats trouvés par la PIV au niveau de la sortie de la porte ont été extraits sur un fichier Excel (**figure 8.29**). On remarque bien l'évolution de la vitesse horizontale à la sortie de la porte.

On constate que jusqu'à 15 secondes de début d'injection du mélange air-hélium, le retour des fumées à travers la porte en partie basse n'a pas encore établie (**figure 8.28**).



**Figure 8.29** : Profil de vitesses à la sortie de la porte (mélange air-hélium)

La vitesse horizontale moyenne calculer à la sortie de la porte est : 0.09 m/s.

#### Calcul du débit

Le débit des fumées à la sortie de la porte a été calculé à partir des mesures PIV par l'extraction des résultats sur un fichier Excel (**figure 8.29**).

On a :  $U$  moyenne = 0.09 m/s donc  $Q_v = 18.9$  l/min et la puissance convective maquette sera 96 W.

### 8.4. Mesure LDV

Nous avons refait les mêmes essais précédents, mais cette fois en utilisant la méthode LDV pour mesurer la vitesse a la sortie de la porte. Le but et de comparer les résultats obtenus avec la PIV avec ceux de la LDV.

Les mesures s'effectuent dans le milieu de la porte pour différents déplacements du volume de mesure. La sonde est placée à coté de la maquette, perpendiculairement sur la porte.

Le montage est réalisé en utilisant des railles fixées sur la table, permettant ainsi le déplacement de la sonde dans les différentes directions.

#### 8.4.1. Injection d'hélium pur

Les profils de vitesse horizontale  $U$  ont été mesurés sur la porte.

Le point de mesure a été positionné sur toute la hauteur de la porte.

Pour chaque hauteur, des mesures de la vitesse moyenne sont effectuées. Pour déplacer le volume de mesure, il suffisait de déplacer la sonde.

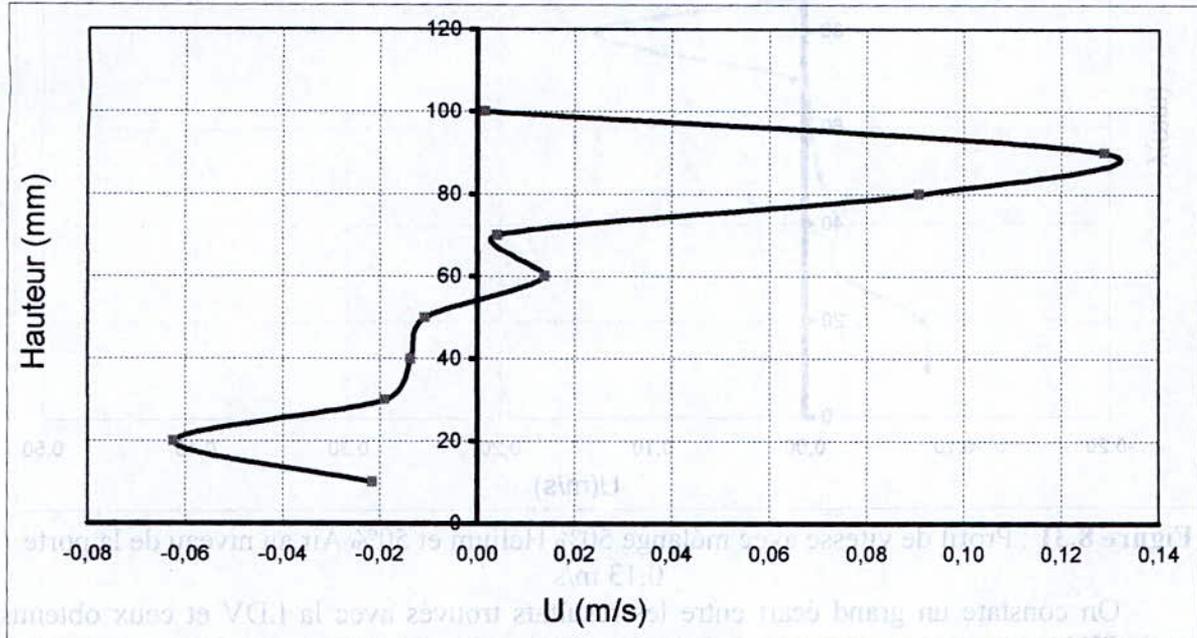
On a fixé le débit d'injection d'hélium pur à 7.5 l/min et le  $TR_p$  à 5 qui correspond a un TR de 22 échelle maquette.

Le graphe de profil de vitesse horizontale  $U$  montre que l'écoulement à la sortie de la porte n'est pas uniforme (**figure 8.30**).

Les profils de vitesses horizontaux suivant la hauteur de la porte ont même allure avec

ceux obtenir avec la PIV (figures 8.30, 8.25 et 8.20). mais avec des écarts importants, ces écarts sont dû sûrement au taux de validation des particules, c'est-à-dire quand on fait la mesure pendant un temps déterminer le nombre de particule qui passe par le volume de mesure sont faibles.

Les vitesses horizontales dans la partie supérieure de la porte sont les plus élevées.



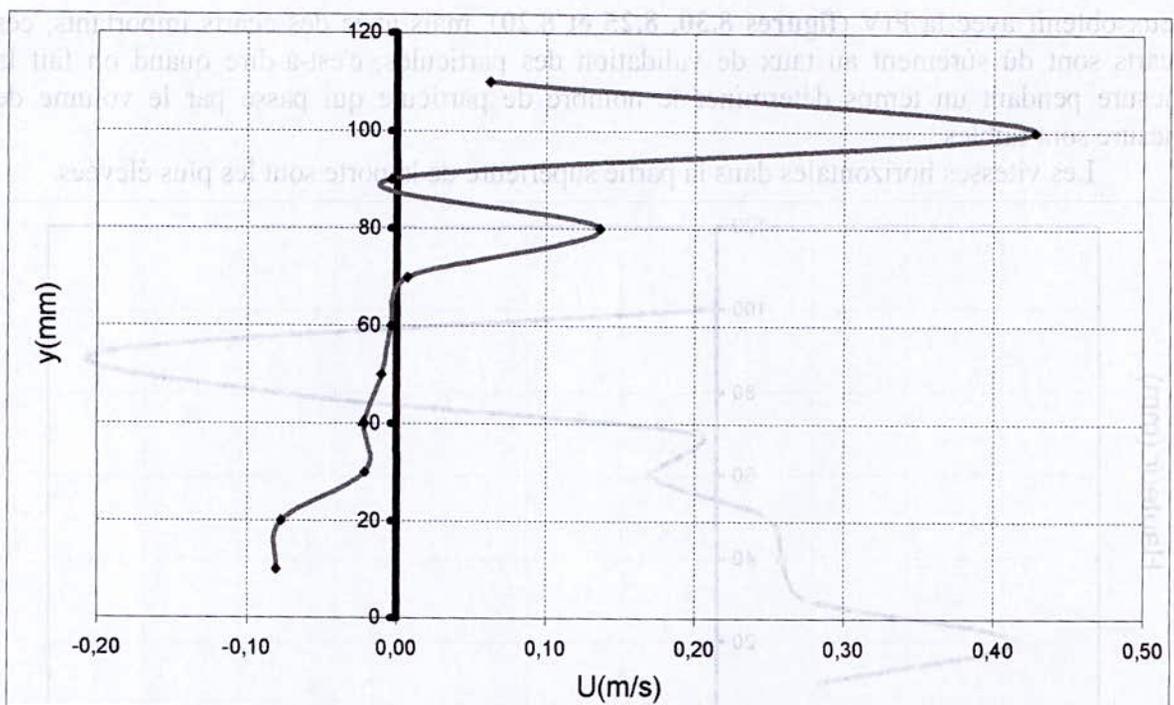
**Figure 8.30 :** Profil de vitesse horizontal au niveau de la porte

La vitesse horizontale moyenne à la sortie de la porte mesurée avec la méthode LDV est:  $U = 0.048 \text{ m/s}$

#### 8.4.2. Injection un mélange air-hélium

On a gardé le même taux de renouvellement et on a injecté cette fois un mélange air-hélium (50% air et 50% hélium) de débit 7.5 l/min pour chacun, c'est à dire un débit total de 15 l/min.

On donne ci-dessous le profil de vitesse horizontale obtenu avec la LDV à la sortie de la porte.



**Figure 8.31** : Profil de vitesse avec mélange 50% Hélium et 50% Air au niveau de la porte  
0.13 m/s

On constate un grand écart entre les résultats trouvés avec la LDV et ceux obtenus avec la PIV.

- **Comparaison des mesures LDV et PIV sur la porte**

On note des écarts importants pour les vitesses horizontales des deux séries de mesure PIV et LDV (8.25 et 8.30, 8.29 et 8.31).

Il faut noter que les profils de vitesses extraits des mesures LDV, ont une localisation spatiale qui peut ne pas être exactement confondue avec celle des mesures PIV.

Un autre facteur important peut intervenir pour expliquer cette différence, c'est le taux d'échantillonnage. En LDV, la fréquence d'échantillonnage dépasse en moyenne 100 Hz et la vitesse moyenne est obtenue à partir de plus de 2000 échantillons, alors qu'en PIV, le nombre d'images acquises est de 30 ou 60 et la fréquences des mesures ne dépasse pas 3.0Hz. Sachant que nous observons un écoulement très turbulent (fluctuations de vitesses importantes), il est normal de constater des différences de mesure.

## 8.5. Mesure de la concentration d'hélium

Suite au retard de recevoir de la sonde on n'a pas respecté les températures dans la maquette comme celles de l'échelle réelle, donc on a fait juste des mesures qualitatives. A ce titre, on a été limité à la mesure seulement de la concentration d'hélium dans les deux locaux dans le cas d'injection d'hélium pur. Pour voir à peu près l'évolution de la température dans ces deux locaux.

Pour ce la, nous avons refait le réglage de l'essai précédemment de l'injection d'hélium pur. Nous avons fait deux mesures de concentration dans le local source ; le premier au niveau du plafond et l'autre au milieu de la maquette, et nous avons refait même chose dans le local cible.

La sonde de concentration donne le pourcentage volumique d'oxygène dans le mélange, après on déduit le pourcentage d'air et d'hélium et donc la masse volumique du mélange.

La température du mélange est calculée par la formule suivante :

$$T_{\text{mélange}} = \frac{\rho_{\text{air}} T_{\text{air}}}{\rho_{\text{mélange}}}$$

Après les calculs, nous avons trouvé les graphes d'évolutions de température dans les deux locaux (figure 8.32, 8.33, 8.34, et 8.35).

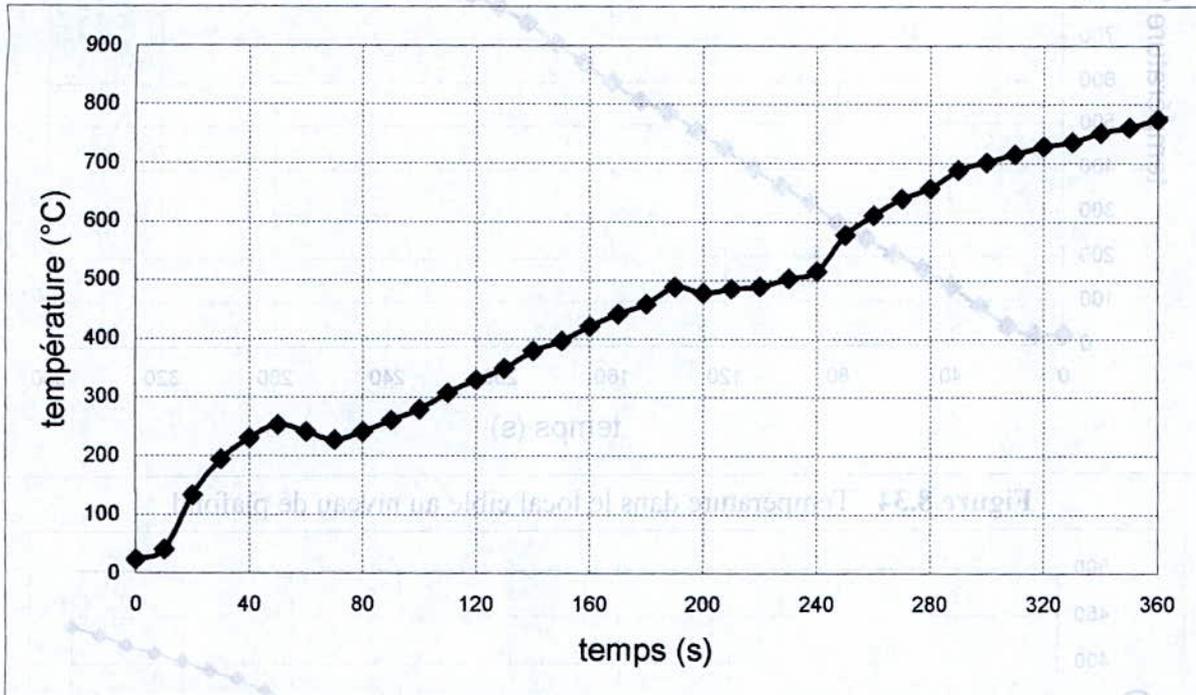


Figure 8.32 : Température dans le local source au niveau de plafond

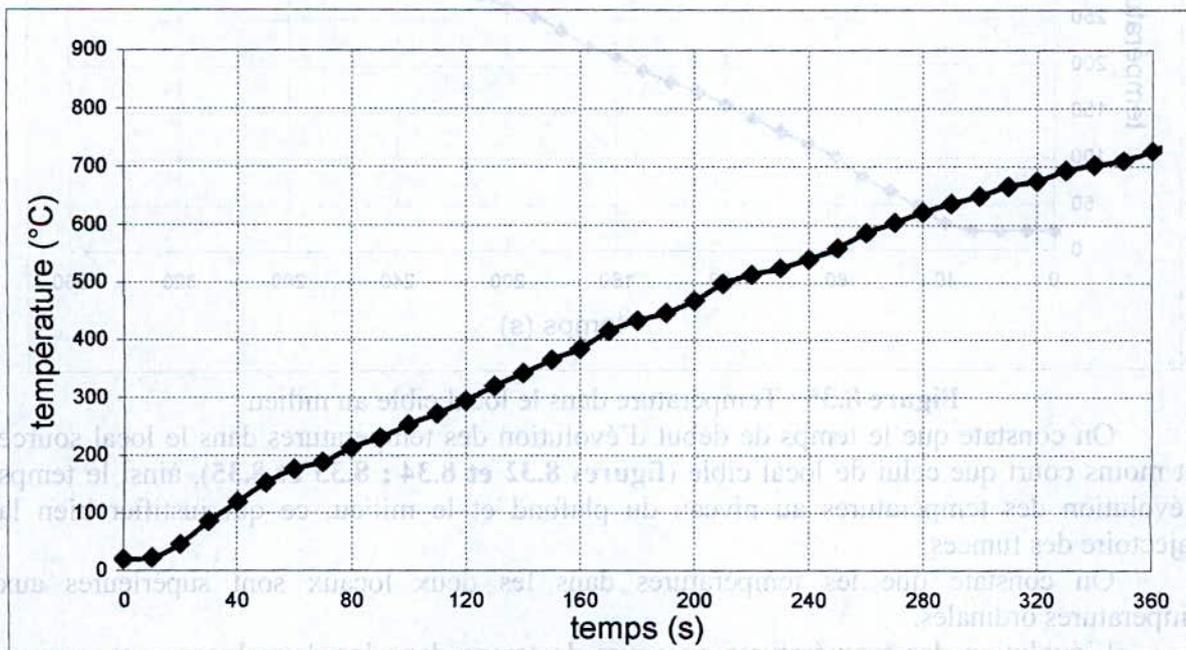
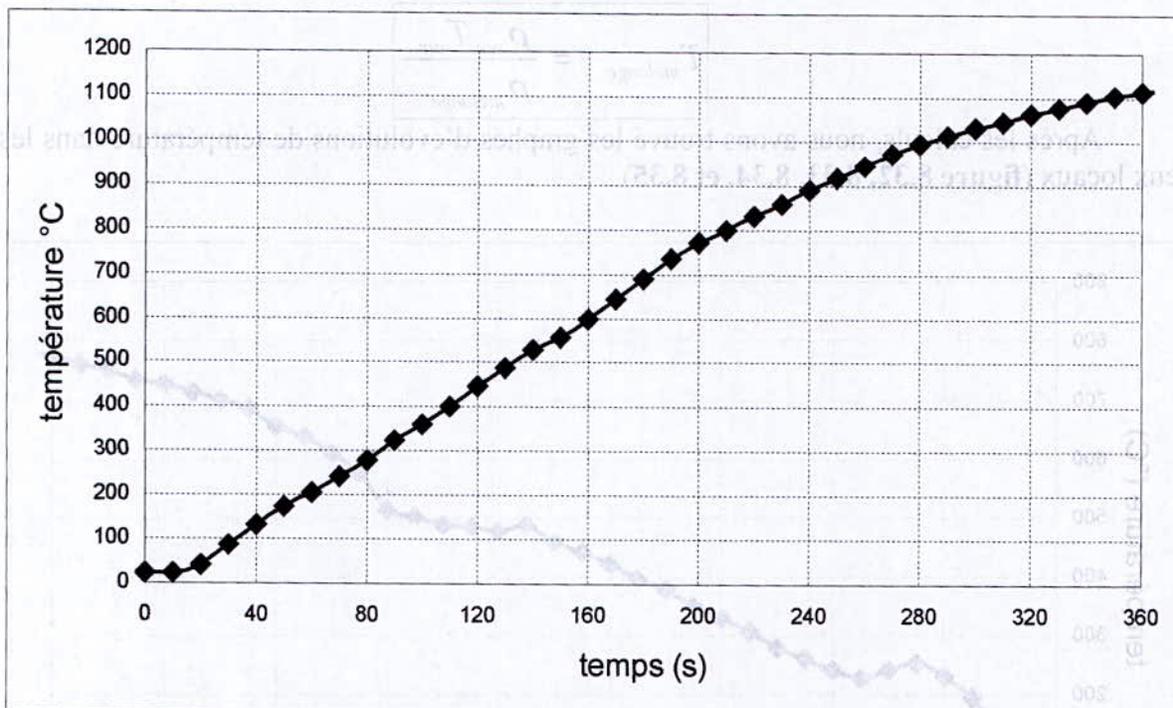
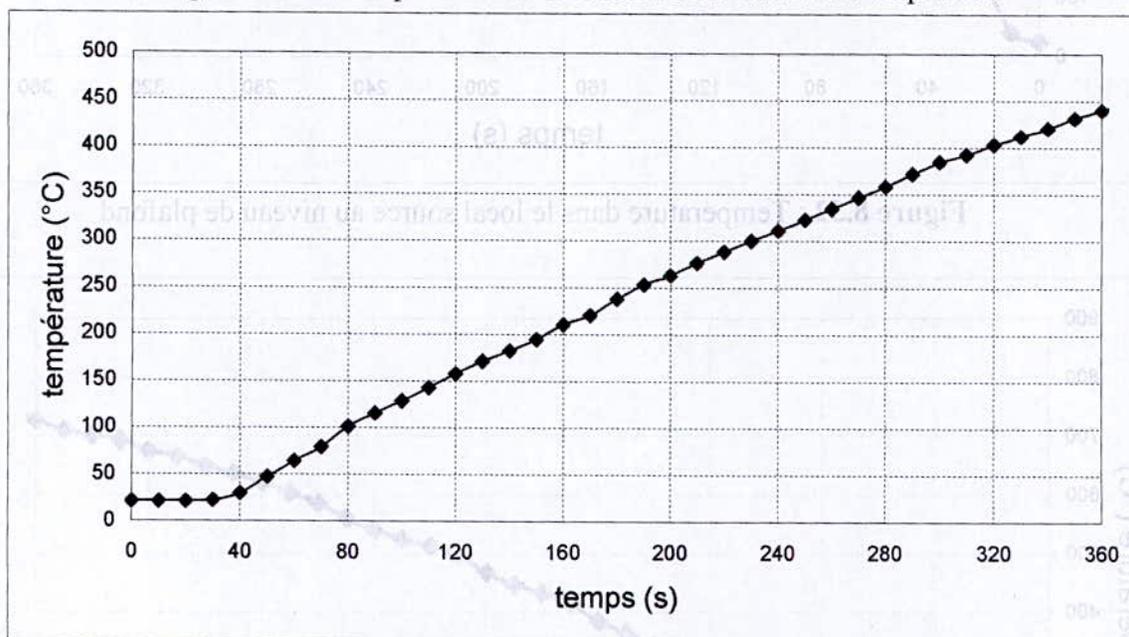


Figure 8.33 : Température dans le local source en milieu



**Figure 8.34 :** Température dans le local cible au niveau de plafond



**Figure 8.35 :** Température dans le local cible au milieu

On constate que le temps de début d'évolution des températures dans le local source est moins court que celui de local cible (**figures 8.32 et 8.34 ; 8.33 et 8.35**), ainsi le temps d'évolution des températures au niveau du plafond et le milieu, ce qui justifier bien la trajectoire des fumées.

On constate que les températures dans les deux locaux sont supérieures aux températures ordinaires.

L'évolution des températures au cours de temps dans les deux locaux est presque linéaire et elle tend vers la température maximale qui est celle d'hélium pur 1832 °C.

## **9. Simulation des expériences avec le code FDS**

### **9.1. Introduction**

L'idée d'étudier la dynamique d'un feu par des outils de simulation numérique remonte au tout début de l'informatique. Cependant, malgré la connaissance de l'ensemble des équations relatives à la dynamique des fluides, il existe de très nombreuses difficultés auxquelles il faut faire face pour obtenir des résultats raisonnables.

La puissance toujours croissante des moyens de calcul permet aujourd'hui d'envisager de façon sérieuse de résoudre ces équations en 3 dimensions et de pouvoir ainsi simuler des écoulements. Mais dans le cas d'incendie notamment, la complexité est accrue puisqu'il faut considérer également des transferts de chaleur importants et une modélisation pour le processus et les phénomènes de combustion qui sont encore assez mal connus. La nécessité de prendre en compte les phénomènes de turbulence dans ce genre de cas constitue également une difficulté importante.

### **9.2. Le Code Fire Dynamics Simulator (FDS)**

Ce code est basé sur la résolution des équations de Navier-Stokes appropriées aux faibles nombres de Mach et sur des considérations thermodynamiques classiques. Afin de modéliser la turbulence, la technique LES (Large Eddy Simulation) ou bien la technique de simulation directe est employée pour prendre en compte l'influence des différentes échelles [21].

### **9.3. Principe et objectifs du modèle**

Ce code a été spécialement développé dans le but de modéliser les conséquences d'incendie de taille industrielle.

Les objectifs poursuivis dans le développement du code FDS sont multiples. Premièrement en tant que code CFD (Computational Fluid Dynamics), il permet la modélisation de la dynamique du feu. On peut penser qu'à terme avec l'amélioration croissante de la puissance de calcul il sera possible d'obtenir une résolution permettant une simulation de plus en plus proche de la réalité. Deuxièmement il est destiné à prévoir les conséquences d'un incendie dans de très diverses géométries [1].

### **9.4. Simulation de la maquette thermique avec FDS**

#### **9.4.1. Objectifs des calculs**

Dans le cadre d'une première approche de l'utilisation de FDS, les calculs réalisés avaient pour but de se familiariser avec ce nouveau code de calcul en essayant de reproduire les résultats expérimentaux obtenus lors des essais.

Des plans ont été disposés de manière à obtenir les variations de température dans le jet de plafond et en fonction de la distance radiale à la source.

Les expériences effectuées sur la maquette 1/5 sur les feux de nappe en espace confiné et ventilé ont été à la base de cette étude. Réalisées à l'intérieur d'un local de 1.34 m<sup>3</sup> avec un bac de TPH au centre, l'objectif était d'étudier les températures à l'intérieur du milieu pour différentes conditions de ventilation.

## 9.4.2. Calcul de la température dans le local avec FDS

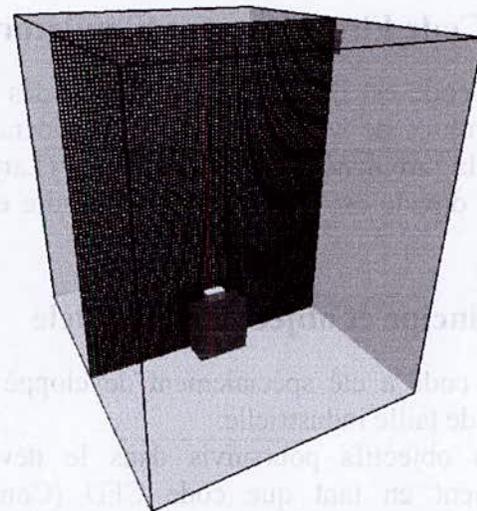
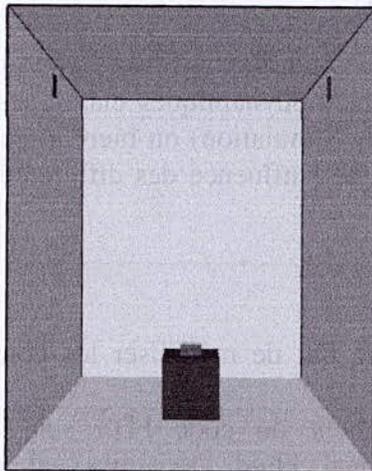
Dans le cadre d'une première modélisation, et vu les temps de calcul nécessaires, seule la zone du milieu a été considérée. (voir annexe 10, programme FDS).

Cette étude comprend uniquement la simulation de l'essai feu de nappe avec un taux de renouvellement maquette de 9.

### 9.4.2.1. Géométrie et maillage

Le local représenté avec FDS donne une bonne vision de la configuration expérimentale (**figure 9.1**). L'entrée d'air se situe sur la face droite et la sortie sur la face gauche.

Un calcul pour un taux de renouvellement maquette ( $TR_m = 9$ ) précédemment définis a été effectué avec un maillage régulier de  $80 \times 96 \times 100$  soit 768 000 points (**figure 9.2**) pour un temps de simulation de 400 seconds. Ceci a conduit à des temps de calcul d'environ une semaine.



**Figure 9.1** : vue du dispositif expérimental      **Figure 9.2** : maillage de la zone du milieu avec FDS

### 9.4.2.2. Définitions des conditions aux limites

Les conditions aux limites de l'espace physique considéré sont des conditions d'entrée et de sortie ventilées.

Des plans placés sous le plafond conformément à l'expérience permettent au cours du temps d'obtenir les températures en fonction de la distance à la source et au plafond.

Au niveau de l'entrée, un débit volumique conforme à l'expérience de  $11.5 \text{ m}^3/\text{h}$  est imposé pour une température ambiante de  $20^\circ\text{C}$ .

Au niveau de la sortie, un débit volumique conforme à l'expérience de  $11.5 \text{ m}^3/\text{h}$  est imposé pour une température de fumée.

La source a été définie par une puissance thermique par unité de surface.

### 9.4.2.3. Résultats de calculs

Les températures calculées au niveau des thermocouples ainsi que les résultats expérimentaux sont présentés en partie 7.3 pour un  $TR_m = 9$ .

- **Prédiction des températures du feu**

L'ordre de grandeur des températures des fumées obtenues est conforme à l'expérience. Ces températures varient entre  $40^\circ\text{C}$  et  $85^\circ\text{C}$  sous le plafond (**figures 9.3 et 9.4**).

L'évolution des températures des fumées calculées dans la pièce sont généralement

inférieures aux températures mesurées expérimentales mais les erreurs restent inférieures à 5 %.

L'effet des cantonnements sur le champ de température est mis en évidence par une vue de dessus (figure 9.4).

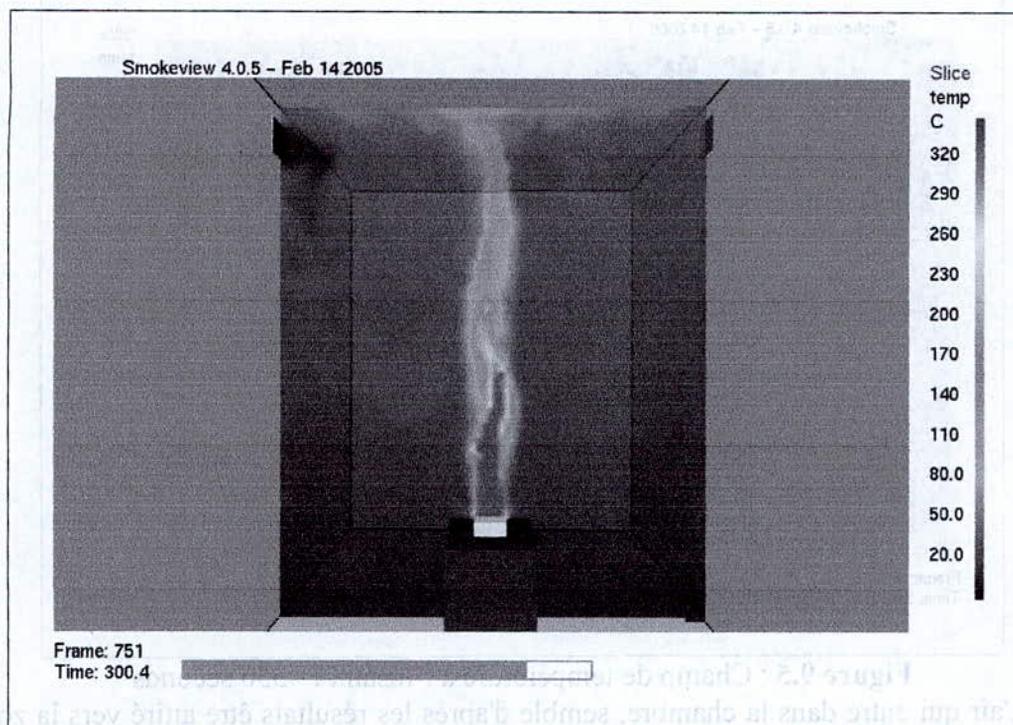


Figure 9.3 : champ de température à 300 seconds

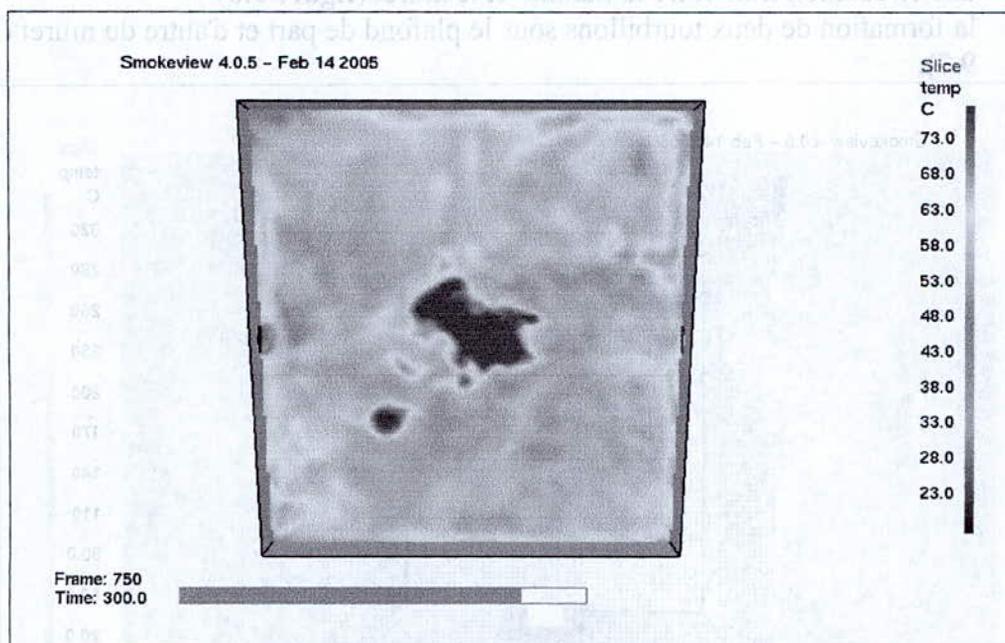


Figure 9.4 : champ de température sous le plafond à 300 seconds

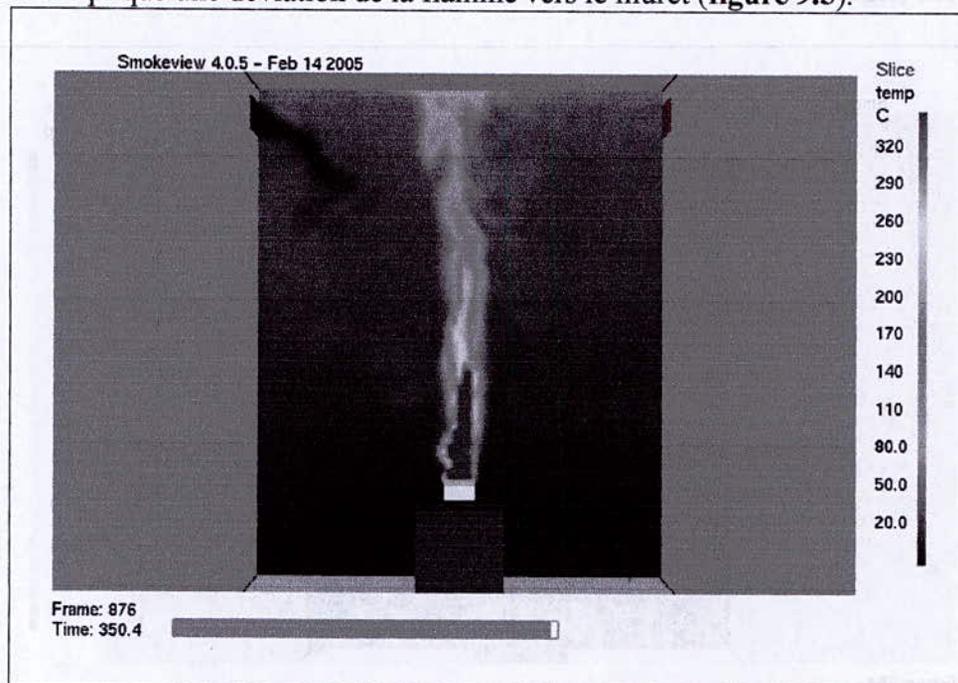
Le gradient de température sur l'axe de la flamme a une allure proche de l'expérience et suit bien l'augmentation de température à l'approche du plafond.

La température dans la flamme est de l'ordre de 400 °C, elle est inférieure aux températures mesurées mais les erreurs restent inférieures à 40 % (figure 9.3).

- Prédiction de l'écoulement

L'écoulement semble très perturbé dans la moitié supérieure de la pièce où l'air est admis et les fumées échappés. C'est en effet à cet endroit que l'alimentation du feu en comburant est possible grâce à l'air frais.

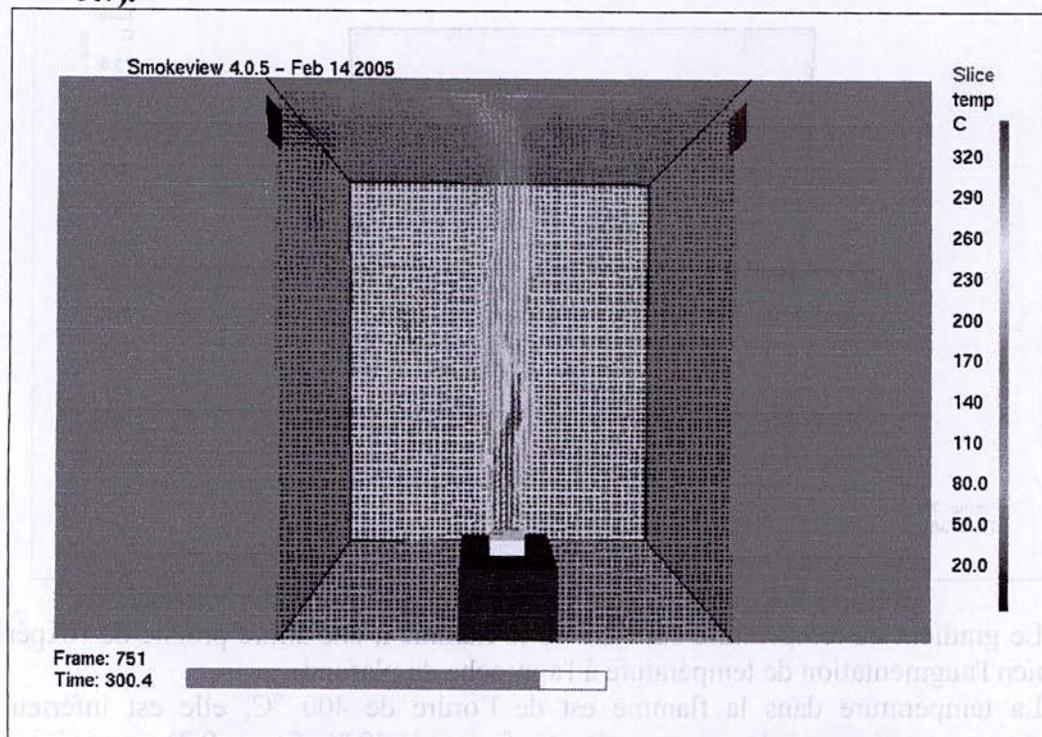
Ceci implique une déviation de la flamme vers le muret (**figure 9.5**).



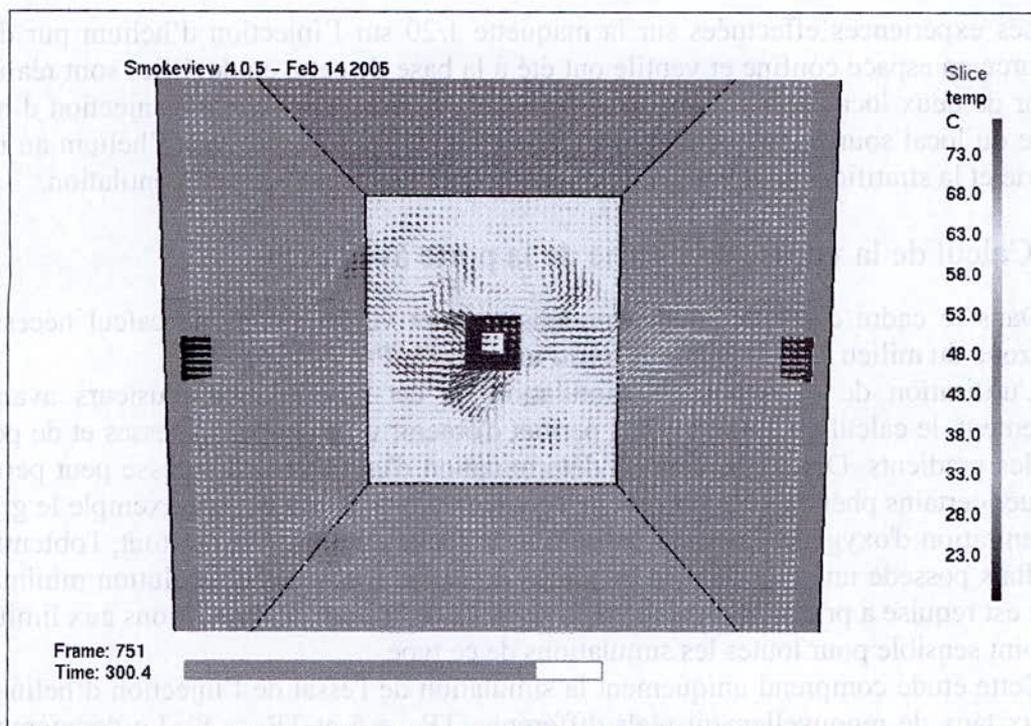
**Figure 9.5** : Champ de température à l'instant  $t=350$  seconds

L'air qui entre dans la chambre, semble d'après les résultats être attiré vers la zone où se produit la combustion. Cette observation a 2 conséquences:

- une circulation d'air entre la flamme et le muret (**figure 9.6**)
- la formation de deux tourbillons sous le plafond de part et d'autre du muret (**figure 9.7**).



**Figure 9.6** : Champ des vecteurs de déplacement à  $t = 300$ s



**Figure 9.7 :** Champ des vecteurs de déplacement sous le plafond à  $t = 300s$

En effet, la circulation d'air entre le plafond et le sol ne peut pas se faire correctement en raison de l'admission de l'air frais et de l'entraînement de cet air par le feu. L'air chaud a donc un mouvement descendant le long des murs et ascendant en raison de cet entraînement. Cette constatation pourrait être à l'origine du gradient de concentration d'oxygène car l'analyse de ces simulations permet de conclure que l'air chargé en oxygène a du mal à atteindre le haut de la pièce.

#### 9.4.3. Conclusion

Les premiers calculs effectués lors de cette étude ont permis d'obtenir de bons résultats avec des erreurs relativement raisonnables.

La propagation de la chaleur en fonction de la source a été observée et les gradients de température sous le plafond ont été correctement reproduits.

La prédiction de la température dans la pièce est inférieure à la température maximale (sous le plafond) de l'ordre d'environ 5%. Cependant, cette température est une valeur moyenne des températures dans la pièce. Les résultats donnés par le code sont donc relativement corrects et proches de la valeur moyenne des températures mesurées.

Les calculs FDS réalisés sur cette expérience ont permis de démontrer qu'un maillage relativement "grossier" conduit à des résultats satisfaisants.

L'allure de l'écoulement dans la chambre permet de tirer des conclusions en accord avec les concentrations d'oxygène.

### 9.5. Simulation de la Maquette adiabatique avec FDS

#### 9.5.1. Objectifs des calculs

Dans le cadre d'une deuxième approche de l'utilisation de FDS, les calculs réalisés avaient pour but de se familiariser avec ce nouveau code de calcul en essayant de reproduire les résultats expérimentaux obtenus lors des essais sur la maquette 1/20.

Les expériences effectuées sur la maquette 1/20 sur l'injection d'hélium pur dans le local source en espace confiné et ventilé ont été à la base de cette étude. Elles sont réalisées à l'intérieur de deux locaux de volume total de  $0.015 \text{ m}^3$  avec une source d'injection d'hélium au centre du local source, l'objectif était d'étudier les vitesses de passage d'hélium au niveau de la porte et la stratification d'écoulement pour différentes conditions de ventilation.

### 9.5.2. Calcul de la vitesse à la sortie de la porte avec FDS

Dans le cadre d'une deuxième modélisation, et vu les temps de calcul nécessaires, seule la zone du milieu a été considérée. (voir annexe 11, Programme FDS).

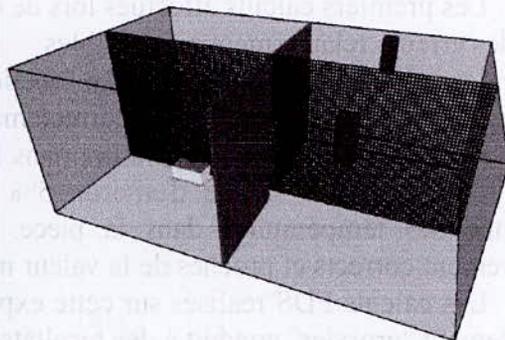
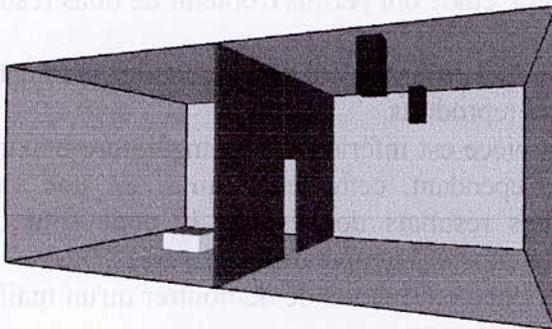
L'utilisation de FDS pour la simulation de cet essai donne plusieurs avantages. Premièrement, le calcul en 3 dimensions permet d'obtenir un champ de vitesses et de pouvoir évaluer les gradients. Deuxièmement, la détermination d'un champ de vitesse peut permettre d'expliquer certains phénomènes observés expérimentalement comme par exemple le gradient de concentration d'oxygène par la visualisation de recirculations. Malgré tout, l'obtention de ces résultats possède un coup d'abord en temps de calcul (puisque une résolution minimale du maillage est requise a priori) et ensuite vis-à-vis de la définition des conditions aux limites qui est un point sensible pour toutes les simulations de ce type.

Cette étude comprend uniquement la simulation de l'essai de l'injection d'hélium pur avec deux taux de renouvellement réels différents ( $TR_p = 5$  et  $TR_p = 8$ ). Le deuxième avait pour but d'étudier l'influence du taux de renouvellement.

#### 9.5.2.1. Géométrie et maillage

Le local représentée avec FDS donne une bonne vision de la configuration expérimentale (**figure 9.8**). L'entrée d'air se situe sur la bouche derrière et la sortie sur la bouche avant.

Deux calculs pour deux taux de renouvellement ( $TR_p = 5$  et  $TR_p = 8$ ) précédemment définis ont été effectués avec un maillage régulier de  $128 \times 80 \times 50$  soit 512 000 points (**figure 9.9**), pour un temps de simulation de 250 seconds. Ceci a conduit à des temps de calcul d'environ 4 jours.



**Figure 9.8** : vue du dispositif expérimental      **Figure 9.9** : maillage de la zone du milieu avec FDS

#### 9.5.2.2. Définitions des conditions aux limites

Les conditions aux limites de l'espace physique considéré sont des conditions d'entrée et de sortie de la ventilation.

Deux essais ont été réalisés avec pour chacun d'eux une valeur de débit d'air entrant et débit de mélange sortant différentes. Les débits considérés sont les suivants : 5.6 l/min et 8.95 l/min.

Au niveau de l'entrée, deux débits volumiques conformes à l'expérience de 5.6 l/min et 8.95 l/min sont imposés pour une température ambiante de  $20^\circ\text{C}$ .

Au niveau de la sortie, deux débits volumiques conformes à l'expérience de 5.6 l/min

et 8.95 l/min sont imposés pour une température de mélange de 20°C.

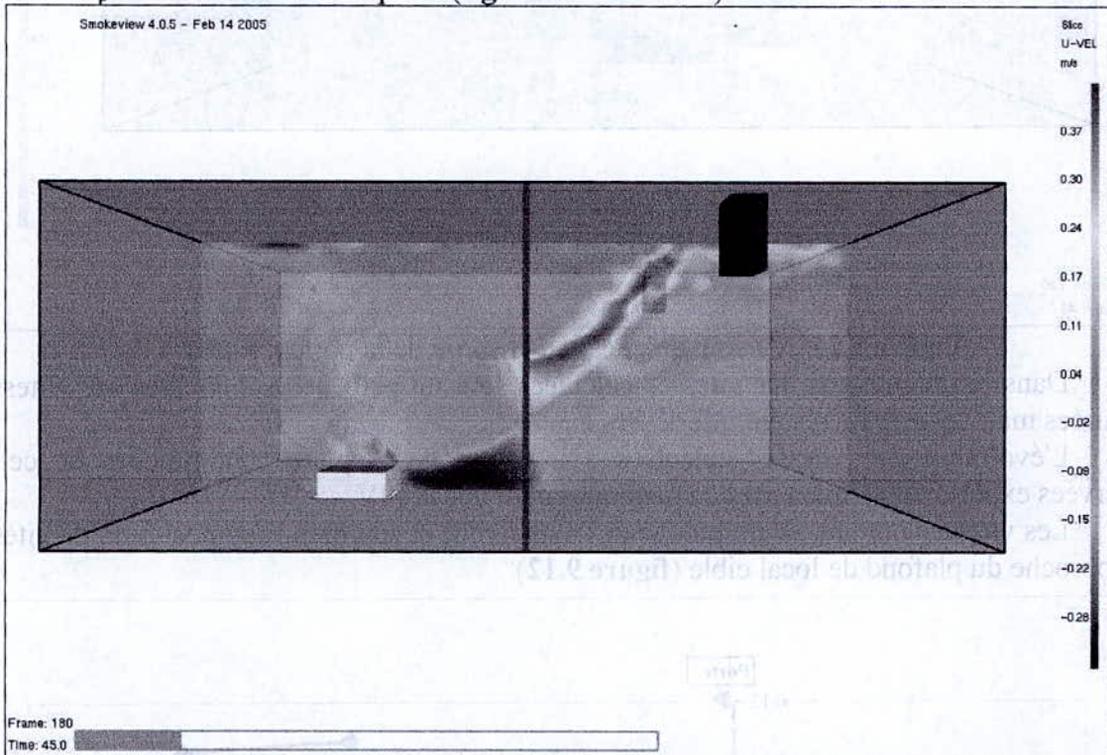
La source a été définie par un débit volumique d'hélium de 7.5 l/min.

### 9.5.2.3. Résultats de calculs

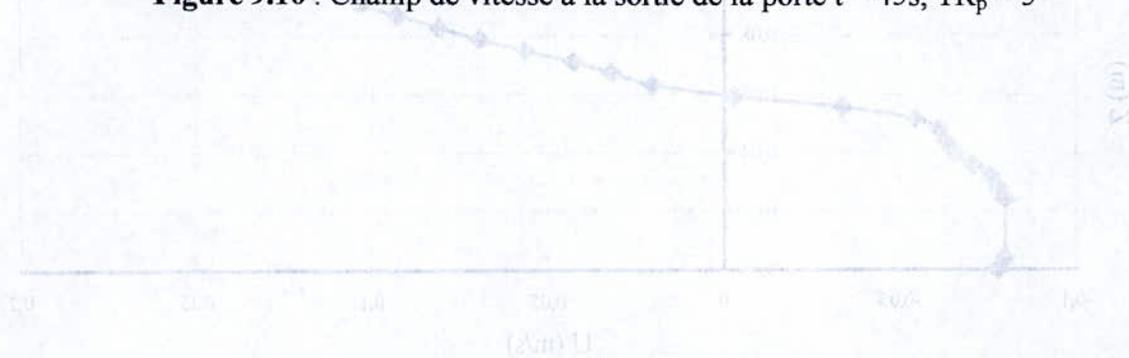
Les vitesses calculées au niveau de la porte ainsi que les résultats expérimentaux sont présentés en partie 8.

- **Prédiction des vitesses**

L'ordre de grandeur des vitesses obtenues est conforme à l'expérience pour les 2 calculs. Ces vitesses varient entre 0.05 et 0.15 m/s pour le  $TR_p$  de 5 et entre 0.06 et 0.18 m/s pour le  $TR_p$  de 8 à la sortie de la porte (**figures 9.10 et 9.11**).

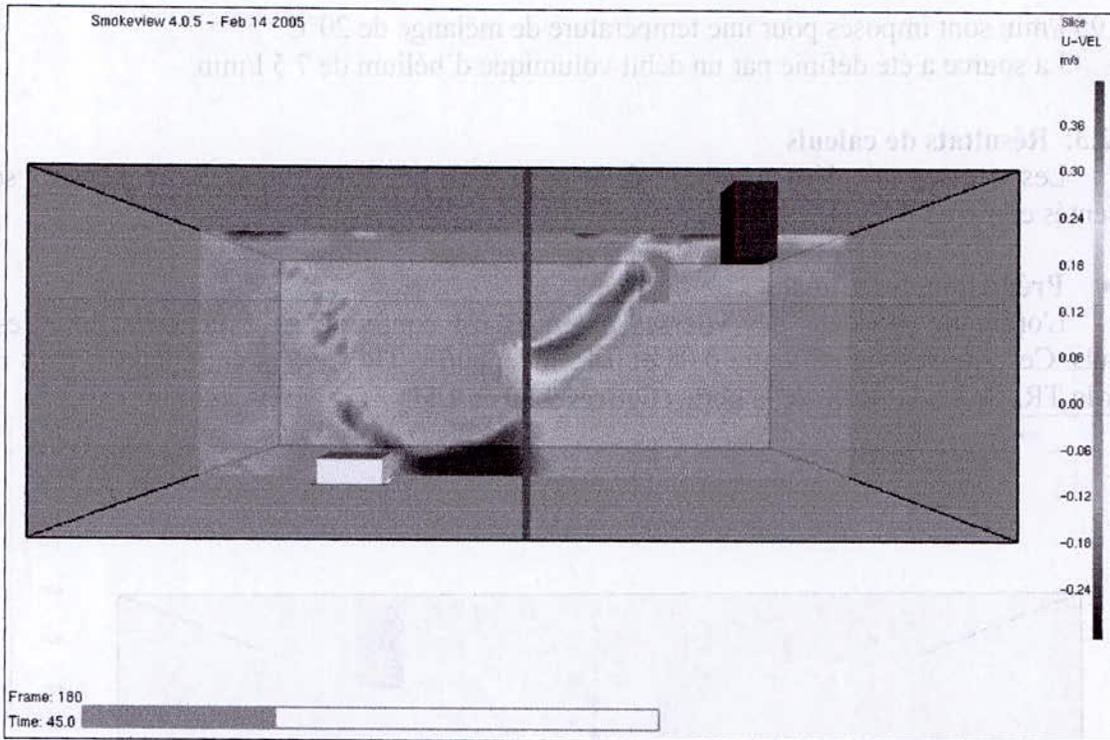


**Figure 9.10** : Champ de vitesse à la sortie de la porte  $t = 45s$ ,  $TR_p = 5$



**Figure 9.11** : Variation de la vitesse horizontale au niveau de la porte en fonction de la distance X (m) pour  $t = 45s$  avec le logiciel de simulation FDS.

Prédiction de l'écoulement  
L'écoulement semble se comporter dans les deux pièces (figures 9.13 et 9.14), dans le local cible où l'impact du jet des fumées, et au niveau des bouches d'injection et d'extraction et aussi au niveau du plafond (figures 9.15 et 9.16).

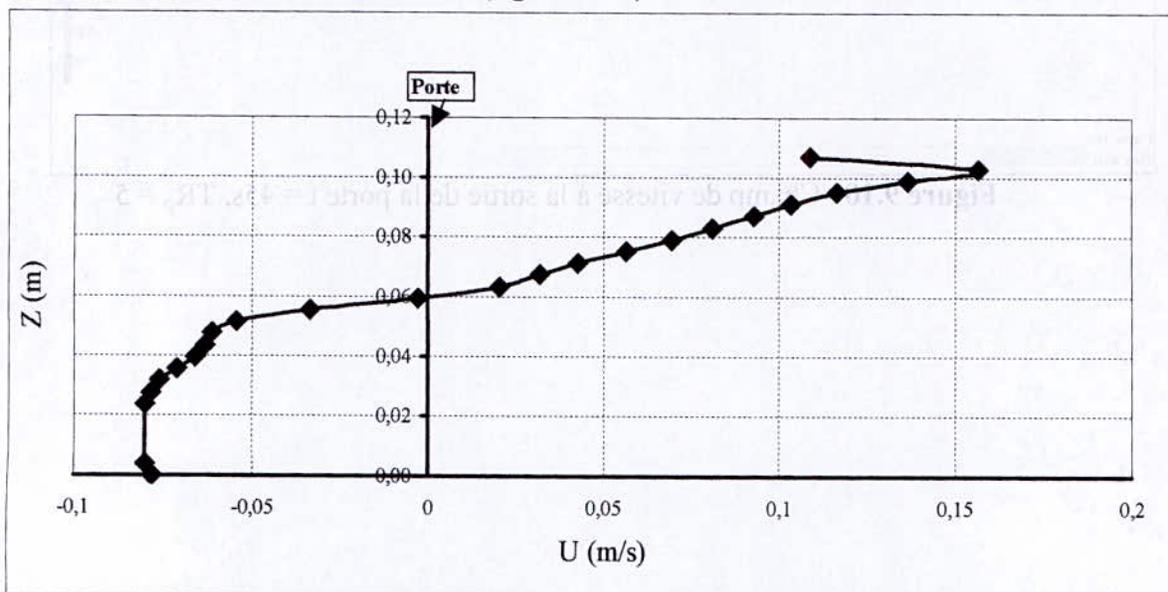


**Figure 9.11** : Champ de vitesse a la sortie de la porte  $t = 45$  s,  $TR_p = 8$

Dans le premier cas, les vitesses calculées sont un petit peu supérieures aux vitesses mesurées mais les erreurs restent inférieures à 5 %.

L'évolution des vitesses calculées à la sortie de la porte sont proches de celles observées expérimentalement avec la méthodes optiques la PIV.

Les vitesses ont une allure proche de l'expérience et suit bien l'augmentation de vitesse à l'approche du plafond de local cible (**figure 9.12**).



**Figure 9.12** : Variation de la vitesse horizontal au niveau de la porte en fonction de la hauteur  $t = 40$  s avec le logiciel de simulation FDS.

- **Prédiction de l'écoulement**

L'écoulement semble très perturbé dans les deux pièces (**figures 9.13 et 9.14**), dans le local cible où l'impact du jet des fumées, et au niveau des bouches d'injection et d'extraction et aussi au niveau du plafond (**figures 9.15 et 9.16**).

On constate que l'épaisseur du jet laminaire à la sortie de la porte est plus épais quand

le taux de renouvellement est important, et aussi la densité dans les deux locaux change.

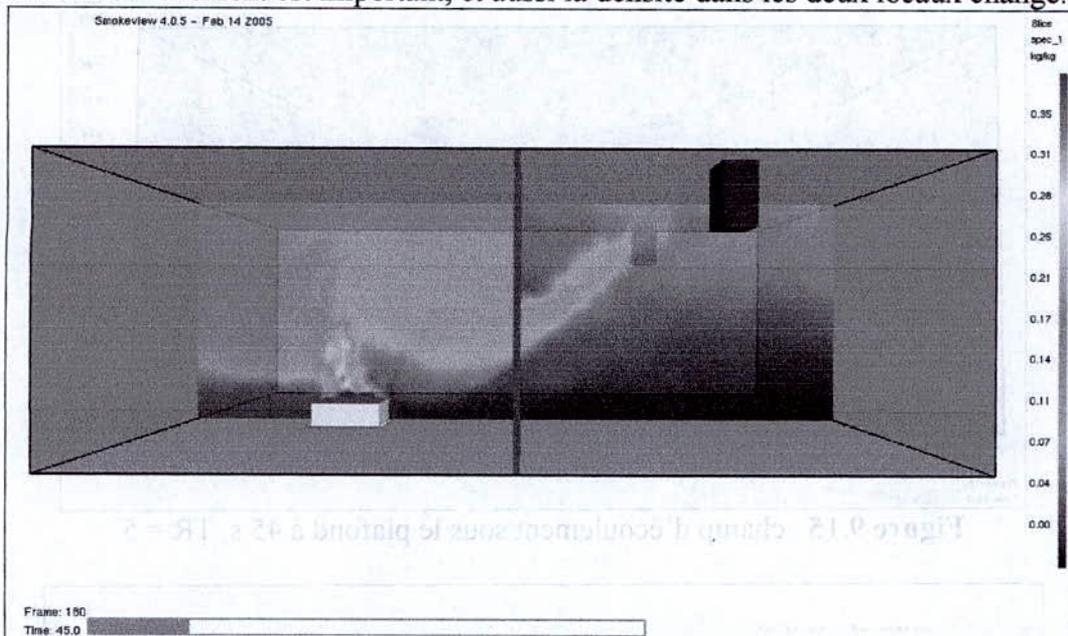


Figure 9.13 : Concentration d'hélium dans les deux locaux à  $t = 45$  s,  $TR = 5$

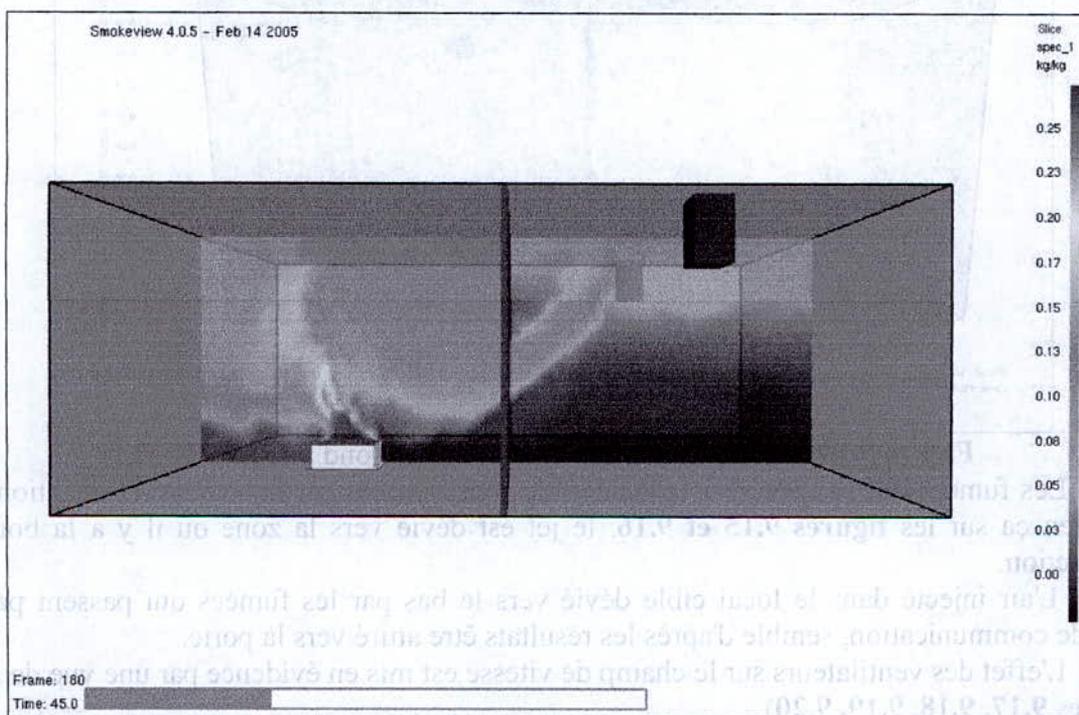
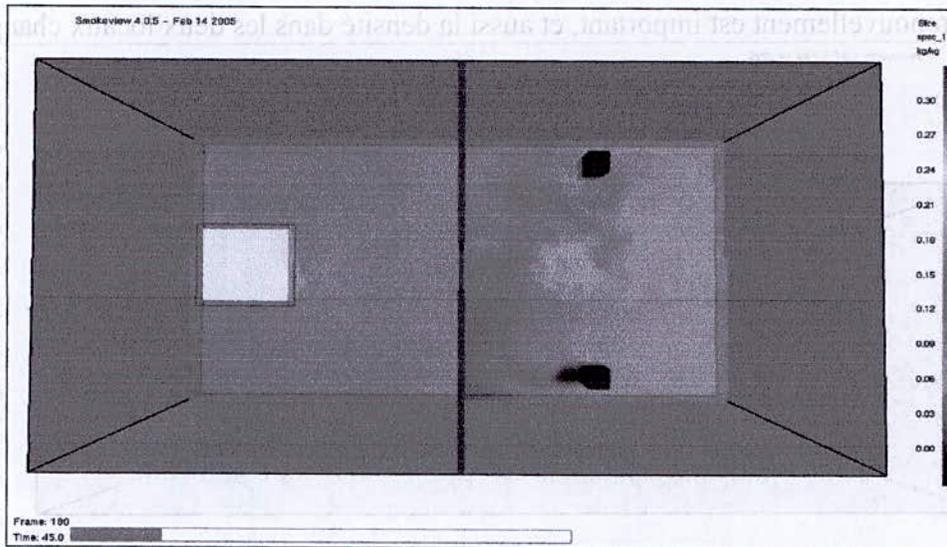
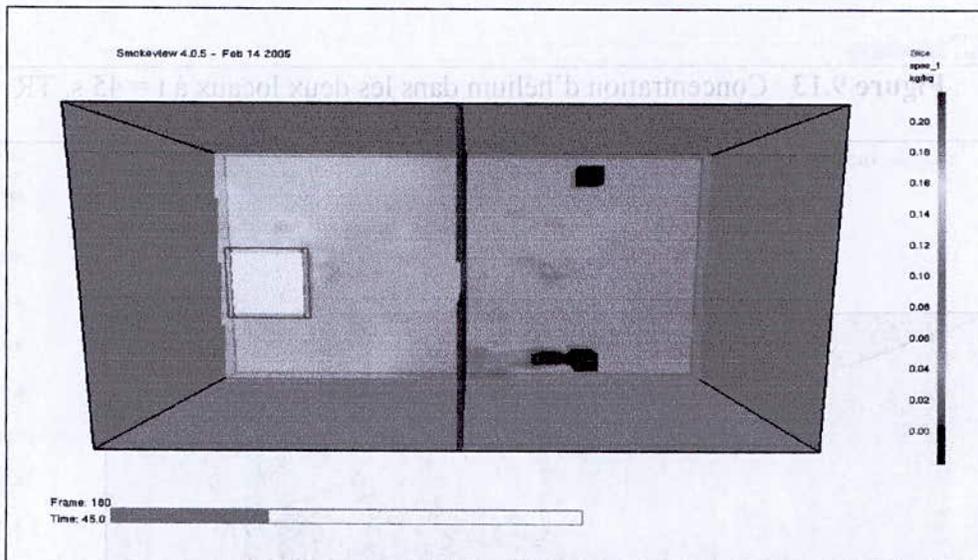


Figure 9.14 : Concentration d'hélium dans les deux locaux à  $t = 45$  s,  $TR = 8$ .



**Figure 9.15** : champ d'écoulement sous le plafond à 45 s, TR = 5



**Figure 9.16** : champ d'écoulement sous le plafond à 45 s, TR = 8

Les fumées qui passent vers le local cible sont aspirées par la bouche d'extraction, on voit bien ça sur les **figures 9.15 et 9.16**, le jet est dévié vers la zone où il y a la bouche d'extraction.

L'air injecté dans le local cible dévié vers le bas par les fumées qui passent par la porte de communication, semble d'après les résultats être attiré vers la porte.

L'effet des ventilateurs sur le champ de vitesse est mis en évidence par une vue de face (**figures 9.17, 9.18, 9.19, 9.20**).

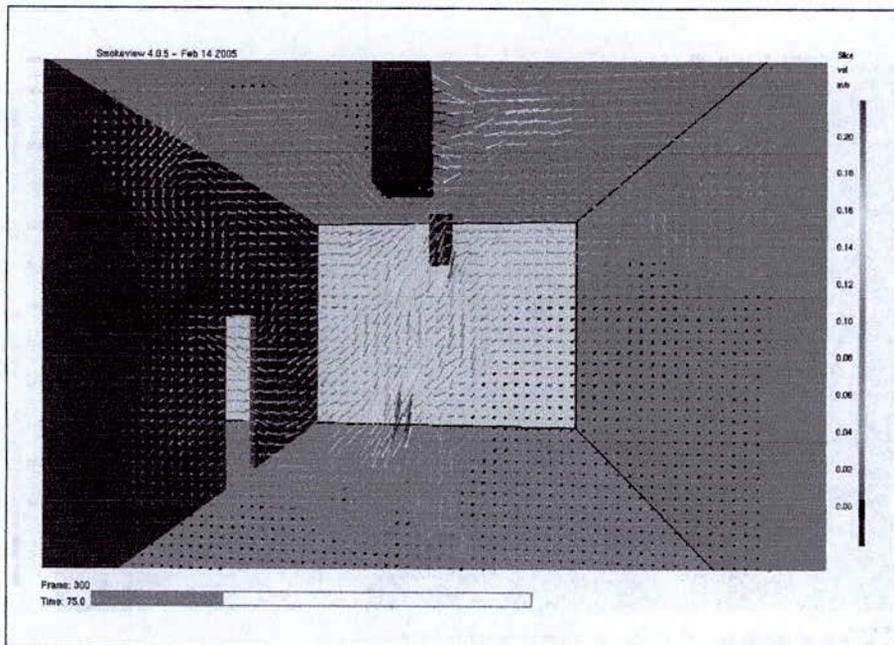


Figure 9.17 : Bouche d'extraction des fumées à  $t = 75s$ ,  $TR = 5$

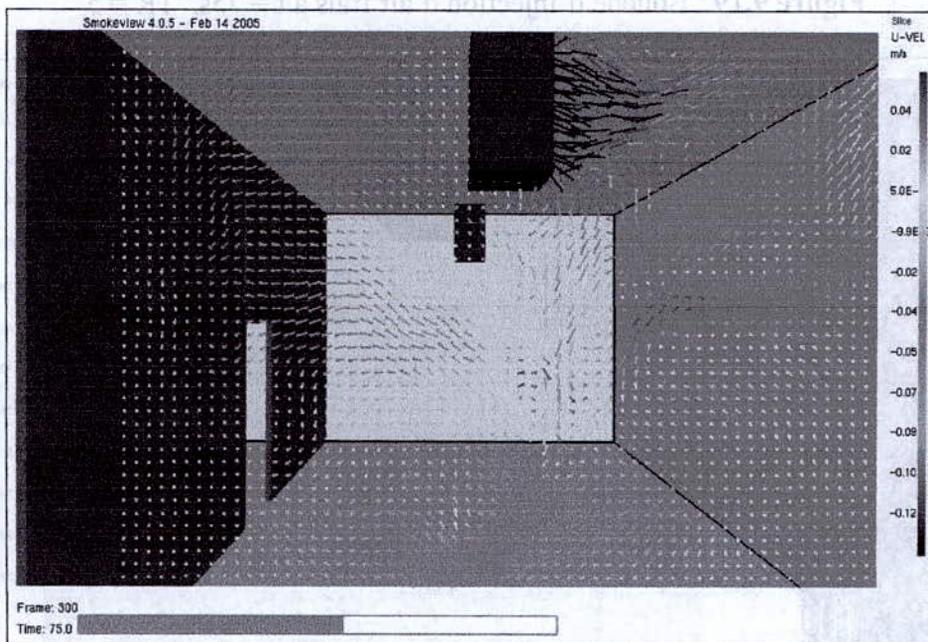


Figure 9.18 : Bouche d'extraction des fumées à  $t = 75s$ ,  $TR = 8$

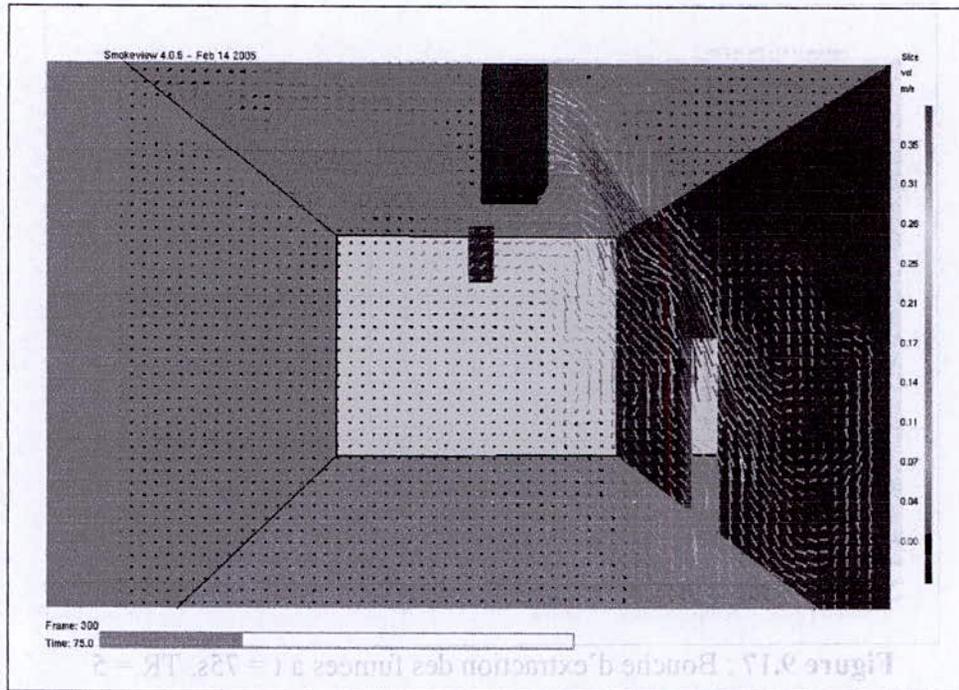
On constate que les vitesses à l'entrée des ventilateurs correspondent bien aux taux de renouvellements.

9.4.4. Conclusion

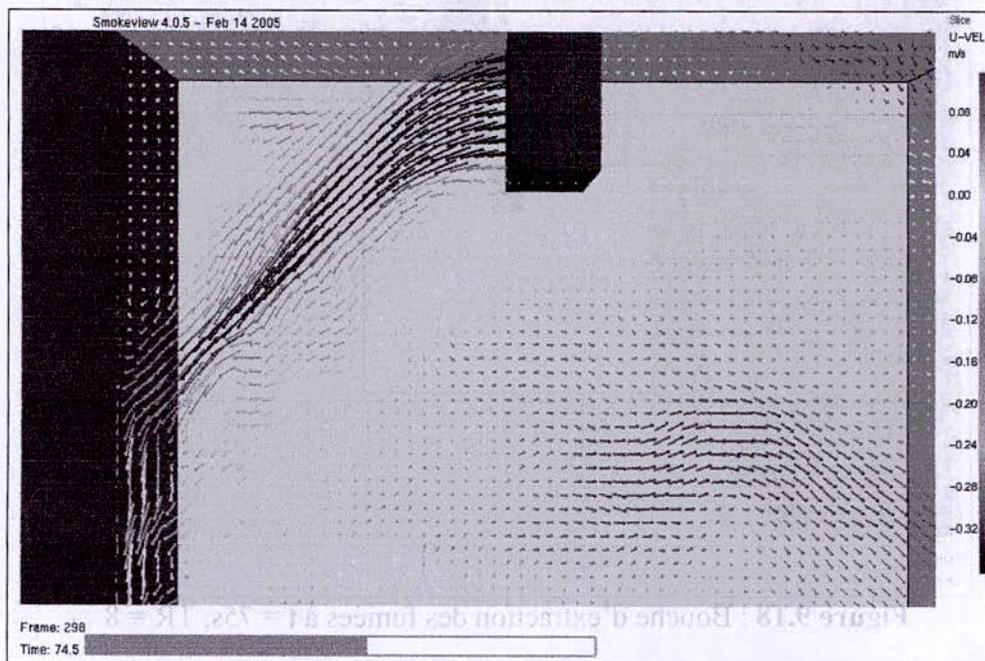
L'air injecté par la bouche d'injection s'accroît vers le bas quand il s'éloigne de la bouche puis il se renverse et passe par la porte.

Les temps de passage et de retour des fumées par la porte de communication sont comparables aux ceux trouvés expérimentalement.

Le taux de renouvellement est un grand indicateur sur la quantité et la vitesse des fumées qui passent par la porte.



**Figure 9.19** : Bouche d'injection d'air frais à  $t = 75s$ ,  $TR = 5$



**Figure 9.20** : Bouche d'injection d'air frais à  $t = 75s$ ,  $TR = 8$

On constate que les vitesses à la sorties des ventilateurs correspondent bien aux taux des renouvellements.

#### 9.4.4. Conclusion

L'air injecté par la bouche d'injection s'accélère vers le bas quand il s'éloigne de la bouche puis il sort en partie basse de la porte.

Les temps de passage et de retour des fumées par la porte de communication sont semblables aux ceux trouvés expérimentalement.

Le taux de renouvellement joue un grand importance sur la quantité et la vitesse des fumées qui passe par la porte.

La concentration en hélium dans le local source est important quand le taux de renouvellement est plus élevé.

Les calculs FDS réalisés sur cette expérience ont permis de démontrer qu'un maillage relativement "grossier" conduit à des résultats satisfaisants.

L'allure de l'écoulement dans les deux locaux permet de tirer des conclusions en accord avec les concentrations d'hélium observé expérimentalement. Et même s'il est impossible de capter la plupart des structures, les calculs effectués donnent dans ce cas une bonne base à la compréhension des phénomènes dans la chambre.

Les résultats trouvés avec le code de simulation FDS semblent aux résultats expérimentaux calculer avec la méthode optique PIV.

#### Méthode adaptative :

Les profils de vitesse au niveau de la sortie de la porte ont été déterminés par des mesures LDV et PIV. Ils ont permis de quantifier le transfert de masse présent entre les deux locaux, avec simulation d'incendie de plusieurs puissances.

Il a été constaté que le mouvement au niveau de la porte présente un phénomène de retour vers le local source.

Les résultats numériques obtenus sur FDS décrivent un résultat qualitativement semblable avec l'expérimentation. Et ont permis d'effectuer une simulation avec plusieurs taux de renouvellement.

Le mouvement des fumées à l'intérieur de la maquette a été décrit.

L'étude de la propagation des fumées entre les deux locaux a été donc réalisée. Elle a permis de valider qualitativement les simulations numériques faites sous le logiciel FDS et de prédire de façon assez précise la propagation d'une fumée. Les tests de propagation de fumées le montrent.

Les simulations avec mélange air-hélium ont permis de décrire le comportement de fumées se propage dans l'espace. Le taux de renouvellement influe étroitement sur la propagation des fumées entre les deux compartiments à travers la porte de communication. Ce

## 10. Conclusions

Le présent rapport de synthèse permet d'avoir une vue générale sur le travail réalisé au cours de ce projet.

### **Maquette thermique :**

Les températures à l'intérieur de la maquette et les vitesses de pertes de masse ont été déterminées pour différents taux de renouvellement et puissance de foyer.

Différentes configurations d'essais concernant le confinement, la ventilation et la puissance du feu ont été effectuées.

Les caractéristiques de la flamme ont été décrits, à savoir le profils de températures et sa hauteur.

Des calculs sur FDS ont été réalisés, et qui ont présenté des résultats qualitativement semblables.

Grâce aux essais réalisés sur la maquette feu, les conséquences d'un feu sur le local où s'est produit l'incendie et sur la ventilation peuvent être mieux appréciées : échauffement des gaz ; propagation des fumées ; endommagement éventuel des équipements situés dans le local et des équipements du réseau de ventilation.

La puissance du feu de nappe est strictement proportionnelle à la surface de nappe de combustible. Alors que la quantité de combustible pour une surface de nappe donnée n'influe guère sur la puissance du feu.

La forme et la taille de la flamme de nappe évoluent suivant les réglages de système de ventilation.

Le champ de températures, dans une telle flamme, est assez compliqué : la température est peu élevée au centre du jet de gaz, elle atteint son maximum dans la zone de flamme de diffusion et décroît vers l'extérieur, à la fois à cause du mélange avec l'air (qui est en général en excès) et à cause des pertes de chaleur par convection ou rayonnement vers les parois ou les objets à chauffer.

Les fuites de gaz tendent à diminuer la puissance disponible produite par le foyer. Elles peuvent également être à l'origine de changement dans la configuration du feu : inclinaison de la flamme, réduction de la longueur de flamme, etc.

### **Maquette adiabatique :**

Les profils de vitesses au niveau de la sortie de la porte ont été déterminés par des mesures LDV et PIV. Ils ont permis de quantifier le transfert de masse présent entre les deux locaux, avec simulation d'incendie de plusieurs puissances.

Il a été constaté que le mouvement au niveau de la porte présente un phénomène de retour vers le local source.

Les résultats numériques obtenus sur FDS décrivent un résultat qualitativement semblable avec l'expérimentation. Et ont permis d'effectuer une simulation avec plusieurs taux de renouvellement.

Le mouvement des fumées à l'intérieur de la maquette a été décrit.

L'étude de la propagation des fumées entre les deux locaux a été donc réalisés. Elle a permis de valider qualitativement les simulations numériques faites sous le logiciel FDS et de prédire, de façons assez précise, la propagation d'une fumée. Les tests de propagation de fumées le montrent.

Les simulations avec mélange air-hélium ont permis de décrire le comportement de fumées se propage dans l'enceinte. Le taux de renouvellement influe efficacement sur la propagation des fumées entre les deux compartiments à travers la porte de communication. Ce

résultat s'avérera certainement décisif le choix d'une configuration de retardées ou diminuées la propagation des fumées.

Globalement, la propagation de la fumée se fait selon le mouvement de l'air induit par les ventilateurs. Donc la ventilation joue une grande importance.

L'emploi de modèle numérique pour l'évaluation de la propagation des fumées entre deux locaux présente de nombreux avantages par rapport à des expérimentations : La rapidité de l'étude et la possibilité d'envisager un grand nombre des cas. Toutefois, les essais à échelle maquette permettent aussi de connaître les phénomènes à modéliser et par conséquent de participer au développement des outils de calcul.

Le code FDS permet quant à lui d'étudier finement l'incendie mais sa mise en œuvre est complexe et les temps de calcul sont importants. Toutefois, il s'agit d'un modèle très intéressant qui est en cours de développement et nécessite encore des travaux de validation.

Les premiers calculs effectués lors de cette étude avec le code FDS ont permis d'obtenir des bons résultats avec des erreurs relativement raisonnables.

#### Pour la maquette adiabatique :

Réaliser une étude complète sur maquette à échelle 1/2, et mettre en œuvre des essais avec le maximum de configurations possibles.  
Établir une relation entre le TR et le débit des fumées, la puissance convective au niveau de la porte de communication.  
Pour chaque TR et puissance déterminer les temps de passage et de retour des fumées et aussi le temps de remplissage des locaux.  
Réaliser un calcul sur le code FDS-UI-MT avec plusieurs configurations.  
Effectuer des visualisations dans d'autres plans de la maquette.  
Faire les mesures pour les différents plans de renouvellement et les différentes positions de la bouche d'injection d'air :  
Travailler avec les trois modes : mode porte, guide centré, et excentré ;  
Travailler avec différentes puissances du feu (puissance d'hélium) et donc le diamètre de bac de combustible ;  
Réprouver les températures de l'échelle réelle sous le plafond, en respectant la quantité d'air dans le mélange air-hélium injecté dans le local source  
Simuler de façon très simplifiée les réactions de combustion avec un mélange fin.

## 11. Perspectives

Les perspectives que ce travail nous permet d'entrevoir sont nombreuses. Il ouvre aussi bien la voie à des études expérimentales complémentaires qu'à des simulations numériques.

### Pour la maquette thermique :

Réalisation d'une autre maquette thermique à échelle 1/5, dont laquelle on respecte les conditions de similitude. Cette maquette devra constituer de deux locaux avec tous les mode de transferts.

Trouvez un autre combustible qui dégage moins des fumées, pour pouvoir faire les mesures avec les lasers PIV et LDV.

Simuler plusieurs puissances de feu.

Faire les mesures des vitesses de la flamme et au dessus de la flamme avec PIV et LDV, et aussi les visualisations par la tomographie.

L'idée intéressante à explorer est l'emploi d'une camera rapide pour filmer l'évolution d'un feu de nappe produit par une combustion de combustible.

Il serait intéressant d'effectuer des mesures de concentrations des produits de combustion et d'obtenir la quantité d'air consommé pendant l'essai et la comparer avec le pouvoir comburivore.

Faire les mesures de pression à l'intérieur de la maquette.

Travailler avec différent TR et différente position d'injection d'air frais et aussi la direction de la bouche d'injection.

### Pour la maquette adiabatique :

Réaliser une étude complète sur maquette à échelle 1/5, et mettre en œuvre des essais avec le maximum de configurations possibles.

Etablir une relation entre le TR et le débit des fumées, la puissance convective au niveau de la porte de communication.

Pour chaque TR et Puissance déterminer les temps de passage et de retour des fumées et aussi le temps de remplissage des locaux.

Réaliser un calcul sur le code FLUENT avec plusieurs configurations.

Effectuer des visualisations dans d'autres plans de la maquette.

Faire les mesures pour les différents taux de renouvellement et les différentes positions de la bouche d'injection d'air ;

Travailler avec les trois modes : mode porte, gaine centrée, et excentrée ;

Travailler avec différentes puissances du feu (puissance d'hélium) et donc le diamètre de bac de combustible,

Reproduire les températures de l'échelle réelle sous le plafond, en respectant la quantité d'air dans le mélange air-hélium injecte dans le local source.

Simuler de façon très simpliste les réactions de combustion avec un maillage fin.

## Bibliographie

- [1] F. CRETIN, A. CARRAU, Développement d'une méthodologie d'évaluation des effets thermiques et toxiques des incendies d'entrepôt (DRA 03), Rapport intermédiaire d'Opération Modélisation de l'incendie en milieu confiné, INERIS, Décembre 2000.
- [2] J-L. GUSTIN, Risques d'explosion de poussières - Prévention et protection, Techniques de l'ingénieur, Article SE5 031.
- [3] R. AUBER, Prévention des accidents électriques, Techniques de l'ingénieur, Article D5 100.
- [4] B. FALLOU, Problèmes de feu dans le matériel électrique, Techniques de l'ingénieur, Article D2 070.
- [5] Guide du formateur, Accidents thermiques, Version 5.12.
- [6] E. BERNUCHON, O. SALVI, Méthodes pour l'évaluation et la prévention des risques accidentels (DRA-006), Feux de nappe, INERIS, Octobre 2002.
- [7] Jean-Michel D'HOOP, Sécurité incendie bâtiment, Techniques de l'ingénieur, Article SE2 050.
- [8] DELICHATSIOS, Air Entrainment into Buoyant Jet Flames and Pool Fires, Combustion and Flame, 1987.
- [9] E. ESPOSITO, Combustion - Inflammation spontanée, Techniques de l'ingénieur, Article A1 625.
- [10] R. BORGHI, M. DESTRIAU, La combustion et les flammes. Technip 1995.
- [11] R. COMOLET, Mécanique expérimentale des fluides, Dynamique des fluides réels turbomachines, Tome II, MASSON et C<sup>ie</sup>, Editeurs, Paris, 1963.
- [12] A. LALLEMAND, Ecoulement des fluides, Analyse dimensionnelle. Similitude, Techniques de l'ingénieur, Article BE 8 159.
- [13] A. LALLEMAND, Ecoulement des fluides – Equations de bilans. Techniques de l'ingénieur, Article BE8 153.
- [14] L. Girardot, G. Losfeld, F. Micheli, M. Pérotto, R. Soarès Morgadinho et D. Soulevant. Mise en œuvre de la Vélocimétrie Laser à Franges au département d'Aérodynamique Fondamentale et Expérimentale. Onera RT 193/1865 DAFE/N, décembre 1998.
- [15] Laurent Girardot, Eléments sur la Vélocimétrie Laser. evrest. UFC/UTBM, Belfort 2002.
- [16] Francis DUPRIEZ et Jean-Pierre FLODROPS- Mesures locales de vitesse dans un fluide- Techniques de l'Ingénieur - Article R 2110 – 2.

- [17] D. PANTELIS, Laser de puissance, Interactions, Traitement et utilisation, Technique de l'ingénieur, Article A1 095.
- [18] Alain BOUTIER et Henri ROYER, Visualisations et mesures optiques en aérodynamique. Techniques de l'Ingénieur.
- [19] Traité de thermométrie par thermocouple et résistance, TC, Version 6.0, 2004.
- [20] F. CRETIN, A. CARRAU, Développement d'une méthodologie d'évaluation des effets thermiques et toxiques des incendies d'entrepôt (DRA 03), Rapport intermédiaire d'Opération Modélisation de l'incendie en milieu confiné, INERIS, Décembre 2000.
- [21] P. FORNEY, B. McGRATTAN, User's guide for smokeview (Version 4)-A Tool for Visualizing Fire Dynamics Simulation Data, NIST Special publication 1017, août 2004.
- [22] B. McCRATTAN, Fire Dynamics Simulator (Version 4), Technical reference guide, NIST Special publication 1018, Février 2005.
- [23] B. McCRATTAN, P. FORNEY, Fire Dynamics Simulator (Version 4), NIST Special publication 1019, février 2005.
- [23] H.C Van de Hulst. Dover, Light Scattering by small particle, Publication. 1981.
- [24] Elisabeth Giacobino, Optique des milieux matériels, Techniques de l'Ingénieur, traité Sciences fondamentales, Article A 1 080.
- [25] G. Gouesbet et G. Gréhan, Diffusion des faisceaux laser par des particules, Techniques de l'Ingénieur, Article AF 3 460.
- [26] P.Vigliano, Granulométrie des aérosols par diffusion lumineuse, Session Métrologie Laser en Mécanique des Fluides- Institut National des Sciences et Techniques Nucléaires.-Novembre 1992.
- [27] J-P. SCHON, G. COMTE-BELLOT et G. CHARNAY, Anémomètres à fil ou à film chaud, Techniques de l'Ingénieur, Article R2 272.

## Table des figures

Figure 3.1: Vue en perspective du dispositif opérationnel à Cadarache.....	8
Figure 4.1: Triangle du feu.....	10
Figure 4.2: Evolution de l'incendie.....	11
Figure 4.3: étapes d'un feu en espace confiné.....	13
Figure 4.4: Produits de la combustion de Propane en fonction de la richesse.....	14
Figure 4.5: Schéma du mécanisme de combustion auto-entretenu.....	16
Figure 4.6: Domaine d'inflammabilité.....	17
Figure 4.7: Représentation schématique de la flamme.....	18
Figure 4.8: Mécanismes de transfert de la chaleur dans la flamme.....	19
Figure 4.9: entraînement d'air dans le panache d'un feu.....	20
Figure 6.1: Doppler différentiel.....	26
Figure 6.2: Réalisation du volume de mesure.....	27
Figure 6.3: Volume de mesure.....	28
Figure 6.4: Sections de réseaux de franges bleu ( $\lambda=488$ nm) et vert ( $\lambda=514.5$ nm).....	29
Figure 6.5: Sections de réseau de franges vert ( $\lambda=514.5$ nm) avant le croisement parfait.....	29
Figure 6.6: Ambiguïté de signe.....	30
Figure 6.7: Application d'une fréquence de shift.....	30
Figure 6.8: Montage d'un système PIV.....	32
Figure 6.9: Principe de la PIV.....	33
Figure 6.10: Déplacement des particules entre l'instant $\Delta t$ .....	33
Figure 6.11 : Thermocouple.....	35
Figure 6.12: Thermocouple type K.....	35
Figure 7.1: Maquette feu à l'état final.....	38
Figure 7.2: Intérieur de l'enceinte.....	38
Figure 7.3: Disposition des thermocouples dans l'enceinte ouverte.....	39
Figure 7.4: Photo flamme perturbée.....	39
Figure 7.5: Photo flamme normale.....	39
Figure 7.6: Evolution des températures au cours du temps.....	40
Figure 7.7: Vitesse de perte du masse de TPH.....	41
Figure 7.8: Disposition des thermocouples à l'intérieur de l'enceinte.....	41
Figure 7.9 : Flamme sans toit.....	42
Figure 7.10 : Flamme avec toit Flamme étirée.....	42
Figure 7.11 : Evolution de la température et la perte de masse au cours du temps.....	42
Figure 7.12: Vitesse de perte de masse.....	43
Figure 7.13 : Enceinte fermée et ventilée.....	44
Figure 7.14 : Position des ventilateurs d'extraction et d'injection.....	44
Figure 7.15 : Disposition des thermocouples à l'intérieur de l'enceinte fermée.....	45
Figure 7.16 : Evolution de la température et la perte de masse au cours du temps $Q_{v\text{ entrée}} = 6.4$ et $Q_{v\text{ sortie}} = 8.9$ m <sup>3</sup> /h.....	46
Figure 7.17: Evolution de la température et la perte de masse au cours du temps $Q_{v\text{ entrée}} = 6.4$ et $Q_{v\text{ sortie}} = 11,5$ m <sup>3</sup> /h.....	46
Figure 7.18 : Evolution de la température et la perte de masse au cours du temps $Q_{v\text{ entrée}} = Q_{v\text{ sortie}} = 6,4$ m <sup>3</sup> /h.....	47
Figure 7.19 : Evolution de la température et la perte de masse au cours du temps $Q_{v\text{ entrée}} = Q_{v\text{ sortie}} = 11,5$ m <sup>3</sup> /h.....	48
Figure 7.20 : Evolution de la température et la perte de masse au cours du temps $Q_{v\text{ entrée}} = 11,5$ et $Q_{v\text{ sortie}} = 6,4$ m <sup>3</sup> /h.....	49

Figure 7.21 : Evolution de la température et la perte de masse au cours du temps $Q_{v \text{ entrée}} = 11,5$ et $Q_{v \text{ sortie}} = 8,9 \text{ m}^3/\text{h}$ .....	49
Figure 7.22 : Bouche de déviation de l'air.....	50
Figure 7.23 : Evolution de la température et perte de masse en fonction du temps avec entrée d'air déviée, $Q_{v \text{ entrée}} = Q_{v \text{ sortie}} = 6,4 \text{ m}^3/\text{h}$ .....	51
Figure 7.24 : Evolution de la température et perte de masse en fonction du temps avec entrée d'air déviée, $Q_{v \text{ entrée}} = Q_{v \text{ sortie}} = 11,5 \text{ m}^3/\text{h}$ .....	51
Figure 7.25 : Evolution de la température et perte de masse en fonction du temps avec entrée d'air déviée, $Q_{v \text{ entrée}} = 6,4$ et $Q_{v \text{ sortie}} = 8,9 \text{ m}^3/\text{h}$ .....	52
Figure 7.26 : Evolution de la température et perte de masse en fonction du temps avec entrée d'air déviée, $Q_{v \text{ entrée}} = 6,4$ et $Q_{v \text{ sortie}} = 11,5 \text{ m}^3/\text{h}$ .....	52
Figure 8.1 : Vue générale de la maquette 1/20.....	56
Figure 8.2 : Schéma simplifié et les principales côtes (en mm) de la maquette 1/20.....	57
Figure 8.3 : Ventilateur d'injection d'air.....	56
Figure 8.4 : Ventilateur d'extraction des fumées.....	56
Figure 8.5 : Débitmètre électronique Air-Hélium.....	57
Figure 8.6 : Tout est fermée.....	58
Figure 8.7 : Fermé avec fuite imposé.....	58
Figure 8.8 : Extraction fermée injection Ouverte.....	58
Figure 8.9 : Extraction ouverte injection fermé.....	58
Figure 8.10 : Extraction ouverte injection partie basse.....	58
Figure 8.11 : Extraction ouverte injection partie haute.....	58
Figure 8.12 : Repère lié à la porte.....	59
Figure 8.13 Position du laser par rapport à la maquette.....	59
Figure 8.14 Position de la camera par rapport à la maquette.....	59
Figure 8.15: Champ de vitesse à la sortie de la porte après 5s de début d'injection.....	61
Figure 8.16: Champ de vitesse à la sortie de la porte après 15s de début d'injection.....	61
Figure 8.17: Champ de vitesse à la sortie de la porte après 25s de début d'injection.....	62
Figure 8.18: Champ de vitesse à la sortie de la porte après 35s de début d'injection.....	62
Figure 8.19: les lignes de courant au niveau de la porte après 35 s de début d'injection.....	63
Figure 8.20 : Variation de la vitesse horizontale à la sortie de la porte en fonction de la hauteur au cours de temps.....	64
Figure 8.21: Champ de vitesse à la sortie de la porte dt = 40s.....	64
Figure 8.22: Champ de vitesse al sortie de porte dt = 40s (Partie Haute).....	65
Figure 8.23: Champ de vitesse à la sortie de la porte dt = 40s (Partie basse).....	65
Figure 8.24: Les lignes de courants près de la porte dt = 40s.....	66
Figure 8.25: Profil des vitesses en sortie de porte dt = 40s.....	66
Figure 8.26: Champ de vitesse à la sortie de la porte dt = 10s.....	67
Figure 8.27: Champ de vitesse à la sortie de la porte dt = 10s (partie haute).....	68
Figure 8.28: Champ de vitesse à la sortie de porte dt = 10s (partie basse).....	68
Figure 8.29: Profil de vitesses à la sortie de la porte (mélange air-hélium).....	69
Figure 8.30: Profil de vitesse horizontal au niveau de la porte.....	70
Figure 8.31: Profil de vitesse avec mélange 50% Hélium et 50% Air au niveau de la porte.....	71

Figure 8.32: Température dans le local source au niveau de plafond.....	72
Figure 8.33: Température dans le local source en milieu.....	72
Figure 8.34: Température dans le local cible au niveau de plafond.....	73
Figure 8.35: Température dans le local cible au milieu.....	73
Figure 9.1: vue du dispositif expérimental.....	75
Figure 9.2: maillage de la zone du milieu avec FDS.....	75
Figure 9.3: champ de température à 300 seconds.....	76
Figure 9.4: champ de température sous le plafond à 300 seconds.....	76
Figure 9.5: Champ de température à l'instant t=350 seconds.....	77
Figure 9.6: Champ des vecteurs de déplacement à t = 300s.....	77
Figure 9.7: Champ des vecteurs de déplacement sous le plafond à t = 300s.....	78
Figure 9.8: vue du dispositif expérimental.....	79
Figure 9.9: maillage de la zone du milieu avec FDS.....	79
Figure 9.10: Champ de vitesse à la sortie de la porte t = 45s, TR <sub>p</sub> = 5.....	80
Figure 9.11: Champ de vitesse a la sortie de la porte t = 45 s, TR <sub>p</sub> = 8.....	81
Figure 9.12: Variation de la vitesse horizontal au niveau de la porte en fonction de la hauteur t = 40 s avec le logiciel de simulation FDS.....	81
Figure 9.13 : Concentration d'hélium dans les deux locaux à t = 45 s, TR = 5.....	82
Figure 9.14 : Concentration d'hélium dans les deux locaux à t = 45 s, TR = 8.....	82
Figure 9.15 : champ d'écoulement sous le plafond à 45 s, TR = 5.....	83
Figure 9.16 : champ d'écoulement sous le plafond à 45 s, TR = 8.....	83
Figure 9.17 : Bouche d'extraction des fumées à t = 75s, TR = 5.....	84
Figure 9.18 : Bouche d'extraction des fumées à t = 75s, TR = 8.....	84
Figure 9.19 : Bouche d'injection d'air frais à t = 75s, TR = 5.....	85
Figure 9.20 : Bouche d'injection d'air frais à t = 75s, TR = 8.....	85

## Annexe 2 : Diffusion de la lumière par les aérosols

Diffusion de la lumière par des particules de petite taille :

La diffusion de la lumière par des particules inférieures à notre taille est le principe de la diffusion optique employée lors des simulations mais également dans la vélocimétrie laser s'applique largement sur ce phénomène.

Sous l'effet des forces électromagnétiques induites par la lumière, il se crée dans la matière des dipôles oscillants qui rayonnent à leur tour, généralement à la même fréquence que le faisceau incident (diffusion élastique).



Figure 1

## Annexes

### Annexe 1: Tétra Propylène Hydrogène T.P.H.

#### Description du produit :

- Nom du produit : Tétraprylène hydrogéné ;
- Nom chimique : Dodécane (mélange d'isomères) ;
- Synonyme : T.P.H.
- Formule globale :  $C_{12}H_{26}$  ;
- Poids moléculaire : 168 g ;
- Symbole de danger : Xi ;

#### Propriété physiques et chimiques :

- Aspect :
  - Liquide à 20 °C ;
  - Couleur : Incolore ;
  - Odeur : très légère.
- Changement d'état :
  - Point de congélation ;
  - Point/intervalle d'ébullition : initiale ébullition à 188°C.
- Point d'éclair : 55-61°C ;
- Inflammabilité : limite inférieure d'inflammabilité dans l'air = 25 g/m<sup>3</sup> ;
- Auto inflammabilité : 240 °C ;
- Pression Vapeur :
  - À 20 °C 1.5 mbar ;
  - À 70 °C 16 mbar.
- Densité : du liquide à 20 °C = 0.76 g/ml ;
- Solubilité : inférieure à 1 g/l dans l'eau ;
- Viscosité : 1.26 mPas (à 20 °C) ;
- Température de décomposition : supérieure à 400 °C ;
- Danger d'explosion : les vapeurs peuvent former avec l'air des mélanges explosifs.

### Annexe 2 : Diffusion de la lumière par les aérosols

#### Diffusion de la lumière par des particules de petite taille :

La diffusion de la lumière par des particules intéresse notre étude parce qu'elle est le principe de la détection optique employée lors des simulations mais également parce que la vélocimétrie Laser s'appuie largement sur ce phénomène.

Sous l'effet des forces électromagnétiques induites par la lumière, il se crée dans la matière des dipôles oscillants qui rayonnent à leur tour, généralement à la même fréquence que le faisceau incident (diffusion élastique).

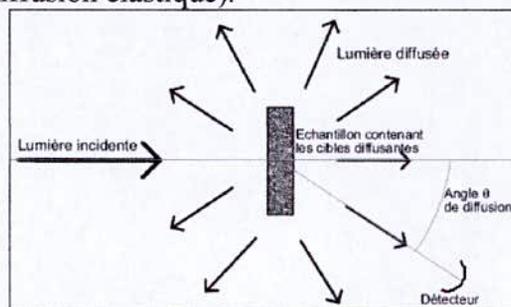


Figure 1

## Théorie de Mie

Cette théorie, développée par Mie en 1908, a pour ambition de décrire la diffusion de la lumière d'une longueur d'onde quelconque et quelque soit la taille de la particule considérée. Elle a pour restriction la sphéricité de la particule. En général, elle est utilisée pour des particules de taille proche de la longueur d'onde du rayonnement incident [26].

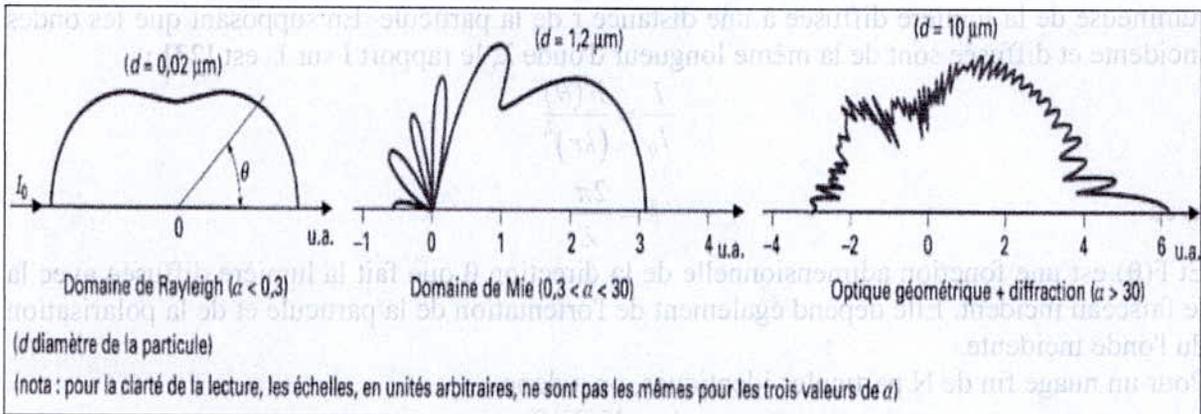
Le paramètre de Mie  $\alpha$  permet d'apprécier la taille de la particule relativement à la longueur d'onde [26] :

$$\alpha = \frac{\pi d}{\lambda}$$

$\alpha < 0.2$  théorie de Rayleigh

$0.2 < \alpha < 300$  théorie de Mie

$\alpha > 300$  optique géométrique



**Figure 2**

Dans le cas de la détection optique des fumées de chlorure d'ammonium nous avons :

$$\left. \begin{array}{l} \lambda \approx 950 \text{ nm (IR)} \\ d \approx 0.3 - 2 \mu\text{m} \end{array} \right\} \Rightarrow \alpha \approx 1 - 6.6$$

Dans le cas de la LDV :

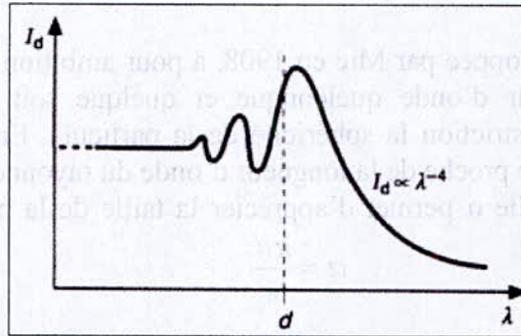
$$\left. \begin{array}{l} \lambda \approx 690 \text{ nm (Laser)} \\ d \approx 0.5 \mu\text{m} \end{array} \right\} \Rightarrow \alpha \approx 2.3$$

Dans le cas de la PIV :

$$\left. \begin{array}{l} \lambda \approx 532 \text{ nm (laser Nd - Yag)} \\ d \approx 0.5 \mu\text{m} \end{array} \right\} \Rightarrow \alpha \approx 3$$

Ainsi, nous pouvons affirmer que quelque soit l'application entrant dans le cadre de notre étude (PIV, LDV ou détection optique de fumée) [25], le phénomène de diffusion exploité, est dans le domaine de validité de la théorie de Mie.

La théorie montre alors que l'intensité de la lumière diffusée en fonction de la longueur d'onde décroît fortement à partir d'une longueur d'onde environ égale à la taille de la particule [24]. Au-dessous de cette valeur, elle ne dépend pratiquement pas de la longueur d'onde du rayonnement. La puissance diffusée est maximale lorsque la longueur d'onde est proche du rayon de la particule. (Voir graphe ci-dessous).



**Figure 3**

Figure Intensité diffusée par une particule de diamètre  $d$  en fonction de la longueur d'onde.

Soit  $I_0$  l'intensité lumineuse d'un rayon incident sur une particule, et  $I$  l'intensité lumineuse de la lumière diffusée à une distance  $r$  de la particule. En supposant que les ondes incidente et diffusée sont de la même longueur d'onde  $\lambda$ , le rapport  $I$  sur  $I_0$  est [23] :

$$\frac{I}{I_0} = \frac{F(\theta)}{(kr)^2}$$

avec

$$k = \frac{2\pi}{\lambda}$$

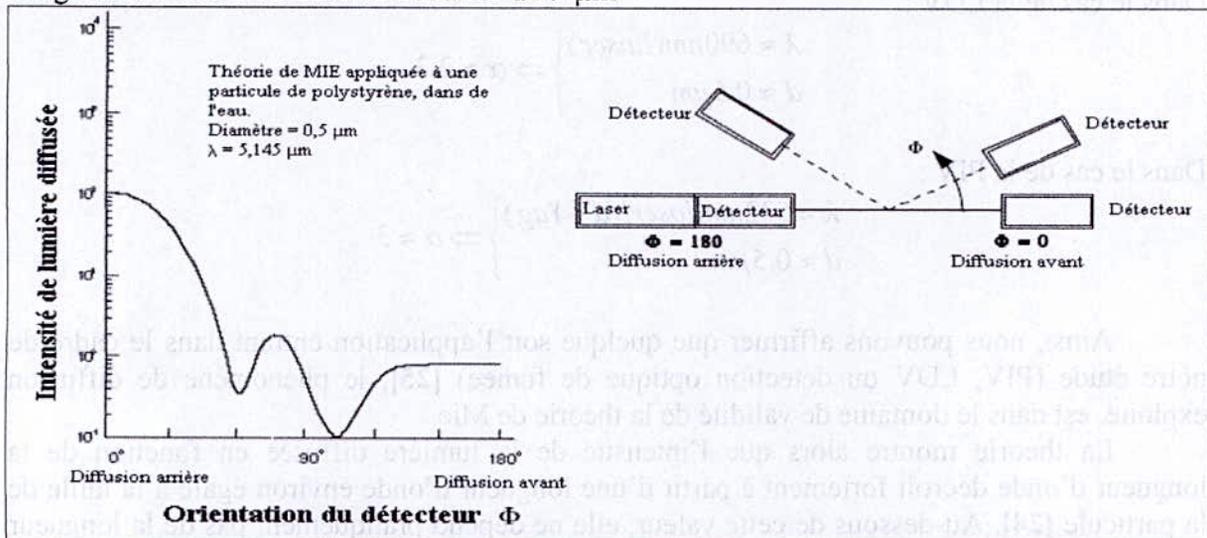
Et  $F(\theta)$  est une fonction adimensionnelle de la direction  $\theta$  que fait la lumière diffusée avec la le faisceau incident. Elle dépend également de l'orientation de la particule et de la polarisation du l'onde incidente.

Pour un nuage fin de  $N$  particules identiques, on a donc :

$$\frac{I}{I_0} = \frac{N \cdot F(\theta)}{(kr)^2}$$

Durbin (1951) a utilisé des fumées de chlorure d'ammonium de  $0.4\mu\text{m}$  de diamètre pour ses expérimentations sur la mesure de la taille des aérosols.

Volz (1954) et Wilson (1951) ont estimé expérimentalement la taille des particules dans un nuage de fumées d'un feu de forêt à  $0.5$  à  $0.6\mu\text{m}$



**Figure 4** : Intensité de lumière diffusée en fonction de l'angle de réception.

La diffusion de Mie décrit l'interaction entre la lumière et les particules. Pour les tailles de particule qui nous intéressent (en dessous de  $1\mu\text{m}$ ), elle montre qu'il y a 50 à 1000 fois plus d'intensité lumineuse diffusée dans le sens de propagation des faisceaux (diffusion avant), qu'en sens inverse (rétrodiffusion) [25].

### Annexes 3 : Torche émettrice-réceptrice

La torche qui équipe le système T.S.I. est une torche émettrice réceptrice qui reçoit la lumière diffusée par rétrodiffusion (diffusion arrière).



Figure 5 : Torche émettrice-réceptrice

- **Montage de base de la torche d'émission**

Une torche reçoit les fibres mono modes qui acheminent les faisceaux conditionnés (Braggués ou non Braggués, monochromatiques et énergie équilibrée). A la sortie des fibres, les faisceaux sont collimatés et rendus parallèles entre eux avec un écartement fixe ou réglable. Une lentille, de longueur focale fixe, placée à l'extrémité de la torche focalise la paire de faisceaux. La longueur focale de la lentille et l'écartement des faisceaux à l'attaque de celle-ci permettent de calculer la valeur de l'inter frange et interviennent dans le calcul des dimensions caractéristiques du volume de mesure. Le positionnement du waist de chaque faisceau au niveau du volume de mesure est important car il permet de générer des franges planes, équidistantes et bien contrastées.

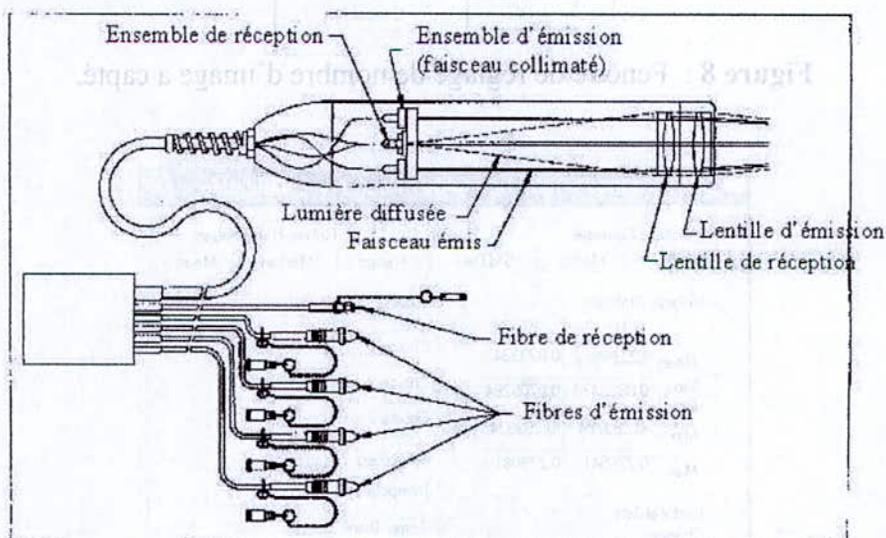


Figure 6 : Montage de base de la torche d'émission

## Annexe 4 : Camera CCD



Figure 7 : Camera CCD

## Annexe 5 : Logiciel PIV : INSIGHT 3G

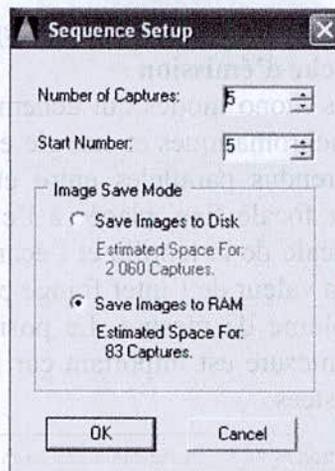


Figure 8 : Fenêtre de réglage de nombre d'image a capté.

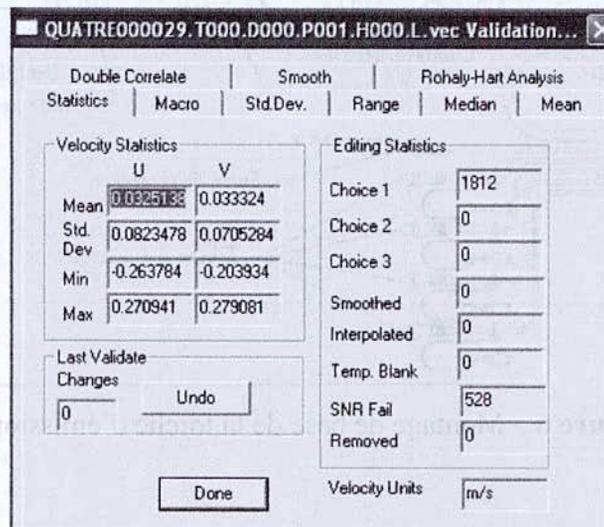


Figure 9 : Fenêtre des filtres et de la Macro.

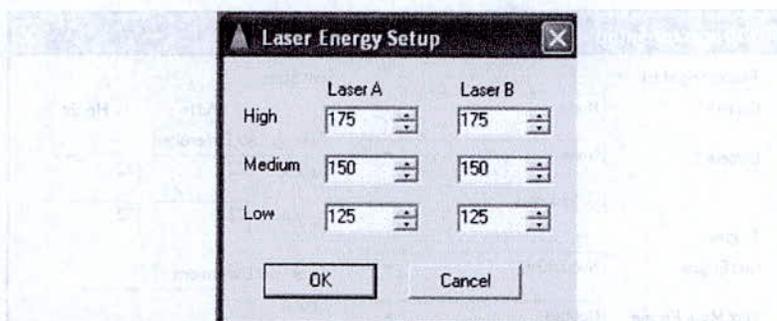


Figure 10 : Fenêtre de réglage de la puissance du Laser

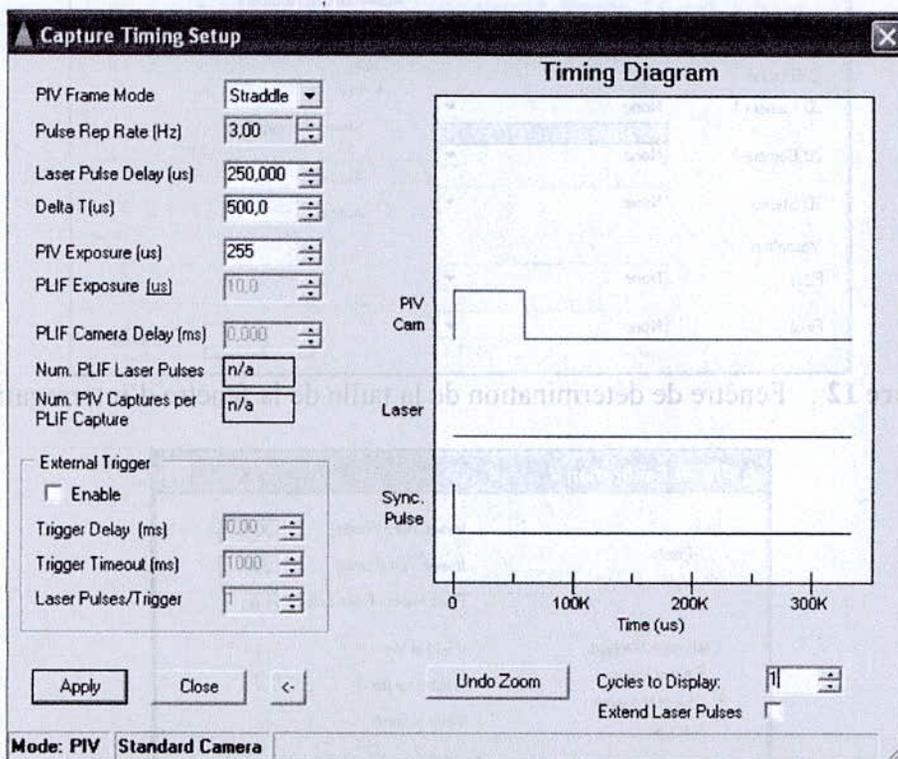


Figure 11 : Fenêtre de détermination de l'intervalle de temps, ainsi que la fréquence entre les deux impulsions

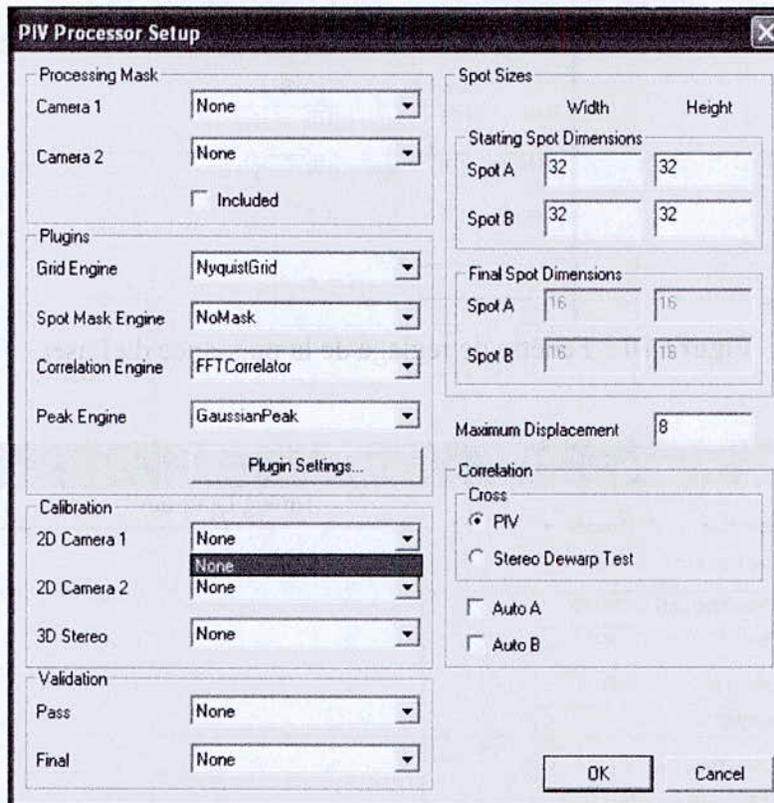


Figure 12 : Fenêtre de détermination de la taille de la fenêtre d'interrogation

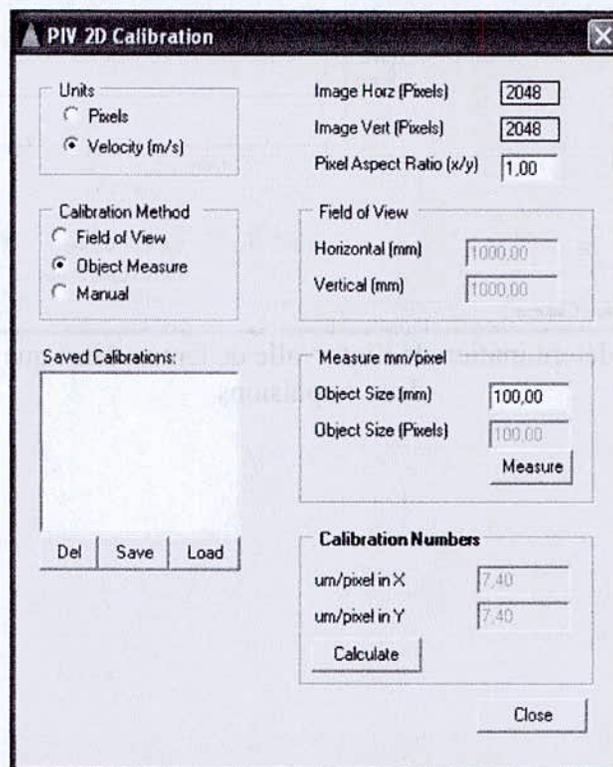


Figure 13 : Fenêtre de la calibration.

**Procédure pour la mesure PIV :**

- 1- La mise au point de la caméra et du Laser;
- 2- La calibration ;

3- Choix de la fréquence et de l'intervalle de temps. Ce dernier est choisi en fonction de la vitesse du fluide, il ne doit pas être trop large pour éviter de perdre le déplacement des vecteurs, ou trop court ;

4- Choix du mode d'enregistrement:

Le mode *free* permet de visualiser sur l'écran de l'ordinateur en temps réel ce que voit la caméra.

Aucune capture d'images n'est prise.

En mode *frame straddle*, on peut faire des enregistrements d'images.

Pour déterminer le champ de vecteurs, on doit faire des séquences d'enregistrement, et cela en mode *Sequence*, où on choisit le nombre d'images à enregistrer.

5- Définition des filtres: Cette fonction permet d'éliminer les faux vecteurs, et de diminuer les erreurs sur le champ obtenu.

## **Annexe 6 : polynômes des interpolations (thermocouples)**

### **Type K inverse fonction polynomial**

	-200°C to 0°C (-5,891µV to 0µV)	0°C to 500°C (0µV to 20,644µV)	500°C to 1,372°C (20,644µV to 54,886µV)
$c_0 =$	0.0	0.0	$-1.318\ 058 \times 10^2$
$c_1 =$	$2.517\ 346\ 2 \times 10^{-2}$	$2.508\ 355\ 2 \times 10^{-2}$	$4.830\ 222 \times 10^{-2}$
$c_2 =$	$-1.166\ 287\ 8 \times 10^{-6}$	$7.860\ 106\ 2 \times 10^{-8}$	$-1.646\ 031 \times 10^{-6}$
$c_3 =$	$-1.083\ 363\ 8 \times 10^{-9}$	$-2.503\ 131\ 2 \times 10^{-10}$	$5.464\ 731 \times 10^{-11}$
$c_4 =$	$-8.977\ 354\ 0 \times 10^{-13}$	$8.315\ 270\ 2 \times 10^{-14}$	$-9.650\ 715 \times 10^{-16}$
$c_5 =$	$-3.734\ 237\ 7 \times 10^{-16}$	$-1.228\ 034\ 2 \times 10^{-17}$	$8.802\ 193 \times 10^{-21}$
$c_6 =$	$-8.663\ 264\ 3 \times 10^{-20}$	$9.804\ 036\ 2 \times 10^{-22}$	$-3.110\ 810 \times 10^{-26}$
$c_7 =$	$-1.045\ 059\ 8 \times 10^{-23}$	$-4.413\ 030\ 2 \times 10^{-26}$	
$c_8 =$	$-5.192\ 057\ 7 \times 10^{-28}$	$1.057\ 734\ 2 \times 10^{-30}$	
$c_9 =$		$-1.052\ 755\ 2 \times 10^{-35}$	
<i>Error:</i>	$0.04^\circ\text{C to } -0.02^\circ\text{C}$	$0.04^\circ\text{C to } -0.05^\circ\text{C}$	$0.06^\circ\text{C to } -0.05^\circ\text{C}$
$t_{90} = c_0 + c_1E + c_2E^2 + c_3E^3 \dots c_iE^i$ where: $t_{90}$ is the calculated temperature in °C. E is the measured voltage in microvolts.			

## **Annexe 7 : Les appareils de mesure**

- **L'anémomètre à fil chaud**

Pour mesurer les débits d'injection d'air et d'extraction des fumées, au niveau des ventilateurs, nous avons utilisés l'anémomètre à fil chaud.

L'anémomètre à fil ou film chaud va donc permettre de déterminer les caractéristiques de vitesse locale d'un fluide [27].



Figure 14 : la sonde de vitesse

- **Balance électronique**

La balance est placée sous le réservoir contenant le liquide enflammé ce qui nous permet de relever la perte de masse du TPH en fonction du temps. Ceci nous permet d'avoir de nombreux renseignements sur le feu en fonction de cette perte de masse.

Ces renseignements nous donne des informations sur :

- la puissance du feu : plus la perte de masse est élevée, plus la puissance du feu est grande
- la variation de la flamme : une perte de masse régulière nous informe sur le fait que la flamme a une allure régulière et inversement.
- Le taux d'oxygène : il est important de connaître l'influence de l'oxygène sur la perte de masse. Ceci nous permet par exemple de déterminer les conditions optimales suivant le feu voulu : un feu à combustion rapide mais puissant ou un feu à combustion lente mais de faible puissance et plus stable (moins dangereux).



Figure 15 : Balance électronique

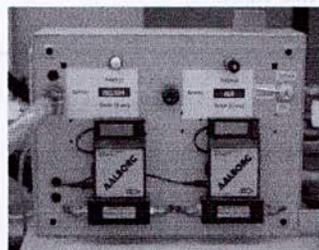


Figure 16 : Débitmètre air-hélium



Figure 17 : Manomètre numérique

- **Les ventilateurs à débit variable**

Nous disposons d'un ventilateur servant à introduire de l'air dans l'enceinte et d'un deuxième pour en extraire l'air. Ces deux ventilateurs sont réglables sont utile pour connaître l' influence d'un courant d'air, d'une dépression ou d'une surpression au sein de l'enceinte sur la flamme.

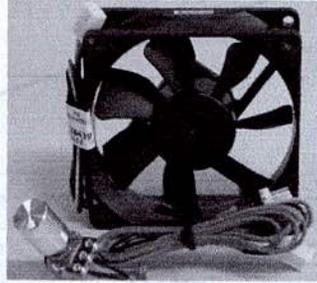


Figure 18 : Ventilateur axial avec régulateur de vitesse

## Annexe 8 : Maquette feu

### 1. Combustion de TPH dans une enceinte fermée et ventilé

#### 1.1. Débit d'entrée inférieur au débit de sortie

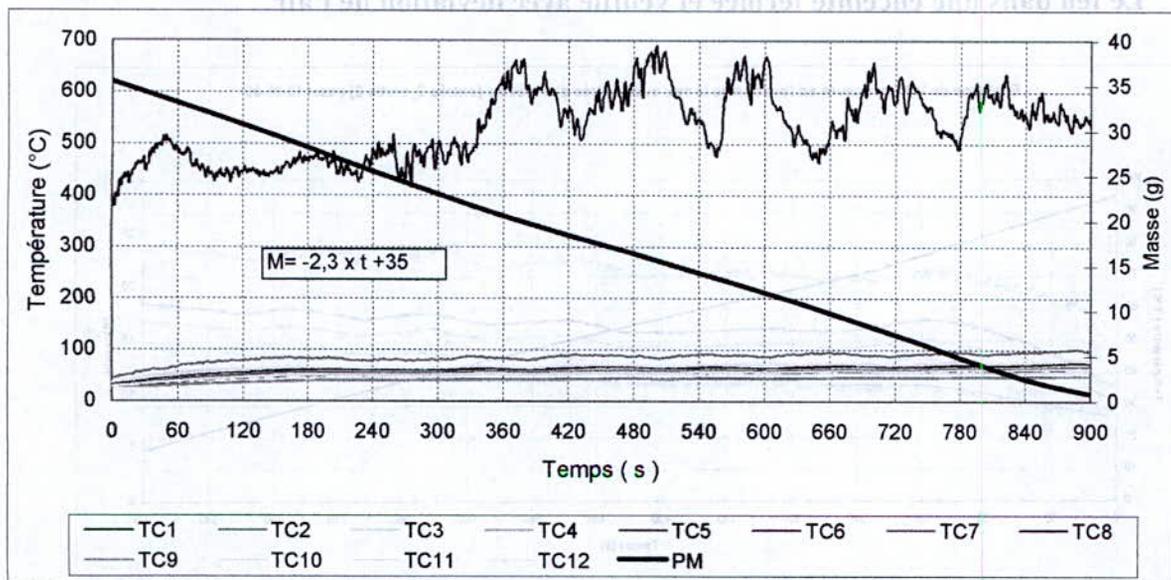
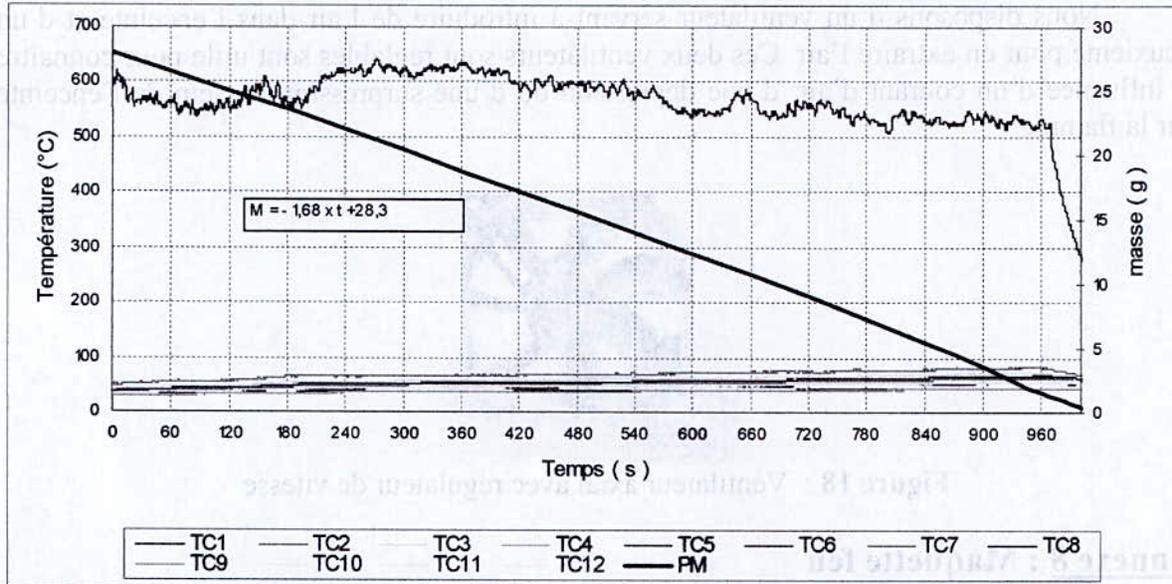


Figure 19 : Evolution de la température et la perte de masse au cours du temps

$$Q_{v \text{ entrée}} = 8,9 \text{ et } Q_{v \text{ sortie}} = 11,5 \text{ m}^3/\text{h}$$

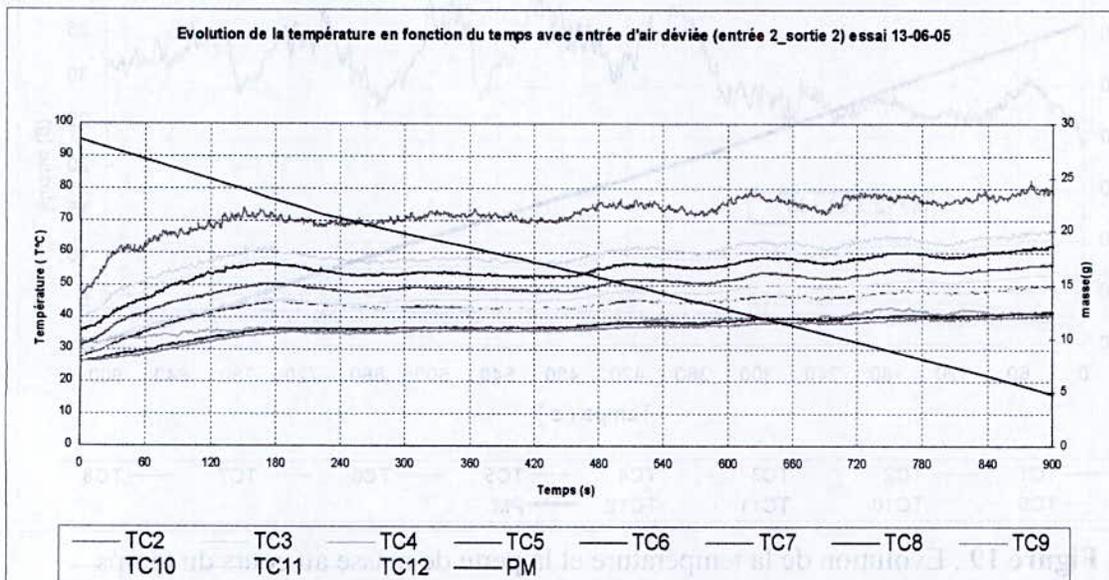
## 1.2. Débit d'entrée égale au débit de sortie



**Figure 20** : Evolution de la température et la perte de masse au cours du temps

$$Q_{v \text{ entrée}} = Q_{v \text{ sortie}} = 8,9 \text{ m}^3/\text{h}$$

## 2. Le feu dans une enceinte fermée et ventilé avec déviation de l'air



**Figure 21** : Evolution de la température et perte de masse en fonction du temps avec entrée d'air déviée,  $Q_{v \text{ entrée}} = Q_{v \text{ sortie}} = 8,9 \text{ m}^3/\text{h}$

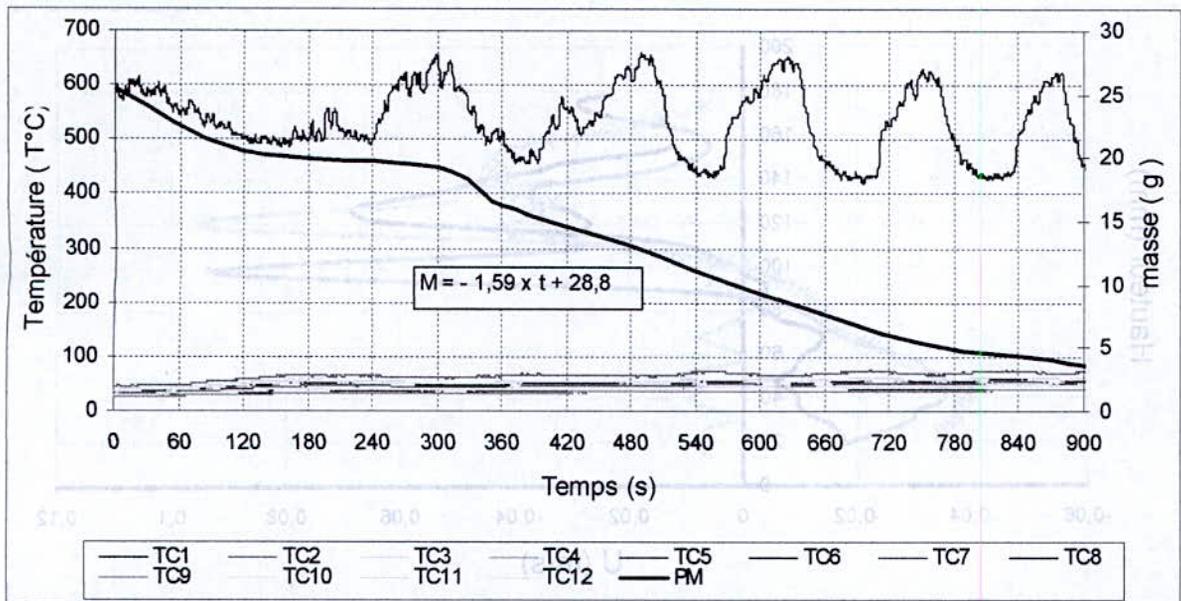


Figure 22 : Evolution de la température et perte de masse en fonction du temps avec entrée d'air déviée,  $Q_{v \text{ entrée}} = 8,9$  et  $Q_{v \text{ sortie}} = 11,5 \text{ m}^3/\text{h}$

### Annexe 9 : Maquette adiabatique

- Injection helium pur:  $\Delta t = 10 \text{ s}$

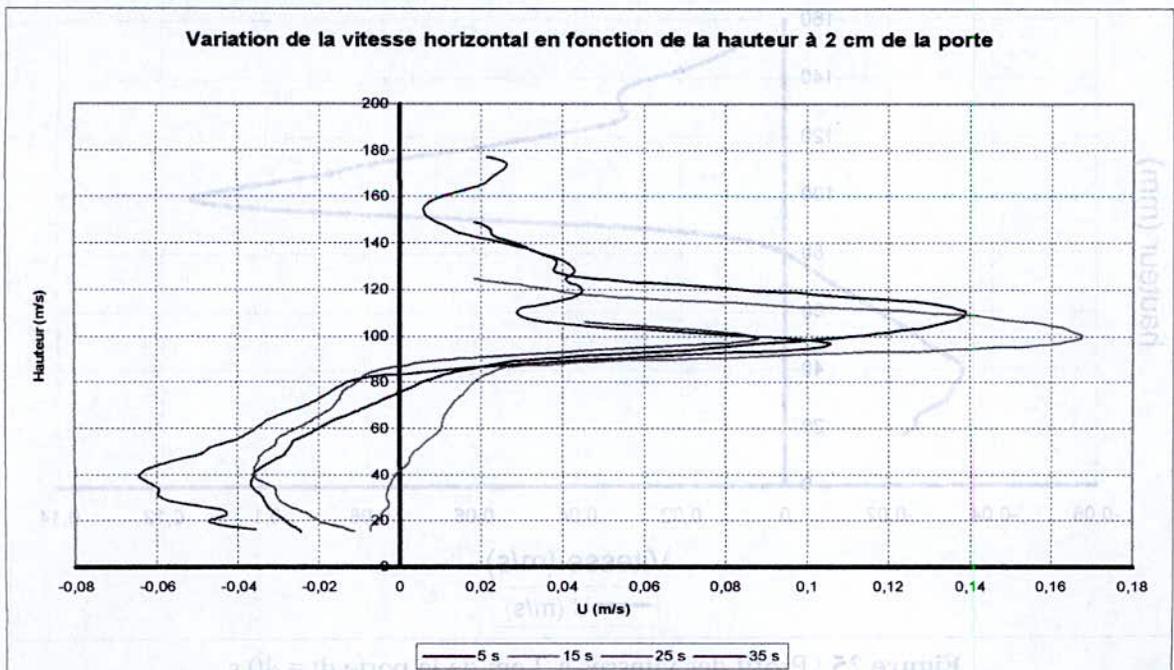
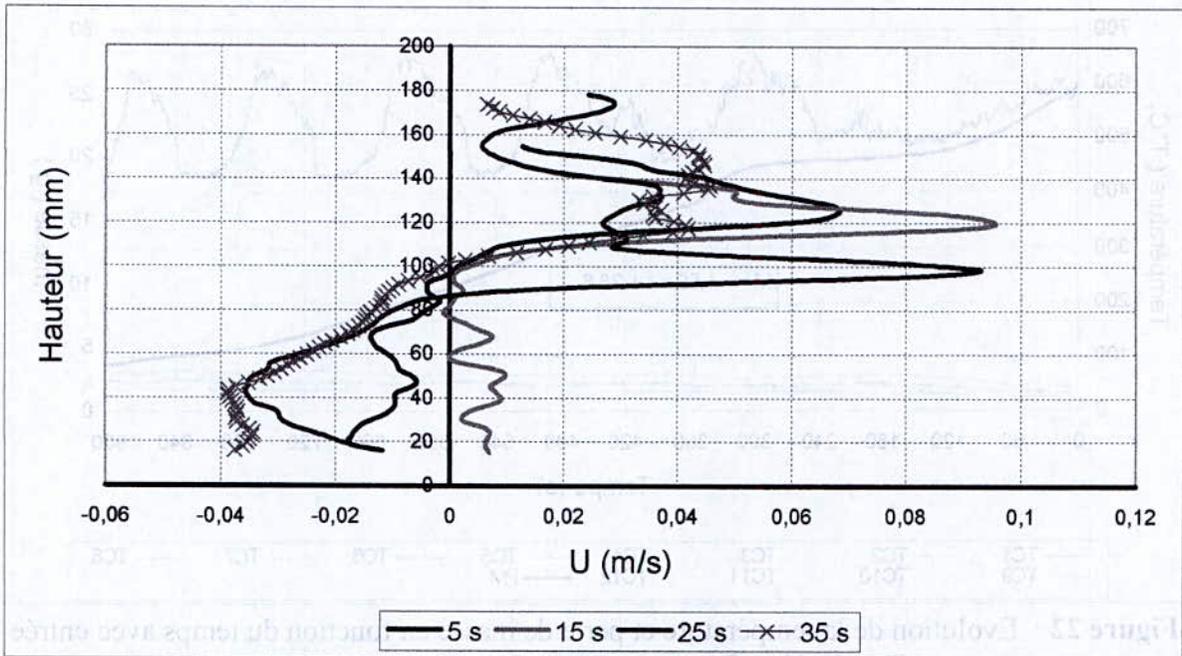
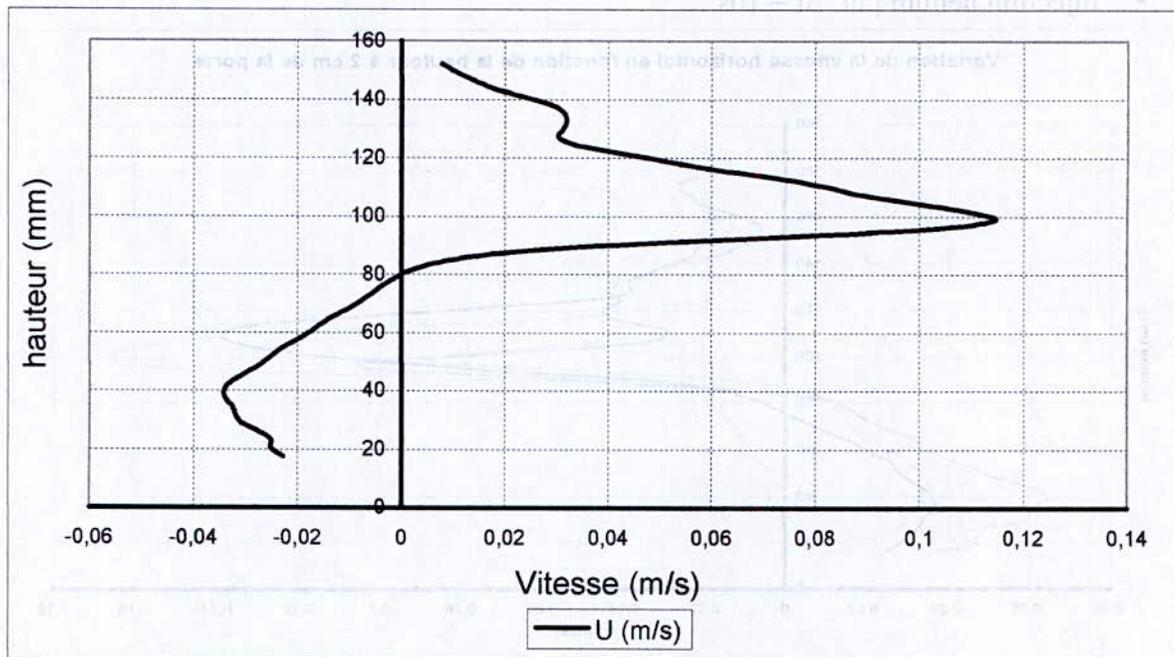


Figure 23 : Variation de la vitesse horizontale en fonction de la hauteur à 2 cm de la porte



**Figure 24** : Variation de la vitesse horizontale en fonction de la hauteur à 4 cm de la porte

- Injection helium pur:  $\Delta t = 40$  s



**Figure 25** : Profil des vitesses à 2 cm de la porte dt = 40 s

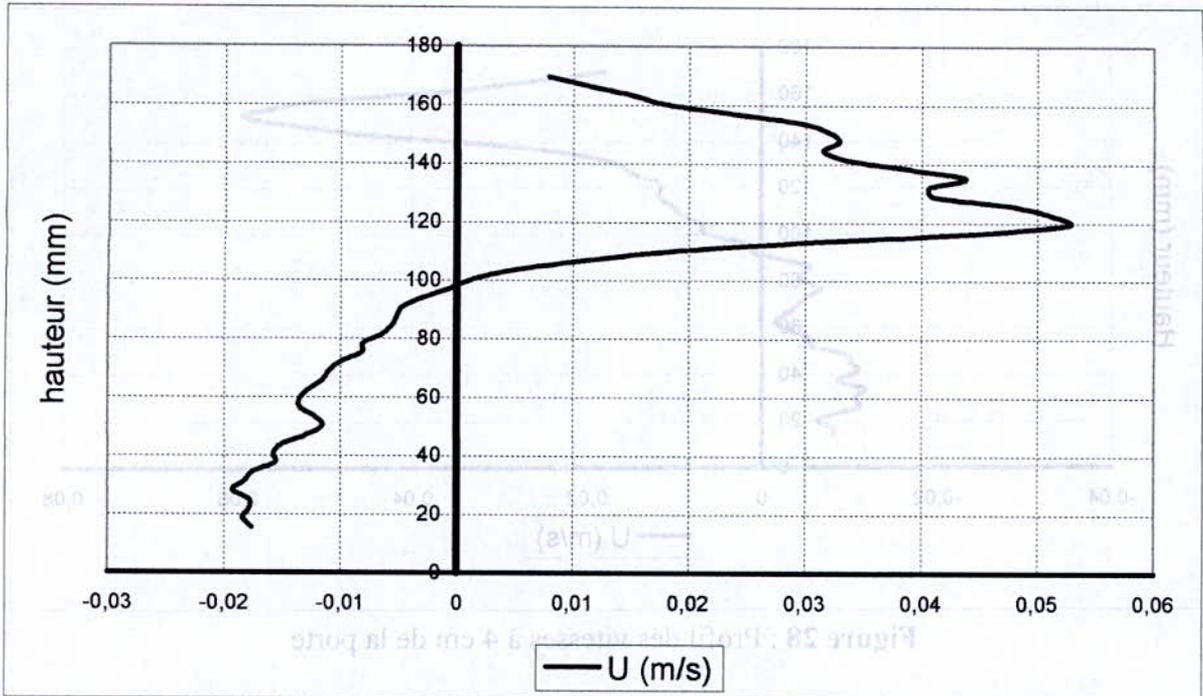


Figure 26 : Profil des vitesses à 4 cm de la porte dt = 40 s

- Injection un mélange hélium-air  $\Delta t = 10s$

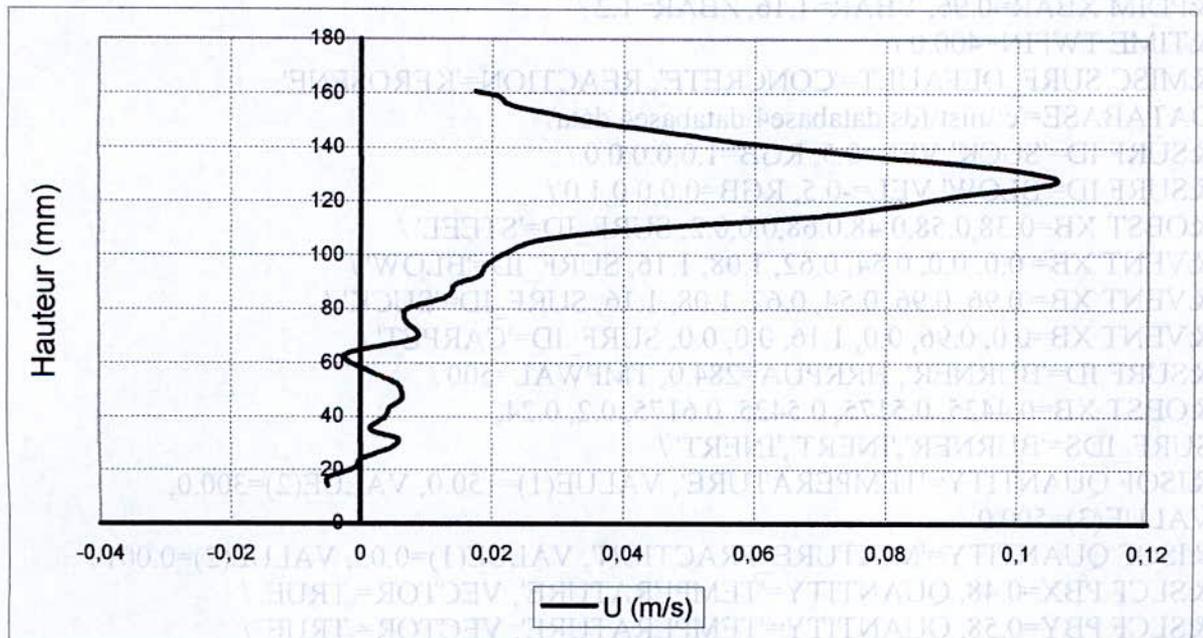


Figure 27 : Profil des vitesses à 2 cm de la porte

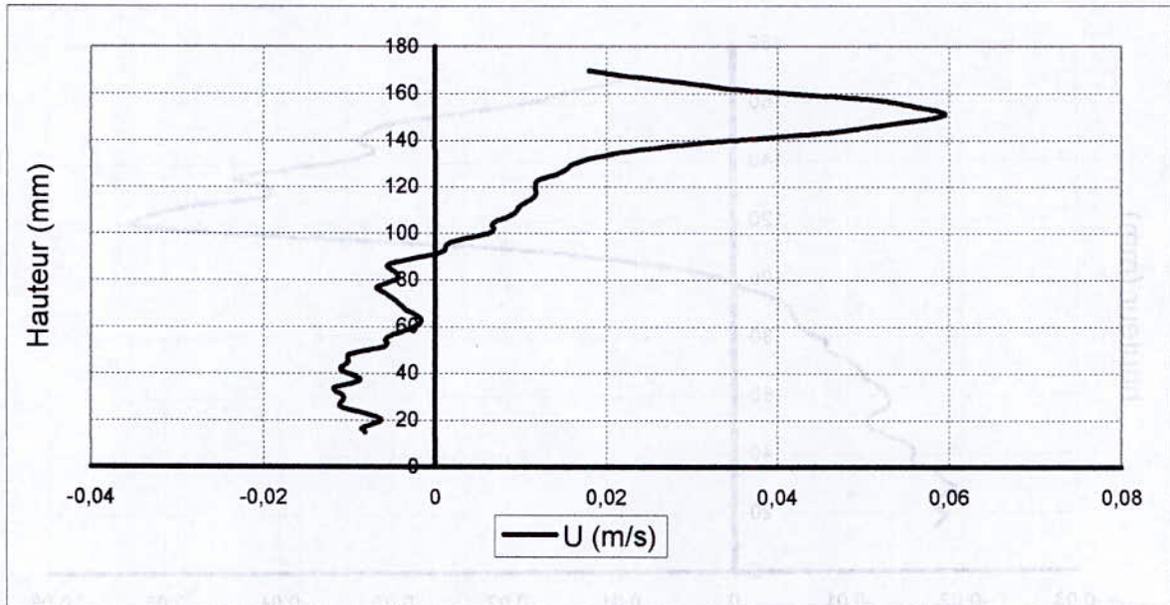


Figure 28 : Profil des vitesses à 4 cm de la porte

### Annexe 10 : Programme FDS de la maquette 1/5 ; [20], [21], [22]

```

&HEAD CHID='feu9', TITLE='local confiné' /
&GRID IBAR=80, JBAR=96, KBAR=100 /
&PDIM XBAR=0.96, YBAR=1.16, ZBAR=1.2 /
&TIME TWFIN=400.0 /
&MISC SURF_DEFAULT='CONCRETE', REACTION='KEROSENE',
DATABASE='c:\nist\fds\database4\database4.data' /
&SURF ID='SUCK', VEL=0.5, RGB=1.0,0.0,0.0 /
&SURF ID='BLOW', VEL=-0.5, RGB=0.0,0.0,1.0 /
&OBST XB=0.38,0.58,0.48,0.68,0.0,0.2, SURF_ID='STEEL' /
&VENT XB= 0.0, 0.0, 0.54, 0.62, 1.08, 1.16, SURF_ID='BLOW' /
&VENT XB= 0.96, 0.96, 0.54, 0.62, 1.08, 1.16, SURF_ID='SUCK' /
&VENT XB=0.0, 0.96, 0.0, 1.16, 0.0, 0.0, SURF_ID='CARPET' /
&SURF ID='BURNER', HRRPUA=284.0, TMPWAL=500 /
&OBST XB=0.4425, 0.5175, 0.5425, 0.6175, 0.2, 0.24,
SURF_IDS='BURNER','INERT','INERT' /
&ISOF QUANTITY='TEMPERATURE', VALUE(1)=150.0, VALUE(2)=300.0,
VALUE(3)=500.0 /
&ISOF QUANTITY='MIXTURE_FRACTION', VALUE(1)=0.05, VALUE(2)=0.001 /
&SLCF PBX=0.48, QUANTITY='TEMPERATURE', VECTOR=.TRUE. /
&SLCF PBY=0.58, QUANTITY='TEMPERATURE', VECTOR=.TRUE. /
&SLCF PBZ=0.25, QUANTITY='TEMPERATURE', VECTOR=.TRUE. /
&SLCF PBZ=0.55, QUANTITY='TEMPERATURE', VECTOR=.TRUE. /
&SLCF PBZ=0.85, QUANTITY='TEMPERATURE', VECTOR=.TRUE. /
&SLCF PBZ=1.15, QUANTITY='TEMPERATURE', VECTOR=.TRUE. /
&SLCF PBX=0.48, QUANTITY='VELOCITY', VECTOR=.TRUE. /
&SLCF PBY=0.58, QUANTITY='VELOCITY', VECTOR=.TRUE. /
&SLCF PBZ=0.25, QUANTITY='VELOCITY', VECTOR=.TRUE. /
&SLCF PBZ=0.55, QUANTITY='VELOCITY', VECTOR=.TRUE. /
&SLCF PBZ=0.85, QUANTITY='VELOCITY', VECTOR=.TRUE. /

```

&SLCF PBZ=1.15, QUANTITY='VELOCITY', VECTOR=.TRUE. /

### Annexe 11 : Programme FDS de la maquette 1/20, [20], [21], [22]

Programme FDS de la maquette 1/20 pour un TR de 8. Pour le TR de 5, il reste le même programme sauf les conditions aux limites qui changent (vitesse d'injection = vitesse d'extraction = 0.21 m/s).

&HEAD CHID='TR8', TITLE='essai porte ouverte' /

&GRID IBAR=128, JBAR=80, KBAR=50 /

&PDIM XBAR=0.5, YBAR=0.3, ZBAR=0.198 /

&TIME TWFIN=250.0 /

&MISC SURF\_DEFAULT='CONCRETE',

DATABASE='c:\nist\fds\database4\database4.data' /

&SPEC ID='HELIUM' /

&SURF ID='HELIUM', VEL=-0.051, MASS\_Fraction (1)=1.0, RGB=1.0,0.0,1.0 /

&SURF ID='SUCK', VEL=0.33, RGB=1.0,0.0,0.0 /

&SURF ID='BLOW', VEL=-0.33, RGB=0.0,0.0,1.0 /

&OBST XB=0.25,0.254,0.0,0.3,0.0,0.198, SURF\_ID='SPRUCE' /

&HOLE XB=0.25, 0.254, 0.132, 0.168, 0.0, 0.108 /

&OBST XB=0.1, 0.15, 0.125, 0.175, 0.0, 0.02, SURF\_IDS='HELIUM','INERT','INERT' /

&VENT XB= 0.098, 0.100, 0.121, 0.179, 0.0, 0.0, SURF\_ID='OPEN', RGB=1.0,0.0,1.0 /

&VENT XB= 0.150, 0.152, 0.121, 0.179, 0.0, 0.0, SURF\_ID='OPEN', RGB=1.0,0.0,1.0 /

&VENT XB= 0.100, 0.150, 0.121, 0.125, 0.0, 0.0, SURF\_ID='OPEN', RGB=1.0,0.0,1.0 /

&VENT XB= 0.100, 0.150, 0.175, 0.179, 0.0, 0.0, SURF\_ID='OPEN', RGB=1.0,0.0,1.0 /

&OBST XB= 0.365, 0.385, 0.02, 0.04, 0.155, 0.198, SURF\_ID='STEEL' /

&OBST XB= 0.365, 0.385, 0.26, 0.28, 0.155, 0.198, SURF\_ID='STEEL' /

&VENT XB= 0.365, 0.365, 0.2625, 0.2775, 0.16, 0.193, SURF\_ID='BLOW' /

&VENT XB= 0.385, 0.385, 0.0225, 0.0375, 0.16, 0.193, SURF\_ID='SUCK' /

&ISOF QUANTITY='HELIUM', VALUE(1)=0.1, VALUE(2)=0.2 /

&SLCF PBX=0.125, QUANTITY='HELIUM', VECTOR=.TRUE. /

&SLCF PBX=0.250, QUANTITY='HELIUM', VECTOR=.TRUE. /

&SLCF PBX=0.360, QUANTITY='HELIUM', VECTOR=.TRUE. /

&SLCF PBX=0.390, QUANTITY='HELIUM', VECTOR=.TRUE. /

&SLCF PBY=0.150, QUANTITY='HELIUM', VECTOR=.TRUE. /

&SLCF PBY=0.030, QUANTITY='HELIUM', VECTOR=.TRUE. /

&SLCF PBY=0.270, QUANTITY='HELIUM', VECTOR=.TRUE. /

&SLCF PBZ=0.197, QUANTITY='HELIUM', VECTOR=.TRUE. /

&SLCF PBZ=0.105, QUANTITY='HELIUM', VECTOR=.TRUE. /

&SLCF PBZ=0.080, QUANTITY='HELIUM', VECTOR=.TRUE. /

&SLCF PBZ=0.193, QUANTITY='HELIUM', VECTOR=.TRUE. /

&SLCF PBZ=0.160, QUANTITY='HELIUM', VECTOR=.TRUE. /

&SLCF PBZ=0.176, QUANTITY='HELIUM', VECTOR=.TRUE. /

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

&SLCF PBX=0.250, QUANTITY='VELOCITY', VECTOR=.TRUE. /

&SLCF PBX=0.365, QUANTITY='VELOCITY', VECTOR=.TRUE. /

&SLCF PBX=0.385, QUANTITY='VELOCITY', VECTOR=.TRUE. /

&SLCF PBY=0.150, QUANTITY='VELOCITY', VECTOR=.TRUE. /

&SLCF PBY=0.030, QUANTITY='VELOCITY', VECTOR=.TRUE. /

&SLCF PBY=0.270, QUANTITY='VELOCITY', VECTOR=.TRUE. /

&SLCF PBZ=0.197, QUANTITY='VELOCITY', VECTOR=.TRUE. /

&SLCF PBZ=0.105, QUANTITY='VELOCITY', VECTOR=.TRUE. /

&SLCF PBZ=0.080, QUANTITY='VELOCITY', VECTOR=TRUE. /  
&SLCF PBZ=0.193, QUANTITY='VELOCITY', VECTOR=TRUE. /  
&SLCF PBZ=0.160, QUANTITY='VELOCITY', VECTOR=TRUE. /  
&SLCF PBZ=0.176, QUANTITY='VELOCITY', VECTOR=TRUE. /

Programme F1  
mises programme sur les conditions aux limites qui changent (adresse de injection = masse  
d'extraction = 0.21 m/s)  
&FILE /C/HD/FRS/TITLE/essai pour ouyris  
&GRID IBAR=128 JBAR=80 KBAR=20  
&EDIM XBAR=0.5 YBAR=0.5 ZBAR=0.198  
&TIME TWIN=250.0  
&MISC BURT DEBAILT=CONCRETE  
DATA BASE=C:/mat4/database4/database4 data  
&SPEC ID=HELIUM  
&SURF ID=HELIUM VFL=0.651 MASS FRACTION(I)=1.0 RGB=1.0 0.0 1.0  
&SURF ID=SUCK VFL=0.53 RGB=1.0 0.0 0.0  
&SURF ID=BLow VFL=0.23 RGB=0.0 0.0 1.0  
&ORST KB=0.02 0.22 0.0 0.0 0.0 0.198 SURF ID=SPRUCY  
&HOLE KB=0.22 0.22 0.12 0.18 0.0 0.198  
&ORST XB=0.1 0.12 0.12 0.12 0.0 0.02 SURF ID=HELIUM INERT INERT  
&VENT XE=0.098 0.160 0.12 0.12 0.0 0.0 SURF ID=OPEN RGB=1.0 0.0 1.0  
&VENT XB=0.120 0.12 0.12 0.12 0.0 0.0 SURF ID=OPEN RGB=1.0 0.0 1.0  
&VENT XE=0.100 0.12 0.12 0.12 0.0 0.0 SURF ID=OPEN RGB=1.0 0.0 1.0  
&VENT XB=0.100 0.12 0.12 0.12 0.0 0.0 SURF ID=OPEN RGB=1.0 0.0 1.0  
&ORST XB=0.382 0.382 0.02 0.04 0.12 0.198 SURF ID=STEEL  
&ORST XB=0.382 0.382 0.28 0.28 0.12 0.198 SURF ID=STEEL  
&VENT XE=0.382 0.382 0.272 0.16 0.198 SURF ID=BLow  
&VENT XB=0.382 0.382 0.272 0.16 0.198 SURF ID=SUCK  
&ISOE QUANTITY=HELIUM VALUE(P=0.1 VALUE2)=0.2  
&SLCF PBX=0.125 QUANTITY=HELIUM VECTOR=TRUE  
&SLCF PBX=0.250 QUANTITY=HELIUM VECTOR=TRUE  
&SLCF PBX=0.350 QUANTITY=HELIUM VECTOR=TRUE  
&SLCF PBX=0.390 QUANTITY=HELIUM VECTOR=TRUE  
&SLCF PBX=0.450 QUANTITY=HELIUM VECTOR=TRUE  
&SLCF PBX=0.500 QUANTITY=HELIUM VECTOR=TRUE  
&SLCF PBX=0.570 QUANTITY=HELIUM VECTOR=TRUE  
&SLCF PBX=0.197 QUANTITY=HELIUM VECTOR=TRUE  
&SLCF PBZ=0.105 QUANTITY=HELIUM VECTOR=TRUE  
&SLCF PBX=0.680 QUANTITY=HELIUM VECTOR=TRUE  
&SLCF PBZ=0.193 QUANTITY=HELIUM VECTOR=TRUE  
&SLCF PBZ=0.160 QUANTITY=HELIUM VECTOR=TRUE  
&SLCF PBZ=0.176 QUANTITY=HELIUM VECTOR=TRUE  
&SLCF PBX=0.125 QUANTITY=VELOCITY VECTOR=TRUE  
&SLCF PBX=0.250 QUANTITY=VELOCITY VECTOR=TRUE  
&SLCF PBX=0.362 QUANTITY=VELOCITY VECTOR=TRUE  
&SLCF PBX=0.382 QUANTITY=VELOCITY VECTOR=TRUE  
&SLCF PBX=0.450 QUANTITY=VELOCITY VECTOR=TRUE  
&SLCF PBX=0.530 QUANTITY=VELOCITY VECTOR=TRUE  
&SLCF PBZ=0.197 QUANTITY=VELOCITY VECTOR=TRUE  
&SLCF PBZ=0.105 QUANTITY=VELOCITY VECTOR=TRUE