

## Ecole Nationale Polytechnique

Département de Génie Mécanique



المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات  
BIBLIOTHEQUE — المكتبة  
Ecole Nationale Polytechnique

المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات  
Ecole Nationale Polytechnique

### *Projet de fin d'étude*

Pour l'obtention du diplôme  
d'ingénieur d'état en Mécanique

# **Étude expérimentale de la propagation d'une fumée dans une enceinte confinée avec recirculation d'air forcée.**

Proposé et dirigé par :  
Monsieur Ph. Bournot  
Monsieur. A. Bouhdjar  
Monsieur. B. Benkoussas

Présenté par :  
C. Abdellaoui  
K. Ben Miloud

**Promotion 2003-2004**

Réalisé sous la direction de Mr Ph. Bournot, au Centre interuniversitaire de Mécanique  
et de technologie Mécanique UNIMECA – Université de la Méditerranée – Marseille.

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

### ملخص

هذا العمل دراسة تجريبية لانتشار دخان في نموذج لعبة تحويل ثانوي للتيار (مغلقة)، تحتوي على تهوية داخلية. النموذج موجود في قطار كبير السرعة (TGV) و محققا على سلم 1. دراسة جريان الهواء داخل النموذج حقت بسيل طرق بصرية لقياس السرعة، النتائج المحصل عليها قورنت مع النتائج المحصل عليها من طرف البرنامج الصناعي FLUENT. هذه الدراسة سمحت لنا بمعرفة تسرب الدخان باستعمال طريقة للدخان الباردة، هدف هذه الطريقة الأخيرة هو إنتاج عوامل الطفو الموجودة عند حالة الحريق.

**كلمات مفتاح:** خصلة، حريق، دخان باردة، حمل حراري مختلط، تصنيع، حصر، علب مغلقة، انتشار.

### Abstract

The present work is an experimental study of the propagation of a fire smoke in a confined and compartmented enclosure with recirculated air. The experiments were carried out on a mock-up of a Siemens' auxiliary electric converter; which an efficient fire detection system should be set in. First, the investigations were performed by laser velocimetry techniques and smoke propagation simulation. They yielded to a description of the movement of air in the structure. Then, a comparison of velocity measures with numerical data was made, in order to validate the simulations made on Fluent code.

Finally, a low-density and cold gaseous mixture was used to reproduce the buoyant plume of a fire. The transport of the smoke in the structure was described.

**Key words:** smoke, buoyant plume, fire, enclosure, LDV, PIV, fire detection.

### Résumé

Ce travail, est une étude expérimentale de la propagation d'une fumée d'un incendie dans une enceinte compartimentée et confinée avec recirculation d'air forcée. Les investigations ont été menées sur une maquette à l'échelle réelle d'un convertisseur auxiliaire de courant Siemens. L'étude aérodynamique de l'écoulement de l'air dans l'enceinte a été réalisée. Elle a fourni aux simulations numériques les données caractérisant les ventilateurs. 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. Ces simulations ont permis d'observer, de décrire et de comprendre le mouvement des fumées dans la structure.

**Mots clés :** fumées, panache, incendie, convection mixte, écoulement, fumées froides, LDV, PIV.

## Remerciements

*Nous remercions avant tout Dieu le tout puissant de nous avoir donné la foi, la volonté et le courage de mener à bien ce modeste travail.*

*Nous adressons nos sincères remerciements à Monsieur Ph. Bournot pour nous avoir accueillis au sein de l'UNIMECA, et pour nous avoir permis de réaliser ce stage dans de si bonnes conditions. Nous le remercions pour ses conseils, l'encadrement dont nous avons bénéficié et la confiance qu'il nous a accordée. Nous remercions également Monsieur A. Bouhidjar et Monsieur B. Benkroussas pour nous avoir sélectionnés pour ce stage, pour avoir cru en nous et pour leur soutien et leurs conseils.*

*Nous remercions Monsieur O. Vauquelin pour son aide et son expérience dont il nous a fait profiter lors des simulations d'incendie et pour ses conseils avisés. Nous remercions Monsieur G. Le Palec pour son aide sur les simulations numériques sa patience et ses précieux conseils.*

*Nous remercions les enseignants auxquels nous avons eu le privilège d'assister aux cours lors de ce stage : Monsieur Ph. Caminat, Monsieur O. Boiron et Monsieur D. Morvan, tout particulièrement Monsieur Caminat pour sa patience et sa disponibilité lors des travaux pratiques d'instrumentation.*

*Nous remercions Monsieur J. Stéphanini, de la société TSI pour sa précieuse et indispensable aide sur les mesures PIV et LDV.*

*Nous remercions la société Siemens pour avoir proposé le sujet de TER et pour nous avoir confié la maquette d'essai et le matériel nécessaire qui nous a permis de mener à bien ce travail, avec des remerciements particuliers à Monsieur Peters et Monsieur Wetzel. Nos remerciements vont aussi à Monsieur Bury de la société Cerberus pour nous avoir prêté du matériel.*

*Nous tenons également à remercier Monsieur Vicente, Madame Lançon, Monsieur F. Onofri, Monsieur Le Niliot, Madame Dore, Monsieur A. Berthon, Monsieur Ph. Giraud, Monsieur W. Kriaa et Monsieur G. Michaux pour leurs aides et leur gentillesse.*

*Nous exprimons notre gratitude aux responsables du Service des Relations Internationales de l'Université de la Méditerranée : Madame M. Robert et Madame I. Algan, ainsi qu'à Monsieur Lamarche, Madame Refalo, Madame Duchene et la CNASEA pour nous avoir accordé la bourse.*

*Nous remercions les membres du jury : le président du jury Monsieur Larbi, Monsieur Boufidjar, Monsieur Benbraïka et Monsieur Bournot pour avoir accepté d'examiner notre travail.*

*Enfin, nous remercions tous nos enseignants et toutes les personnes qui nous ont aidés à mener à bien ce travail.*

## ***Dédicaces***

*Je dédie ce travail à mes très chers parents, source de ma réussite.*

*A ma sœur Meriem*

*A mes frères :*

*Redha, Amine et Malik*

*A mes amis ;*

*Je tiens à remercier profondément ceux qui ont contribué de près ou de loin à la création de ce travail, principalement mon professeur*

*monsieur Benbraïka, ainsi que mes promoteurs*

*Je remercie mesdames Rjahi et Doria pour leurs aide*

*Kamal*

<b>CHAPITRE 3 : ELEMENTS THEORIQUES ET MODELES DE LA PROPAGATION DE LA FUMEE</b>	<b>21</b>
3.1. MODELES THEORIQUES DE PREDICTION DE LA PROPAGATION DE LA FUMEE :	21
3.1.1. Profils de concentration, de vitesse et de température dans le panache :	21
3.1.2. La hauteur de flamme	24
3.1.3. L'entraînement d'air	24
3.1.4. Loi de montée en puissance d'un incendie :	24
3.2. MODES DE PROPAGATION DE LA FUMEE	25
3.2.1. Transport par mouvement moyen	25
3.2.2. Transport par diffusion moléculaire	25
3.2.3. Transport par mouvement turbulent	25
3.2.4. Mélange	28
3.3. INFLUENCE DE LA VENTILATION	28
3.4. INFLUENCE DU CONFINEMENT	28
<b>CHAPITRE 4 : DETECTION OPTIQUE DE FUMEEES</b>	<b>29</b>
4.1. PRINCIPE DE LA DETECTION OPTIQUE	29
<b>CHAPITRE 5 : PARTIE EXPERIMENTALE</b>	<b>31</b>
5.1. ETUDE DYNAMIQUE DE L'ECOULEMENT DE L'AIR DANS L'ENCEINTE	31
5.1.1. Instrumentation	31
5.1.2. Résultats et mesures de vitesses	42
5.1.3. Visualisations par tomoscopie laser	100
5.1.4. Expérience avec les fils de laine	100
5.1.5. Résultats expérimentaux et simulations numériques	101
5.1.6. Conclusions	103
5.2. SIMULATIONS DE PROPAGATION DE FUMEEES D'INCENDIE	103
5.2.1. Modèle expérimental	104
5.2.2. Procédure expérimentale	111
5.2.3. Matériel de détection utilisé	113
5.2.4. Temps de détection	113
5.2.5. Visualisations par lumière blanche	118
5.3. SYNTHESE ET ANALYSE DES RESULTATS	119
<b>CHAPITRE 6 : CONCLUSIONS</b>	<b>120</b>
<b>CHAPITRE 7 : PERSPECTIVES</b>	<b>121</b>
<b>REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES</b>	<b>123</b>
<b>ANNEXES</b>	<b>126</b>
ANNEXE 1 : EXEMPLE D'UN FICHIER DE STATISTIQUES (EDITE PAR LE LOGICIEL LASERVEC) D'UNE MESURE LDV	126
ANNEXE 2 : CARACTERISTIQUES GEOMETRIQUES ET DYNAMIQUES DES VENTILATEURS :	127

ANNEXE 3 : PROGRAMME POUR LE CALCUL DES DEBITS : .....	127
ANNEXE 4 : DIFFUSION DE LA LUMIERE PAR LES AEROSOLS .....	128
ANNEXE 5 : SIGNAUX LDV .....	131
ANNEXE 6 : PERFORMANCES DE LA DETECTIONS OPTIQUE.....	132
ANNEXE 7 : DIFFUSION MOLECULAIRE.....	133
ANNEXE 8 : MESURES PIV (OUVERTURE F1).....	134
ANNEXE 9 : LOGICIEL PIV INSIGHT.....	140
ANNEXE 10 : LOGICIEL LDV LASERVEC.....	142
ANNEXE 11 : SYSTEME D'INJECTION DES FUMES FROIDES .....	143
ANNEXE 12 : DETECTEUR SICLI P9: .....	144
ANNEXE 13 : POSITIONS DES SOURCES D'INJECTION DES FUMES.....	145
ANNEXE 14 : PHOTOS DES MONTAGES.....	146
ANNEXE 15 : ESSAIS DE REPETABILITE ET DE FIDELITE DES DETECTEURS.....	152
ANNEXE 16 : AUTRES PRINCIPES DE DETECTION OPTIQUE DE FUMEE : .....	153
ANNEXE 17 : COTATIONS .....	155
<b>LEXIQUE.....</b>	<b>158</b>
<b>TABLES.....</b>	<b>159</b>
TABLES DES ILLUSTRATIONS : .....	159
TABLE DES TABLEAUX : .....	161

### Nomenclature

- $a$  : diffusivité thermique [ $m^2/s$ ]  
 $C_p$  : Chaleur spécifique à pression constante [ $J/Kg.K$ ]  
 $C$  : concentration [ $mole/m^3$  ou  $Kg/m^3$ ]  
 $D$  : coefficient de diffusion ou diamètre de la source [ $m^2/s$ ]  
 $f$  : fréquence [Hz]  
 $k$  : énergie cinétique du mouvement turbulent [ $m^2/s^2$ ]  
 $p$  : pression ou exposant [Pa]  
 $P$  : Puissance de l'incendie [W]  
 $Q$  ou  $Q_t$  : puissance totale [W]  
 $Q_c$  : puissance de convection [W]  
 $t$  : temps[s]  
 $T$  : température [K]  
 $u$  : vitesse instantanée [m/s]  
 $\bar{u}$  : Vitesse moyenne [m/s]  
 $u'$  : vitesse fluctuante [m/s]  
 $U, V, W$  : composantes du vecteur vitesse [m/s]  
 $x, y, z$  : coordonnées spatiales [mm]  
 $I$  : Intensité turbulente  
 $m_s$  : débit de fumée (Kg/s).  
 $\chi_r$  : fraction de l'énergie radiative  
 $z_v$  : hauteur virtuelle (d'une source ponctuelle) [m].  
 $D$  : diamètre de la source du feu [m].  
 $C_{xp}$  : concentration en fumée dans le panache ( $Kg/m^3$ )  
 $C_{xp0}$  : concentration en fumée au centre du panache ( $Kg/m^3$ )  
 $u_z$  : vitesse ascendante des gaz dans le panache (m/s)  
 $u_{zm}$  : vitesse ascendante des gaz au centre du panache (m/s)  
 $r$  : distance radiale à partir du centre du panache (m)  
 $z$  : hauteur à partir du foyer [m]  
 $u_0$  est la vitesse centrale du fluide [m/s].  
 $z_v$  est la hauteur virtuelle de la source [m].  
 $\Delta T_0$  : élévation de température [K]  
 $T_0$  : température au centre du panache [K].

### **Symboles grecs :**

- $\lambda$  : Conductivité thermique ou longueur d'onde [ $W/m^2.K - \mu m$ ]  
 $\rho$  : Masse volumique [ $kg/m^3$ ]  
 $\mu$  : Viscosité dynamique [Kg/m.s]  
 $\mu_t$  : Viscosité dynamique turbulente [Kg/m.s]  
 $\nu$  : Viscosité cinématique moléculaire [ $m^2/s$ ]  
 $\nu_t$  : Viscosité cinématique turbulente [ $m^2/s$ ]  
 $\bullet$  : Taux de dissipation de l'énergie turbulente [ $m^2/s^3$ ]  
 $\sigma \lambda$  : 1/e de la largeur du panache.  
 $\lambda$  : coefficient de la distribution Gaussienne.  
 $\sigma$  : 1/e de la largeur du profil de vitesse.

## Introduction

« Le 09 août 2003 vers 18 heures, la locomotive électrique BB 15033 a pris feu en gare de Mulhouse. Appliquant les règles de sécurité, l'alimentation de la caténaire a été coupée d'urgence, bloquant les trains autour de Mulhouse en pleine voie, et impliquant des retards importants pour les lignes touchées. L'engin a été radié par suite de l'incendie».

Ce fait divers au dénouement heureux n'est qu'un exemple des incidents engendrés par l'incendie dans les trains à énergie électrique. L'issue de ce genre d'accident aurait pu être bien plus dramatique particulièrement sur un Train à Grande Vitesse (TGV). Quand on sait que la distance d'arrêt d'un TGV en charge normale roulant à 300 Km/h est de l'ordre 3.5Km, l'importance de la sécurité incendie prend toute sa mesure.

Le moindre dysfonctionnement non signalé sur un TGV roulant à plus de 300Km/h peut avoir des conséquences graves mettant en jeu la vie des passagers et l'intégrité du matériel. Ajoutant à cela, que dans un monde où les retards sont chiffrés en termes de coûts, on imagine bien que les pertes économiques sont aussi bien déplorées par la compagnie ferroviaire, qui voit les voyageurs préférer d'autres moyens de transport, que par le constructeur, qui voit son crédit et son image ternis.

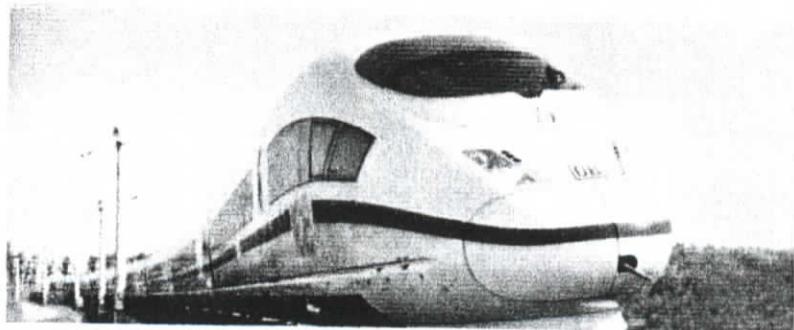
Ainsi, en cas d'incendie, la rapidité de la détection revêt un caractère primordial afin d'assurer la sécurité des voyageurs et de préserver les biens, en prenant les mesures adéquates de lutte contre le feu.

Les motrices des TGV sont alimentées en courant électrique par des câbles tendus au dessus de la voie. Le courant est ensuite transformé afin d'alimenter les différents systèmes.

Il nous a donc été confié, dans le cadre de la détection incendie, l'étude expérimentale de la propagation d'une fumée d'un feu survenant à l'intérieur d'un système électrique. En l'occurrence, il s'agit d'un convertisseur auxiliaire de courant d'un TGV de la société Siemens.

Ce convertisseur comporte deux ventilateurs brassant l'air et a la particularité d'être étanche à toute infiltration. Une maquette de ce système à l'échelle réelle a été mise à notre disposition. Tous les essais et mesures seront effectués sur cette maquette.

Figure 1. Le TGV allemand ICE3 conçu par Siemens, dépasse les 300km/h de vitesse.



Les objectifs de cette étude sont :

- Décrire l'écoulement tridimensionnel à l'intérieur de l'enceinte de la façon la plus fidèle et précise possible, afin d'expliquer, voire de prédire, le comportement des fumées et d'évaluer l'influence de la ventilation sur leur propagation ;
- Fournir aux simulations numériques des données sur le fonctionnement du système en terme de dynamique de l'air dans l'enceinte. Ces données expérimentales sont destinées à être introduites comme conditions aux limites dans les calculs numériques ;

- Valider l'étude numérique menée parallèlement à celle-ci par comparaison avec les résultats expérimentaux ;
- Simuler et décrire la propagation de fumées d'un incendie ;
- Optimiser la position du ou des détecteurs de fumée pour obtenir la meilleure protection en termes de temps de réponse et de fiabilité de l'alarme.

Notre démarche consistera d'abord à caractériser l'écoulement de l'air à l'intérieur de ce convertisseur par des mesures de vitesses et des visualisations. Cette première étape constitue l'étude dynamique de l'écoulement. Dans un second temps, nous nous proposons d'étudier la propagation d'une fumée par des simulations expérimentales.

Différents scénarios d'incendie sont à étudier selon la localisation du foyer et la configuration du système de détection employé.

# Chapitre 1

## Description de la maquette

# Chapitre 1 : Description de la maquette

## 1.1. Géométrie

La maquette reproduit un convertisseur électrique situé dans un TGV.

Elle est composée de trois compartiments voisins, liés entre eux par des ouvertures (**Figure 2**)

Le compartiment C1 est équipé de deux ventilateurs, il communique avec le compartiment C2 par une ouverture de profil horizontal F1, et une autre plus large de profil vertical F2 (**Figure 3**).

Le compartiment C3 est voisin au compartiment C2. Les deux compartiments communiquent par deux ouvertures de profil vertical : l'ouverture F3 et l'ouverture F4.

Les deux ventilateurs sont placés au plafond.

Les **figures 2 et 3** définissent la nomenclature qui sera employée tout au long du mémoire. Une cotation plus détaillée est donnée en **Annexe 17**.

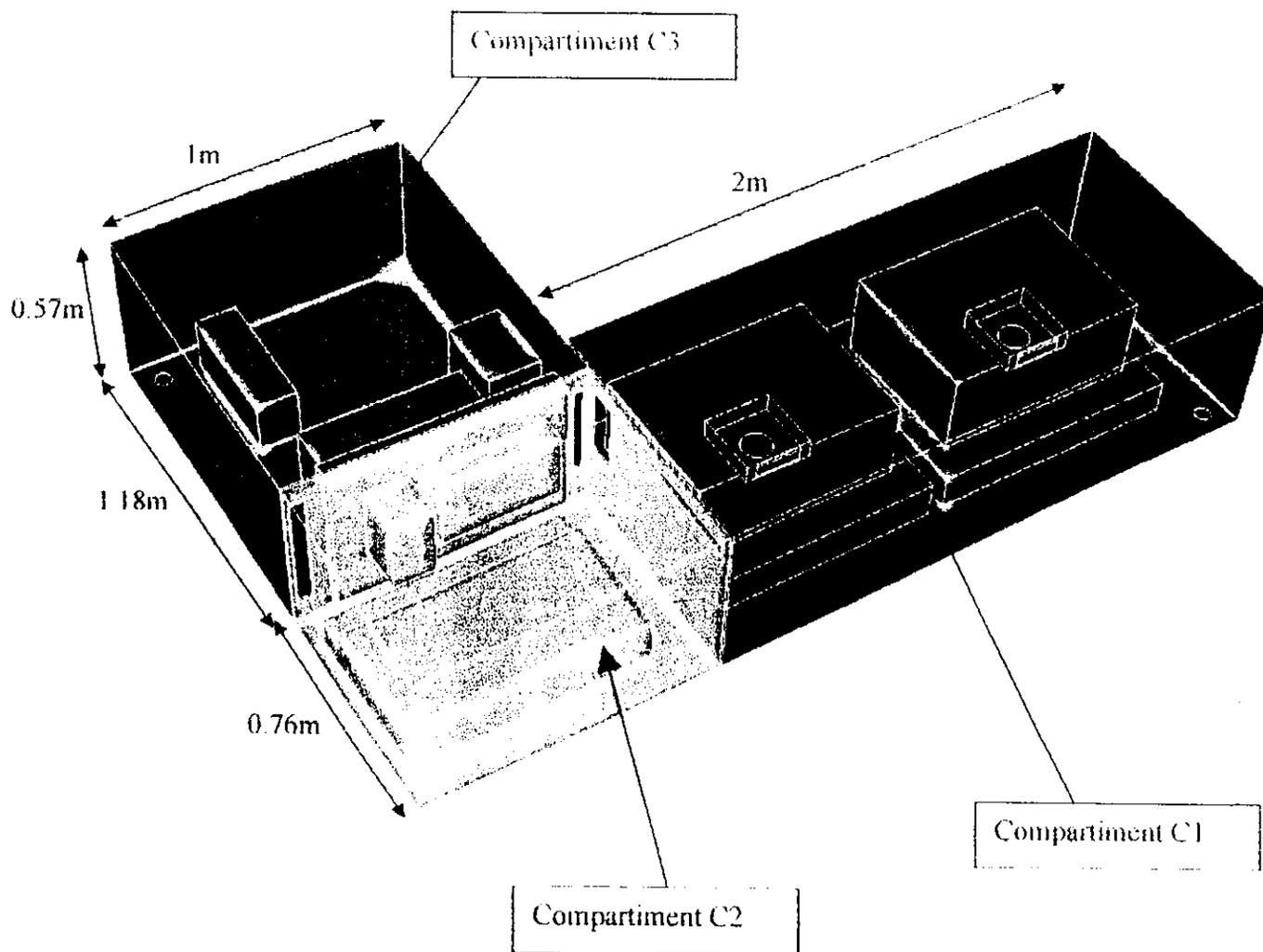


Figure 2. Schéma de la maquette

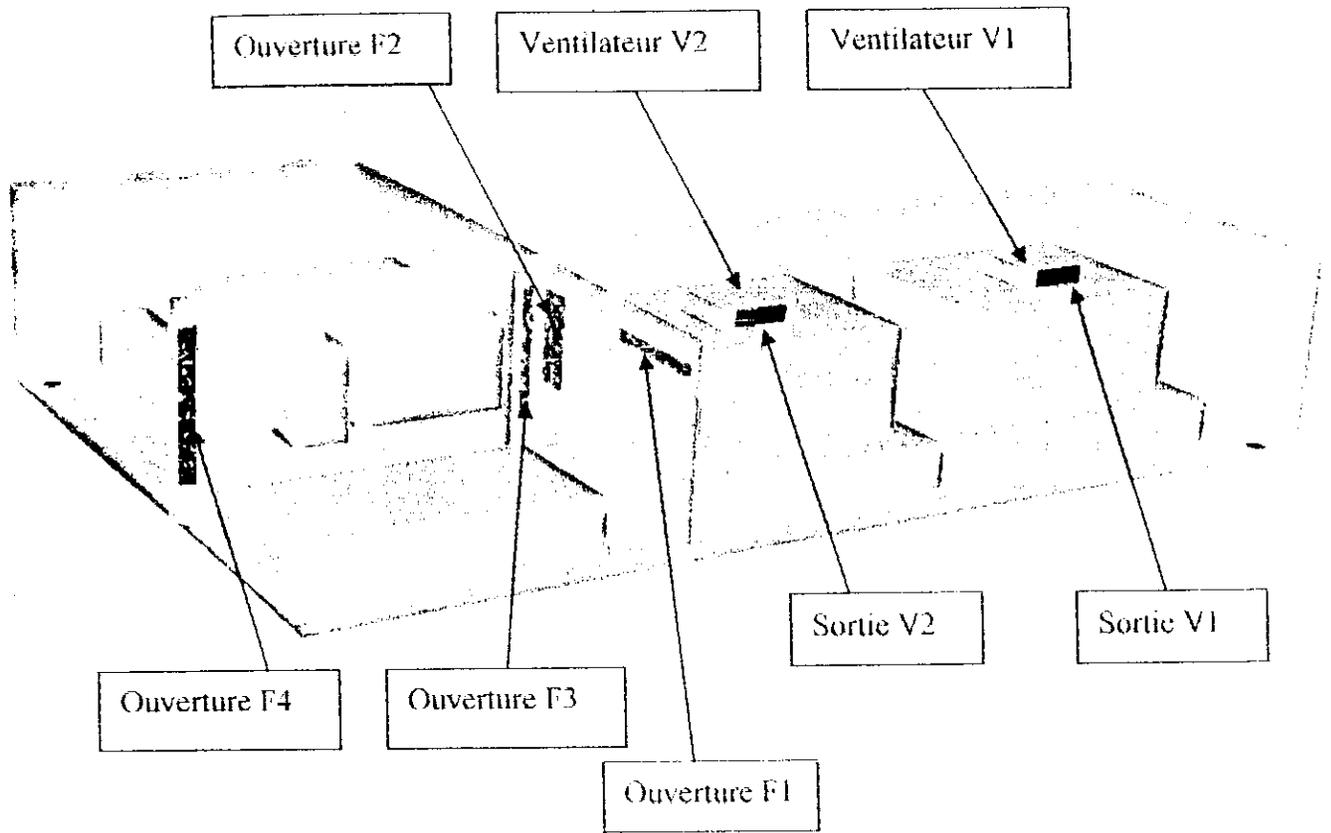


Figure 3. Schéma de la maquette

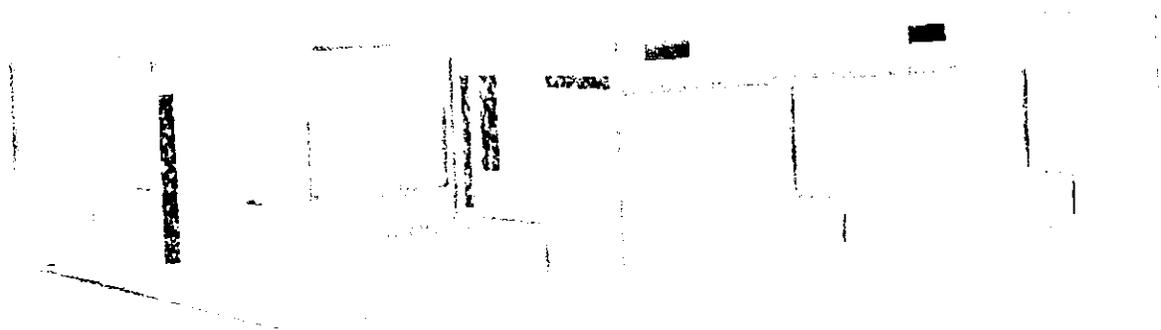
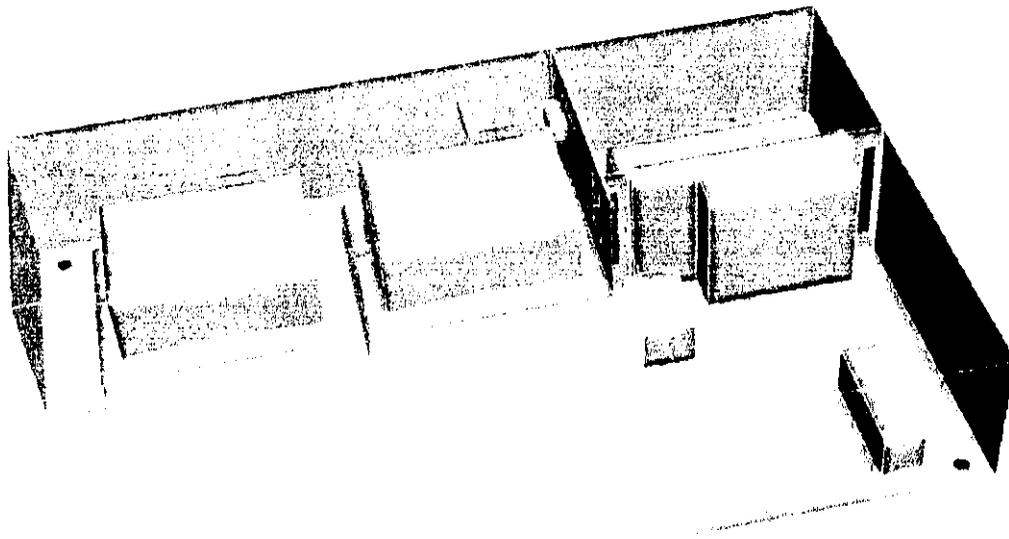


Figure 4. Schéma de la maquette (les sorties des ventilateurs et les ouvertures sont colorées)



**Figure 5. Vue 3D de la maquette.**

Remarque :

Les ventilateurs V2 et V1 sont également désignés respectivement par « ventilateur gauche » et « ventilateur droit ».

Les parois de la maquette sont en plexiglas, montées sur des cornières en aluminium et les boîtiers sont en bois.

Le volume total du fluide de la maquette (volume d'air) est de  $1.5857 \text{ m}^3$ . Il est réparti entre les trois compartiments comme suit :

Compartiment C1 :  $0.644 \text{ m}^3$

Compartiment C2 :  $0.348 \text{ m}^3$

Compartiment C3 :  $0.593 \text{ m}^3$

Un dessin technique au format SolidWorks et DXF avec les cotations de la maquette a été réalisé. Il peut être consulté sur le Cd-rom joint au mémoire.

### **Les ouvertures de communication entre compartiments**

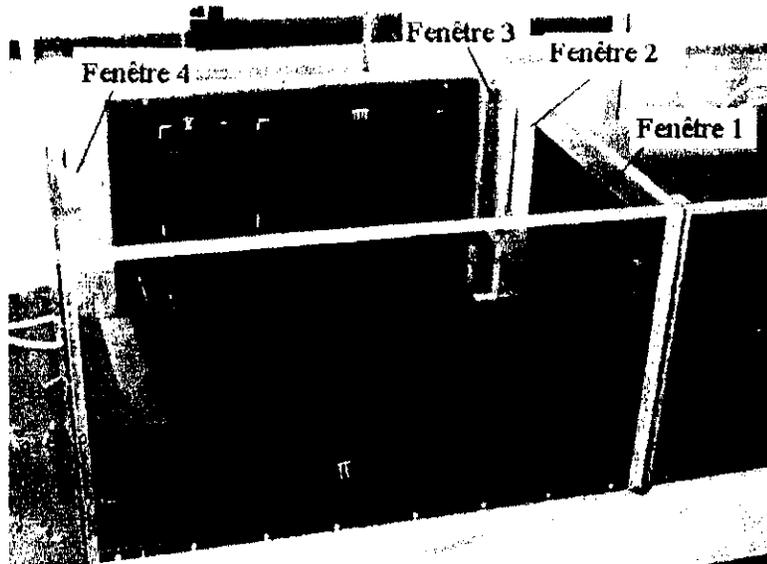
Le tableau suivant résume les dimensions des ouvertures :

**Tableau 1a : dimensions des ouvertures**

Ouverture	Hauteur (verticale) [mm]	Largeur (horizontale) [mm]	assure la communication entre les compartiments
F1	34	336	<b>C1 et C2</b>
F2	252	104	<b>C1 et C2</b>
F3	345	35	<b>C2 et C3</b>
F4	410	50	<b>C2 et C3</b>

Les ouvertures F1 et F2 sont situées sur la même cloison, de même pour les ouvertures F3 et F4 (voir **Annexe 17** pour la cotation des ouvertures).

Toutes les ouvertures ont l'épaisseur de la paroi en plexiglas, soit 5mm.



**Figure 6. Disposition des ouvertures**

Remarque :

Les ouvertures sont parfois désignées par « fenêtres » dans ce présent document.

### **Les boîtiers :**

Les boîtiers présents dans la maquette simulent les éléments électriques du convertisseur.

Le compartiment C1 contient quatre grands boîtiers placés en dessous des ventilateurs et un petit boîtier situé juste en dessous de l'ouverture F1.

Le compartiment C2 contient deux grands boîtiers, dont le premier est situé sur le planché, tandis que l'autre sur la paroi séparant ce compartiment du compartiment C3.

Enfin, le compartiment C3 contient un boîtier avec une grande surface et une petite épaisseur (placé sur la paroi), et deux autres boîtiers de dimension moyenne (**Figures 4 et 5**).

## **1.2. Ventilateurs**

Les ventilateurs installés dans le convertisseur électrique sont centrifuges (**Figure 7**). L'aspiration se fait par leurs bases, à travers une entrée circulaire d'un diamètre de 100 mm, et le refoulement se fait par leur face latérale, à travers une section rectangulaire de 49.5 mm de large, et de 151 mm de long.



**Figure 7. Ventilateur centrifuge du convertisseur électrique [Source Papst]**

Les ventilateurs V1 et V2 sont montés à 10mm du plafond et sont alimentés en 48V (**Figure 3**). Ils développent une puissance de 20Watts chacun. Ils sont munis de 11 pales et tournent à une fréquence de 2850tr/mn. Leur régime de fonctionnement est constant.

La fréquence de passage des pales en un point est de 522.5Hz.

Les caractéristiques fournies par le constructeur (Papst) sont données en **Annexe 2**.

Le débit d'air brassé par chaque ventilateur est approximativement de 210m<sup>3</sup>/h. Ainsi nous pouvons déduire de ces données un temps caractéristique de l'écoulement à l'intérieur du convertisseur en divisant le volume fluide par le débit d'air soufflé par les deux ventilateurs, soit :

$$\frac{1.585787m^3}{2 \times 210m^3/h} * 3600 = 13.6s$$

Ce temps exprime la durée nécessaire pour que l'équivalent de la totalité du volume d'air présent dans la maquette soit brassé. Cette valeur n'est pas un résultat rigoureux puisque seule une fraction du débit d'air rejeté par les ventilateurs passe du compartiment C1 vers les compartiments C2 et C3. Cependant, elle permet de caractériser l'écoulement du système et de se donner un ordre de grandeur à comparer aux temps de détection d'une fumée.

### **1.3. Données thermiques (sur le système réel)**

#### **1.3.1. Indications du constructeur**

La répartition de la charge combustible dans le convertisseur électrique nous a été fournie par le constructeur (**Tableau 1**) :

**Tableau 1. Répartition de la charge combustible dans le convertisseur**

<b>Compartiments</b>	<b>C1</b>	<b>C2</b>	<b>C3</b>
<b>énergie totale par compartiment en MJ</b>	<b>1277,21</b>	<b>187,22</b>	<b>313,50</b>

L'énergie potentielle de combustion des éléments constituant le convertisseur électrique est évaluée à 1945MJ. Ce qui ne rend pas compte de l'inflammabilité des matériaux mais uniquement de l'énergie dégagée en cas de combustion complète de toute l'unité.

Les informations fournies signalent la présence de matières plastiques diverses, de caoutchouc, de polyamide mais nous ignorons leurs quantités exactes et leurs niveaux d'inflammabilité.

Il existe une très grande variété de plastiques de pouvoirs calorifiques variables selon le produit. A titre d'exemple, le pouvoir calorifique du polyéthylène vaut 43 MJ/kg (identique au polypropylène), celui du P.V.C. varie de 4 à 30 MJ/kg (16 MJ/kg en moyenne).

Chapitre 2

L'incendie

## Chapitre 2 : L'incendie

### 2.1. Causes

La façon dont un incendie se déclare détermine le développement du feu. Un incendie se déclare immédiatement avec une flamme (sans dégagement de fumée au préalable) alors qu'un feu couvant (provoqué par une source de chaleur intense) dégagera une fumée dense (95% des cas d'incendie) [2].

Un mauvais contact dans lequel sont dissipés quelques dizaines de watts conduit à un mélange gazeux confiné qui est inflammable dans un espace de temps allant de quelques minutes à une demi-heure selon les caractéristiques du matériau concerné. Une dizaine de watts peut suffire [2].

Au regard du confinement du système, un mélange de gaz de pyrolyse peut atteindre une concentration suffisante pour constituer un mélange inflammable.

L'incendie dans un système électrique peut être causé par [1] :

- une connexion défectueuse (desserrée, brisée, oxydée...);
- un défaut d'isolation (fuite de courant, amorçage superficiel, carbonisation...);
- une surintensité (surcharge, court-circuit...);
- la proximité d'un matériel dégageant de la chaleur, soit normalement (trop grande proximité), soit anormalement (par suite d'un défaut interne, d'un manque de ventilation...);
- un manque d'entretien (accumulation de poussières, obstruction d'orifices de ventilation...);
- une explosion d'un système électrique (transformateur...);
- des surtensions d'origine interne (enclenchement ou déclenchement d'un disjoncteur);
- des surtensions propagées par les réseaux aériens, que celles-ci proviennent d'un coup de foudre direct ou indirect ou d'une induction, plus ou moins amortie, suivant la distance à l'impact;
- des arcs électriques : le convertisseur électrique est parcouru par des courants électriques allant jusqu'à 1500V et 330A. Ces courants peuvent générer des arcs en cas de dysfonctionnement. Les arcs électriques pourraient être à l'origine d'incendie.
- L'augmentation anormale de la résistance d'un composant électrique pourrait également causer une dissipation par effet Joule d'une chaleur intense.

### 2.2. Evolution de l'incendie

Il est généralement admis qu'un feu suit trois phases (**Figure 8**) :

- 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 davantage 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).

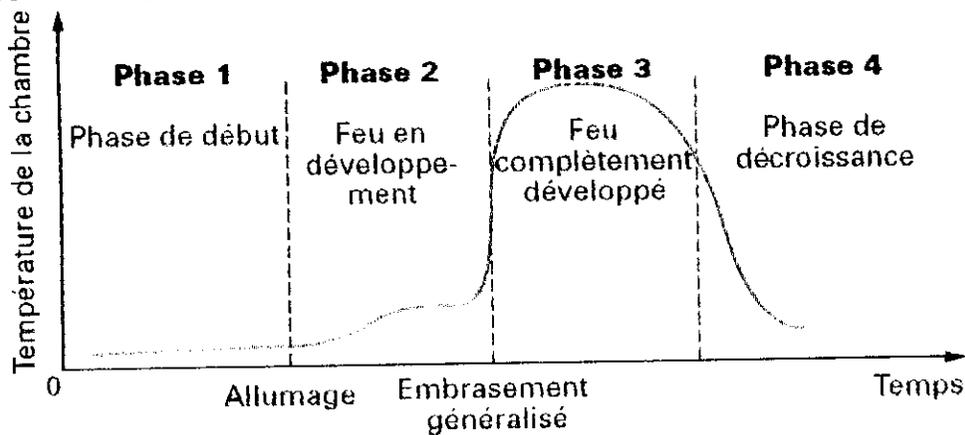


Figure 8. Evolution de l'incendie [source Techniques de l'Ingénieur] [2].

Nous nous intéresserons dans cette étude uniquement à la première 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.

Les matériaux employés pour ce type de système électrique sont choisis pour leur faible inflammabilité, de plus, l'unité électrique est hermétique à toute fuite ou entrée d'air, ainsi des scénarios de flashover ou de backdraft sont peu plausibles (voir Lexique page 158).

### 2.3. Caractéristiques d'un feu couvant

Le système étudié étant un convertisseur électrique de courant, il est très probable que la nature de l'incendie qui pourrait se déclarer soit un feu couvant, car il proviendrait de la combustion lente de matières telles que le PVC, le plastique ou le caoutchouc, due à une surchauffe d'un circuit électrique.

Ce type de combustion se produit avec les substances dont la température d'inflammation est plus élevée que la température de l'incendie.

Un feu couvant se caractérise par :

- Une absence de flammes,
- Une chaleur importante,
- Une émission abondante de fumées,
- Une combustion lente.

Il est à noter qu'une porosité du matériau combustible (tel que certains caoutchoucs) est propice au développement d'une combustion interne, c'est-à-dire à un feu couvant.

#### **2.4. 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 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 [3]. 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.

#### Exemple d'évolution d'un incendie confiné :

Nous reproduisons ici à titre indicatif des résultats de tests d'incendie.

Les données des **figures 9 et 10 [4]** sont les résultats de simulations d'incendie effectuées dans le laboratoire Building and Fire Research Laboratory.

Du papier a été enflammé sur le siège passager d'un van. Les ouvertures ont été maintenues fermées lors des simulations. Ce feu peut donc être considéré confiné au même titre que celui qui fait l'objet de notre étude.

Les **figures 9 et 10** montrent l'évolution en fonction du temps de la température et de la concentration de différentes espèces chimiques (monoxyde et dioxyde de carbone, oxygène) en différents points de l'habitacle du véhicule.

Ces mesures illustrent bien l'évolution d'un incendie confiné.

Lors des deux premières minutes de l'expérience, la température augmente linéairement jusqu'à atteindre une valeur maximale tandis que la fraction d'oxygène décroît jusqu'à une valeur hors des limites d'inflammabilité. Le feu, n'étant plus alimenté de façon suffisante en oxygène, s'éteint. Les transferts thermiques vers l'extérieur font alors chuter rapidement la température.

Il n'existe pas, à notre connaissance, de données expérimentales décrivant l'évolution de la puissance d'un incendie en milieu confiné. Ce constat s'explique par le fait que la mesure de la puissance développée se fait communément en recueillant les fumées produites dans un calorimètre ce qui serait absurde dans le cas d'un incendie confiné.

Une technique expérimentale consisterait à la mesure, en fonction du temps, du poids d'un combustible de pouvoir calorifique connu pour obtenir l'évolution de la puissance du feu.

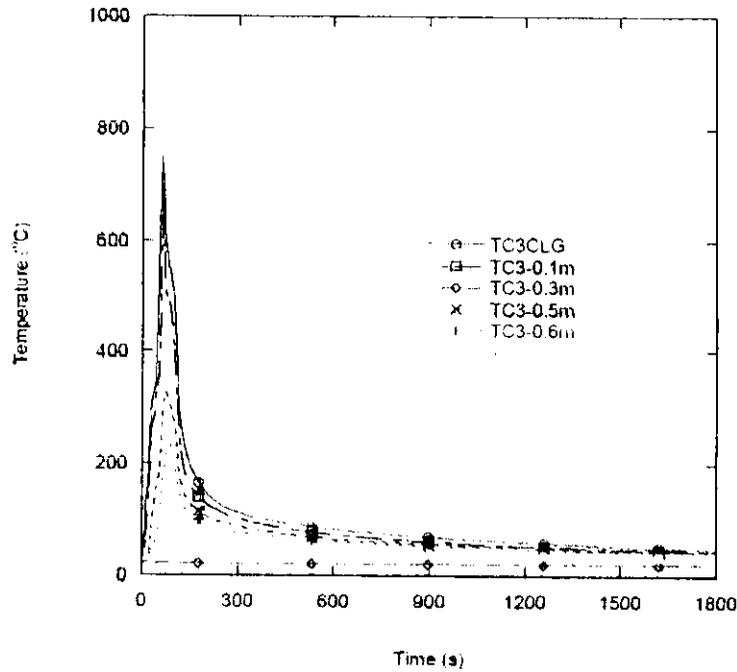


Figure 9. Évolution de la température au dessus des sièges [source [4]].

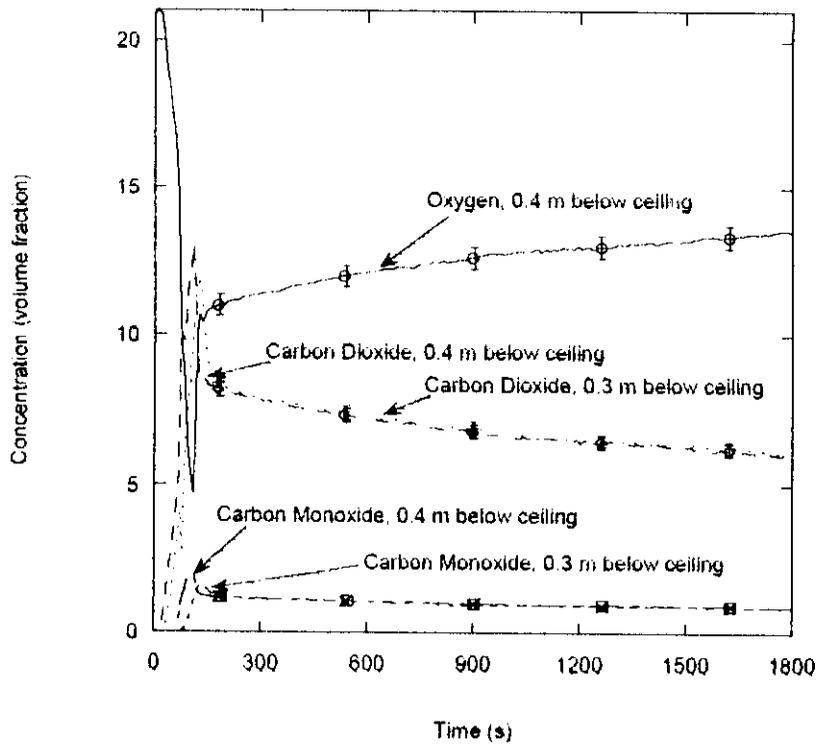


Figure 10. Évolution de la concentration en oxygène, en dioxyde et monoxyde de carbone, en deux endroits du van [source [4]].

### 2.5. Fumées émises

La fumée est l'ensemble de particules liquides ou solides en suspension dans les gaz, résultant d'une combustion ou d'une pyrolyse.

Quel que 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 [5] :

- dioxyde de carbone ( $\text{CO}_2$ ) ;
- monoxyde de carbone ( $\text{CO}$ ). 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 ;
- $\text{NO}_x$  : 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 11**.

Les fumées peuvent aussi être constituées uniquement de la vapeur d'un matériau soumis à la chaleur, ou de gaz de pyrolyse (voir **Figure 12**).

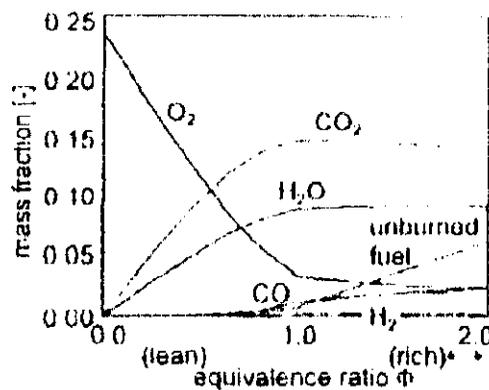


Figure 11. Produits de la combustion de Propane en fonction de la richesse. [Source NISTIR 6588]

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

### Gainage des câbles électriques

L'importance des matériaux utilisés sur les câbles est essentielle, d'abord parce que les câbles sont présents en quantité importante dans les équipements électriques, ensuite parce qu'ils sont souvent un élément propogateur de l'incendie.

Les matériaux utilisés sur les câbles électriques tels que le chlorure polyvinylique (PVC), chloro sulfure de polyéthylène (Hypalon®), polychloroprène (Neoprene®), fluorocarbones (e.g. Teflon®) et autres matériaux contenant sulfures et composés halogénés, ont la particularité d'assurer une combustion lente en cas d'incendie, ils produisent en revanche, des fumées noires très opaques. Ceci est dû à la présence de retardateurs de feu incorporés dans le gainage pour endiguer la propagation de l'incendie. Les fumées émises par ces substances en cas d'incendie sont très opaques, ce qui s'est révélé être un obstacle capital pour les pompiers intervenant et pour l'évacuation des personnes. Cependant, cette opacité peut être mise à profit pour la détection optique d'incendie dans le convertisseur de courant, comme cela sera vu plus loin.

La combustion des matériaux halogénés utilisés sur le gainage des câbles électriques [6] produit une fumée dense, toxique et corrosive (acide halogéné). Si ces deux premières caractéristiques ne représentent pas un inconvénient pour le cas étudié, il n'en est pas de même pour la dernière particularité citée. En effet, il a été constaté que les fumées corrosives entraînaient des détériorations invisibles importantes sur les équipements électriques non touchés par le feu mais exposés à ces fumées.



Figure 12. Échantillon de polyéthylène subissant une pyrolyse.

Remarque : L'EPR (ethylene propylene rubber polymer) ou l'EPDM satisfait aux critères de résistance au feu et au rayonnement thermique, mais émettent peu de fumées.

## Chapitre 3

# Éléments théoriques et modèles de la propagation de la fumée

## Chapitre 3 : Éléments théoriques et modèles de la propagation de la fumée

Pour le cas étudié, la propagation de la fumée par le mouvement moyen se fait sous l'impulsion d'une convection mixte, c'est-à-dire, convection naturelle et d'une ventilation.

Les fluides se dilatent avec la chaleur du feu et leur masse volumique diminue. Devenus plus légers que les parties qui les entourent, ils s'élèvent par rapport à elles sous l'effet des forces de flottabilité. Ces courants de convection entraînent les gaz brûlés, l'air et divers produits de combustion.

L'écoulement libre du panache ne peut être traité comme un jet, car la vitesse augmente au fur et à mesure que le panache s'élève puis diminue lorsque les gaz se refroidissent et que les effets visqueux deviennent comparables aux forces de flottabilité.

Les gaz ascensionnels sont donc soumis essentiellement à la poussée des forces de flottabilité, aux contraintes visqueuses qui s'opposent à celles-ci et éventuellement à une ventilation transversale.

### 3.1. Modèles théoriques de prédiction de la propagation de la fumée :

Les connaissances sur le comportement des panaches de fumée d'incendie sont essentiellement basées sur des observations et de l'analyse dimensionnelle complétée par quelques modèles analytiques.

Dans la majorité des feux, les flammes sont turbulentes et leur panache également. Pour se donner un ordre d'idée, citons l'exemple d'une bougie ordinaire : elle possède une flamme laminaire et un panache de fumée laminaire jusqu'à une hauteur de 200 ou 300mm, où la transition au régime turbulent se produit.

Des expériences de feu de petits bacs d'heptane avec substrat d'eau ont montré que l'extrémité de la flamme présentait une turbulence pour un diamètre de bac atteignant approximativement 30mm pour une puissance de 300W et une hauteur de flamme de 120mm. *Heskestad (1986)* a mis en évidence que pour qu'un panache soit considéré d'une turbulence pleinement développée, un diamètre de feu minimum de 300mm est nécessaire (pour une puissance d'au moins 10KW).

#### 3.1.1. Profils de concentration, de vitesse et de température dans le panache :

*Morton (1965)* a développé un modèle théorique pour la distribution de température [7], le profil de vitesse et le profil du panache (concentration). Ces relations ont été améliorées par *Heskestad (1984)* grâce à des travaux expérimentaux. Les mesures de *Heskestad* effectuées sur des panaches de feux en laboratoire, lui ont permis de calculer les coefficients numériques pour les relations de Morton. Il obtint ainsi :

$$b_{NT} = 0.12(T_0/T_a)^{1/2}(z - z_v) \quad (1)$$

$$\Delta T_0 = 9.1 \left[ T_a / (g C p^2 \rho_a^2) \right]^{1/3} Q_c^{2/3} (z - z_v)^{-5/3} \quad (2)$$

$$u_0 = 3.4 \left[ g / (C p \rho_a T_a) \right]^{1/3} Q_c^{1/3} (z - z_v)^{1/3} \quad (3)$$

Ici, l'indice « 0 » indique le centre du panache (supposé axisymétrique), et les symboles affectés de l'indice « a » désignent une propriété du fluide ambiant.

$b_{\Delta T}$  est le rayon du panache où l'augmentation de la température vaut  $1/2\Delta T_0$ .

$\Delta T_0$  et  $T_0$  sont respectivement l'élévation de température et la température au centre du panache.

$u_0$  est la vitesse centrale du fluide.

$z_v$  est la hauteur virtuelle de la source (**Figure 14**).

Ces dernières relations ne sont valides qu'à partir de la hauteur de flamme.

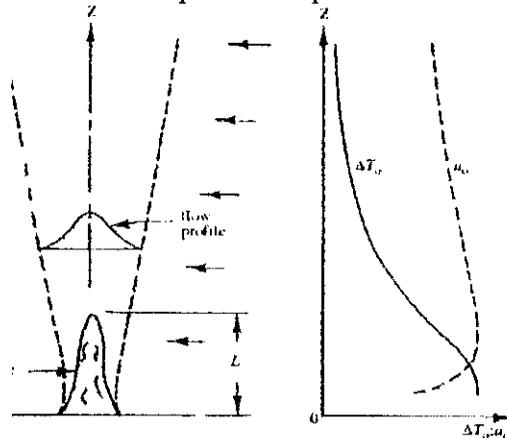
*George et al.* (1977) ont calculé les coefficients précédents, à partir de mesures expérimentales sur un panache thermique (non réactif et dominé par les effets de flottabilité) émis par une buse. Il ont obtenu les coefficients : 0.104 pour  $b_{\Delta T}$ , 9.1 pour  $\Delta T_0$  et 3.4 pour  $u_0$ . Plus récemment, *Papanicolaou & List* (1988), *Shabbir & George* (1994), *Dai et al.* (1994) ont obtenu des résultats similaires.

Ainsi, nous pouvons en déduire que le comportement d'un panache thermique émis par un feu et émis par une buse peut être décrit par le même modèle, à la condition que le panache soit dominé par les forces de flottabilité.

Notons que les coefficients cités précédemment sont valables pour un nombre de Froude de décharge compris entre 0.2 et 61.

$$Fr = \frac{U^2 \cdot \rho_a}{g \cdot d \cdot \Delta \rho} \quad (4)$$

La **figure 13** illustre, d'après des résultats expérimentaux, les variations de température et de vitesse dans le panache. On voit que la température décroît rapidement pour une hauteur supérieure à celle de la flamme, sous l'effet de la dilution par l'air frais entraîné et des transferts thermiques. La vitesse décroît également à partir d'une certaine hauteur à cause de l'élargissement du panache et de la dissipation visqueuse.



**Figure 13.** Profil de température et de vitesse au centre du panache selon les observations de McCafrey 1979, Cox & Chitty 1980, Heskestad 1981, Kung & Stavrianidis 1983, Gengembre et al. 1984 [8].

Dans le but de simplifier les équations, *Davis et Reneke* [8] supposent une distribution gaussienne des profils radiaux de vitesse et de concentration de fumée dans un panache d'un feu issu d'une source circulaire. Ainsi, ils écrivent :

$$C_{xp}(r, z) = C_{xp0}(z) e^{-\left(\frac{r^2}{\lambda^2 \sigma^2}\right)} \quad (5)$$

$$u_z(r, z) = u_{zm}(z) e^{-\left(\frac{r^2}{\sigma^2}\right)} \quad (6)$$

$z$  : hauteur à partir du foyer

$C_{xp}$  : concentration en fumée dans le panache ( $\text{Kg/m}^3$ )

$C_{xp0}$  : concentration en fumée au centre du panache ( $\text{Kg/m}^3$ )

$u_z$  : vitesse ascendante des gaz dans le panache (m/s)

$u_{zm}$  : vitesse ascendante des gaz au centre du panache (m/s)

$r$  : distance radiale à partir du centre du panache (m)

$\sigma \lambda$  : 1/e de la largeur du panache.

$\lambda$  : coefficient de la distribution Gaussienne.

$\sigma$  : 1/e de la largeur du profil de vitesse.

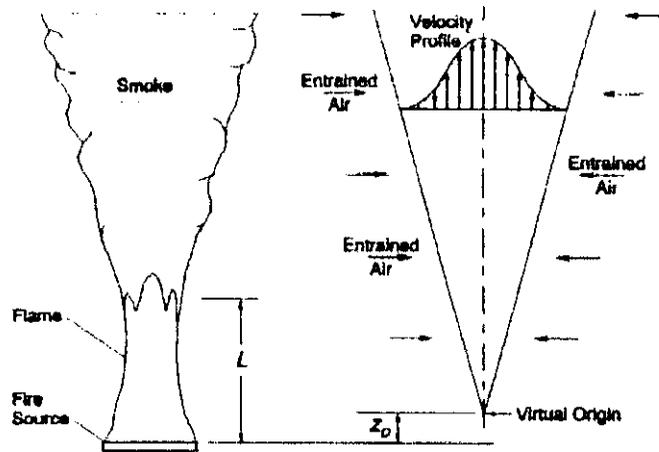


Figure 14. Modèle simplifié de panache de fumée. [Source NISTIR 5516].

En utilisant des corrélations développées par Heskestad (1984), Davis et Reneke proposent des relations pour le profil de température [8], de vitesse et de concentration au centre du panache d'une fumée :

$$\frac{T(z)}{T_w} = 1 + \frac{25 (1 - \chi_r)^{2/3} \dot{Q}^{2/3}}{293 (z - z_v)^{5/3}} \quad (7)$$

$$u_{zm}(z) = \frac{1.03(1 - \chi_r)^{1/3} \dot{Q}^{1/3}}{(z - z_v)^{1/3}} \quad (8)$$

$$C_{xp0}(z) = \frac{27.8 \dot{m}_s}{(1 - \chi_r)^{1/3} \dot{Q}^{1/3} \frac{T(z)}{T_w} (z - z_v)^{5/3}} \quad (9)$$

$$z_v = 1.02D + 0.083 \dot{Q}^{2/5} \quad (10)$$

- D : diamètre de la source du feu (m).
- T : température (K)
- $m_s$  : débit de fumée (Kg/s).
- $\chi_r$  : fraction de l'énergie radiative
- $z_v$  : hauteur virtuelle (d'une source ponctuelle) (m) (**Figure 14**).
- $\dot{Q}$  : puissance de l'incendie (KW).

D'autres corrélations développées par *Yamauchi* [9] donnent la concentration du panache au niveau du plafond.

### 3.1.2. La hauteur de flamme

La hauteur de flamme est définie comme la hauteur à laquelle le mélange de gaz n'est plus réactif.

Heskestad (1983) a corrélié plusieurs données relatives à la hauteur de flamme pour différents combustibles et pour différents diamètres de source et a obtenu la relation suivante [10] :

$$\frac{L}{D} = -1.02 + 0.235 \cdot \frac{\dot{Q}^{2/5}}{D} \quad (11)$$

Avec  $\dot{Q}$  la puissance totale de l'incendie donnée en kilo watt.

Rooney & al. [10] proposent une corrélation similaire.

Nous évaluons cette hauteur pour un incendie d'une puissance 620W tel que simulé lors de la présente étude, à :

$$l \approx 0.186m$$

### 3.1.3. L'entraînement d'air

Le débit de matière issue de la source du feu ne représente que 1% du débit de fumée total au niveau de la pointe de la flamme (Heskestad 1986). Le débit massique d'air entraîné dans le panache s'exprime par :

$$\dot{m}_{air} = G \left[ \frac{(g\rho_a^2)}{CpT_a} \right]^{1/3} \dot{Q}_c^{1/3} (z - z_v)^{5/3} \left[ 1 + \frac{J\dot{Q}_c^{2/3}}{(g^{1/2}Cp\rho_a T_a)^{2/3} (z - z_v)^{5/3}} \right] \quad (12)$$

Avec  $G=0.196$  et  $J=2.9$ .

$\dot{Q}_c$  est la puissance convective du feu, donnée en KW.

Il existe plusieurs travaux abordant ce sujet, nous citerons ceux de McCafrey (1979) et ceux de Zhou Et J. P. Gore (1995) [11].

### 3.1.4. Loi de montée en puissance d'un incendie :

Il est généralement utilisé une loi de puissance de la forme :

$$\dot{Q} = c \cdot t^p \quad (13)$$

Avec

- Q la puissance développée par l'incendie
- c coefficient d'expansion de l'incendie
- p exposant de la loi. (p=0 pour un incendie stationnaire).

Cette loi est dans le cas d'un incendie confiné, difficile à appliquer puisqu'elle ne concernerait que le deuxième stade de développement de l'incendie (voir **chapitre 2.2**). En outre, elle ne prend pas en compte la période d'incubation du feu (feu couvant).

### 3.2. Modes de propagation de la fumée

L'équation régissant l'évolution de la concentration  $C$  est :

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho C) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j C) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( D \frac{\partial C}{\partial x_j} \right) \quad (14)$$

Le premier terme traduit l'instationnarité, le deuxième le transport dû au mouvement du fluide c'est le terme convectif et enfin le dernier exprime la diffusion moléculaire.

Afin de mieux cerner le problème, nous distinguons dans la propagation de la fumée trois modes de transport : transport par mouvement moyen, transport par mouvement turbulent et transport par diffusion moléculaire.

#### 3.2.1. Transport par mouvement moyen

C'est le mouvement macroscopique du fluide, ou le mouvement d'ensemble correspondant à l'évolution moyenne globale de l'écoulement qui transporte l'espèce en question [16]. Ce mouvement, est engendré par les ventilateurs et par convection naturelle du panache de fumées.

#### 3.2.2. Transport par diffusion moléculaire

La diffusion moléculaire est un phénomène irréversible de transport de matière. Elle ne se produit qu'en sens inverse d'un gradient de concentration d'une espèce moléculaire constituant le mélange.

La loi de Fick (1855) donne le nombre de particules traversant la surface  $S_x$  par unité de temps  $\dot{n}_{S_x}$  :

$$\dot{n}_{S_x} = -D \frac{dc(x, y, z, t)}{dx} S_x \quad (15)$$

$c$  : nombre de particules par unité d volume.

$D$  : diffusivité ou coefficient de diffusion moléculaire.

#### 3.2.3. Transport par mouvement turbulent

C'est le transport de particules par les fluctuations de vitesse du fluide.

Le caractère dispersif de la turbulence se manifeste par l'accroissement avec le temps de la distance entre deux particules [12].

La turbulence a pour effet de diminuer les inhomogénéités massiques au sein de l'écoulement et de favoriser le mélange d'une phase dispersée.

##### Efficacité du transport par turbulence

Pour quantifier ce transport, on parle de diffusion turbulente et de viscosité turbulente. Le concept de viscosité turbulente a été introduit par Boussinesq pour permettre de modéliser les tensions de Reynolds.

La viscosité turbulente  $\mu_t$  représentant la diffusion turbulente est évaluée par la relation :

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\epsilon} \quad (16)$$

On déduit une estimation de l'énergie cinétique turbulente  $k$  en supposant une turbulence isotrope :

$$k = \frac{3}{2} \overline{u'^2} \quad (17)$$

A partir des mesures de vitesse, il a été constaté que la fluctuation  $\sqrt{\overline{u'^2}}$  est de l'ordre de 1m/s, 0.3m/s et 0.04m/s, respectivement, dans le compartiment C1, sur l'ouverture F4 et sur l'ouverture F2.

Prenons une fluctuation minimale de  $\sqrt{\overline{u'^2}} = 0.04 \text{ m/s}$

Connaissant  $\overline{u'^2}$  on déduit  $k$  :

On trouve  $k = 0.0024 \text{ m}^2/\text{s}^2$

Le taux de dissipation  $\epsilon$  est obtenu de la relation :

$$\epsilon = \frac{C_\mu^{3/4} \cdot k^{3/2}}{l_t} \text{ avec } C_\mu = 0.09, \text{ et } l_t \text{ échelle intégrale de la turbulence prise } 0.01 \text{ m.}$$

Ainsi nous obtenons une évaluation de l'ordre de grandeur de la viscosité turbulente :

$$\nu_t \approx 2.6 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$$

Qui est supérieure à la viscosité cinématique du fluide ( $1.5 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$ ) et à la diffusion moléculaire ( $7 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$ ).

Pour un transport de quantité de mouvement sur la distance  $L$ , les temps caractéristiques des diffusions visqueuse (ou de quantité de mouvement), turbulente et moléculaire sont respectivement **[12]** :

$$t_v \sim \frac{L^2}{\nu} \quad (18)$$

$$t_t \sim \frac{L}{u'} \quad (19)$$

$$t_D \sim \frac{L^2}{D} \quad (20)$$

Evaluons ces quantités :

Soit les données relatives au cas étudié :

$$\nu = 1.51 \cdot 10^{-5} m^2 / s$$

$$L = 0.05 m$$

$$u' = 0.04 m / s$$

$$D = 7 \cdot 10^{-5} m^2 / s$$

$$t_v \sim 165 s$$

$$t_r \sim 1.25 s$$

$$t_D \sim 36 s$$

Ces valeurs confirment l'efficacité de la diffusion turbulente avec un temps caractéristique court relativement aux temps caractéristiques des diffusions visqueuse, et moléculaire.

### 3.2.3.1. Origines de la turbulence

On cite ici quelques éléments générateurs de turbulence rencontrés dans le problème étudié :

#### 3.2.3.1.1. Turbulence générée par les ventilateurs

Le mouvement rapide des pales des ventilateurs génère de la turbulence. Le nombre de Reynolds de l'écoulement à l'aspiration dépasse les 78000.

La turbulence de l'écoulement produit par les ventilateurs a été mesurée et est commentée plus loin dans ce rapport.

#### 3.2.3.1.2. Instabilité de Rayleigh-Taylor

Cette instabilité est due à la convection naturelle. Deux couches de fluides, de densité différente, superposées l'une au dessus de l'autre. Le fluide le plus léger se trouvant en dessous, est soumis aux forces de flottabilité. Il s'élève donc jusqu'à rétablissement de l'équilibre (voir schéma). Dans notre cas, il s'agit de la fumée de faible densité qui s'élève dans l'air, à partir de la source d'incendie.

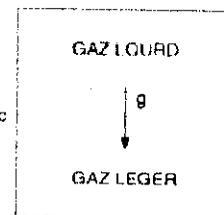


Figure 14. Instabilité de Rayleigh Taylor

#### 3.2.3.1.3. Instabilité de couches de mélange (instabilité de Kelvin-Helmholtz) :

Elle prend naissance dans la zone délimitant des fluides de propriétés différentes (Figure 15). Elle apparaît une fois les fumées stratifiées, entre la nappe supérieure de fumée et l'air inférieur de densité et de vitesse différente. Cette instabilité génère des structures tourbillonnaires au niveau de l'interface des deux fluides, favorisant le mélange.



Figure 15. Expérience de Thorpe (Exp. O. Pouliquen, Polytechnique) (fluides de densité différente).

D'autres phénomènes turbulents peuvent apparaître, tels que les sillages des boîtiers présents dans la maquette, les couches limites turbulentes sur parois planes etc.

### 3.2.4. Mélange

Cette notion associe les diffusions par agitation turbulente et moléculaire.

En notant que la diffusion turbulente a un effet dopant pour la diffusion moléculaire puisqu'elle augmente la surface d'échange où siègent les gradients de concentration.

Le mélange joue un rôle important dans la propagation de la fumée et par conséquent de sa détection, cependant il a pour effet la dilution des fumées, effet retardateur de la détection.

### 3.3. Influence de la ventilation

La circulation de l'air, contribue, d'une part, à amener l'air frais au foyer et d'autre part, à propager les fumées et les gaz chauds dans d'autres volumes.

La ventilation modifie considérablement les caractéristiques et le comportement du panache. La trajectoire des fumées est déviée selon l'intensité de l'écoulement. La combustion est également sujette à l'influence de la ventilation. L'écoulement alimente le foyer en air frais et attise le feu, la puissance dégagée augmente alors.

Babraukas & Grayson estiment l'influence d'un courant transverse d'intensité moyenne  $\bar{U}$  sur le débit de fumée par la loi :

$$\frac{q_{\bar{v}}}{q_0} = 1 + 0.15 \times \frac{\bar{U}}{D} \quad (21)$$

où  $q_0$  et  $q_{\bar{v}}$  sont respectivement les débits sans et avec ventilation.  $D$  diamètre de la source d'incendie.

### 3.4. Influence du confinement

Le confinement du système impose une restriction géométrique à la propagation de la fumée. Il entraîne l'accumulation des fumées au plafond et leur stratification, de sorte qu'un système de détection opérationnel détectera forcément l'incendie. Cependant, l'objectif est de détecter le plus tôt possible les fumées pour prendre les mesures adéquates de sécurité et de lutte contre l'incendie.

## Chapitre 4

# Détection optique des fumées

## Chapitre 4 : Détection optique de fumées

Les critères d'une bonne détection d'incendie sont : crédibilité, fiabilité, rapidité : nous nous intéresserons plus particulièrement à cette dernière qualité.

Le signalement précoce du feu reste un élément fondamental de la lutte contre l'incendie, particulièrement lorsque cela touche le transport de masses importantes de voyageurs à grande vitesse.

Le choix du système de détection dépend en grande partie de la nature des fumées à détecter.

Dans un article paru dans le *Fire Safety Engineering* (2000), Roger Barrett présente les investigations expérimentales visant à tester la réponse de différents types de détecteurs de fumées à différents scénarios d'incendie (selon la norme européenne EN54-7).

Les détecteurs testés étaient de type : optique, ionique, détecteur de monoxyde carbone et mixte optique/thermique.

L'expérience entreprise consistait aux six tests suivants :

- Plastique (POM) surchauffé
- Feu couvant de bois (pyrolyse)
- Feu couvant de coton
- Inflammation d'un échantillon de caoutchouc
- Inflammation d'un échantillon de plastique (Polyuréthane)
- Inflammation de n-heptane (liquide).

La détection optique a été la plus rapide sur les trois premiers tests et s'est classée deuxième pour les deux suivants. En revanche, pour le feu de n-heptane, elle a montré des performances inférieures (bien que bonnes) relativement aux modes de détection ionique et mixte. Cela s'explique par la température très élevée générée par un tel feu.

Les performances des détecteurs optiques ont été largement étudiées. Ils sont employés aussi bien pour la sécurité des bâtiments que pour les installations industrielles telles que l'industrie aéronautique.

Le choix de la méthode de détection s'est porté sur des détecteurs optiques ponctuels pour leur grande sensibilité aux feux couvant et à des fumées de natures chimiques différentes (voir **Annexe 6**). Les détecteurs optiques présentent, en outre, l'intérêt de permettre un bon suivi de la propagation des fumées lors des expérimentations que nous avons menées.

L'utilisation d'un système de détection reposant sur un principe électrique tel que le thermocouple ou le détecteur ionique peut s'avérer délicate en raison des interférences électromagnétiques avec les circuits du convertisseur électrique. Le choix d'une détection optique est donc, de ce point de vue, le plus judicieux.

Toutefois, la combustion de certains isolants qui ne dégagent que des gaz incolores est difficilement détectée par ce type d'appareil.

### 4.1. Principe de la détection optique

#### Composants d'un détecteur optique :

Les détecteurs optiques contiennent principalement deux composants :

- Emetteur de lumière infrarouge (**Figure 16**) : diode infrarouge, émet un signal d'une longueur d'onde de 950nm (ou ultraviolet).
- Récepteur de lumière (**Figure 17**) : diode réceptrice, sensible uniquement à la lumière de la diode émettrice.



Figure 16. Diode Emettrice

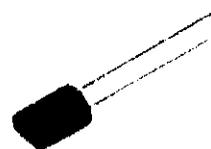


Figure 17. Diode Réceptrice

Les diodes sont les plus répandues, à cause de leur faible consommation de courant électrique et leur longue durée de vie ainsi que leur taille qui permet de réaliser des montages compacts.

Dans une chambre de mesure, les deux diodes sont mises de sorte à ce qu'elles ne soient pas opposées l'une à l'autre. Une lame est placée sur le trajet du faisceau incident pour l'empêcher d'atteindre directement le récepteur (Figure 18).

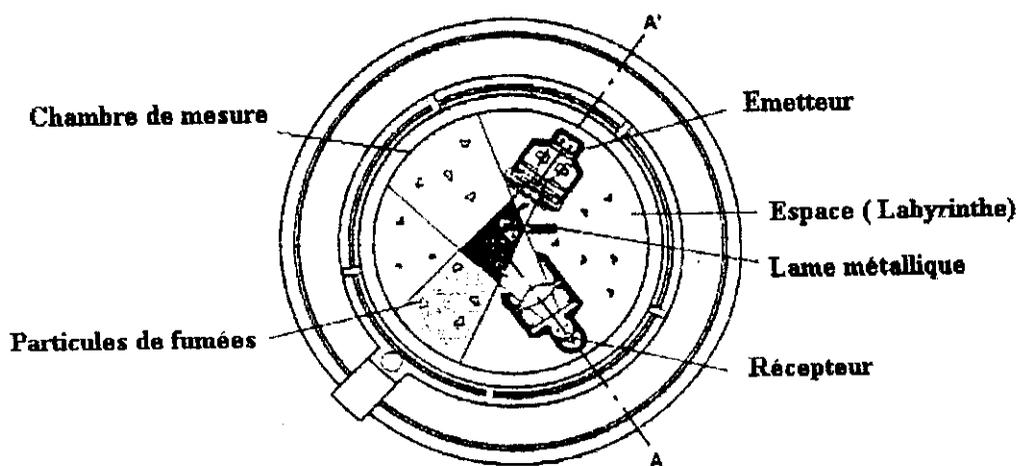


Figure 18. Schéma de fonctionnement d'un détecteur optique de fumées

Soit une particule de fumée se déplaçant dans la chambre de mesure. Lors de son passage par le faisceau incident, l'interaction avec la lumière provoque une diffusion dans toute la chambre (voir **Annexe 4**). La lumière diffusée est captée par la diode réceptrice, qui à partir d'une certaine intensité lumineuse déclenche l'alarme.

# Chapitre 5

## Partie expérimentale

## Chapitre 5 : Partie expérimentale

L'étude du mouvement de la fumée doit être précédée par une étude aérodynamique dans la maquette pour acquérir les données suffisantes en ce qui concerne le transfert de masse entre les compartiments. Le mouvement des fumées est certainement lié au mouvement de l'air.

### 5.1. Etude dynamique de l'écoulement de l'air dans l'enceinte

Il est important de bien comprendre l'écoulement à l'intérieur du système pour pouvoir réaliser les simulations d'incendie par la suite.

De plus, la non prédictibilité des champs turbulents (un petit écart sur les conditions initiales s'amplifie avec le temps) impose cette étude. En effet, le mouvement de l'écoulement à l'intérieur de l'enceinte est complètement chaotique et imprévisible car fortement turbulent, la moindre perturbation dans l'écoulement a des répercussions importantes au niveau des échanges de masse.

La maquette présente une géométrie complexe. La détermination des vitesses au niveau des différentes ouvertures nous paraît essentielle, puisque elle permet d'apprécier les différents échanges entre les compartiments.

#### Restrictions et hypothèses :

Les mouvements de convection naturelle due à la présence dans l'enceinte de composants électroniques exothermes n'ont pas été simulés, car nous ne disposons pas de données relatives à ces échanges thermiques.

L'écoulement est à faible vitesse (faible nombre de Mach) et il n'existe pas dans la maquette de source de chaleur susceptible de faire varier la température. L'écoulement peut être considéré incompressible et isotherme.

#### Remarque importante :

Avant toute mesure de vitesse, il a été laissé un temps suffisamment long s'écouler afin que l'écoulement s'établisse dans l'enceinte.

#### 5.1.1. Instrumentation

L'instrumentation utilisée, a la particularité de reposer sur des techniques optiques.

Les techniques optiques, semblent être les plus adaptées au problème. Elles sont non intrusives, précises et faciles à mettre en œuvre, puisque la maquette offre de nombreux accès optiques. Ainsi, mesures de vitesses et observations, s'effectueront sans perturber l'écoulement [13].

Le choix des deux méthodes de mesure de vitesse PIV et LDV (respectivement Particles Image Velocimetry et Laser Doppler Velocimetry) n'est pas fortuit. Ces deux méthodes sont complémentaires, leurs caractéristiques, ainsi que la géométrie de la maquette nous amènent à éviter d'utiliser d'autres instruments tel que le Pitot, ou le fil chaud.

La méthode de la Vélocimétrie Laser Doppler est caractérisée par son excellente résolution spatiale et temporelle, une chose qui n'est pas bien assurée par la PIV.

Or la PIV permet de décrire la vitesse non pas en un point, mais en plusieurs points, elle permet également de visualiser les lignes de courant. De plus, il nous est possible de déterminer deux composantes de vitesse par PIV, en une seule manipulation, ce qui n'est pas réalisable avec la sonde LDV dont nous disposons.

### 5.1.1.1. LDV (Laser Doppler Velocimetry)

La LDV donne une mesure locale et instantanée d'une projection du vecteur vitesse

#### Principe de la Vélocimétrie Laser Doppler :

La méthode présentée [14] consiste à dédoubler un faisceau issu d'un laser continu en deux faisceaux parallèles qui sont focalisés par une lentille ( $O_1$ ). Dans la région de l'espace qui leur est commune, ces deux faisceaux interfèrent et forment des franges d'interférence (Figure 19).

Si une particule se déplace à une vitesse  $V$  selon un axe  $X'X$  au travers du réseau de franges; elle croise alternativement des franges sombres et brillantes, et diffuse (voir Annexe 4) donc un flux périodique, si bien que le détecteur recevant cette lumière modulée délivre un signal ayant une fréquence  $\nu$ , qui dépend uniquement de l'interfrange et de la composante de vitesse de la particule perpendiculairement au plan des franges [14] (Figure 20).

Pour aller d'une frange brillante à la suivante, une particule de vitesse  $V$  parcourt une distance  $l$  pendant un temps  $T$ ; la fréquence détectée est :

$$\nu = \frac{1}{T} = \frac{|V|}{l} = \frac{|V| \cos \alpha}{l} = \frac{u}{l} \quad \text{avec} \quad u = v l \quad (22)$$

$u$  étant la composante de vitesse perpendiculaire aux franges d'interférence.

L'interfrange est :

$$l = \frac{\lambda \cdot f_i}{D_s} = \frac{\lambda}{2n \sin(\theta)} \quad (23)$$

Avec :

$f_i$  : distance focale de la lentille convergente.

$\theta$  : Angle entre les deux faisceaux

$n$  : Indice de réfraction du milieu.

$D_s$  : Distance entre les deux faisceaux sortant du front de la lentille.

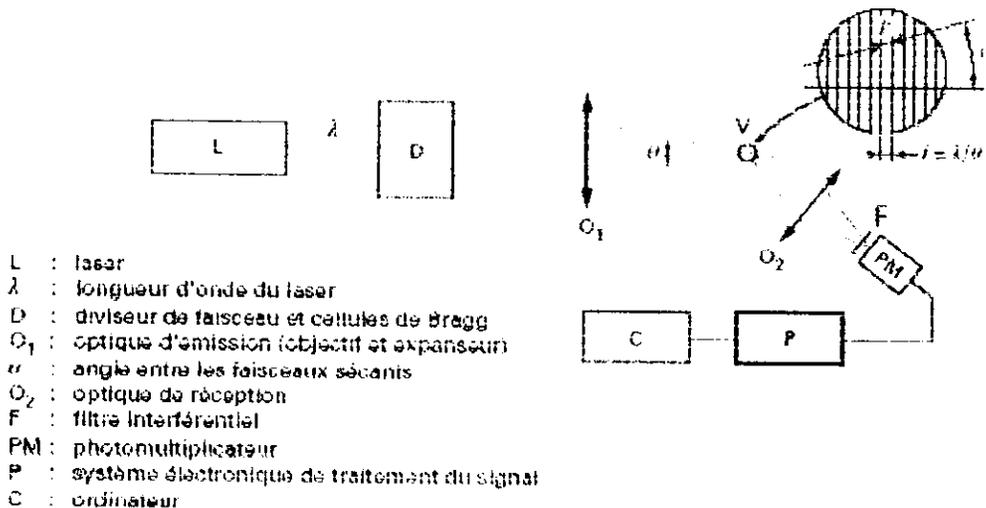


Figure 19. Dispositif de la LDV [14].

La fréquence  $\nu$  de la fluctuation de l'intensité lumineuse causée par le passage de la particule dans le volume de mesure est détectée par le photodétecteur.

#### Le volume de mesure :

Le volume de mesure est constitué par la partie commune aux deux faisceaux qui se croisent

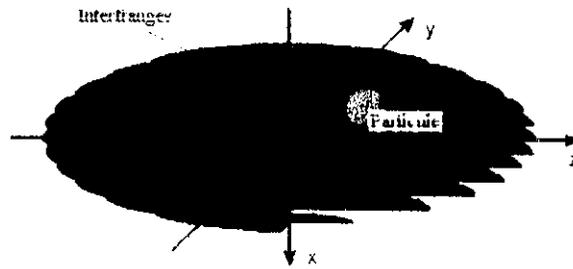


Figure 20. Volume de mesures

Dans sa section droite, le faisceau LASER présente une répartition gaussienne de l'intensité lumineuse et sa dimension latérale est définie comme la distance à l'axe où l'intensité est réduite dans le rapport  $1/e^2$ , d'où la notation  $D_p$ . Au voisinage du point de focalisation, la largeur du faisceau devient  $d_p$ , [12] :

$$d_p = \frac{4f_i \lambda}{\pi D_p} \quad (24)$$

La dimension du volume de mesure est alors (Figure 21) [12] [17] :

$$\Delta z = \frac{d_p}{\sin(\theta)} = \frac{4 \cdot f_i \cdot \lambda}{\pi \cdot D_p \cdot \sin(\theta)} \quad (25)$$

$$\Delta y = \frac{d_p}{\cos(\theta)} = \frac{4 \cdot f_i \cdot \lambda}{\pi \cdot D_p \cdot \cos(\theta)} \quad (26)$$

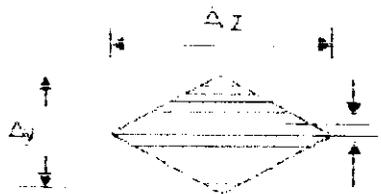


Figure 21. Dimensions du volume de mesure

#### Détermination du sens de la vitesse :

Si l'on considère un réseau de franges fixe, deux particules traversant le volume de mesure à la même vitesse, selon la même trajectoire, mais dans des directions diamétralement opposées, produiront le même signal à la même fréquence.

Le système n'étant pas sensible au sens de la vitesse, on remédie à cette indétermination en introduisant sur un des faisceaux une cellule de Bragg (modulateur acousto-optique) qui permet d'augmenter sa fréquence.

Un décalage constant de fréquences existe alors entre les deux faisceaux incidents. Les franges du volume de mesure sont maintenant animées d'une vitesse constante et connue de défilement  $ud$ .

La fréquence de défilement des franges dans le volume de mesure est relativement élevée, car elle vaut  $\Gamma$ , qui est de l'ordre de 40 MHz (ou plus).

Avec ces dispositifs, le réseau de franges se déplace à une fréquence  $\Gamma$ , ce qui signifie une vitesse de défilement des franges  $ud = \Gamma \cdot i$  ( $i$  étant l'interfrange). Alors la vitesse mesurée un

est la somme algébrique de  $u_d$  et de la composante  $u$  de la vitesse de l'écoulement ; la valeur de  $u_d$  doit être choisie suffisamment élevée pour que  $u$  soit toujours largement positive. En retranchant de la vitesse mesurée  $u_m$ , la vitesse de défilement  $u_d$ , on obtient la valeur algébrique de la vitesse  $u$  de la particule.

La fréquence diffusée par la particule, et interceptée par le photodétecteur est :

$$f = f_d \pm \frac{|vitesse|}{\lambda} \quad (27)$$

$f_d$  est la fréquence de défilement des franges.

Remarque :

Une flèche dessinée sur la sonde permet d'orienter la vitesse mesurée (Figure 21a).

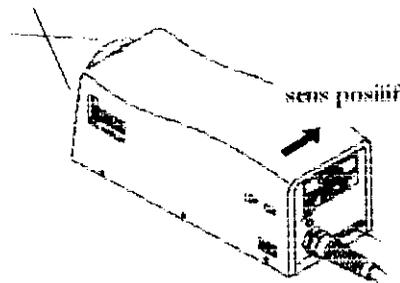


Figure 21a. Flèche permettant d'orienter la vitesse mesurée

Les informations sur la vitesse (voir Annexe 1 et 5), obtenues sont calculées par les formules :

La vitesse moyenne, l'écart type et l'intensité turbulente :

$$\bar{u} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n u_i \quad (28)$$

$$\sqrt{u'^2} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (u_i - \bar{u})^2} \quad (29)$$

$$I = \frac{\sqrt{u'^2}}{\bar{u}} \quad (30)$$

Les facteurs de dissymétrie  $S$  et d'aplatissement  $F$  (de manière à vérifier la nature gaussienne de la distribution) :

$$S = \frac{\overline{u'^3}}{(\overline{u'^2})^{3/2}} \quad \text{avec} \quad \overline{u'^3} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (u_i - \bar{u})^3 \quad (31)$$

$$F = \frac{\overline{u'^4}}{(\overline{u'^2})^2} \quad \overline{u'^4} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (u_i - \bar{u})^4$$

Le premier nous renseigne sur la symétrie de la distribution gaussienne des mesures par rapport à la moyenne. Une distribution non symétrique donne à penser que l'écoulement n'est pas stationnaire

Le deuxième est le facteur d'aplatissement. Il permet d'apprécier la dispersion des mesures et donc le niveau de turbulence.

Pour une loi normale  $S = 0$  et  $F = 3$ .

L'écart à l'état gaussien est général pour la plupart des écoulements turbulents et augmente avec le nombre de Reynolds de la turbulence [15]. La turbulence est souvent caractérisée par de l'intermittence, une statistique non gaussienne et un coefficient de dissymétrie négatif.

**Les intérêts de la LDV dans notre étude, sont donc :**

- L'écoulement n'est pas perturbé ;
- La mesure est très localisée, elle se fait dans un volume pouvant être  $< 1\text{mm}^3$  ;
- Une réponse intrinsèque (pas de nécessité d'étalonnage), et aussi linéaire. Elle est aussi indépendante de la fluctuation de température ou de composition du fluide ;
- Mesure de la vitesse en fonction du temps ;
- Une bonne précision avec un pourcentage d'erreur pouvant être inférieur à 1%.

**Limites d'utilisation de la vélocimétrie laser**

Les limitations principales sont donc les suivantes :

- c'est la vitesse de fines particules supposées suivre avec précision l'écoulement, qui est mesurée, pas du fluide lui-même ;
- comme la cadence d'arrivée des particules dans le volume de mesure est aléatoire, il peut en résulter des biais sur les statistiques et l'analyse spectrale des fluctuations de vitesse constitue un problème délicat ;
- Lors des mesures LDV, le nombre de particules validées par seconde ne dépassait pas les 300. Ce qui signifie que ces mesures ne donnent pas accès aux fluctuations turbulentes les plus rapides (dizaines de kilo hertz) ;
- l'approche des parois lors de l'exploration de couches limites reste difficile en raison des problèmes de lumière parasite ; quand les faisceaux laser sont parallèles à la paroi, le volume de mesure peut être mis tangent à la paroi (permettant des mesures jusqu'à quelques centaine de micromètres de la paroi) mais, quand ils sont perpendiculaires à la paroi, la distance minimale pour acquérir des mesures est de l'ordre de quelques millimètres ;
- Le coût d'un appareillage opérationnel est relativement élevé car il faut rassembler des composants de qualité.

**La sonde LDV utilisée pour notre étude :**

La sonde LDV compacte (Figure 22) comporte un LASER à diode émettant un rayon d'une longueur d'onde de 690nm à une puissance de 50mW, un photodétecteur de type photodiode à avalanche, une cellule de Bragg (40MHz) ainsi que l'optique et l'électronique nécessaire (Tableau 2).

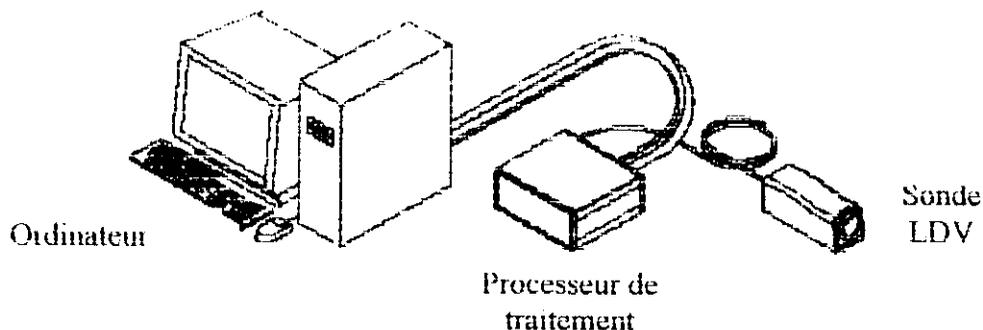


Figure 22. Système LDV de la sonde compacte

Tableau 2. Caractéristiques de la sonde LDV utilisée. [Source Documentation TSI [17]]

<b>Optical:</b>			
Laser wavelength	680-695 nm		
Laser power	50 mw		
Beam spacing	50 mm		
<b>Electrical:</b>			
Photodetector maximum frequency	155 MHz <sup>1</sup>		
<b>Measurement Volume:</b>			
	<b>Focal Distance of Lens</b>		
	<b>120 mm</b>	<b>250 mm</b>	<b>350 mm</b>
Beam half angle (α)	10.74°	5.52°	3.97°
Nominal fringe spacing <sup>2</sup>	1.84 μm	3.56 μm	4.95 μm
Length	.54 mm	2.0 mm	3.8 mm
Horizontal axis	100 μm	190 μm	265 μm
Vertical axis	45 μm	85 μm	115 μm
Number of Fringes	53	52	52

**Domaine d'utilisation :**

La gamme de mesure du matériel commercialisé s'étend couramment de 10<sup>-3</sup> m/s à 500m/s.

**Erreurs statistiques :**

Les statistiques doivent être faites sur un grand nombre N d'échantillons (typiquement plus de 2 000), pour avoir un haut degré de confiance dans les mesures ; les formules (32) permettent d'estimer les incertitudes basées sur ce critère pour la vitesse moyenne et l'écart type [14]:

$$\bar{u} \pm \frac{Z\sqrt{u'^2}}{\sqrt{N}}$$

$$\sqrt{u'^2} \pm \frac{Z\sqrt{u'^2}}{\sqrt{2N}} \tag{32}$$

(la valeur de Z étant de 1,96 pour un taux de confiance de 95 %)

On peut déduire de la première relation que :

$$\frac{\Delta\bar{u}}{\bar{u}} = \frac{I \cdot Z}{\sqrt{N}} \tag{33}$$

Avec I l'intensité turbulente

Lors de nos mesures, le nombre d'échantillons était typiquement de 4096.

Ces relations nous permettent de dire que l'erreur statistique la plus élevée commise ne dépasse pas 4%, sauf au niveau du point d'inversion du profil de vitesse de l'ouverture F1 en raison des grandes fluctuations de vitesse qui s'y produisent. Globalement, l'erreur statistique est largement inférieure au pourcent.

**Erreurs de biais :**

La mesure s'effectuant sur une seule particule traversant le volume mesure, et le nombre de particules traversant ce volume par unité de temps étant proportionnel à la vitesse de l'écoulement mais également très irrégulier, on comprend bien qu'une moyenne temporelle de la vitesse serait biaisée par les particules de vitesse la plus élevée.

La meilleure solution pour remédier à ce problème est un ensemencement dense et homogène et des particules de taille monodispersée.

Note : le logiciel LaserVec (voir **Annexe 10**) qui traite les données LDV effectue une correction pour palier aux erreurs de biais en calculant la vitesse moyenne à partir du temps  $\tau$  de chaque bouffée (burst) de particules [17] :

$$\langle \bar{V} \rangle = \frac{\sum V_{\tau}}{\sum \tau} \quad (34)$$

Enfin, si une particule traverse le réseau de franges selon une trajectoire strictement parallèle aux franges, il n'y aura aucune modulation dans la lumière diffusée : une telle particule de vitesse  $\vec{V}$ , mais qui a une composante de vitesse nulle, n'est pas mesurée. C'est une source de biais dans les mesures.

**Erreurs dû au bruit :**

Le bruit provient essentiellement des réflexions sur les parois, les composants, de la diffusion par les éléments optiques mais également du bruit propre au photodétecteur dû au courant « noir ». On peut augmenter le rapport signal-bruit en plaçant en amont du photodétecteur un filtre qui ne laisse passer que les longueurs d'onde proches de celle du LASER et en peignant les surfaces réfléchissantes d'une peinture qui absorbe la lumière du laser.

Remarque sur les mesures LDV à travers les parois en plexiglas :

Les deux faisceaux laser touchent la paroi en plexiglas avec le même angle d'incidence. La paroi étant à surfaces parallèles, les faisceaux réfractés seront parallèles aux faisceaux incidents mais légèrement décalés, de sorte que l'angle entre ces deux faisceaux est conservé (rappelons que l'interfrange est uniquement fonction de la longueur d'onde et de l'angle entre les deux faisceaux). Ainsi, le croisement ne se produira pas à la distance focale [19], mais plus loin. Ce qui ne modifie en rien la mesure, mais la quantité de lumière focalisée par la lentille sera moins importante (le signal sera plus faible).

**5.1.1.2. PIV (Particles Image Velocimetry)**

La PIV permet la détermination globale d'un champ instantané de vitesse.

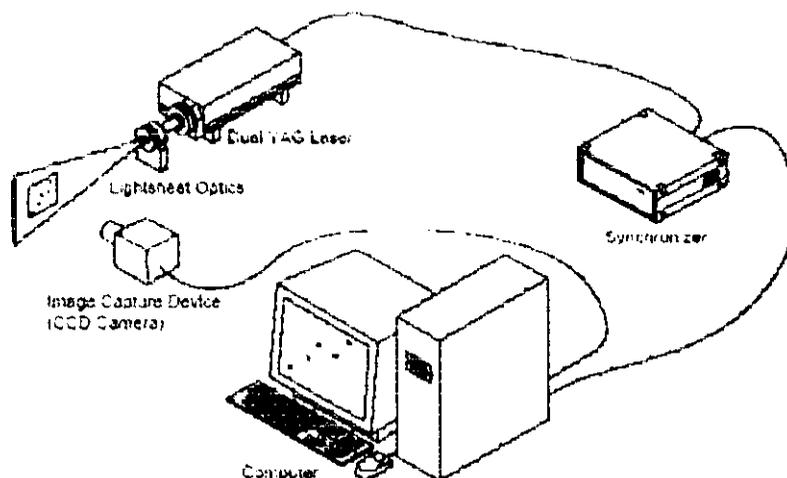


Figure 23. Montage d'un système PIV.

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 23, 24 et 25). Il suffit alors de déterminer la distance parcourue par les particules [14].

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.

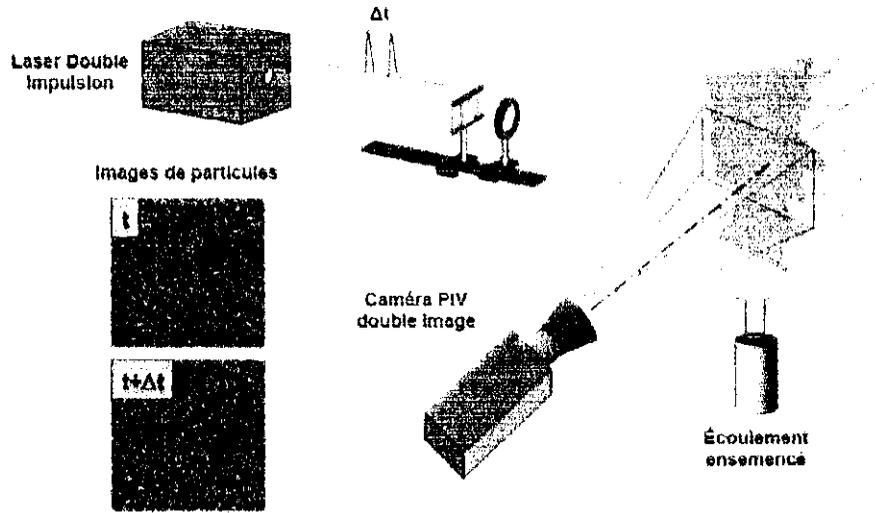


Figure 24. Principe de la PIV

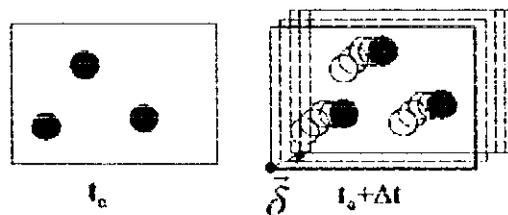


Figure 25. Déplacement des particules entre deux instants

Les images sont enregistrées par caméra vidéo CCD. 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 [14], 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 INSIGNT 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 de contrôler pratiquement tous les paramètres de mesure (voir **Annexe 9**), 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 d'ensemencement 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 le 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 près des parois, une telle situation est générée par l'encombrement des particules, et leur adhérence à la paroi. Cela a été observé sur la maquette près des parois, des ouvertures et des ventilateurs, 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.

### 5.1.1.3. Visualisations par tomoscopie LASER

La visualisation par tranche (tomoscopie) est obtenue en ensemençant le fluide 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.

### 5.1.1.4. Remarques sur l'ensemencement

Les particules de l'ensemencement doivent être suffisamment petites pour suivre l'écoulement le plus fidèlement possible, mais pas trop sinon le signal diffusé faiblit.

Toutes les mesures reposant sur la présence de particules diffusantes, l'ensemencement de l'écoulement et la caractérisation des particules sont deux problèmes majeurs.

L'ensemencement de l'écoulement se fait par de l'huile d'olive (huile minérale) pulvérisée.

Les particules de l'aérosol injecté ont un diamètre moyen de 0.5µm.

Les particules d'huiles ont la fâcheuse tendance à adhérer aux parois de la maquette qui s'opacifient avec le temps. L'écoulement doit donc être ensemençé régulièrement.

La qualité de l'ensemencement dépend de son homogénéité, de sa granulométrie qui doit être monodispersée et de sa faculté à suivre le plus fidèlement possible les fluctuations de vitesses et les accélérations du fluide.

Les deux paramètres essentiels à la caractérisation de la qualité des particules constituant l'ensemencement sont la vitesse de sédimentation et le temps de réponse de la particule à une accélération.

Mazumder et Kirsch et aussi Boutier suggèrent de ne conserver dans les forces qui s'exercent sur la particule que la traînée visqueuse et son inertie. Leur égalité donne [12] :

$$\rho_p \frac{\pi d_p^3}{6} \frac{du_p}{dt} = 3\pi\mu_{air} d_p (u_{air} - u_p) \quad (35)$$

Ils évaluent ainsi le temps de réponse  $\tau_p$  d'une particule de diamètre  $d_p$  par l'approximation :

$$\tau_p \sim \frac{\rho_p}{\rho_{air}} \frac{d_p^2}{18\nu_{air}} \quad (36)$$

$$f = \frac{1}{\tau_p} \quad (37)$$

Pour une particule de 1µm de diamètre dans un écoulement d'air,  $\tau_p = 4 \mu s$  (soit une fréquence de 250KHz).

Le **Tableau 3** donne les vitesses de sédimentation et le temps de réponse d'une particule d'une densité 1000 fois supérieure à celle de l'air.

**Tableau 3. Dimension, vitesse de sédimentation et temps de réponse des particules. [Source TSI réf (17)]**

Diamètre de particules ( $\mu\text{m}$ )	vitesse de sédimentation (cm/s)	temps de réponse (s)
0.5	$7.5 \times 10^{-4}$	$7.7 \times 10^{-7}$
0.6	$1.1 \times 10^{-3}$	$1.1 \times 10^{-6}$
0.7	$1.5 \times 10^{-3}$	$1.5 \times 10^{-6}$
0.8	$1.9 \times 10^{-3}$	$2.0 \times 10^{-6}$
0.9	$2.4 \times 10^{-3}$	$2.5 \times 10^{-6}$
1.0	$3.0 \times 10^{-3}$	$3.1 \times 10^{-6}$
2.0	$1.2 \times 10^{-2}$	$1.2 \times 10^{-5}$
3.0	$2.7 \times 10^{-2}$	$2.8 \times 10^{-5}$
4.0	$4.8 \times 10^{-2}$	$4.9 \times 10^{-5}$
5.0	$7.5 \times 10^{-2}$	$7.7 \times 10^{-5}$

Pour une turbulence homogène isotrope, le temps caractéristique de la turbulence est

$$\tau = l / \sqrt{k} \tag{38}$$

l l'échelle caractéristique de la turbulence de l'écoulement.

k énergie cinétique turbulente.

Pour une fluctuation de vitesse de 1.5m/s et une échelle caractéristique de 1mm (valeurs extrêmes), nous obtenons :

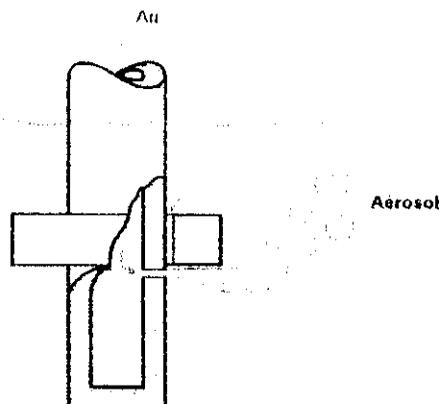
$\tau = 0.5\text{ms}$  soit une fréquence de fluctuation de 1.8Khz.

Le temps de réponse de la particule est donc suffisamment court pour suivre les fluctuations de l'écoulement.

Pour générer ces particules, différentes solutions technologiques sont possibles : atomiseurs de types variés, vaporisateurs, injecteurs, lits fluidisés, cyclones, etc.

Nous utiliserons un atomiseur de type Laskin nozzle (**Figures 26 et 27**). Une arrivée d'air est immergée dans le liquide. Les particules très fines contenues dans les bulles d'air produites par le jet sont relâchées lorsque les bulles atteignent la surface ; pour réduire la granulométrie, un impacteur est installé en sortie du générateur.

L'ensemencement des écoulements qui est indispensable à l'application de la technique de mesure des vitesses par Anémométrie Laser à effet Doppler (LDA) et par PIV, sera réalisé à l'aide de ce dispositif.



**Figure 26. Atomiseur immergé de type Laskin nozzle [13].**

Tous ces aérosols sont générés avec une granulométrie polydispersée qui peut soit introduire des biais dans les mesures par le trainage des particules les plus grosses, soit accroître la dispersion des mesures, ce qui sera interprété comme de la turbulence.

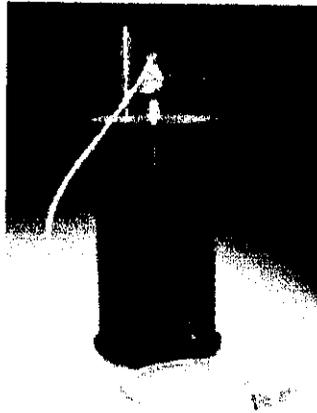


Figure 27. Générateur de particules utilisé pour nos expériences.

## 5.1.2. Résultats et mesures de vitesses

### 5.1.2.1. Ecoulement en sortie des ventilateurs

Les ventilateurs sont, à notre connaissance, les seuls facteurs entretenant l'écoulement à l'intérieur du convertisseur de courant. L'étude de l'écoulement à leur sortie est donc légitime.

Dans une première partie, on utilise une sonde avec film chaud (prête à l'utilisation), avant que la maquette soit totalement montée, pour voir l'ordre de grandeur des vitesses au niveau des ventilateurs (voir Annexe 14 – Figure 142).

Dans une seconde partie, on utilise les procédés de PIV et LDV sur les ouvertures et les ventilateurs. 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 28 et 29).

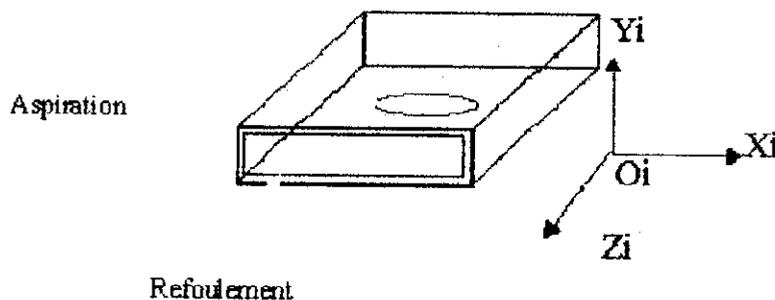


Figure 28. Repère lié aux ventilateurs

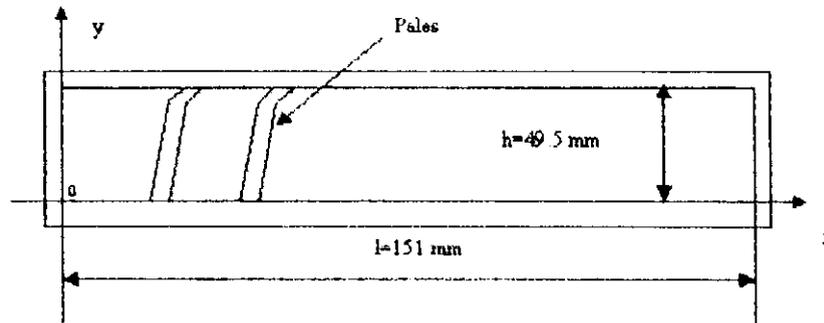


Figure 29. Repérage du ventilateur

Il a été pratiqué des mesures LDV et PIV sur chacun des ventilateurs.

### Mesures LDV

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

Les profils de vitesse normale ( $W$ ) et tangentielle ( $U$ ), ont été mesurés sur le ventilateur V2. Seules les vitesses normales  $W$ , ont été mesurées sur le ventilateur V1.

Le point de mesure a été positionné en trois hauteurs de la sortie du ventilateur

Pour chaque hauteur, des déplacements suivant la longueur sont effectués. Pour déplacer le volume de mesure, il suffisait de déplacer la sonde.

Il est très probable qu'une turbulence périodique se manifeste à la sortie du ventilateur à une fréquence proche de la fréquence de passage d'une pale soit 522Hz. Malheureusement, nous n'avons pu observer ce phénomène car la fréquence d'échantillonnage de nos mesures ne dépassait pas les 250Hz.

L'analyse spectrale des signaux n'a donc pas donné de résultats probants.

L'analyse des données statistiques des mesures LDV ne révèle pas de grands écarts de la densité de probabilité avec une courbe gaussienne, ce qui ne suggère pas l'existence phénomènes turbulents intermittents [15].

Les graphes des profils de vitesses tangentielles et normales montrent que l'écoulement à la sortie des deux ventilateurs n'est pas uniforme (**Figures 30, 31, 32**).

Les profils de vitesses normales suivant les trois hauteurs ont la même allure (**Figures 30 et 31**). Avec un minimum au milieu (selon  $x$ ) de la sortie. La vitesse atteint un maximum pour  $x=147\text{mm}$ .

Les vitesses normales dans la partie inférieure du ventilateur sont, globalement, les plus élevées. En revanche, les vitesses normales, sur les trois hauteurs, sont très proches pour  $x=6\text{mm}$ .

Le ventilateur V2, présente des vitesses tangentielles élevées, dépassant 8m/s en  $y=2\text{mm}$  et  $x=40\text{mm}$ .

Les trois profils de vitesse tangentielle du ventilateur V2 sont très différents sur les très trois hauteurs de mesure (**Figure 32**). De forts gradients de vitesse tangentielle existent selon l'axe ( $OY$ ). D'autre part, en  $y = 2\text{mm}$  et  $x = 6\text{mm}$ , le mouvement est caractérisé par une vitesse positive de l'ordre 4 m/s, alors que l'écoulement se fait globalement dans le sens négatif.

Cette vitesse est engendrée par la réflexion de l'air sur la paroi latérale gauche du ventilateur. Ceci crée un gradient de vitesse tangentielle important selon l'axe (OX).

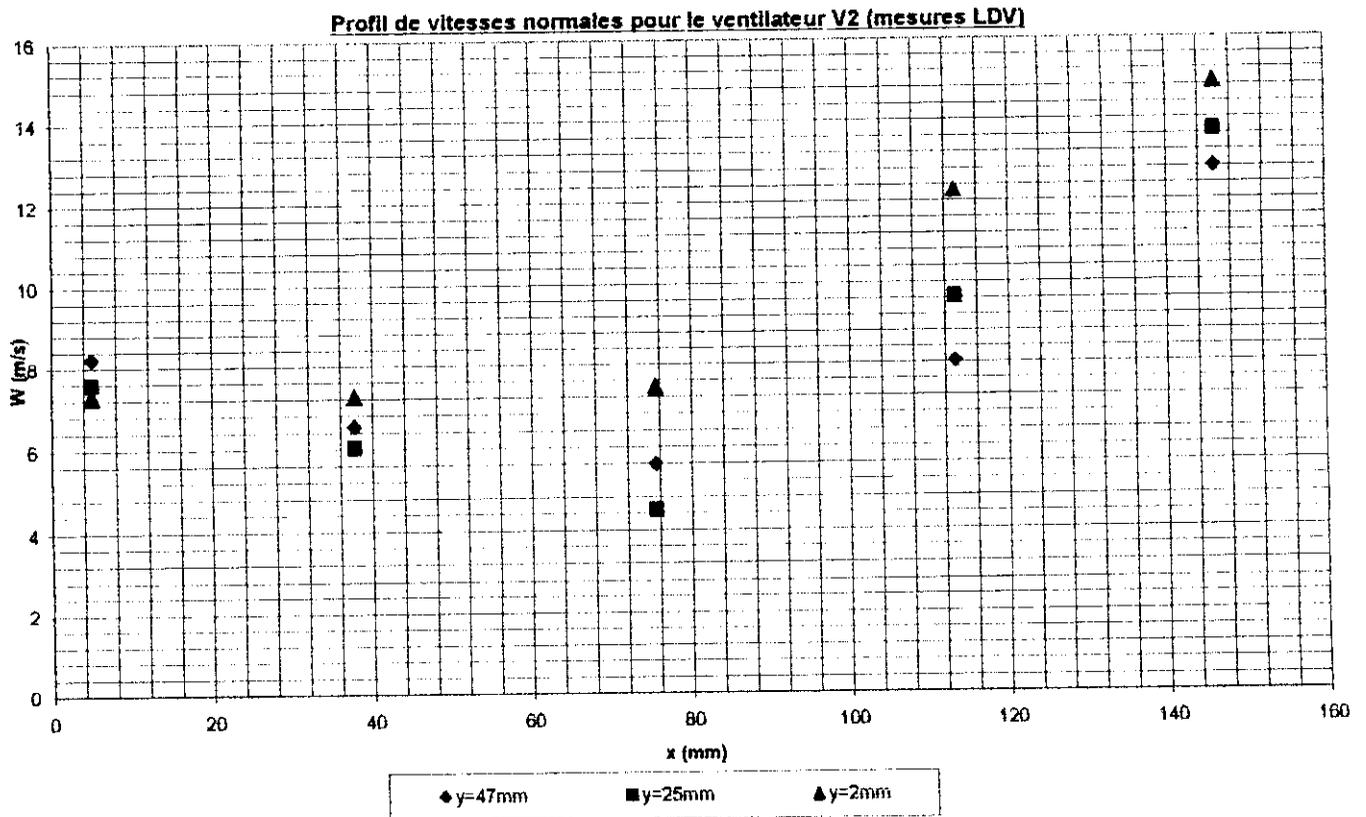


Figure 30. Profil de vitesses normales à la sortie du ventilateur V2

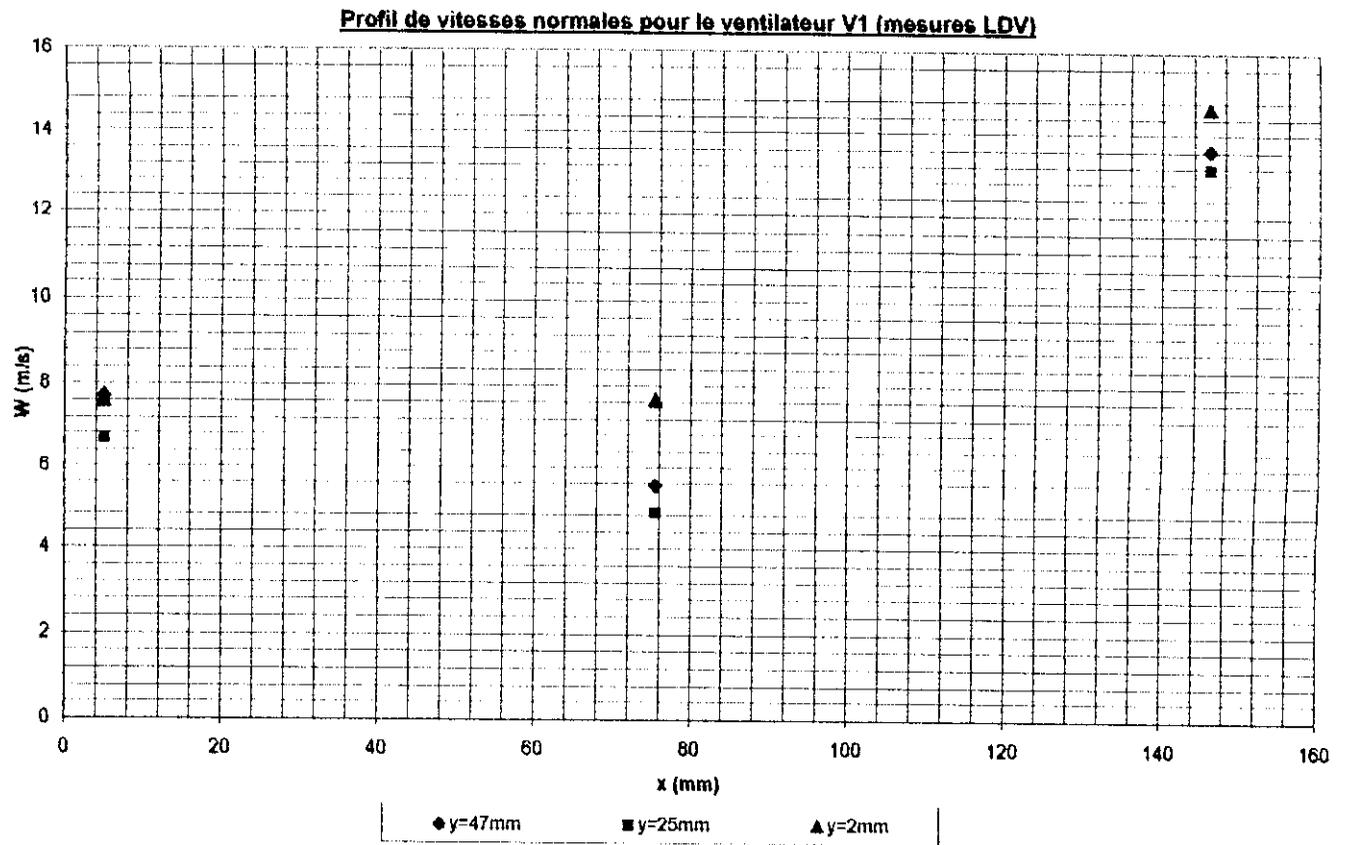


Figure 31. Profil de vitesses normales à la sortie du ventilateur V1

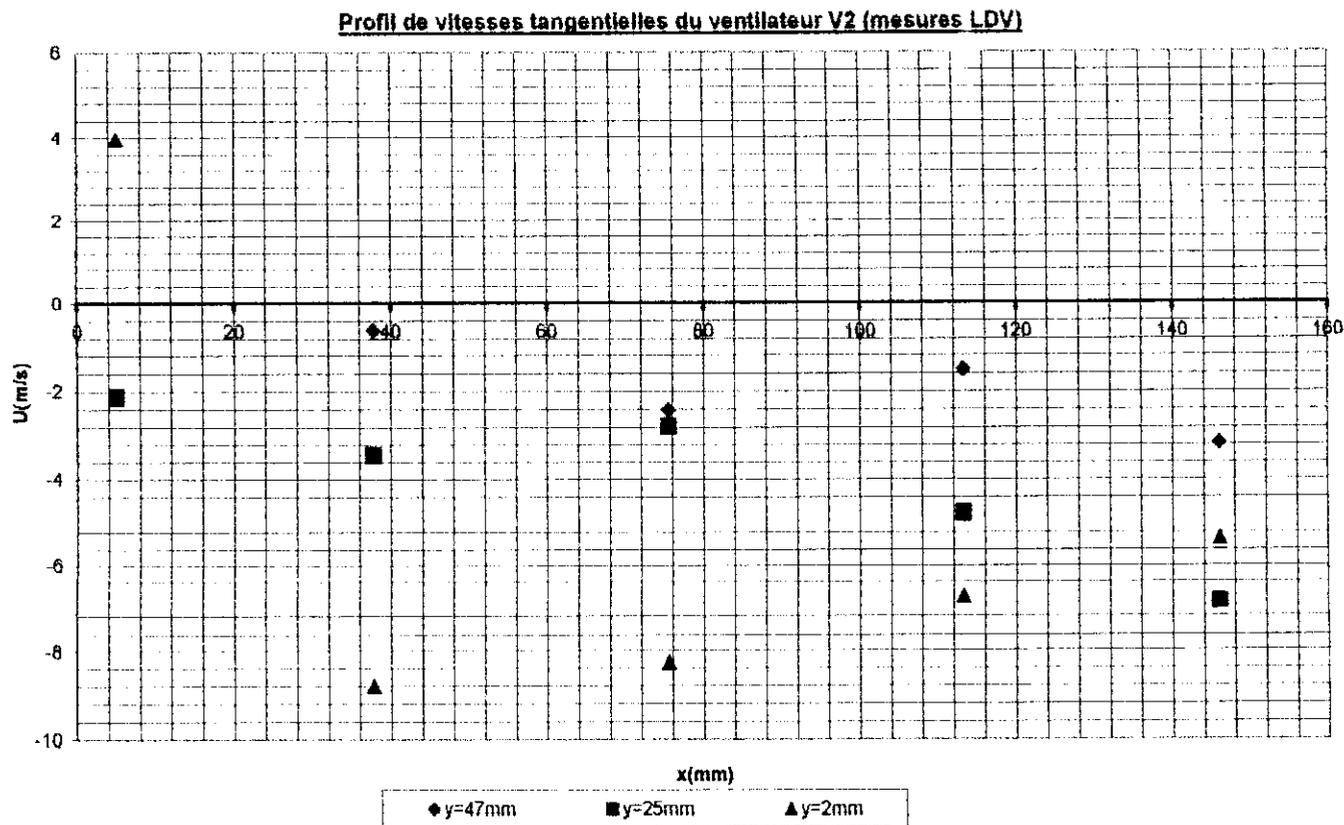


Figure 32. Profil de vitesses tangentielles à la sortie du ventilateur V2

-Comparaison entre les deux ventilateurs :

Les profils obtenus sur le ventilateur V1 sont pratiquement similaires à ceux du ventilateur V2. L'ordre de grandeur de la vitesse est le même, avec une différence n'atteignant pas 1m/s (Tableau 4).

Tableau 4 . Comparaison entre les vitesses normales des deux ventilateurs

x(mm)	Y=2mm		Y=25mm		Y=47mm	
	W2 (m/s)	W1 (m/s)	W2 (m/s)	W1 (m/s)	W2 (m/s)	W1 (m/s)
2	7.31	7.63	7.60	6.71	8.22	7.72
75	7.46	7.69	4.51	4.88	5.60	5.56
147	14.9	14.7	13.7	13.2	12.8	13.6

La Figure 33 montre que les écarts types de chaque mesure de vitesse qu'on notera  $U'$  et  $W'$ , sont très proches sur la partie droite de la sortie du ventilateur. Ils s'éloignent sur la partie gauche.

Des écarts types proches, de composantes de vitesse différentes, indiquent une turbulence isotrope dans cette région de l'écoulement.

La Figure 33 montre également une dispersion des écarts types entre 0.2 et 3m/s, ce qui indique une turbulence non homogène et non isotrope, exceptée au niveau du milieu du ventilateur ( $x=75mm$ ) où les écarts types des deux composantes de vitesse et pour les trois hauteurs, se situent tous entre 1.2 et 1.5m/s. On peut parler alors, dans cette région de l'écoulement, de turbulence homogène et isotrope.

On constate de plus, que les fluctuations turbulentes sont, en moyenne plus élevées pour  $x$  compris entre 0 et 75mm. Globalement, elles sont aussi plus élevées sur la composante de vitesse tangentielle.

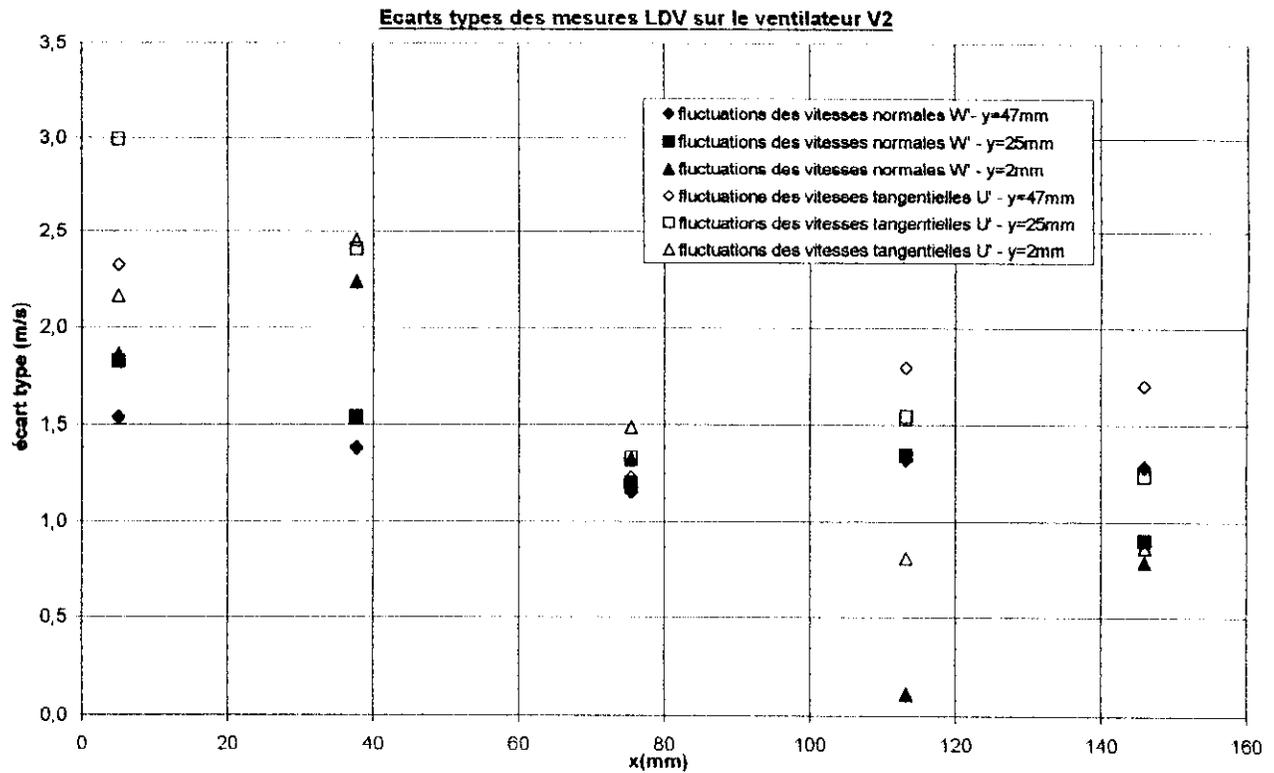


Figure 33. Écarts types des mesures LDV relevées sur le ventilateur V2

Etant donné que les vitesses normales sont plus élevées que les vitesses tangentielles, elles donnent des intensités turbulentes plus faibles, comme l'atteste la Figure 34.

L'intensité turbulente de la composante normale à la sortie du ventilateur est de l'ordre de 25%.

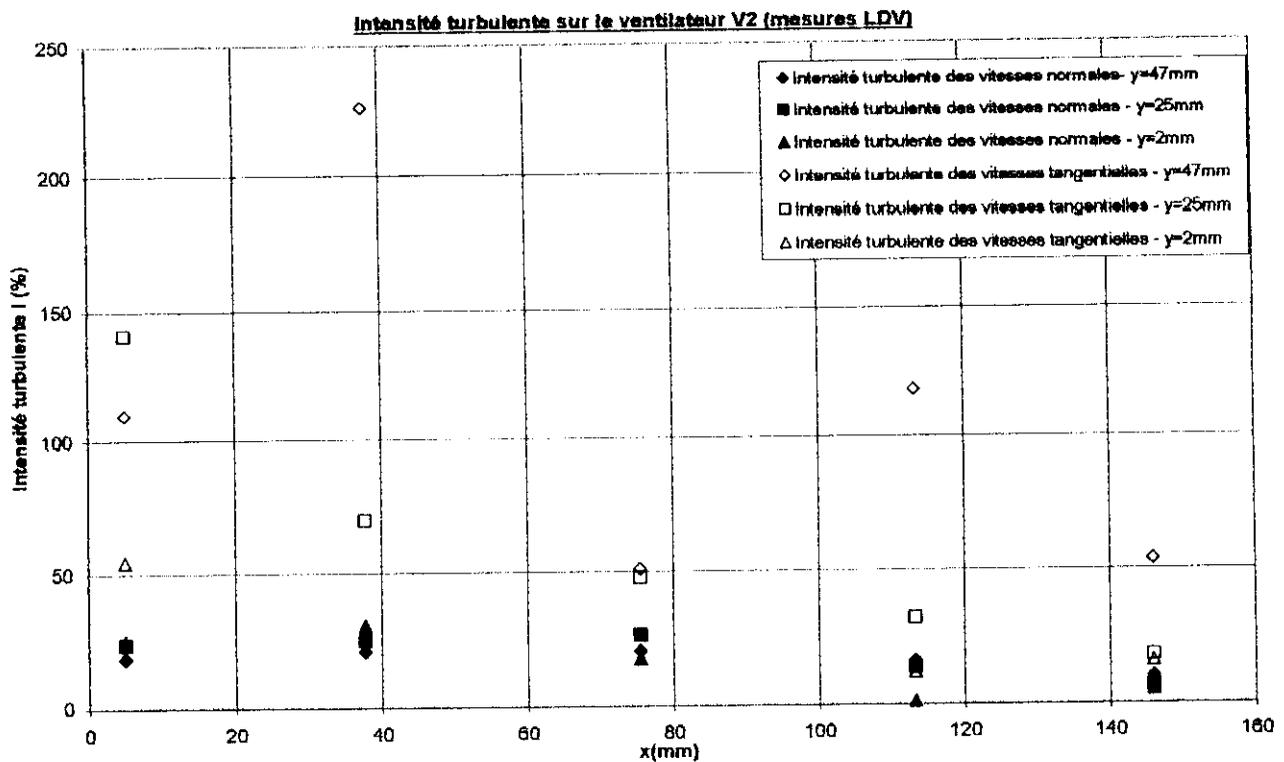


Figure 34. Intensité turbulente relevée sur le ventilateur V2

### Mesures PIV

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.

Les plans PIV verticaux et horizontaux donnent les trois composantes U, V et W des vitesses à la sortie des ventilateurs. A l'instar de la LDV, ils font apparaître que le profil de chacune de ces projections n'est pas uniforme.

Un Laser Nd-YAG est placé du côté latéral de la maquette, (voir **Annexe 14**) et la caméra est placée de sorte à être perpendiculaire au plan de lumière créé, c'est à dire en face des deux ventilateurs.

Pour le calcul du champ de vitesse dans le plan vertical de sortie du ventilateur (O, x, y), la nappe de lumière est disposée verticalement à 1cm de la sortie du ventilateur, donc on voit un champ bidimensionnel composé des vitesses (U,V) (**Figure 28**).

Et pour les composantes dans le plan horizontal (O, x, z), la nappe est disposée horizontalement à mi-hauteur des ventilateurs (soit y=25mm), donc on aura le champ composé des vitesses (U,W).

La disposition de ces plans est représentée par les **figures 35** et **36** :

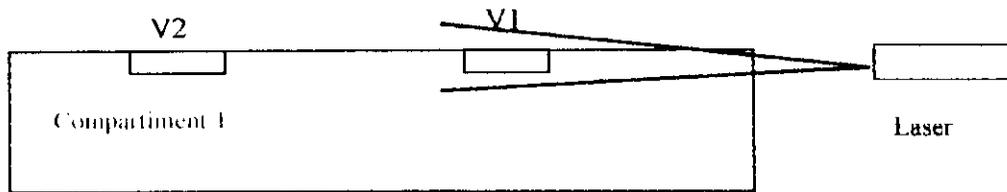


Figure 35. Disposition verticale du plan de lumière

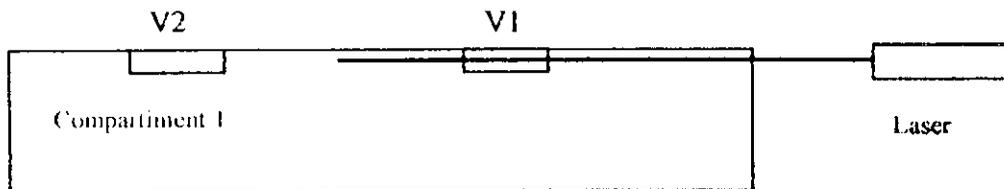


Figure 36. Disposition horizontale du plan lumière.

Remarques :

- Il faut noter que pour la mesure sur le ventilateur V2, la focale du Laser ainsi que sa divergence doivent être modifiées afin d'obtenir le maximum d'éclairement dans la zone de mesure ;
- Le trait noir en gras sur les figures des champs PIV horizontaux représente la sortie du ventilateur. De même, sur les plans verticaux, le rectangle noir, matérialise l'ouverture de sortie du ventilateur (Figures 37 à 52). Les valeurs des coordonnées spatiales x et y représentées sur ces figures ne correspondent pas au repère tel que défini sur la Figure 28, car elles ont été générées automatiquement par le logiciel de traitement ;
- Les vecteurs représentés sur les champs PIV (Figures 37 à 52) sont les vecteurs vitesse.
- La sortie des deux ventilateurs est parallèle à une paroi du compartiment C1 et est située à 20cm de celle-ci. L'air sortant est donc un jet impactant sur paroi plane.

Pour chaque plan, chacune des deux composantes de la vitesse mesurée est représentée, afin d'apprécier leur contribution, ainsi que le module de la vitesse, les lignes de courant, les fluctuations et la vorticité.

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

Le champ de vorticité repr esente le rotationnel du champ de vitesse, tel que :

$$\bar{\omega} = \overline{\text{Rot}(\bar{U})}$$

Cette grandeur joue un rôle important, elle nous décrit les mouvements de rotation locaux du fluide. La valeur calculée par le logiciel pour repr esenter la vorticité n'est qu'une composante du vecteur rotationnel, car la vorticité est calculée à partir d'une information vélocimétrique bidimensionnelle.

**Plans verticaux à la sortie des ventilateurs (figures 37 à 44) :**

Les figures 37, 38 et 40 montrent un écoulement tangentiel à la sortie du ventilateur important, ainsi que de forts gradients de vitesse particulièrement sur la composante horizontale.

La vitesse dépasse en module, les 8m/s (**Figure 37**).

Les vitesses horizontales les plus élevées se situent pour les  $x$  compris entre 100 et 140mm (**Figures 40 et 43**), en prenant comme origine du repère le coin inférieur gauche de la sortie du ventilateur tel que déjà défini plus haut.

La vitesse verticale (toujours dans le plan de sortie du ventilateur) est, quant à elle, uniforme sur la majeure partie du champ (**Figures 39 et 44**). On enregistre cependant, un fort gradient pour  $x$  compris entre 0 et 30mm. En effet, la vitesse verticale dans cette région est positive ascendante pour  $y > 25\text{mm}$  et négative pour  $y < 25\text{mm}$ , variant ainsi, de -1.8 à 4m/s.

En  $x_1 = 0$  mm l'air s'écoule vers le haut et vers le bas (**Figures 38 et 42**). La composante verticale, atteint une valeur maximale de l'ordre de 4 m/s dans la partie supérieure gauche du plan vertical de sortie.

On notera en bas des ventilateurs un écoulement se produisant dans le même sens que le flux d'air sortant avec une vitesse ascendante en bas du ventilateur V2 qu'on ne retrouve pas sous le ventilateur V1 (**Figures 39 et 44**).

Pour l'intensité turbulente (**Figure 41**), on remarque une forte turbulence pour  $10\text{mm} < x < 25\text{mm}$ . Cela est probablement dû à l'impact de l'air sur la paroi latérale du ventilateur. La turbulence diminue par la suite suivant les abscisses croissantes.

Notons cependant, qu'un plan PIV instantané avec un  $\Delta t$  de 10ms (100Hz) ne mesure pas de fluctuations turbulentes pures si le temps caractéristique de ces dernières est largement inférieur à 10ms. On peut donc dire dans ce cas qu'il y a un filtre passe-bas sur la turbulence.

**Remarque importante :**

Le repère représenté sur tous les plans PIV n'est pas le repère exact, il ne donne qu'une échelle de longueur. Il faut se référer aux **figures 28 et 29** pour le repérage exact des mesures de vitesse en sortie des ventilateurs.

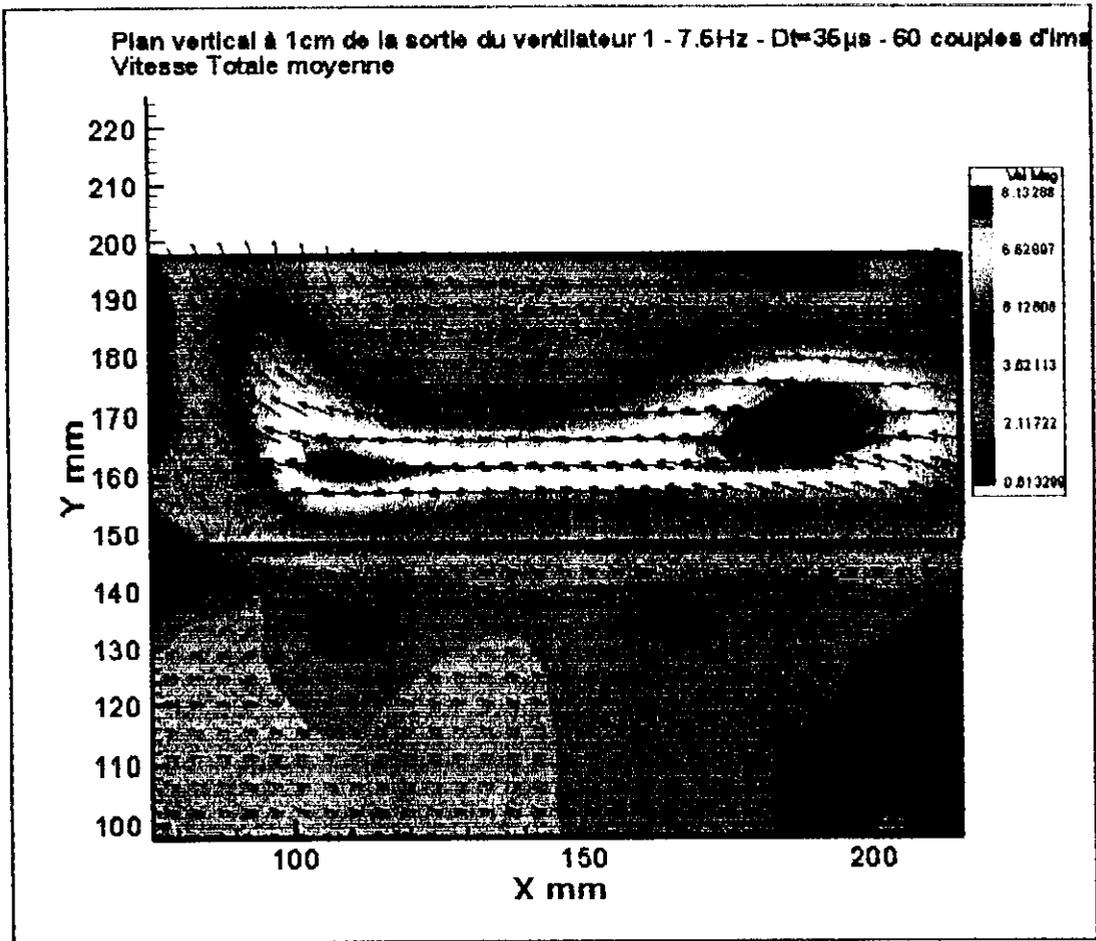


Figure 37. Champ de vitesse et niveaux de module du vecteur vitesse (m/s).

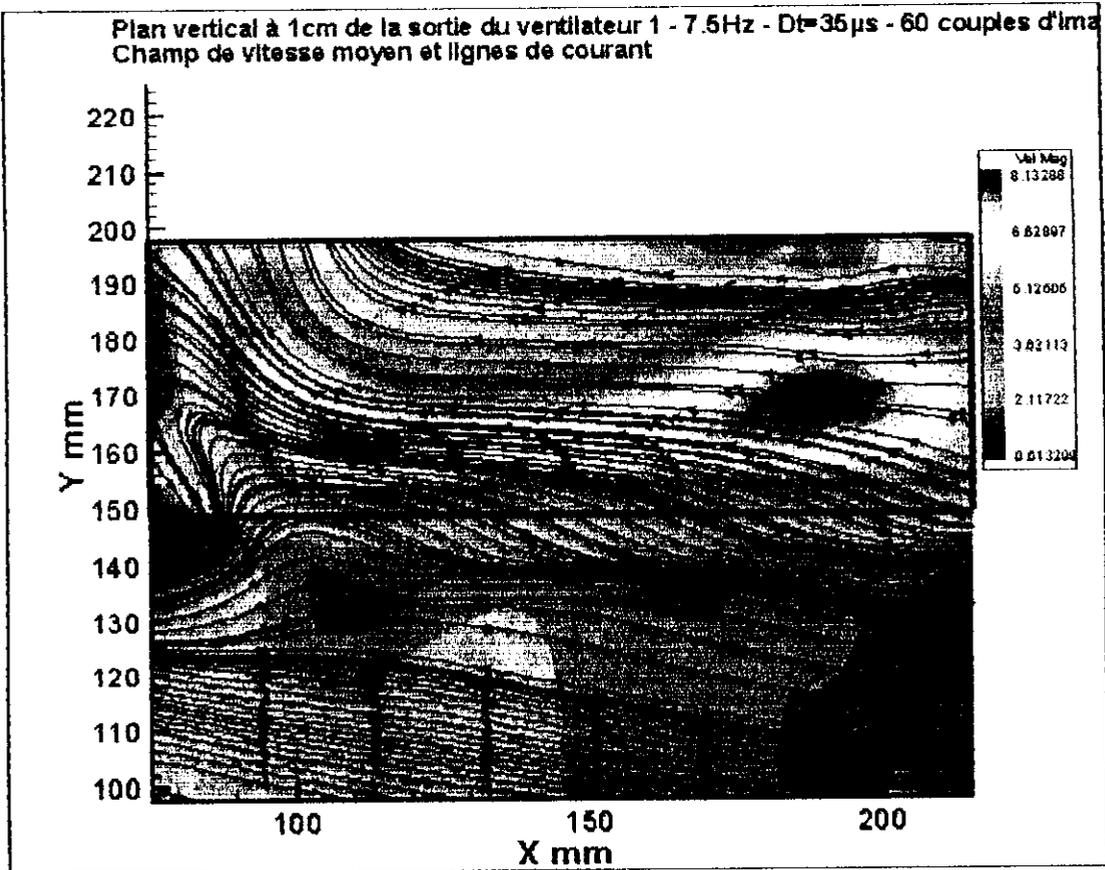


Figure 38. Plan PIV vertical à la sortie du ventilateur V1 (m/s)

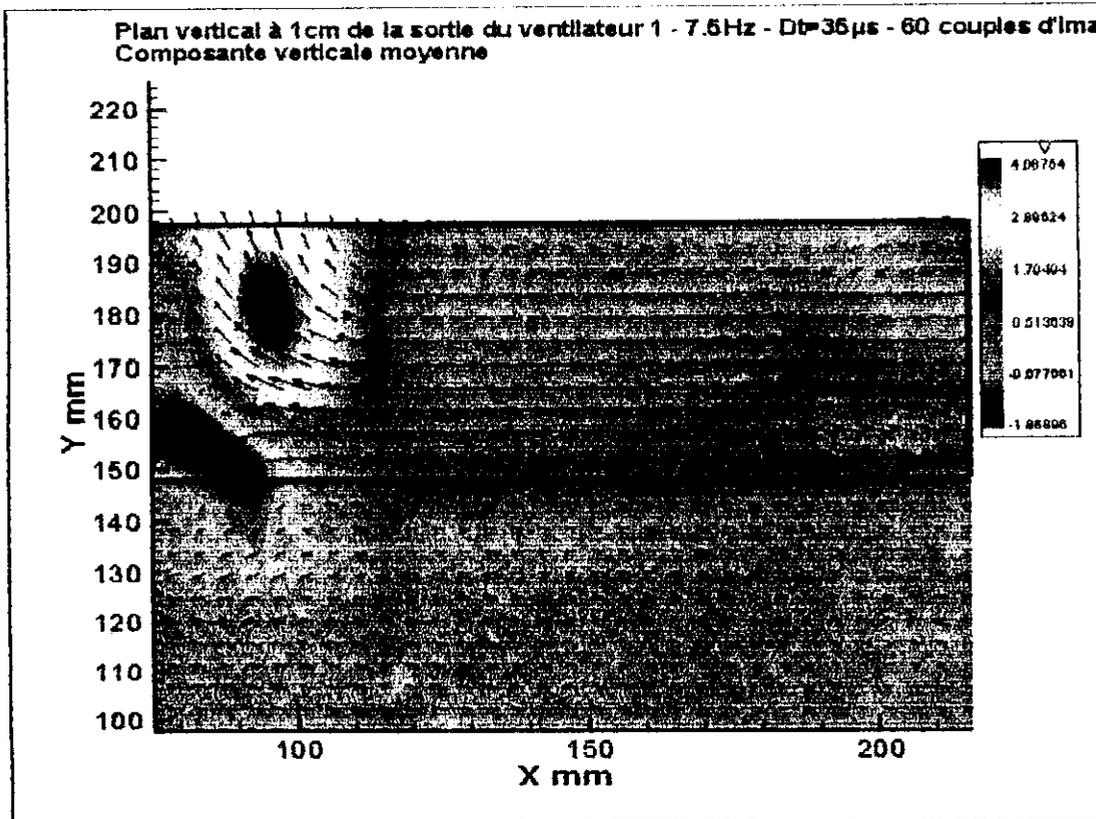


Figure 39. Plan PIV vertical à la sortie du ventilateur V1 (m/s)

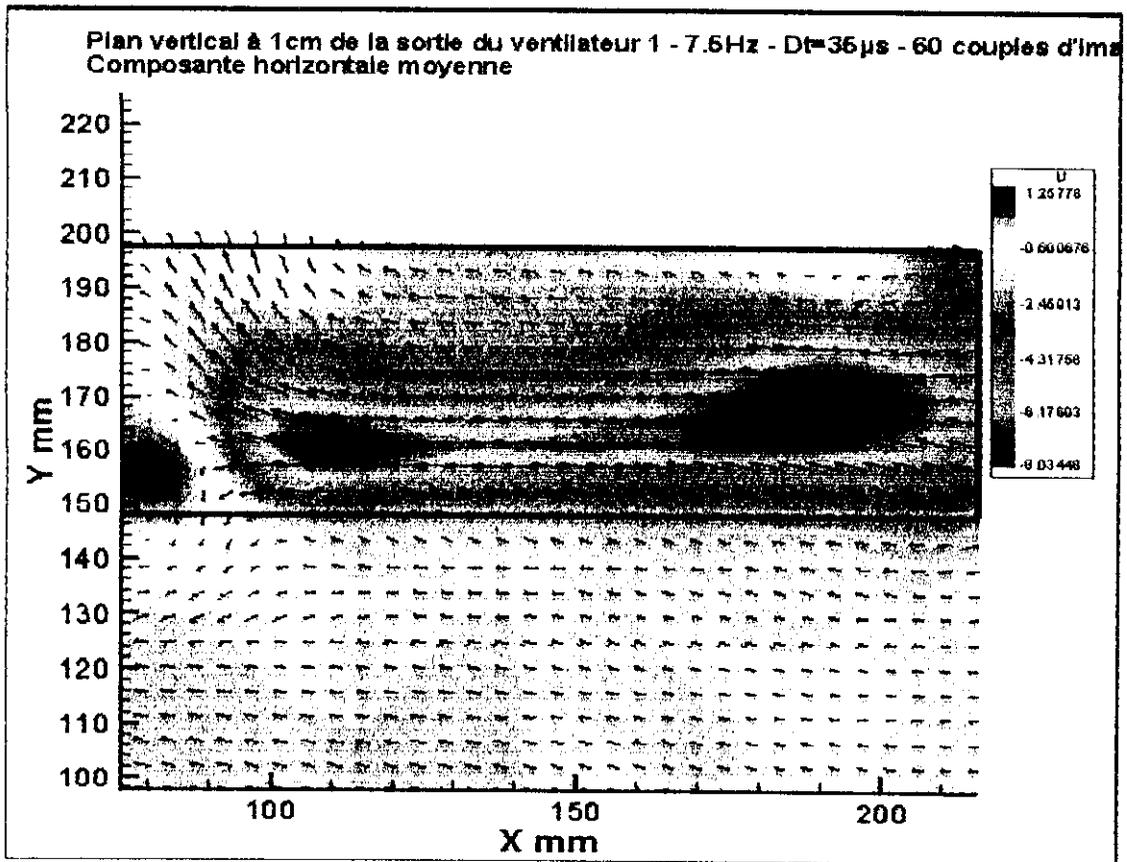


Figure 40. Plan PIV vertical à la sortie du ventilateur V1 (m/s)

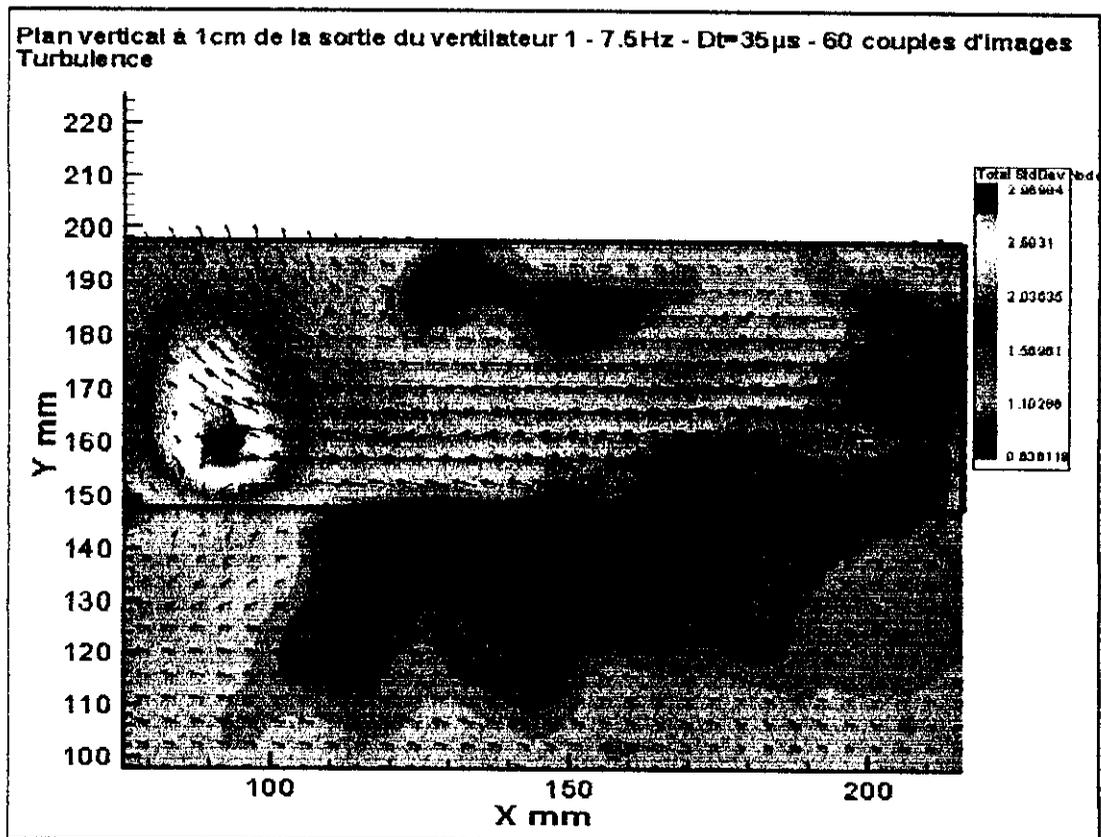


Figure 41. Plan PIV vertical à la sortie du ventilateur V1 (m/s)

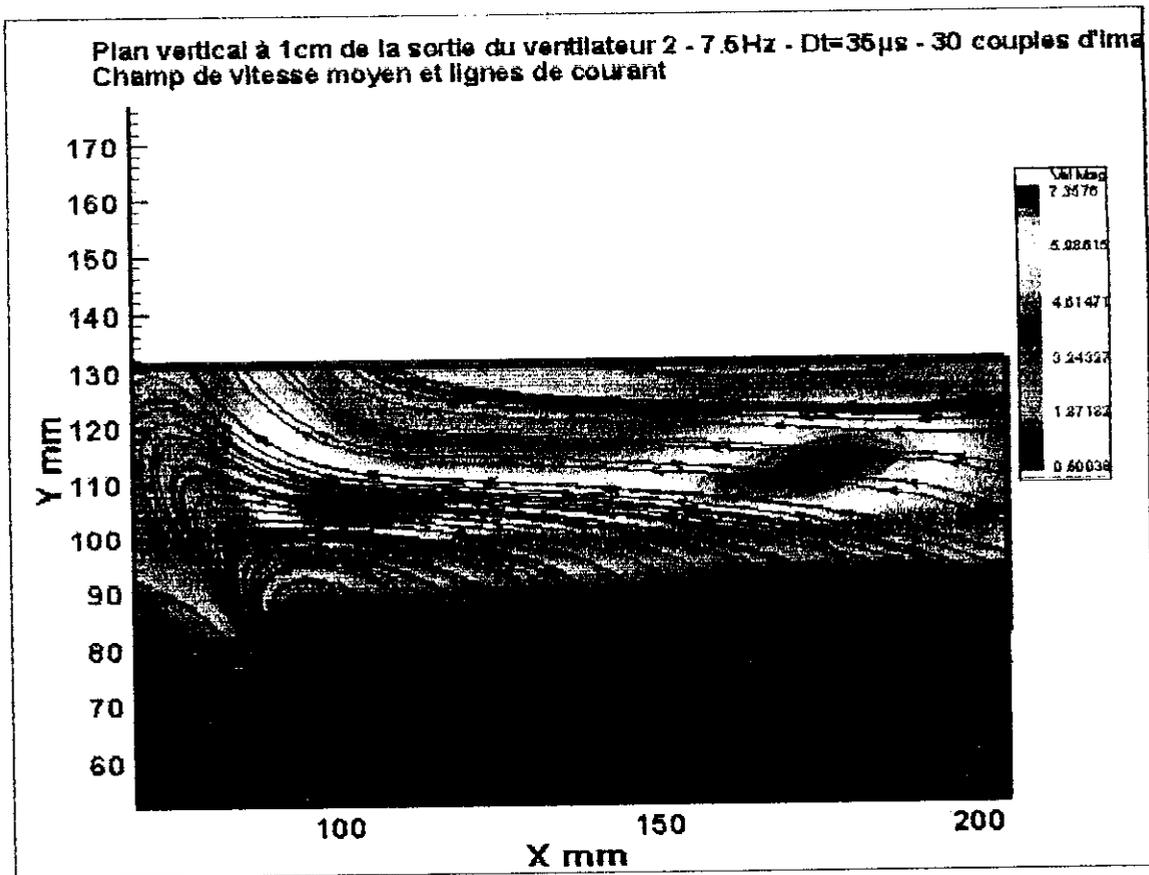


Figure 42. Plan PIV vertical à la sortie du ventilateur V2 (m/s)

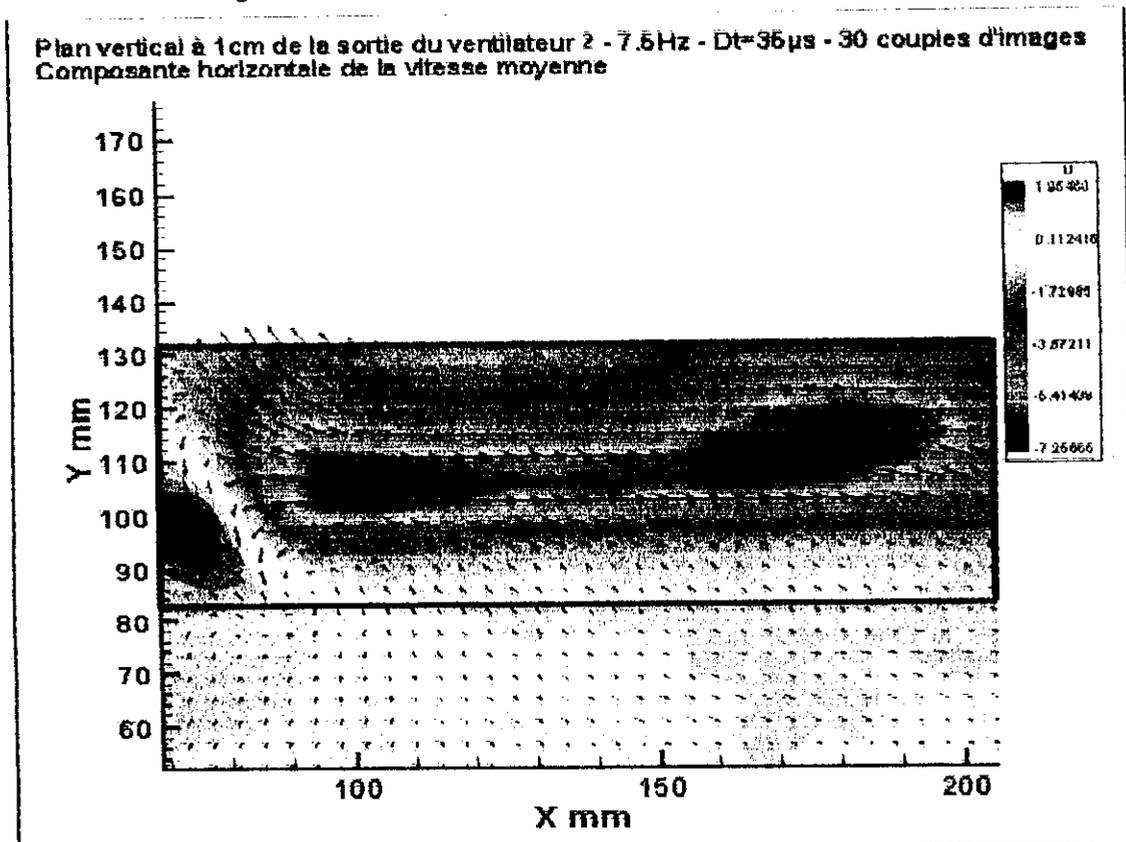


Figure 43. Plan PIV vertical à la sortie du ventilateur V2 (m/s)

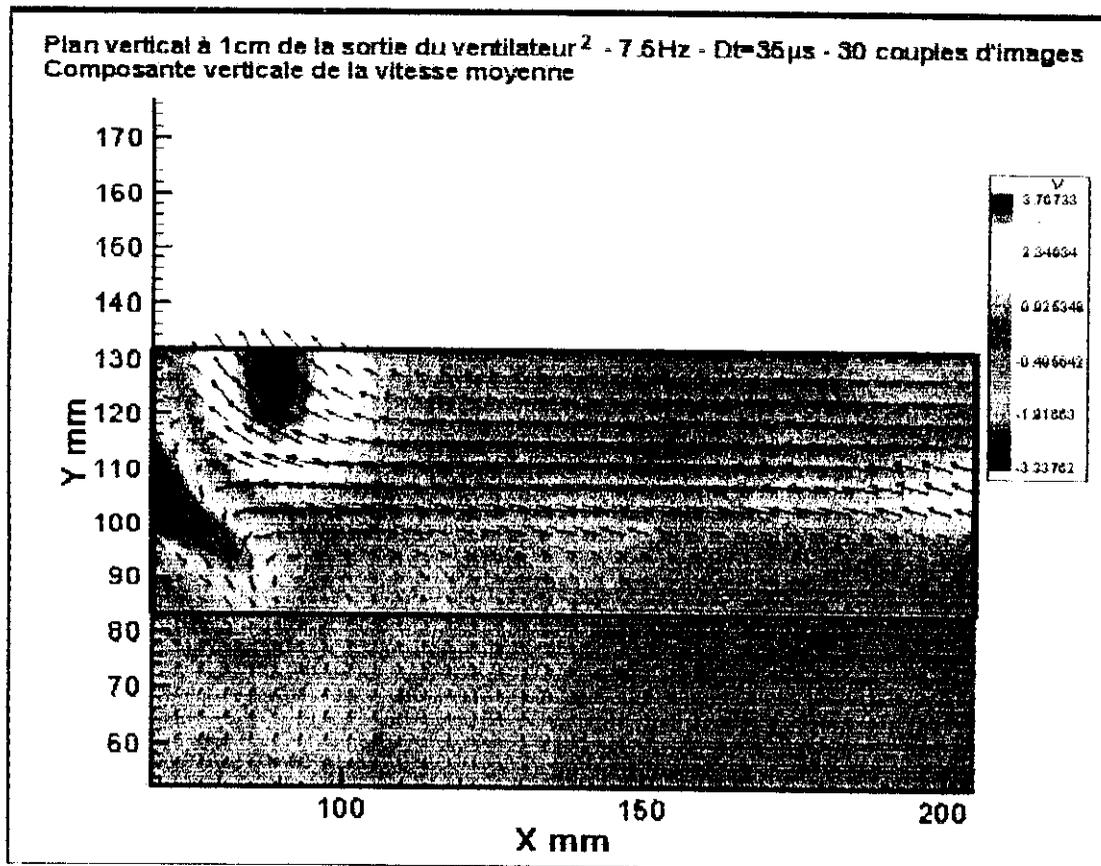


Figure 44. Plan PIV vertical à la sortie du ventilateur V2 (m/s)

#### Plans horizontaux à la sortie des ventilateurs (Figures 45 à 52) :

L'air refoulé du ventilateur V1 se dirige vers le ventilateur V2, ce qui induit un mouvement plus turbulent au niveau de ce dernier, cependant, ces turbulences n'influent pas beaucoup puisque les mêmes caractéristiques de mouvement sont présentes au niveau des deux ventilateurs.

La composante de vitesse normale à la sortie du ventilateur (Figures 46 et 51) atteint un maximum de 14m/s, tandis que la composante tangentielle à la sortie ne dépasse pas 10m/s (Figures 47 et 52).

Les vitesses normales et tangentielles sont les plus intenses entre  $x=120\text{mm}$  et  $x=151\text{mm}$ .

Le module de la vitesse, dépasse, dans ce plan, les 17m/s (Figures 45 et 50).

Le profil de vitesse normale à la sortie du ventilateur n'est pas uniforme. Les vitesses sont bien plus élevées pour les  $x$  supérieures à 76mm.

Le gradient de vitesse ainsi créé peut être source de turbulence et de vorticité comme le montrent les champs de ces grandeurs produits par la PIV (Figures 48 et 49).

A travers la disposition des lignes de courant, on constate que le mouvement de refoulement des deux ventilateurs est similaire (Figures 45 et 50) Il présente les mêmes caractéristiques, et les mêmes ordres de grandeur de vitesses. Le ventilateur V1 présente néanmoins, une vitesse horizontale normale à sa sortie supérieure à celle du ventilateur V2.

Sur les deux bords de la sortie du ventilateur, on remarque deux régions de vorticité élevée. Le rotationnel  $\gamma$  est positif pour l'une et négatif pour l'autre. Ce sont deux allées

tourbillonnaire tournant en sens inverse (Figure 48). Elles sont générées par une instabilité de couches de mélange entre l'air sortant du ventilateur à grande vitesse et l'air environnant plus lent.

Tout comme sur les plans verticaux, on aperçoit sur les plans horizontaux des turbulences aux extrémités de la sortie du ventilateur (Figure 49).

Il est à noter qu'une partie du flux d'air rejeté par le ventilateur est ré-aspiré.

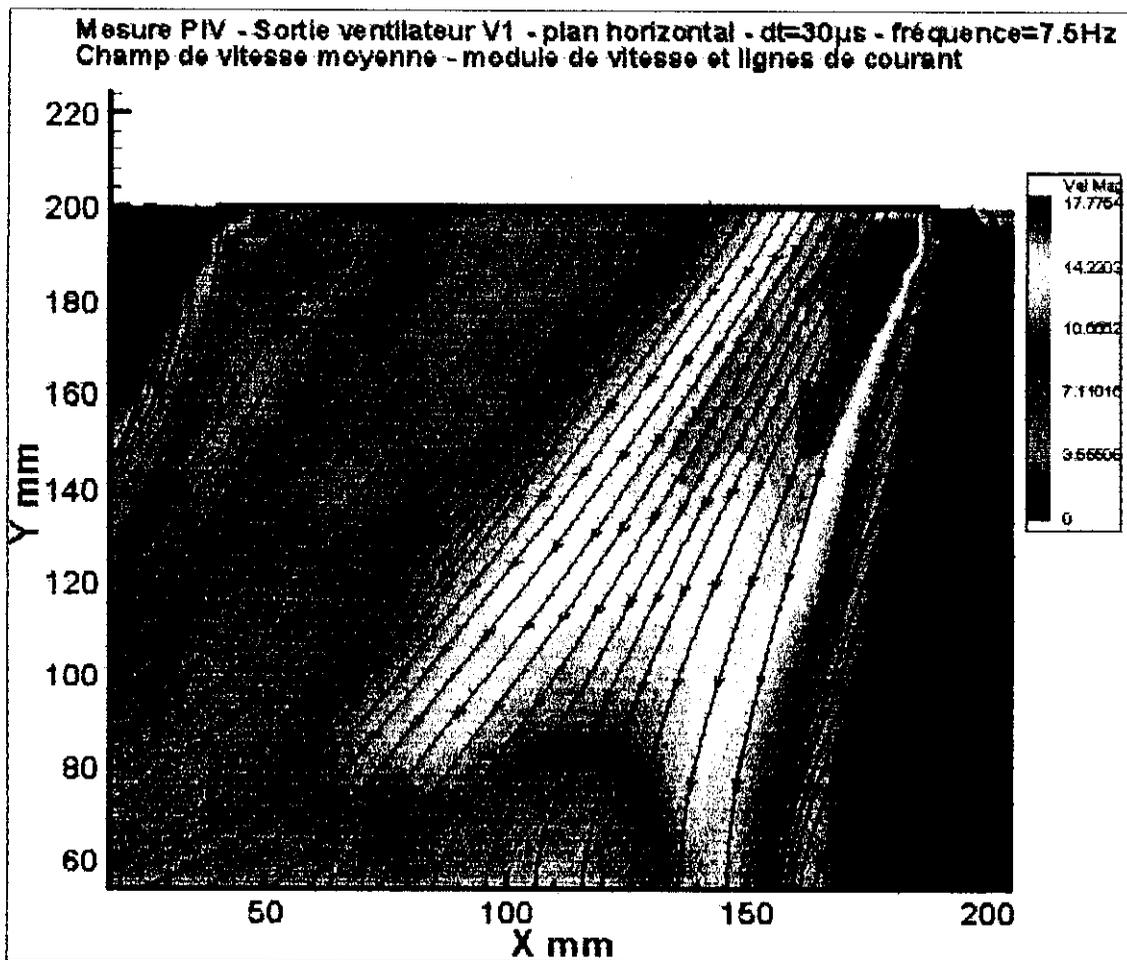


Figure 45. Plan PIV horizontal à la sortie du ventilateur V1 (m/s)

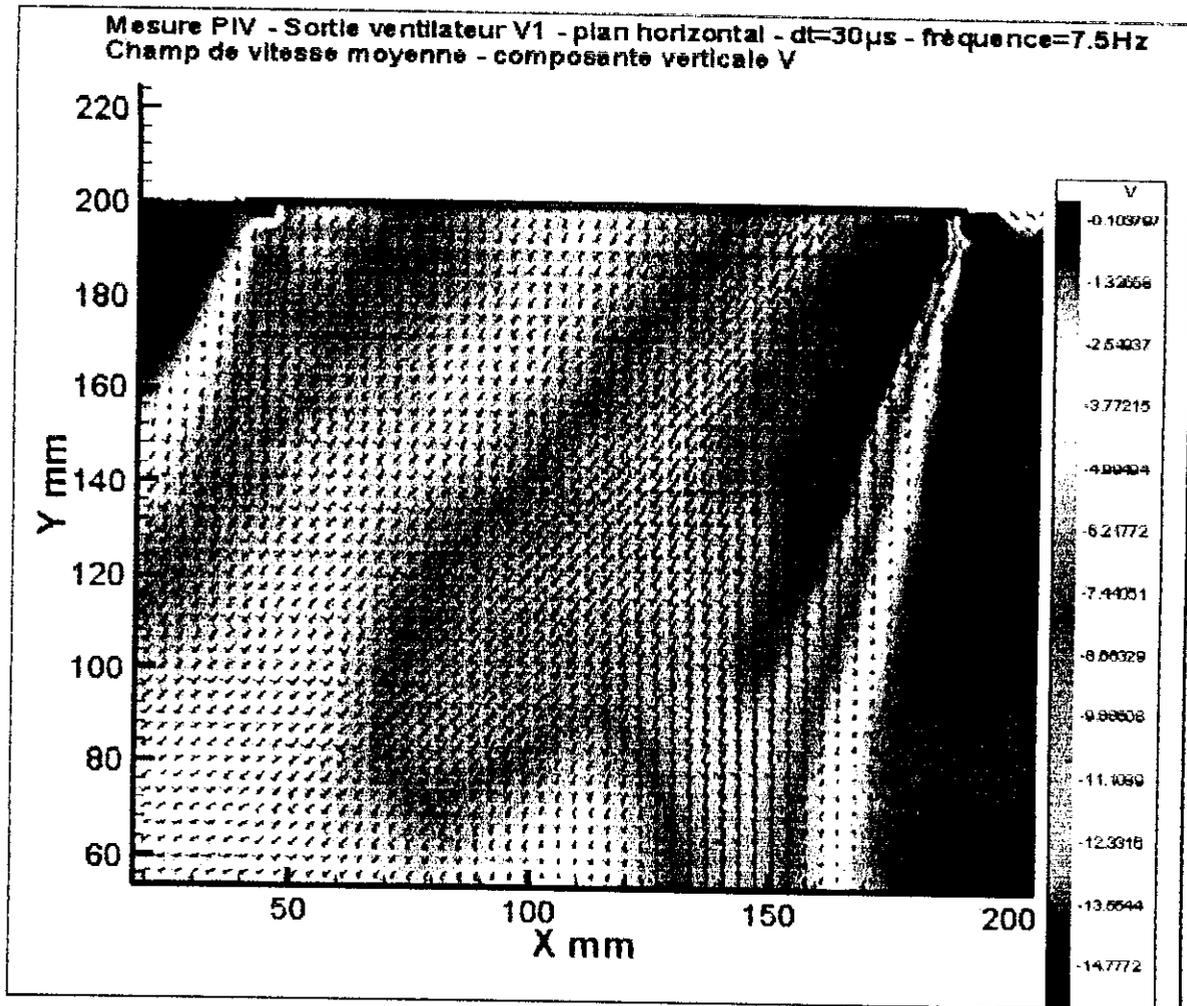


Figure 46. Plan PIV horizontal à la sortie du ventilateur V1 (m/s)

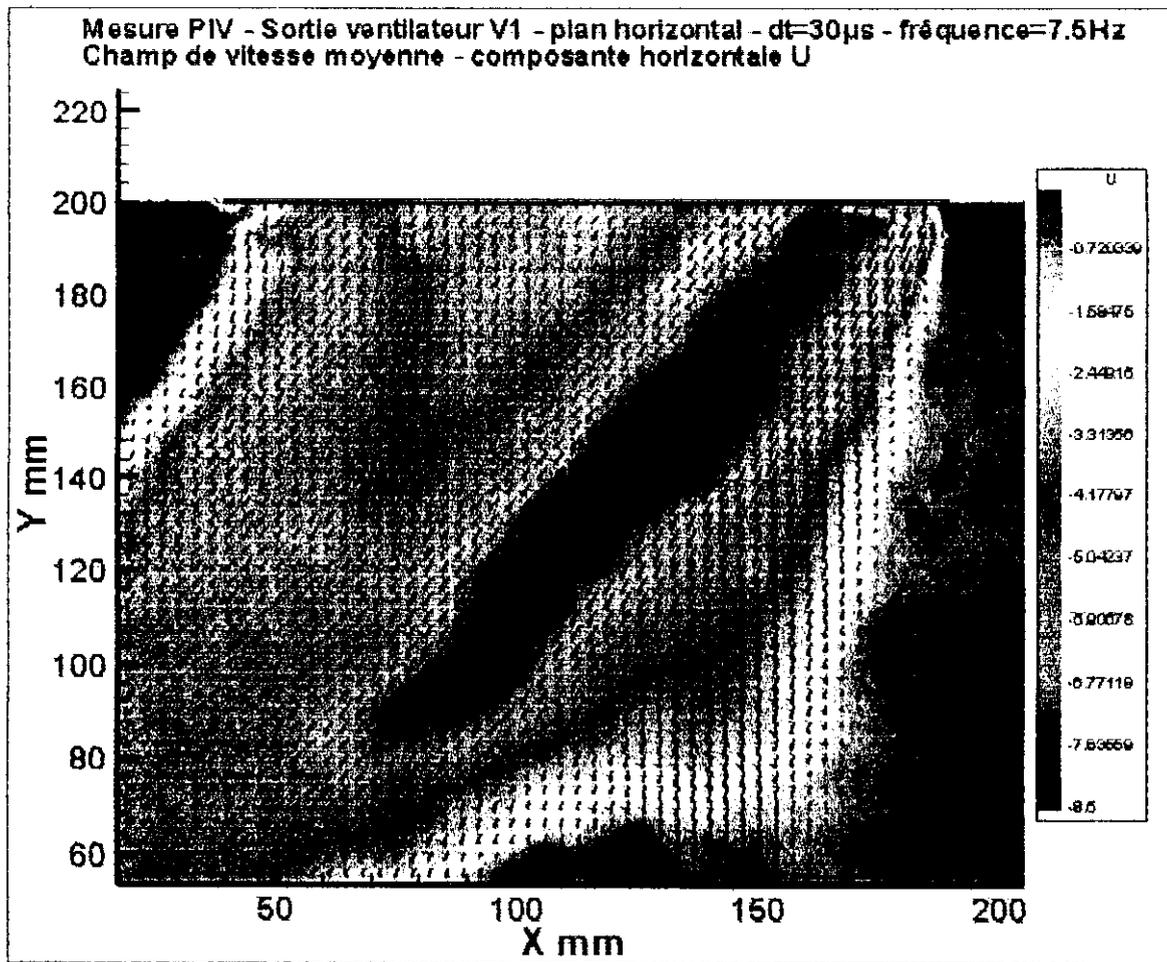


Figure 47. Plan PIV horizontal à la sortie du ventilateur V1 (m/s)

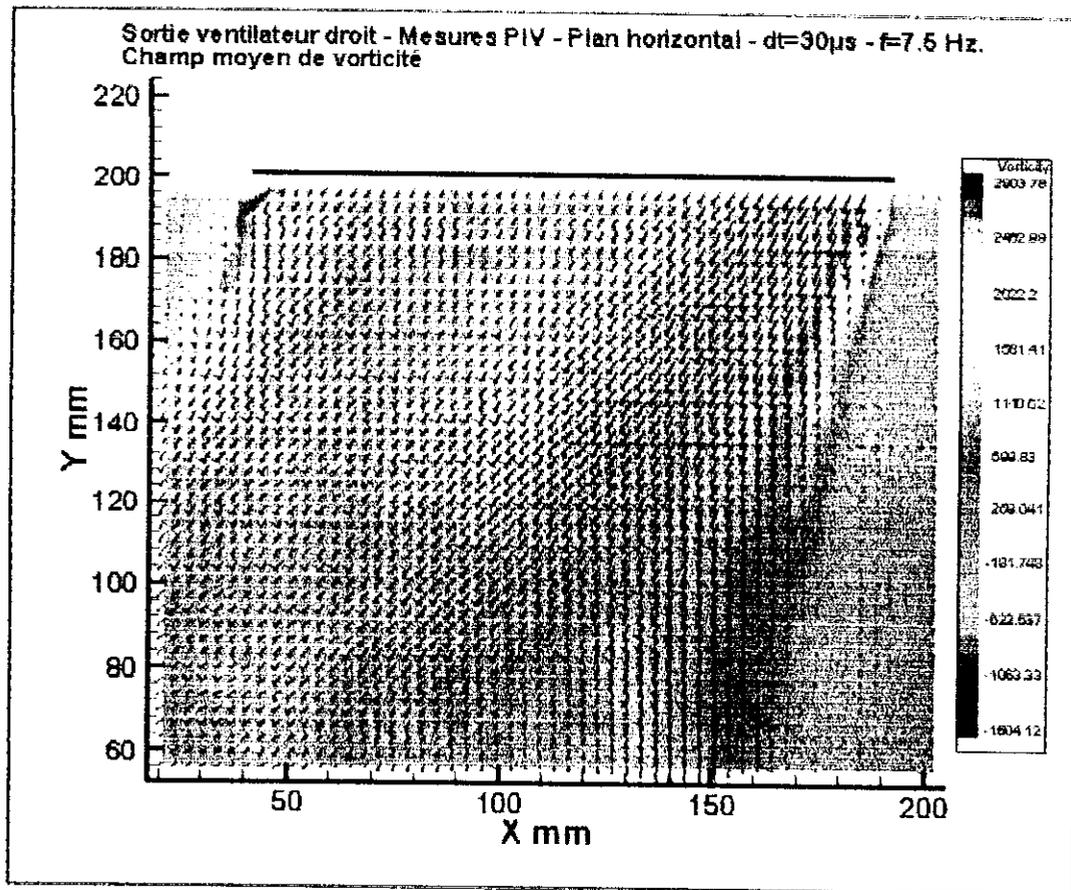


Figure 48. Plan PIV horizontal à la sortie du ventilateur V1 (m/s)

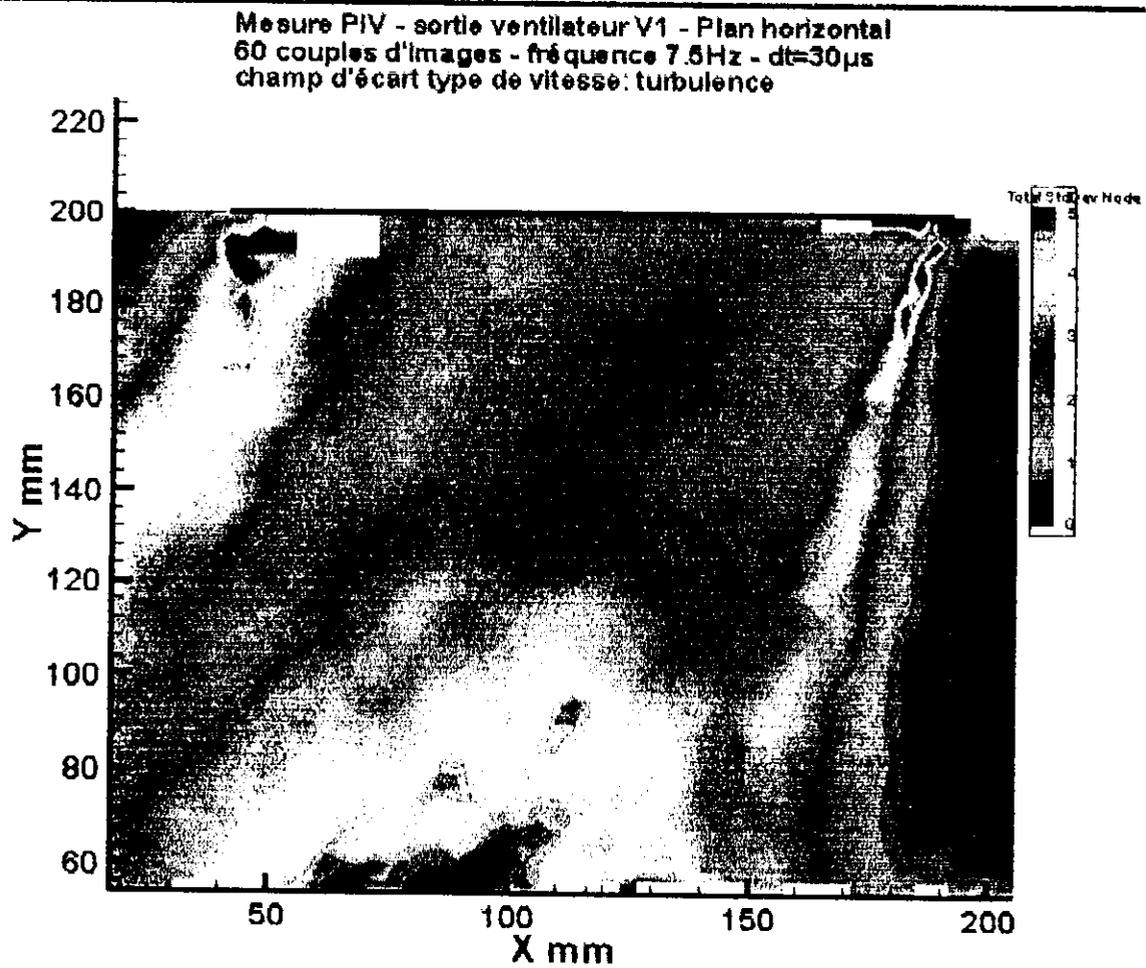


Figure 49. Plan PIV horizontal à la sortie du ventilateur V1 (m/s)

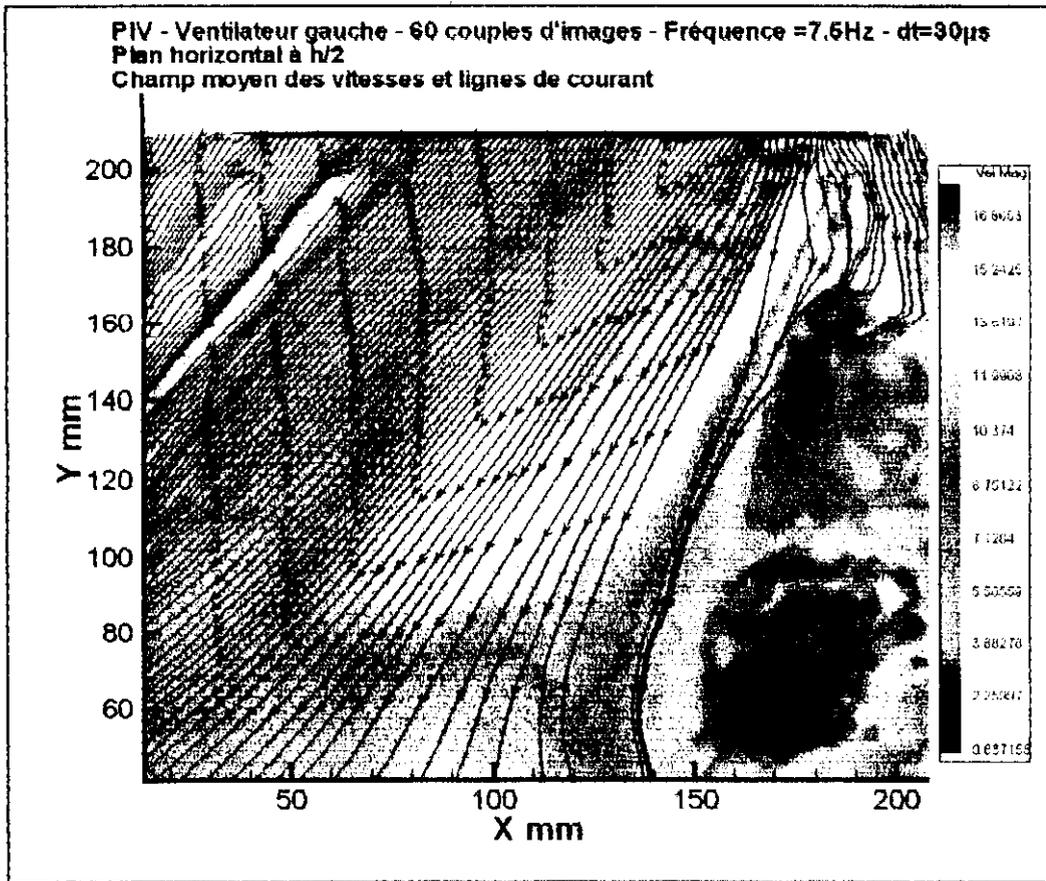


Figure 50. Plan PIV horizontal à la sortie du ventilateur V2 (m/s)

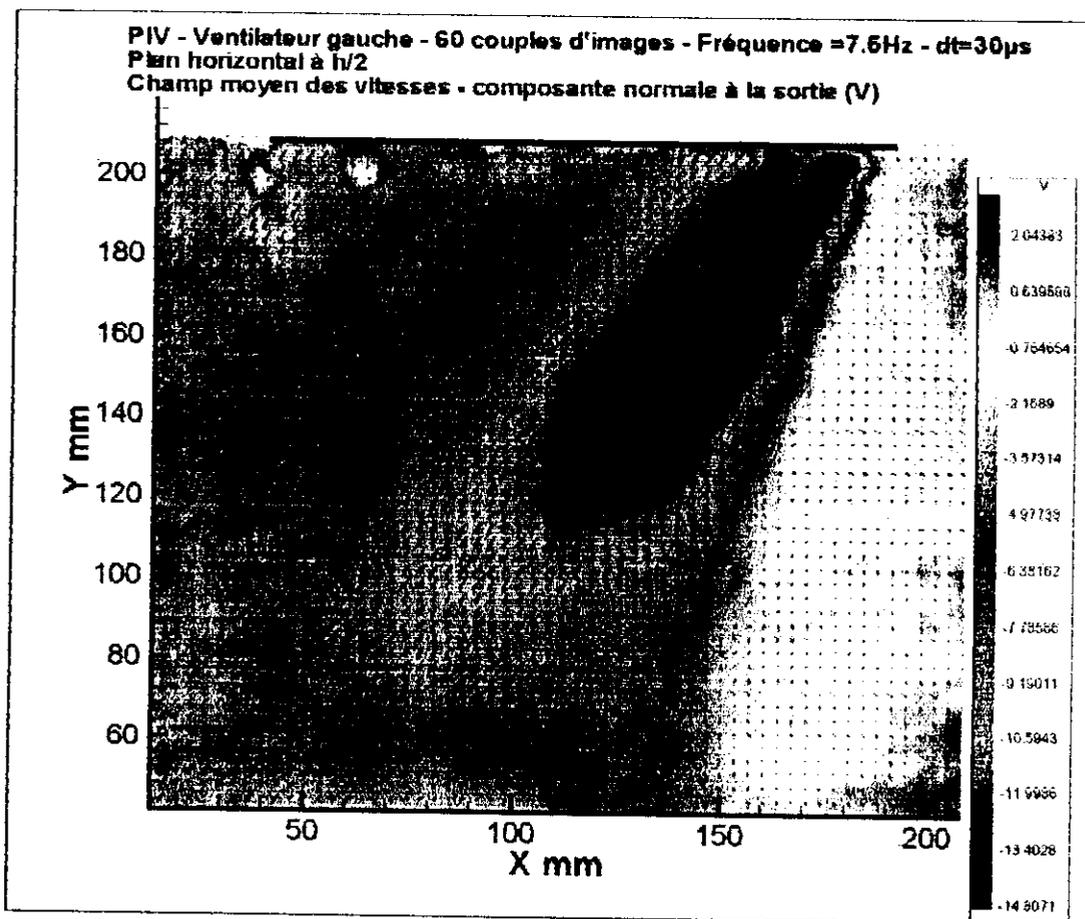


Figure 51. Plan PIV horizontal à la sortie du ventilateur V2 (m/s)

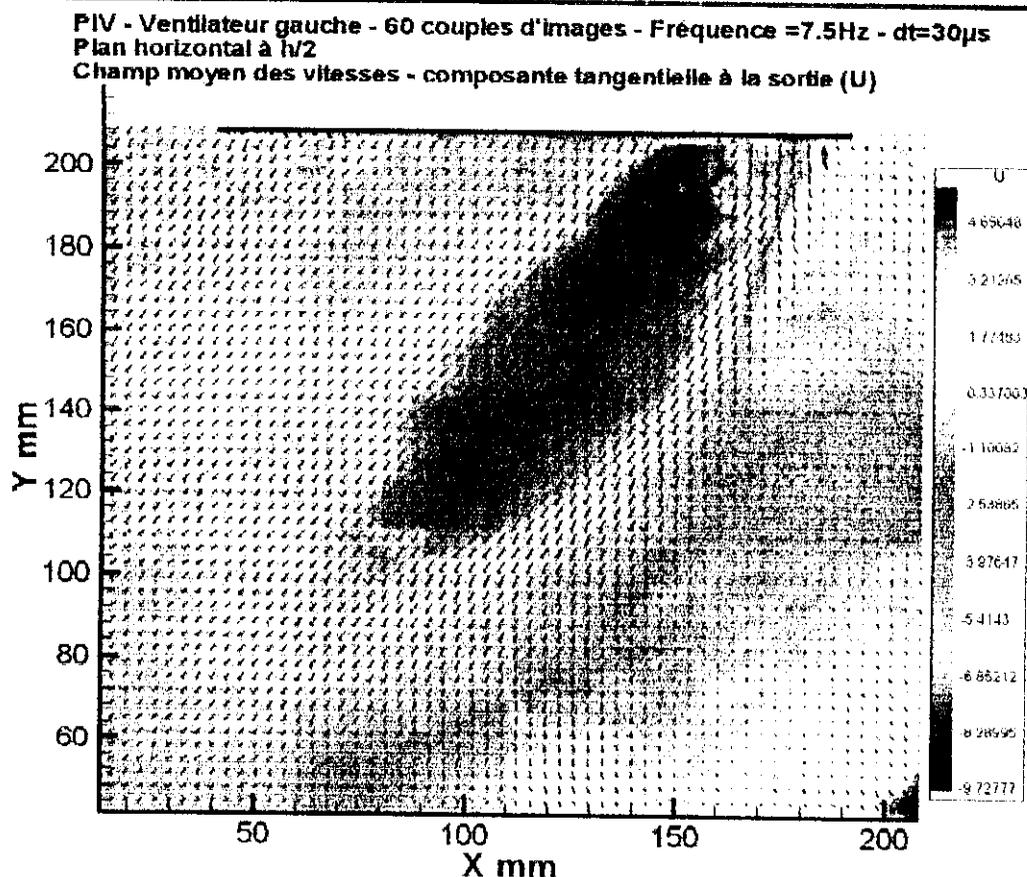


Figure 52. Plan PIV horizontal à la sortie du ventilateur V2 (m/s)

Les mesures de vitesse tangentielle apportent une information décisive sur le flux d'air sortant du ventilateur : ce flux est incliné horizontalement.

Les résultats de la LDV sont largement corroborés par les plans horizontaux de PIV où l'on peut même estimer que l'angle d'inclinaison du flux par rapport à un axe perpendiculaire à la sortie du ventilateur se situe entre 25 et 45° (selon la position du vecteur vitesse).

#### Comparaison des mesures LDV et PIV sur les ventilateurs

Les profils des vitesses normales des deux séries de mesures (LDV et PIV) sont quasiment superposés (Figure 53). Cependant, on note des écarts importants pour les vitesses tangentielles (Figure 54).

La différence est principalement présente sur les bords. Cela peut être dû aux réflexions de la lumière, qui faussent la mesure PIV.

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

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 fréquence des mesures ne dépasse pas 7.5Hz. Sachant que nous observons un écoulement très turbulent (fluctuations de vitesses importantes), il est normal de constater des différences de mesure.

Il faut noter que le plan laser vertical est éloigné de 1cm par rapport au plan vertical de sortie, cela implique que la caméra enregistre la position des particules présentes à 1 cm de la sortie des ventilateurs.

Les parois d'aluminium ont la fâcheuse tendance à réfléchir la lumière du laser, ce qui crée des zones très lumineuses qui éblouissent la caméra et l'empêchent de détecter le déplacement des particules. De plus, il y a des particules qui paraissent que dans un seul cliché, à cause de leur déplacement en dehors du deuxième plan Laser. (C'est à dire qu'elles ne restent pas dans le plan au moment du deuxième enregistrement)

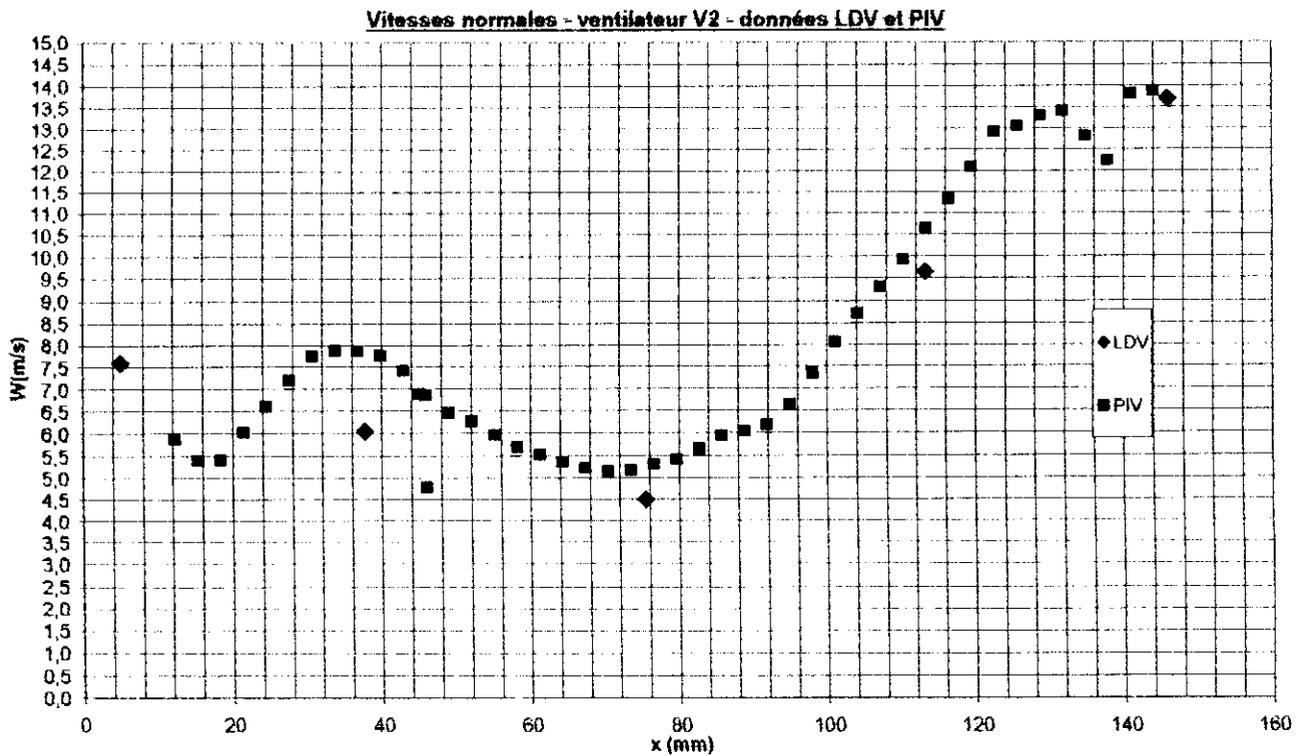


Figure 53. Vitesses normales à la sortie du ventilateur V2 mesurées par PIV et LDV

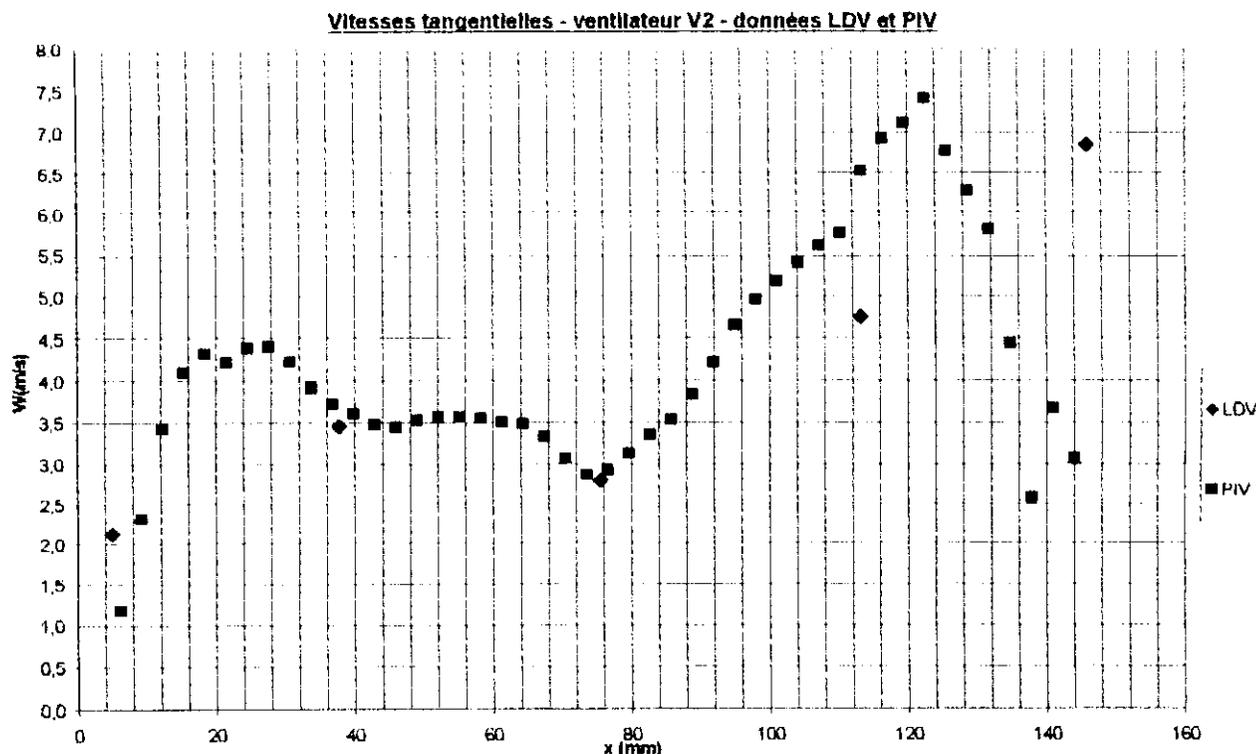


Figure 54. Vitesses tangentielles à la sortie du ventilateur V2 mesurées par PIV et LDV

Calcul du débit :

Le débit de chacun des deux ventilateurs a été calculé à partir des mesures LDV et PIV par interpolation et intégration grâce à un programme TI Basic (voir Annexe 3). Les débits obtenus sont proches de celui du fournisseur (Tableau 5).

Tableau 5. Débits des ventilateurs

	Ventilateur V1 (Droite) 49.5*151 = 7474.5cm <sup>2</sup>		Ventilateur V2 (Gauche) 49.5*151 = 7474.5mm <sup>2</sup>	
	Débit	Vitesse débitante (m/s)	Débit	Vitesse débitante (m/s)
PIV	224	8.3188	214	7.94
LDV	*	*	221.521	8.23
Données du constructeur	209	7.767	209	7.77

**5.1.2.2. Ecoulement au niveau des fenêtres de communication**

La deuxième campagne de mesures entreprise a concerné les fenêtres de communication entre les trois compartiments.

Il est intéressant de souligner que les ouvertures sont « aérodynamiquement » perçues par les flux d'air les traversant comme des rétrécissements puis élargissements brusques (synonymes de pertes de charge singulières).

### 5.1.2.2.1. Écoulement au niveau de l'ouverture F1

#### Mesures LDV

Nous utiliserons sur cette ouverture le même repère utilisé sur les ventilateurs, translaté au coin inférieur de cette ouverture.

Il a été procédé à deux montages : volume de mesure dans la chambre C1, et dans la chambre C2.

-Premier montage (**Figure 55**) : croisement des faisceaux dans la chambre C1. C'est la mesure la plus intéressante car la plus proche de l'ouverture F1. Trois hauteurs de mesure ont été réalisées.

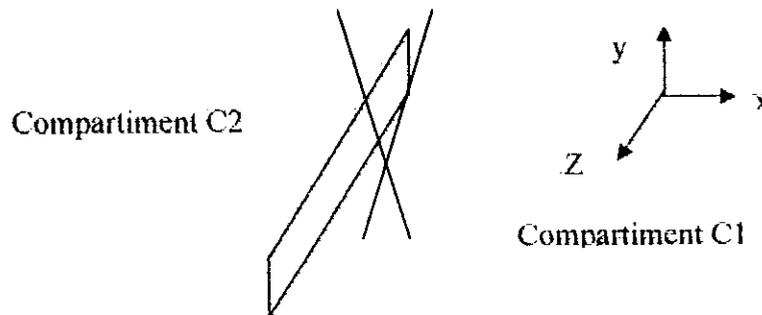


Figure 55. Schéma de l'ouverture F1, du repère associé et du croisement des faisceaux laser

-Deuxième montage (**Figure 56**) : croisement des faisceaux dans la chambre C2. La mesure s'est effectuée à mi-hauteur de l'ouverture uniquement.

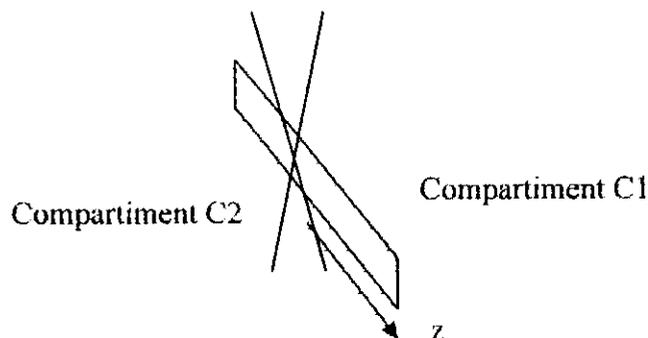


Figure 56. Croisement de faisceaux laser (LDV)

Les mesures dans ce dernier cas sont situées loin de l'ouverture F1 (3cm). Elles ne décrivent pas, par conséquent, l'écoulement dans l'ouverture.

U, V, W sont les composante de la vitesse par rapport au repère de l'ouverture F1 (o, x, y, z)

L'ouverture F1 a la particularité d'être proche du ventilateur V2 et d'avoir son bord supérieur au niveau de la sortie de ce même ventilateur. Elle est donc sous l'influence directe de ce dernier.

#### Résultats :

Les mesures LDV effectuées dans le compartiment C1 indiquent une inversion du signe de la vitesse (**Figures 58, 59, 60**). Cette inversion n'est pas mesurée dans le

compartiment C2 à 3cm de l'ouverture (**Figure 62**). La vitesse reste positive dirigée du compartiment C2 vers C1.

Les commentaires qui vont suivre ne concernent que la mesure dans le compartiment C1.

Après avoir constaté l'inversion du signe de la vitesse près de l'ouverture F1 (dans le compartiment C1), les premières mesures réalisées (**Figure 58**) ont été refaites avec un nombre de points de mesure plus important. Les valeurs des vitesses normales des **Figures 59, 60 et 61** ont alors été obtenues.

On remarque que l'écoulement de l'air se fait dans deux sens au niveau de l'ouverture (**Figure 58**).

La partie des vitesses négatives correspond au fluide sortant du compartiment C1 vers C2, et la partie positive représente le fluide rentrant dans le compartiment C1. L'inversion de la vitesse se produit à  $z = 168$  mm pour la mesure sur une seule hauteur (au milieu) (**Figure 59**).

L'écoulement qui se produit au niveau de cette ouverture, est aussi bien provoqué par le soufflage que par l'aspiration du ventilateur. Le soufflage du ventilateur en direction de l'ouverture F1 engendre un flux qui, après avoir impacté sur la paroi, passe à travers la première partie de cette ouverture de façon oblique vers le compartiment C2. Tandis que sur la deuxième portion de l'ouverture, un flux en sens inverse se produit.

L'air refoulé par le ventilateur V2 est donc dévié par la paroi et se dirige vers l'ouverture F1. Ce flux se divise en deux parties au niveau de l'ouverture : La première partie pénètre dans le compartiment C2, et continue son mouvement, et l'autre reste dans le compartiment C1 pour être entraînée par le flux d'aspiration.

Les profils obtenus pour les 3 hauteurs présentent la même allure, avec le même ordre de grandeur des vitesses (**Figure 59**).

La vitesse normale à l'ouverture F1 est maximale en valeur absolue sur l'écoulement sortant de C1, qui atteint une valeur entre -1.9 m/s et -2.5 m/s et diminue pour s'annuler au point d'inversion pour re-augmenter et atteindre une valeur entre 0.6 m/s et 1.3 m/s.

L'intensité turbulente au niveau de l'ouverture F1 (**Figure 66**) est élevée et dépasse souvent les 100% de fluctuation. Un examen plus attentif des résultats nous indique que l'écart type des mesures de vitesse est conservé entre les ventilateurs et l'ouverture F1 (**Figure 64**). Cela s'explique en partie par le fait que le ventilateur V2 souffle en direction de l'ouverture F1, mais le jet sortant impacte sur la paroi avant de provoquer un écoulement longitudinal sur cette ouverture, de sorte que l'énergie cinétique initiale diminue fortement puisque la vitesse est réduite d'un facteur de 6, mais l'énergie cinétique turbulente est conservée. Ainsi l'intensité turbulente est élevée. D'autre part, la composante de vitesse normale à l'ouverture F1 - qui a été mesurée - n'est pas la composante principale, il est donc normal que l'intensité turbulente soit élevée pour cette vitesse.

La **Figure 64** représentant les écarts types des vitesses normales à l'ouverture F1 mesurées par LDV, montre une turbulence homogène. Les fluctuations sont du même ordre tout le long de l'ouverture.

La **Figure 67** représente les mesures LDV réalisées en un seul point de l'ouverture F1 ( $x=326\text{mm}$ ). Il a été calculé deux moyennes mobiles de ces points, une première avec une période de 10 et une deuxième avec une période de 100, afin de tenter de retrouver des fluctuations périodiques. Néanmoins, nous ne pouvons percevoir de phénomènes périodiques. Les fluctuations semblent être chaotiques.

Le montage évoqué précédemment a permis de déterminer le profil de vitesse normale à l'ouverture F1, mais à une distance de 1cm de celle-ci. Les visualisations de l'écoulement à ce niveau de la maquette ont mis en évidence que l'inversion du signe de la vitesse normale se produisait non pas au sein d'un écoulement cisailé entre deux flux d'air, mais plutôt lors de la déviation d'un flux dont la composante tangentielle à l'ouverture F1 est prépondérante. Ce flux est généré par le jet sortant du ventilateur V2 et impactant sur la paroi.

Placer le volume de mesure à 1cm de l'ouverture F1 (à cause de la présence d'une cornière qui nous empêche de placer le volume de mesure plus près) pose donc la problème de savoir si les particules enregistrées au voisinage de l'inversion comme se déplaçant du compartiment C1 vers le compartiment C2 n'allaient pas en aval de ce point de mesure changer de direction, pour au final rester dans le compartiment C1. Ce qui surestimerait le débit sortant du compartiment C1 vers le compartiment C2.

Nous avons donc jugé intéressant de réaliser des mesures de vitesse à l'intérieur même de l'ouverture F1.

Ne disposant pas d'accès optique direct, il a été décidé d'incliner la sonde LDV de sorte à introduire le croisement des faisceaux dans l'ouverture F1.

Un montage employant un micro-contrôleur autorisant la rotation d'un angle  $\theta$  d'une précision du dixième de degré, a été réalisé (**Figure 57**).

La vitesse mesurée est alors la vitesse située dans le plan incliné d'un angle  $\theta$  par rapport au plan perpendiculaire à l'ouverture. Pour obtenir la composante normale, il suffit de diviser cette vitesse par le cosinus de l'angle  $\theta$  ( $13.5^\circ$ ).

Cette approximation est satisfaisante à condition que les vitesses verticales sur l'ouverture F1 soient négligeables. Ce qui est vraisemblable puisque l'écoulement dans toute la structure est essentiellement horizontal.

Les résultats produits par cette nouvelle série de mesures sont semblables à ceux obtenus sans incliner la sonde (**Figure 63**).

Le gradient de vitesse normale selon la direction normale à l'ouverture F1 est donc faible.

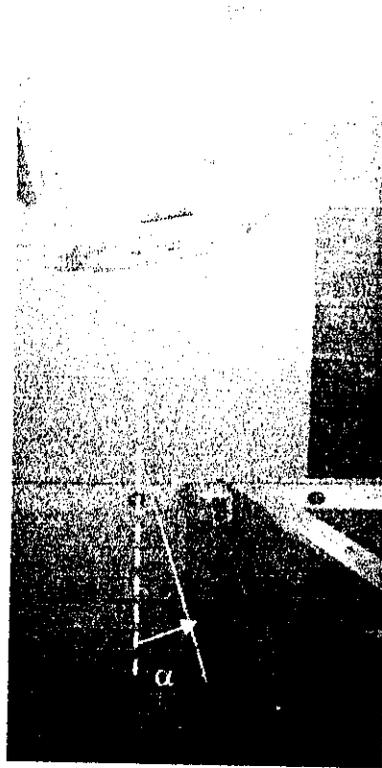


Figure 57. Sonde LDV inclinée

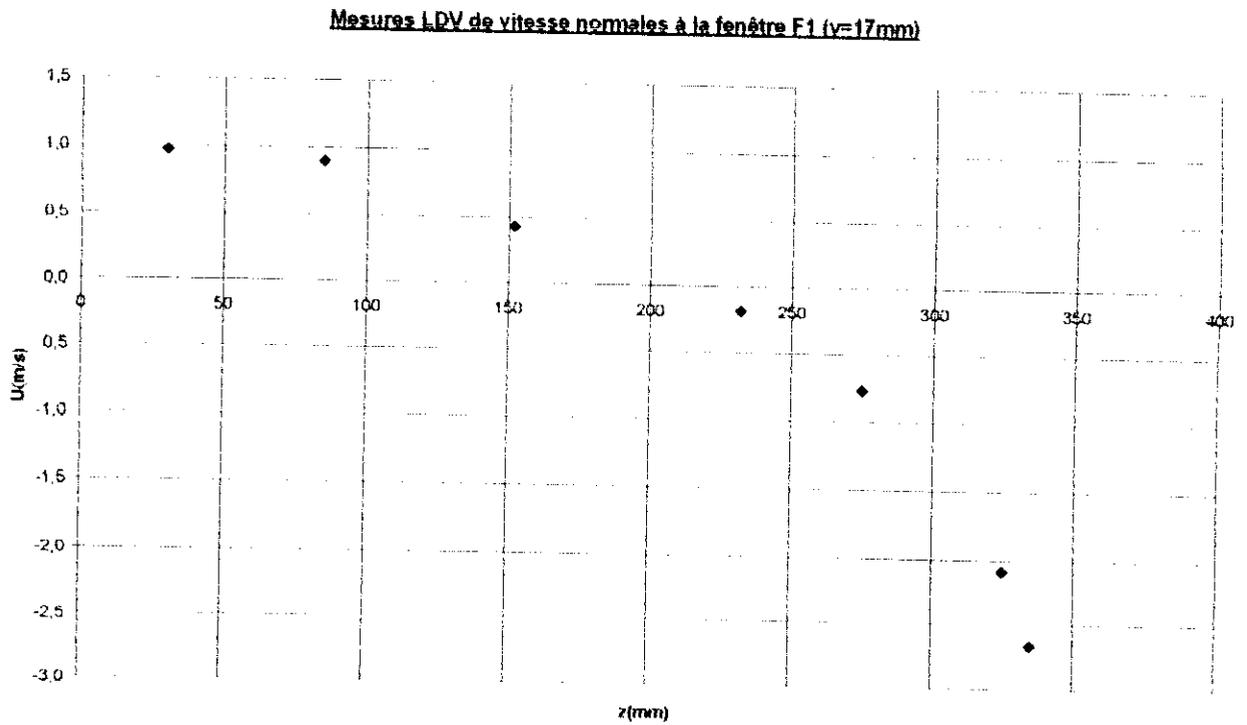


Figure 58. Mesures LDV dans le compartiment C1 de vitesses normales à l'ouverture F1

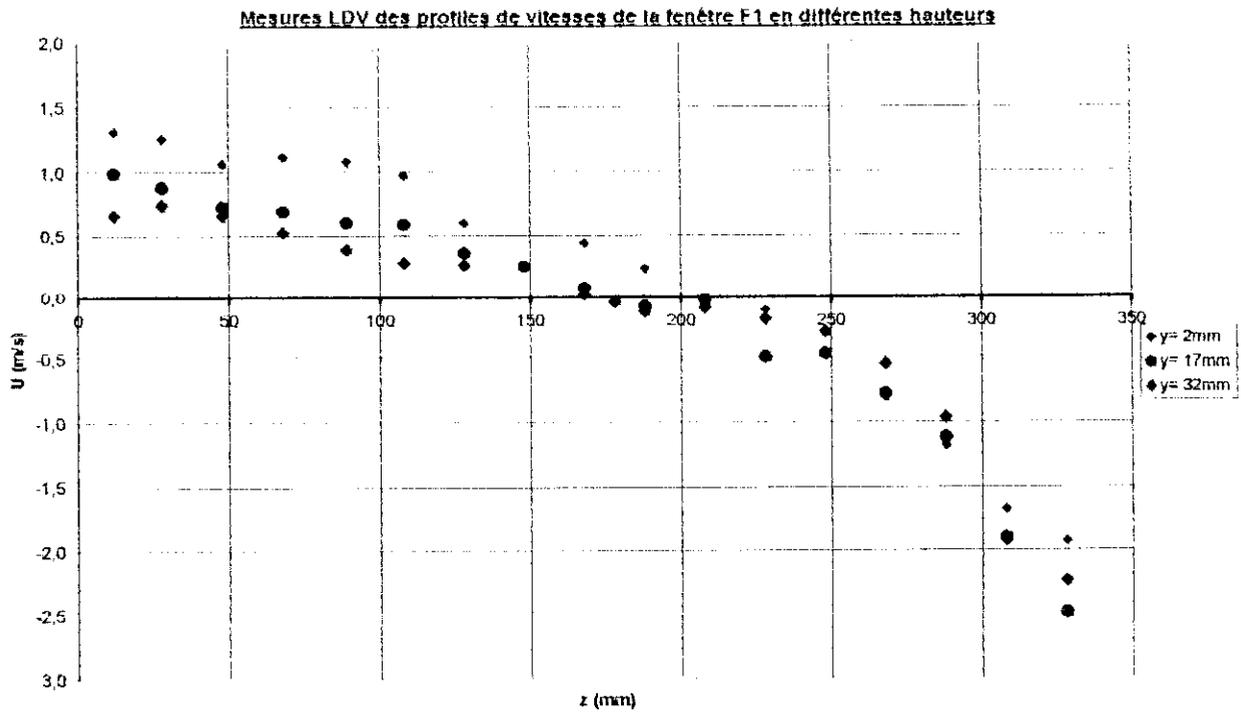


Figure 59. Mesures LDV dans le compartiment C1 de vitesses normales à l'ouverture F1

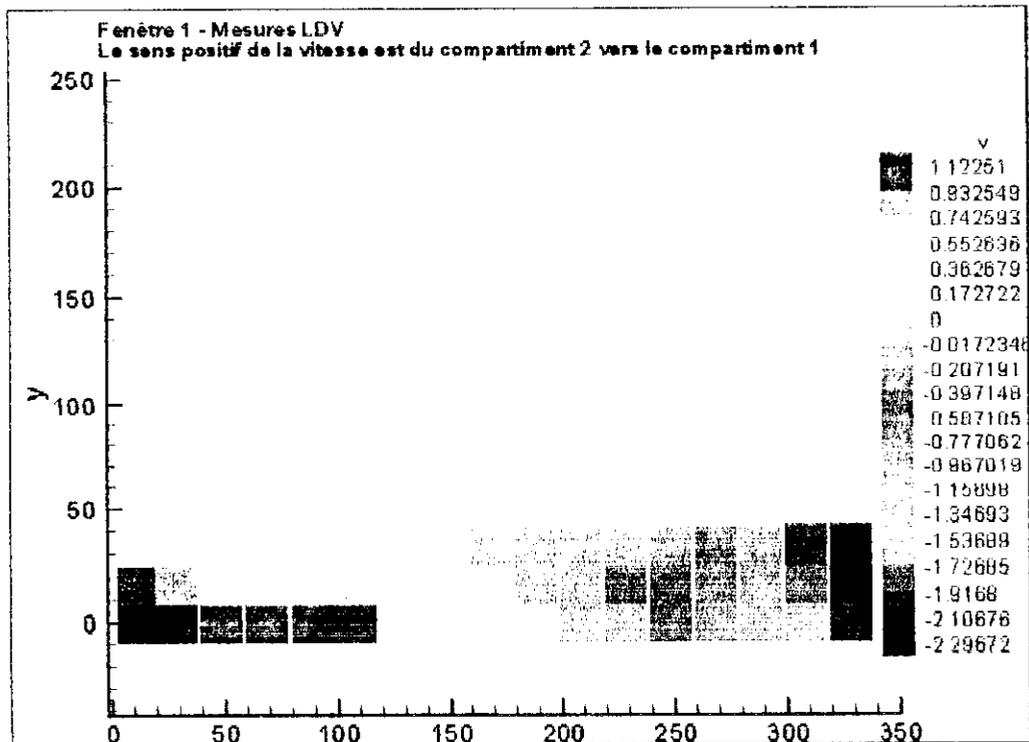


Figure 60. Mesures LDV dans le compartiment C1 de vitesses normales à l'ouverture F1 (m/s).

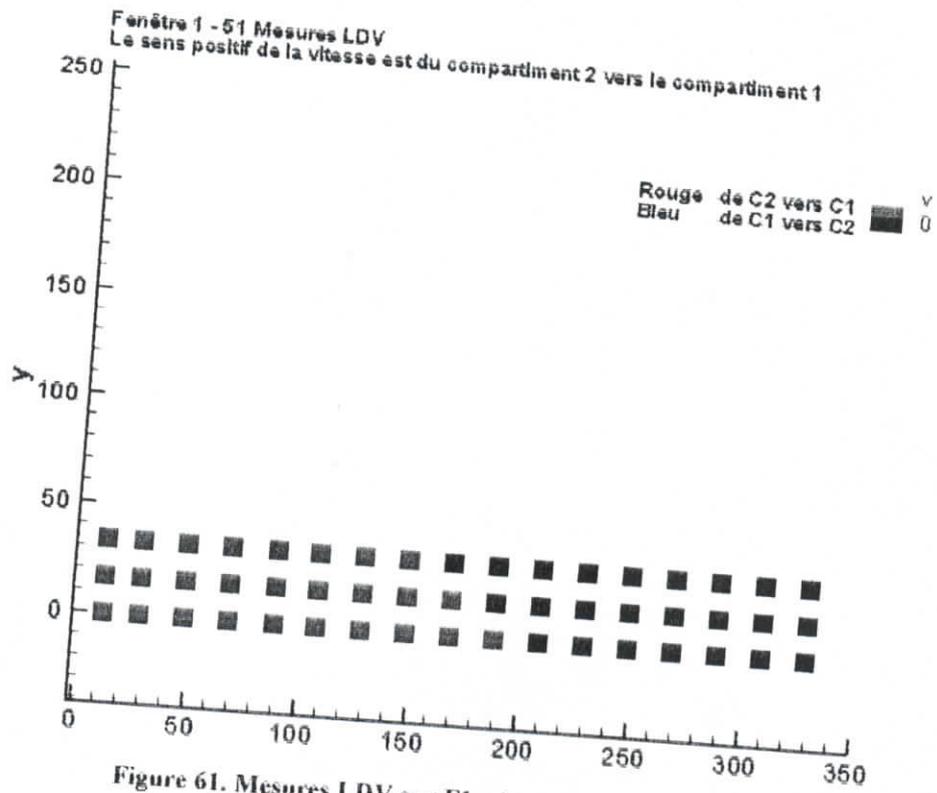


Figure 61. Mesures LDV sur F1 – inversion de la vitesse.

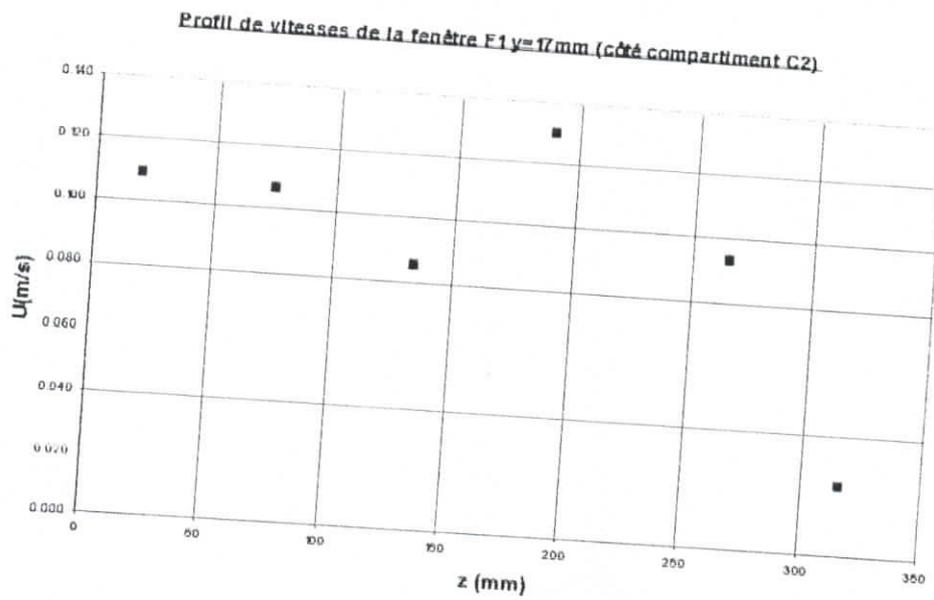


Figure 62. Mesures LDV dans le compartiment C2 de vitesses normales à l'ouverture F1

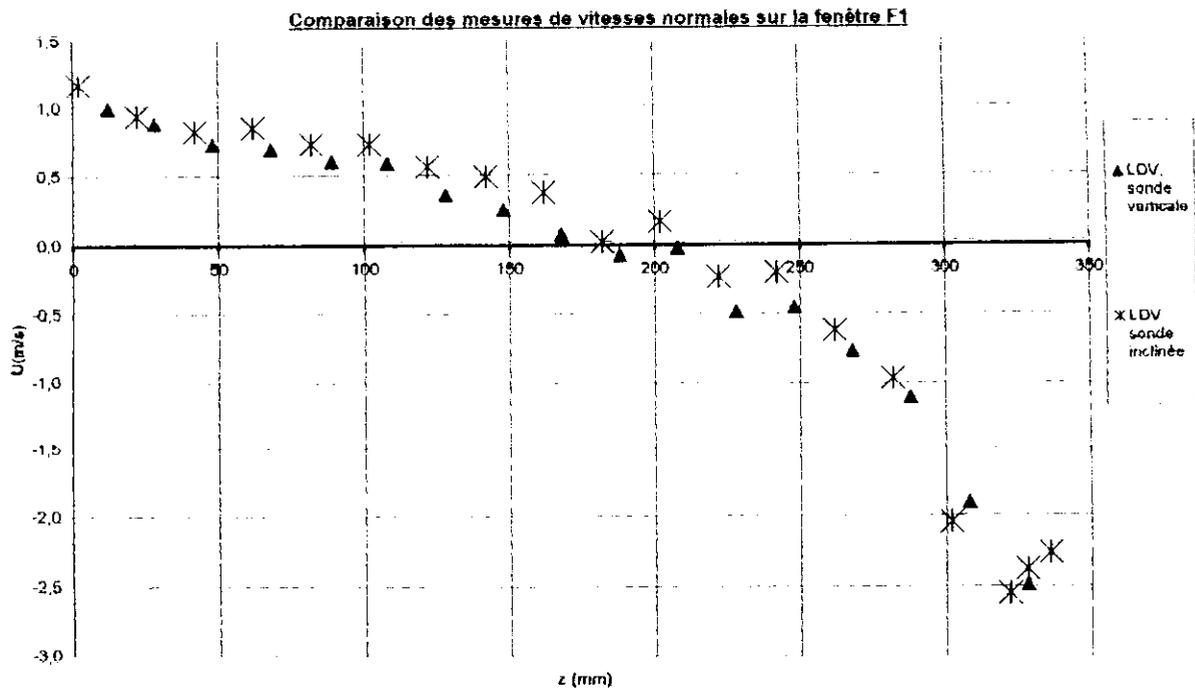


Figure 63. Comparaison des mesures LDV dans le compartiment C1 de vitesses normales à l'ouverture F1

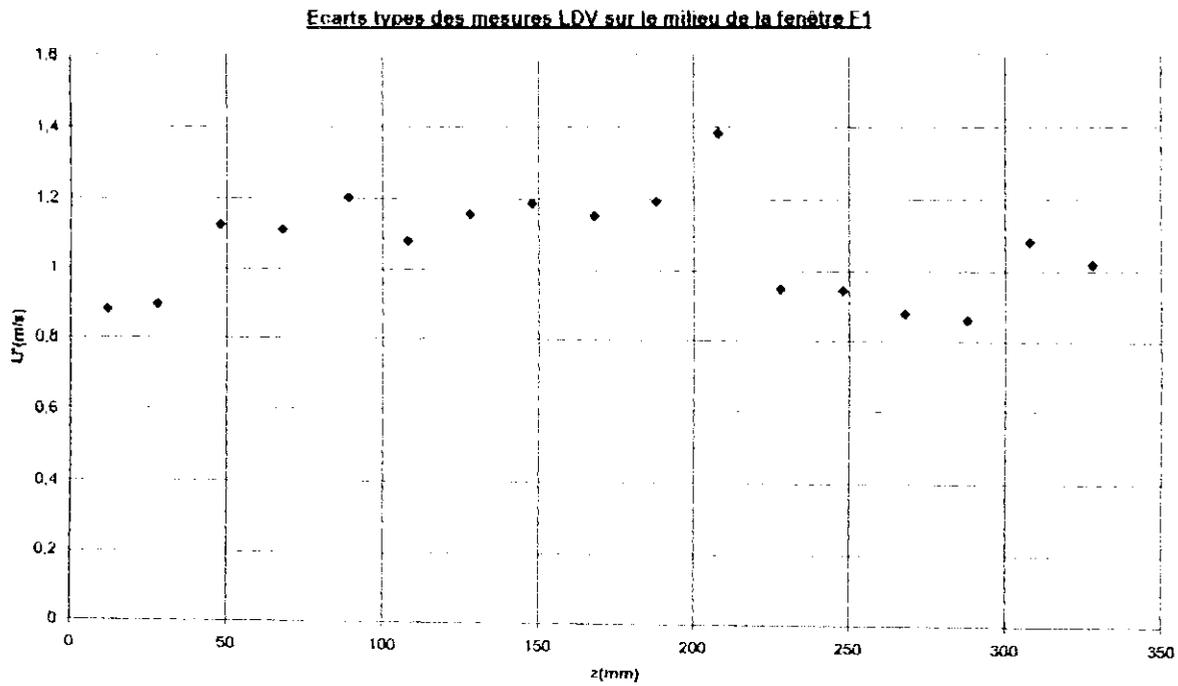


Figure 64. Fluctuations de vitesse au niveau de la fenêtre F1

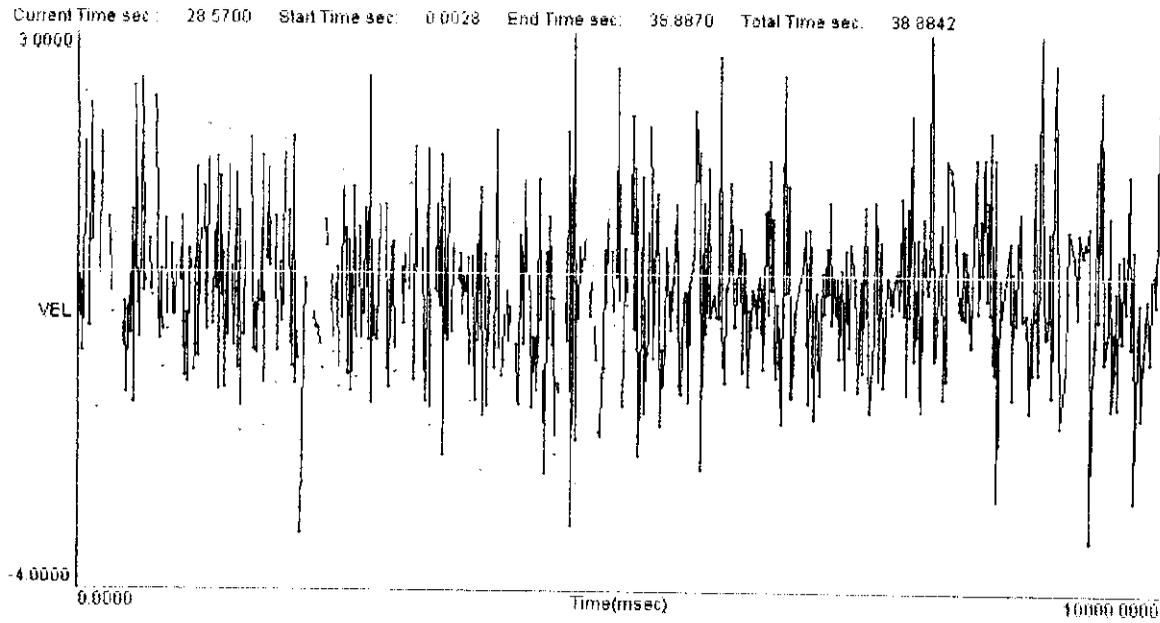


Figure 65. Signal d'une mesure LDV sur l'ouverture F1.

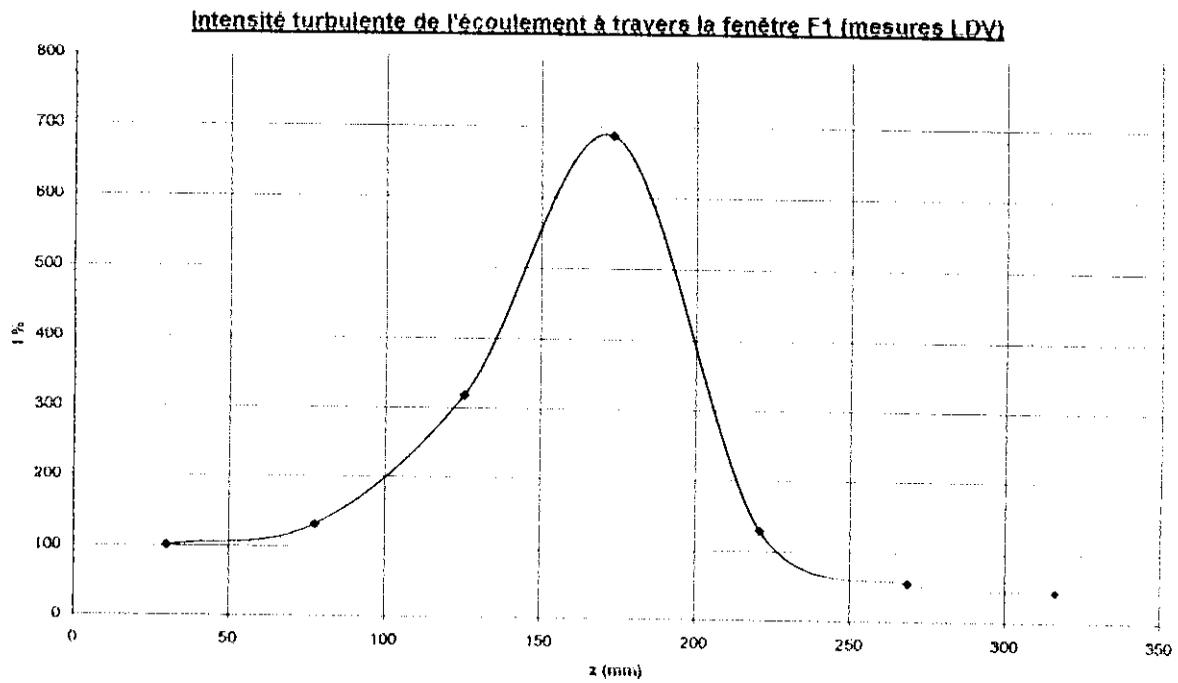


Figure 66. Intensité turbulente des vitesses normales à l'ouverture F1 (mesures LDV)

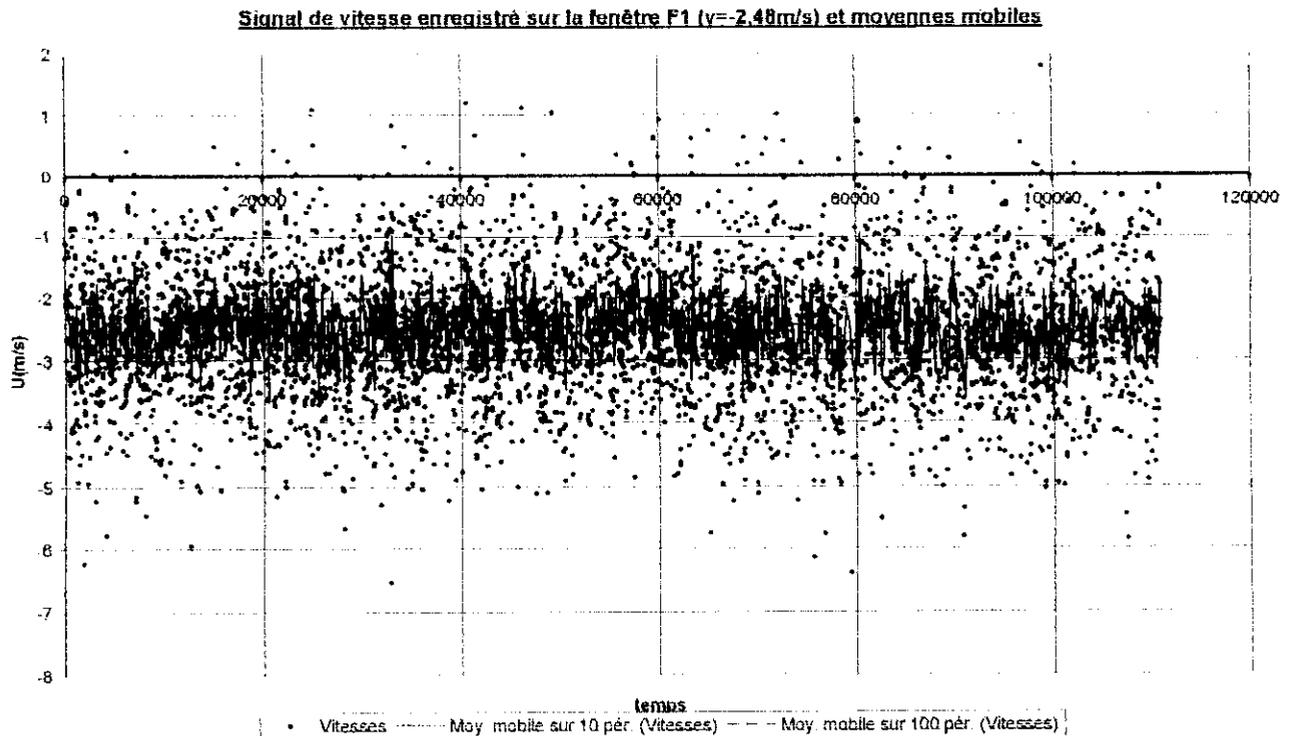


Figure 67. Signal LDV d'une mesure de vitesse au niveau de l'ouverture F1 (coté compartiment C1)

**Mesures PIV :**

Les mesures PIV ont été réalisées à mi-hauteur de l'ouverture F1 ( $y = 17 \text{ mm}$ ) du côté du compartiment C1.

En raison de la longueur de l'ouverture F1 et par souci de précision, la mesure par PIV s'est faite en deux plans. Nous les avons, par la suite, assemblés (Figure 68).

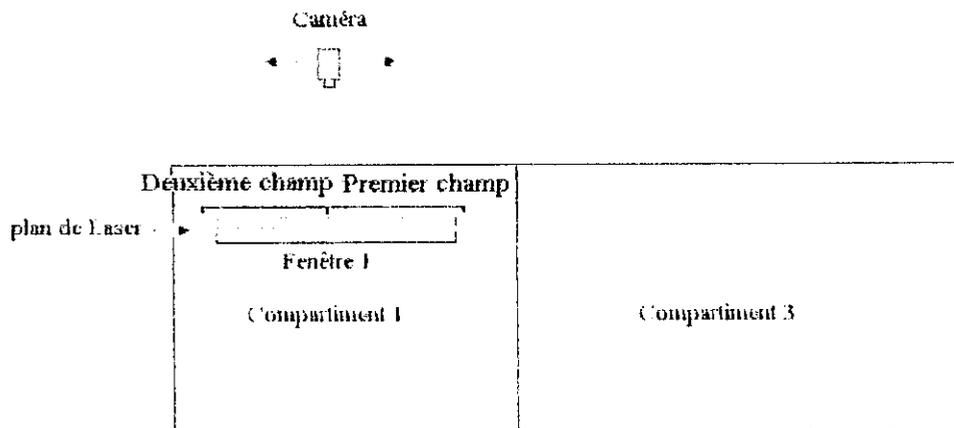


Figure 68. Schéma du montage PIV sur l'ouverture F1.

Le premier champ couvre la zone comprise entre  $z = 0$  et  $z = 210 \text{ mm}$ , et le deuxième champ couvre l'autre moitié (voir Annexe 8).

**Résultats :**

Les champs de vitesse obtenus avec la PIV décrivent la présence d'un grand tourbillon dans le compartiment C1, qui est généré par la composition des différents mouvement :

aspiration et refoulement des ventilateurs, mouvement d'entrée et de sortie d'air par l'ouverture F1 ainsi que les déviations de l'air sur les parois de la maquette.

L'air refoulé par le ventilateur V2 se dirige vers l'ouverture F1 où une partie sort totalement du compartiment C1, et l'autre fait un mouvement d'entrée sortie à travers elle qui n'est en fait qu'un mouvement tangentiel à l'ouverture (Figure 69).

Les profils obtenus en LDV donnent uniquement la composante normale de la vitesse à l'ouverture, cependant, sur les champs obtenus en PIV, on remarque que la composante tangentielle est prépondérante (Figures 70, 71 et 72).

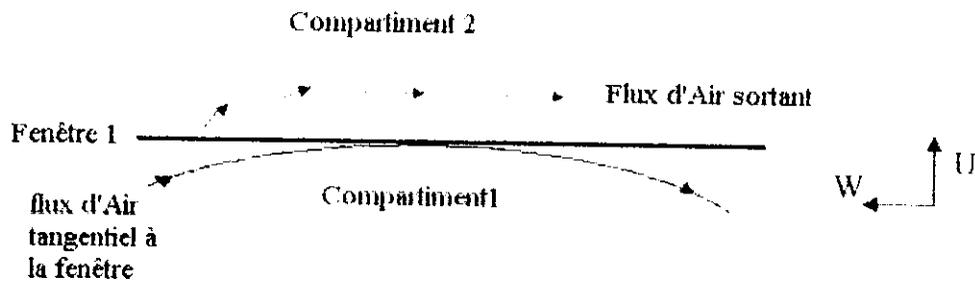


Figure 69. Mouvement de l'air au niveau de l'ouverture F1

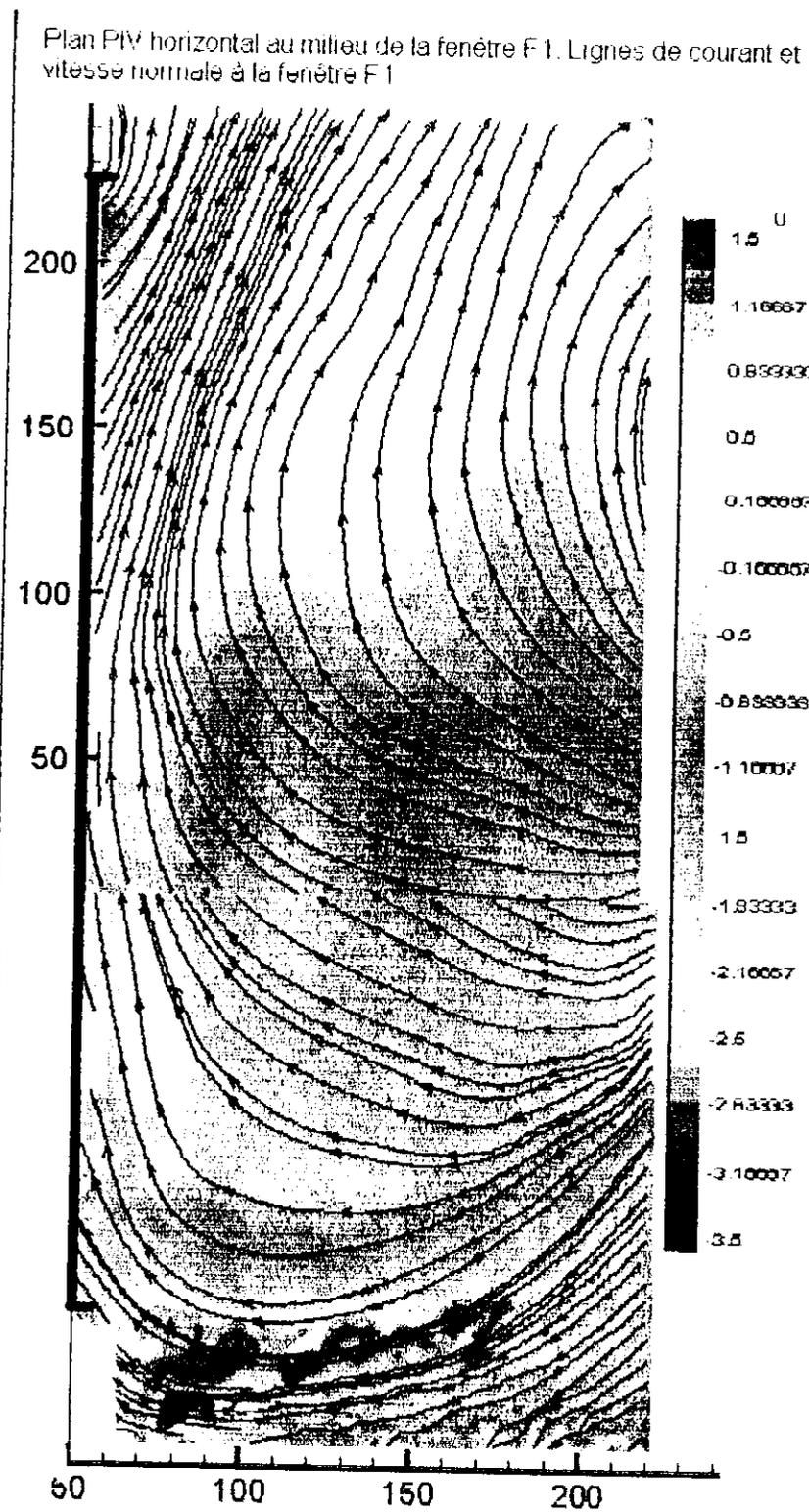


Figure 70. Plan PIV horizontal au niveau de l'ouverture F1 dans le compartiment C1 (m/s).

Plan PIV horizontal au milieu de la fenêtre F1 - vecteur vitesse et champ de vitesse moyen

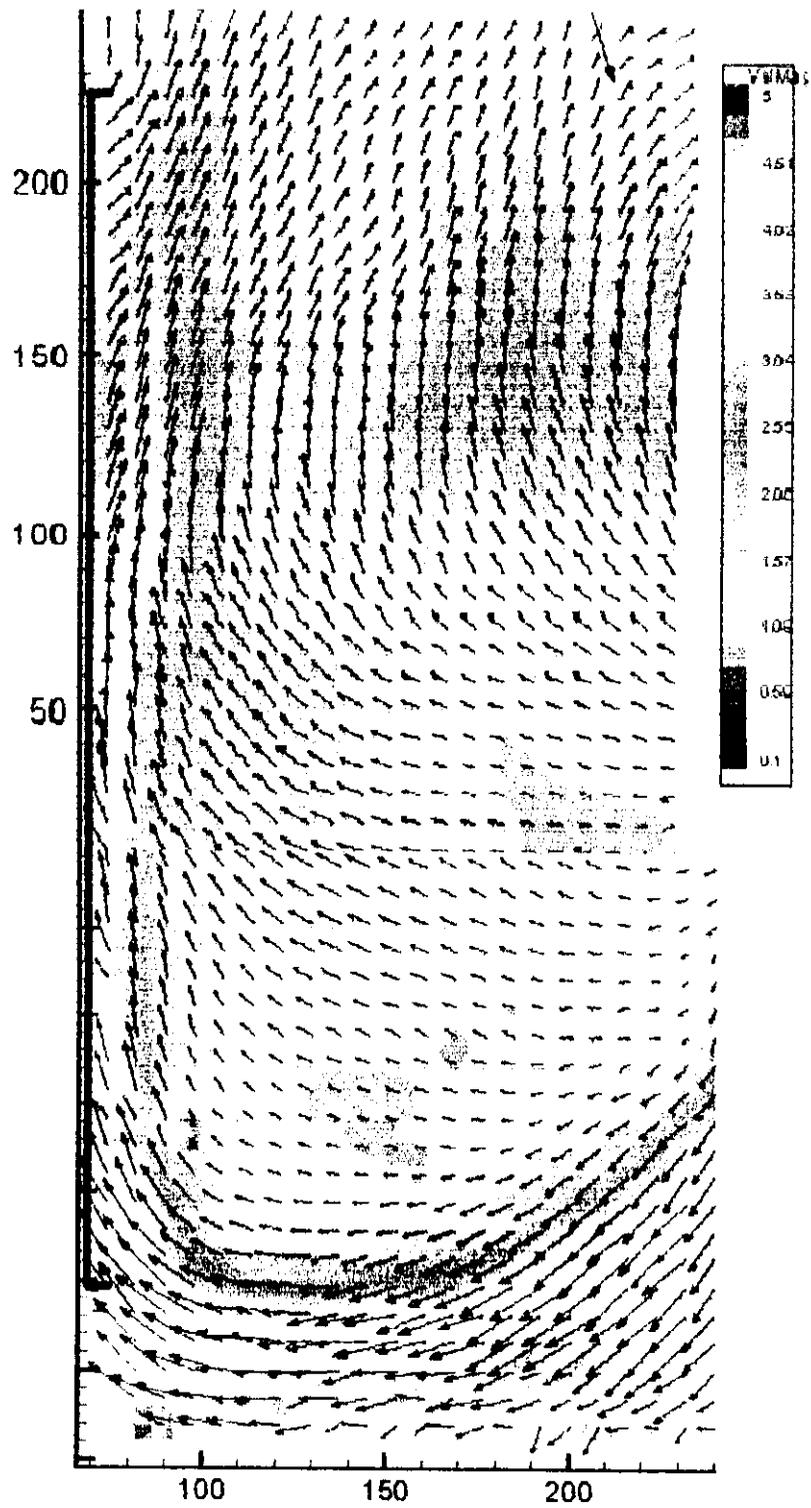


Figure 71. Plan PIV horizontal au niveau de l'ouverture F1 dans le compartiment C1 (m/s).

Plan PIV horizontal au milieu de la fenêtre F1. Vitesse tangentielle V

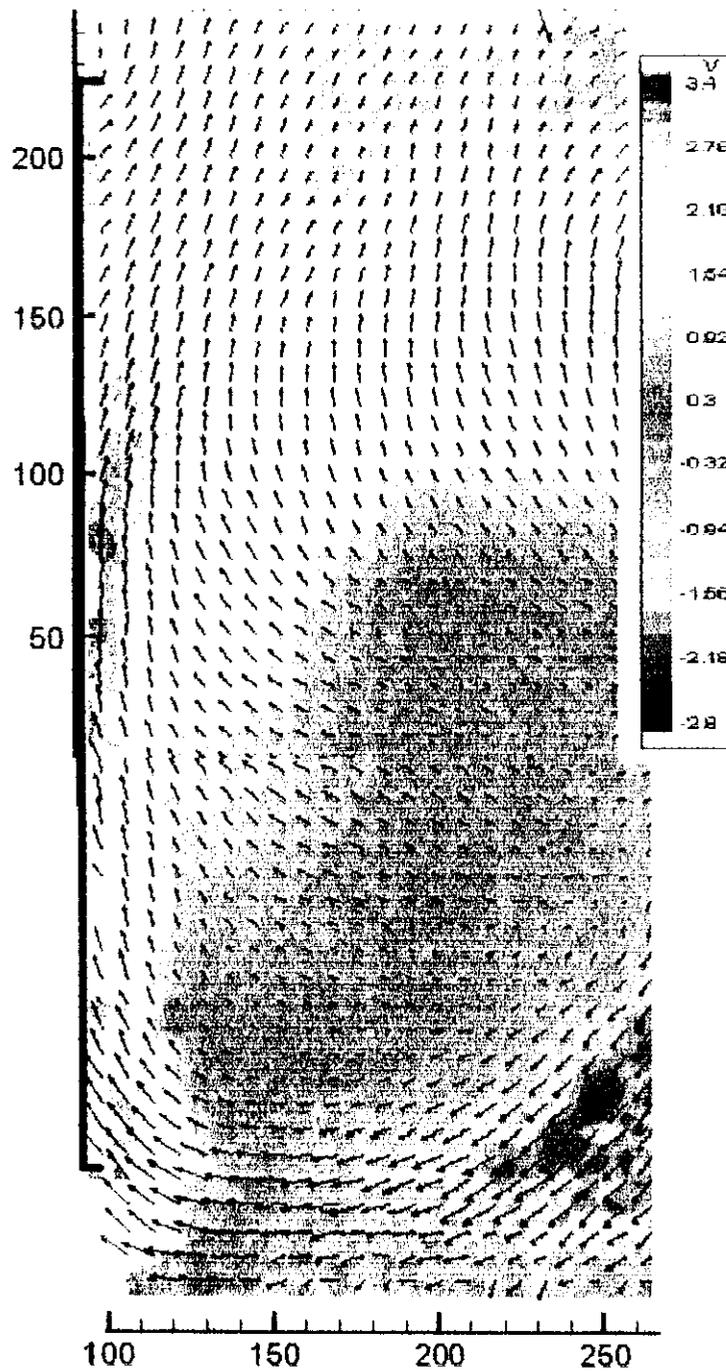


Figure 72. Plan PIV horizontal au niveau de l'ouverture F1 dans le compartiment C1 (m/s).

Le plan PIV suivant (Figure 73), montre une turbulence très élevée près de la paroi de maquette, là où l'air provenant du ventilateur V2 est dévié.

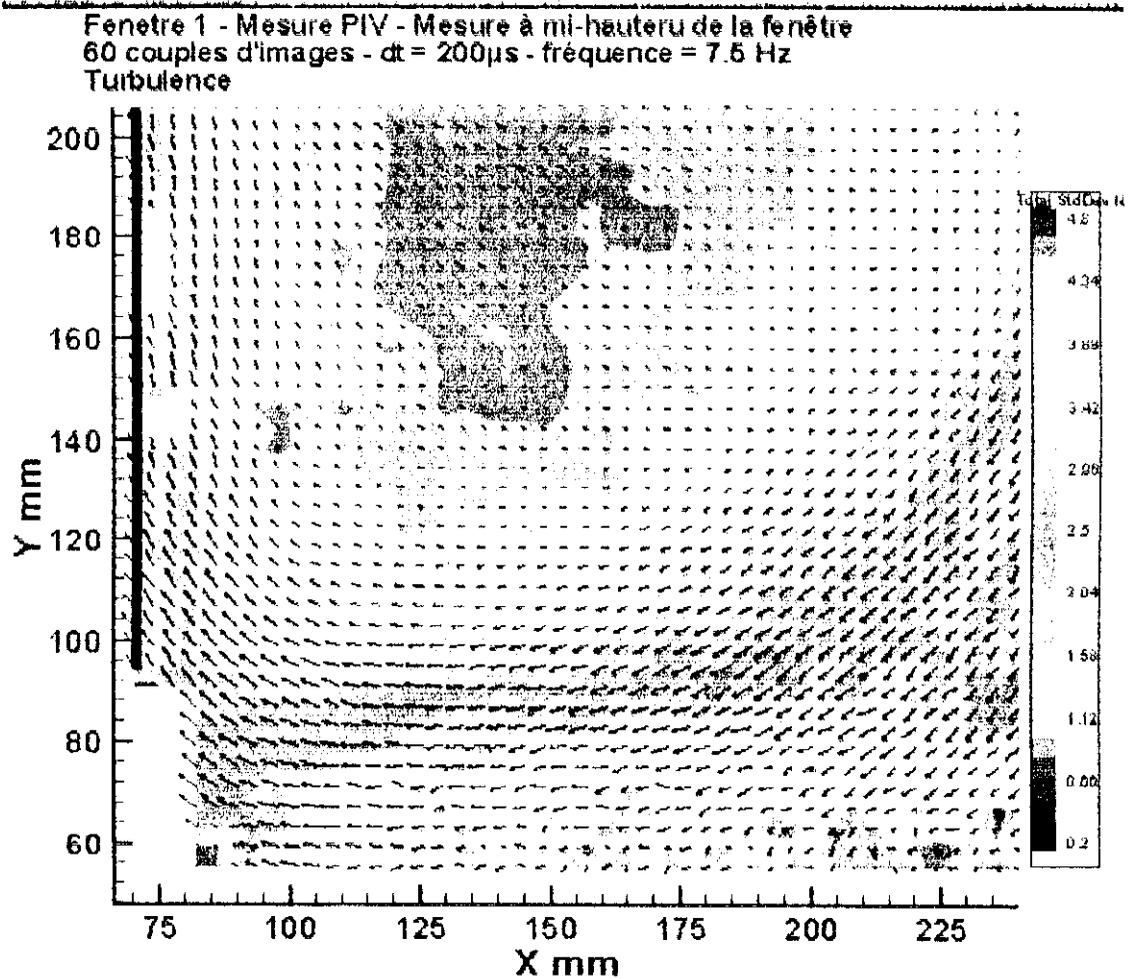


Figure 73. Plan PIV horizontal au niveau de l'ouverture F1 dans le compartiment C1 (m/s).

L'extraction d'un profil de vitesse tangentielle à partir du champ total de l'ouverture décrit une vitesse importante, qui atteint une valeur maximale de 3.4 m/s dans la zone comprise entre 60 mm et 160 mm (Figure 74).

La vitesse tangentielle  $W$  augmente fortement à partir de  $z = 50$  mm, pour atteindre une vitesse maximale (en valeur absolue) au milieu de l'ouverture de l'ordre de -3 m/s. Puis elle se stabilise entre -2 et -2.5 m/s (Figure 74).

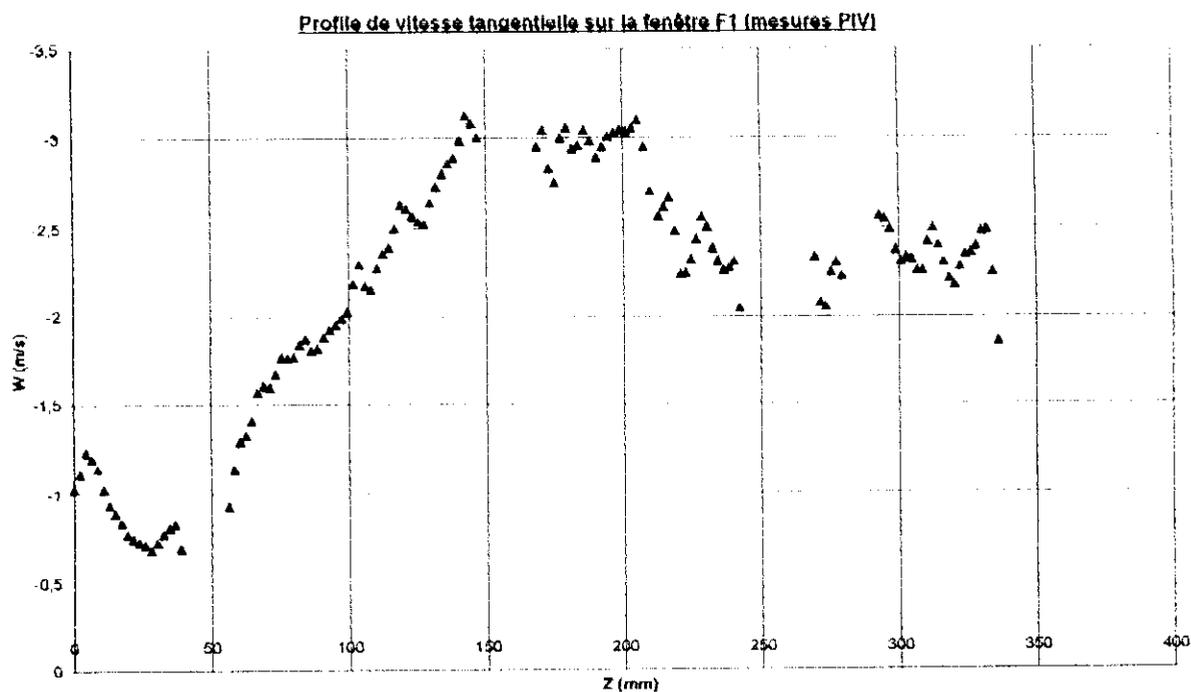


Figure 74. Vitesses tangentielles ouverture F1

Comparaison des différentes mesures :

La Figure 75 reprend les différentes mesures de vitesse normale à l'ouverture F1. Ces mesures sont toutes à mi-hauteur de l'ouverture, soit  $y=17\text{mm}$ .

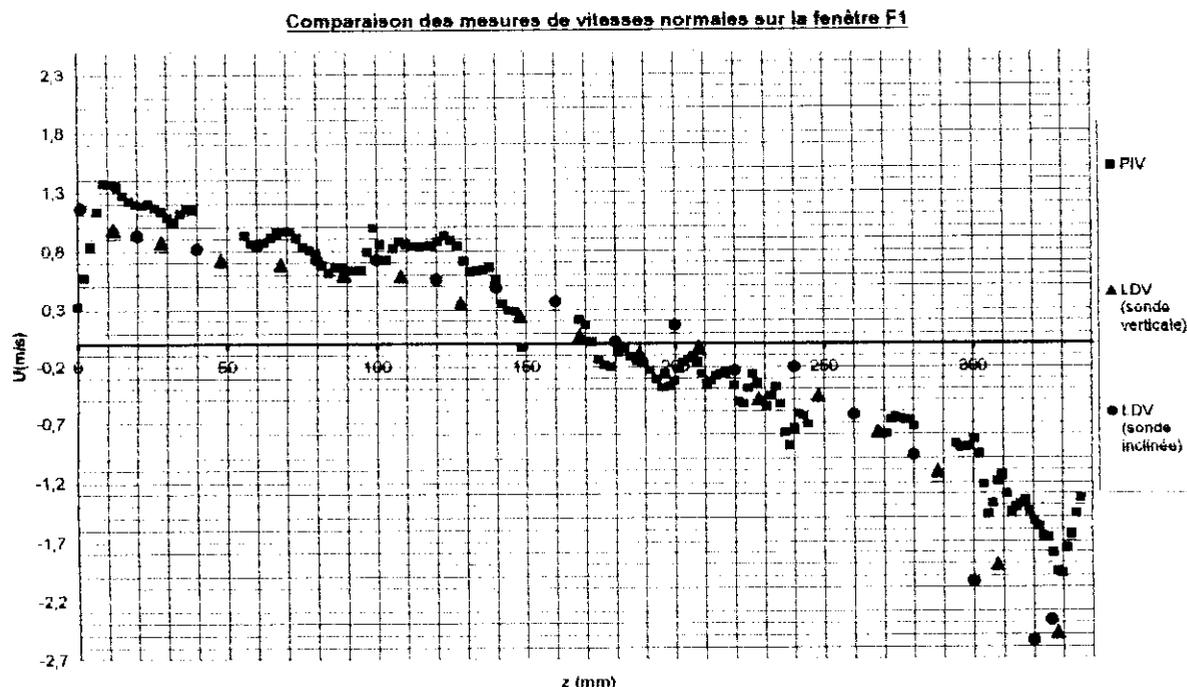


Figure 75. Comparaison des mesures de vitesses au niveau de l'ouverture F1

On voit bien sur le graphique de la Figure 75 que les mesures concordent. Les différents profils expérimentaux obtenus pour l'ouverture F1 sont similaires, l'inversion de la vitesse se produit entre  $z_1=170\text{ mm}$  et  $z_2=220\text{ mm}$ , pour tous les procédés utilisés.

Les écarts présents entre les différentes valeurs reviennent aux fluctuations qui caractérisent l'instabilité du mouvement, ainsi qu'à son instationnarité. Il faut également prendre en compte les conditions d'expérimentation, telles que l'ensemencement, l'état de la paroi et de la sonde, sa position, ainsi que le taux d'échantillonnage, qui peut influencer la mesure.

#### **5.1.2.2.2. Ecoulement au niveau de l'ouverture F2**

Les mesures de vitesse à ce niveau ont été réalisées uniquement par LDV, en raison de la difficulté de la mise en oeuvre de la PIV (encombrement).

Des mesures de vitesse normale ont été réalisées avec la sonde LDV.

Le volume de mesure est déplacé sur 15 points de l'ouverture : 5 déplacements suivant la longueur et 3 déplacements suivant la largeur pour chaque hauteur du volume de mesure.

Des vitesses assez faibles de moins de 0.5m/s dirigées du compartiment C2 vers le compartiment C1 ont été enregistrées. Les vitesses les plus élevées sont enregistrées dans la partie supérieure de l'ouverture. Elles diminuent à mesure que l'on descend (**Figure 76**).

La distance focale de la lentille de la sonde LDV n'a pas permis d'atteindre la partie inférieure de l'ouverture F2, seul 70% de sa hauteur a été couverte par les mesures. D'autres mesures ont été entreprises avec une sonde munie d'une focale plus longue, malheureusement, elle s'est révélée être défectueuse (**Figures 147 et 148**).

Il faut signaler, que les vitesses au niveau de cette ouverture ne peuvent être considérées comme les vitesses du fluide traversant réellement l'ouverture, car le volume de mesure est situé à 1cm de la sortie, de plus, cet écart augmente au fur et à mesure que l'on progresse vers le bas de l'ouverture. Ainsi, un écoulement pariétal dans le compartiment C1 provenant de l'ouverture F1 vient s'ajouter au flux qui provient du compartiment C2 à travers l'ouverture F2.

Les visualisations montreront plus tard, que la direction de l'écoulement n'est pas normale à l'ouverture mais oblique par rapport à celle-ci.

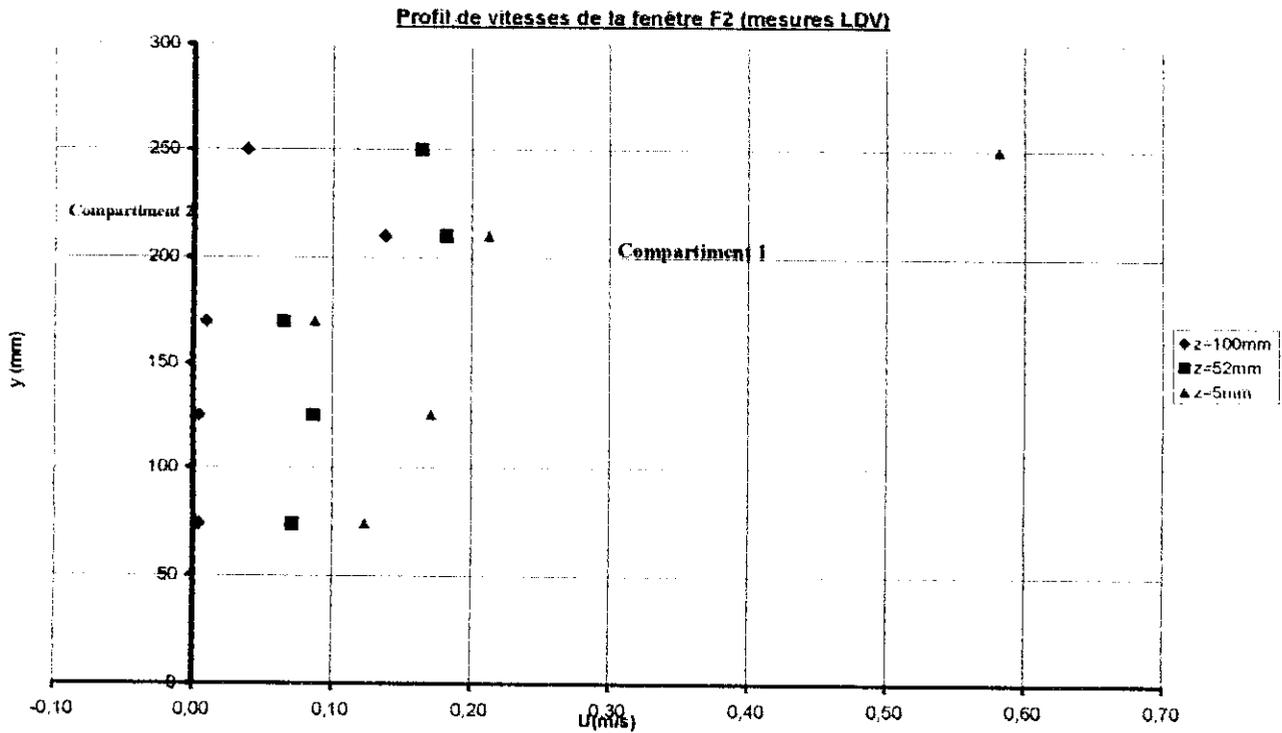


Figure 76. Mesures LDV des vitesses normales à l'ouverture F2 (réalisées dans le compartiment C1 à 1cm de l'ouverture)

### 5.1.2.2.3. Ecoulement au niveau de l'ouverture F3

Les mesures sur la troisième fenêtre sont réalisées seulement avec le procédé de la PIV. Quatre plans PIV horizontaux ont été réalisés sur différentes hauteurs de cette ouverture F3, du côté du compartiment C2. Ils ont permis de mesurer un écoulement de fluide traversant l'ouverture F3 du compartiment C2 vers le compartiment C3. Une vitesse moyenne débitante de 0.5m/s a été mesurée.

La figure 77 montre la disposition du plan Laser et de la caméra.

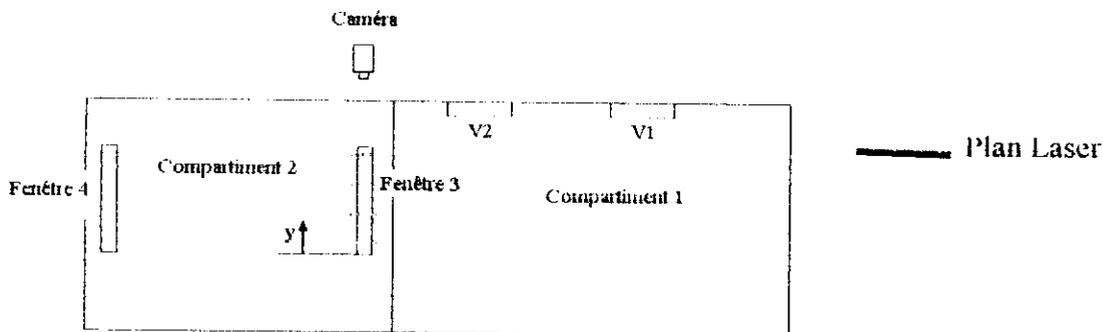


Figure 77. Montage PIV sur l'ouverture F3 (maquette vue de côté)

Les différentes positions du plan sont :  
 Premier plan :  $y_3 = 30$  mm (Figure 78)  
 Deuxième plan :  $y_3 = 160$  mm (Figure 80)

Troisième plan :  $y_3 = 260\text{mm}$  (**Figure 81**)

Quatrième Plan :  $y_3 = 320\text{mm}$  (**Figure 82**)

La hauteur totale de l'ouverture est de 345 mm.

Les lignes de courant (**Figures 78, 80 et 81**), montrent que l'écoulement est globalement normal à l'ouverture F3

Remarque :

Les réflexions du laser sur les boîtiers et les parois, ont engendré des faux vecteurs qui faussent la mesure dans ces zones

L'écoulement traversant l'ouverture F3 est entretenu par le débit provenant de l'ouverture F1 et par l'appel d'air de l'ouverture F2.

L'air qui sort de l'ouverture F1 s'écoule dans le compartiment C2, et entre par la fenêtre F3 dans le compartiment C3 après avoir été dévié par le boîtier, la section prise par l'air diminue donc, et sa vitesse augmente.

Les lignes de courant du champ PIV à 3cm de hauteur (**Figure 78**) font apparaître un tourbillon qui se forme devant le boîtier. C'est une zone de recirculation. Elle est créée par le rétrécissement brusque et par le boîtier.

Cette structure tourbillonnaire est visible que pour la première hauteur du plan, cependant, les faux vecteurs empêchent de bien discerner l'écoulement dans cette région.

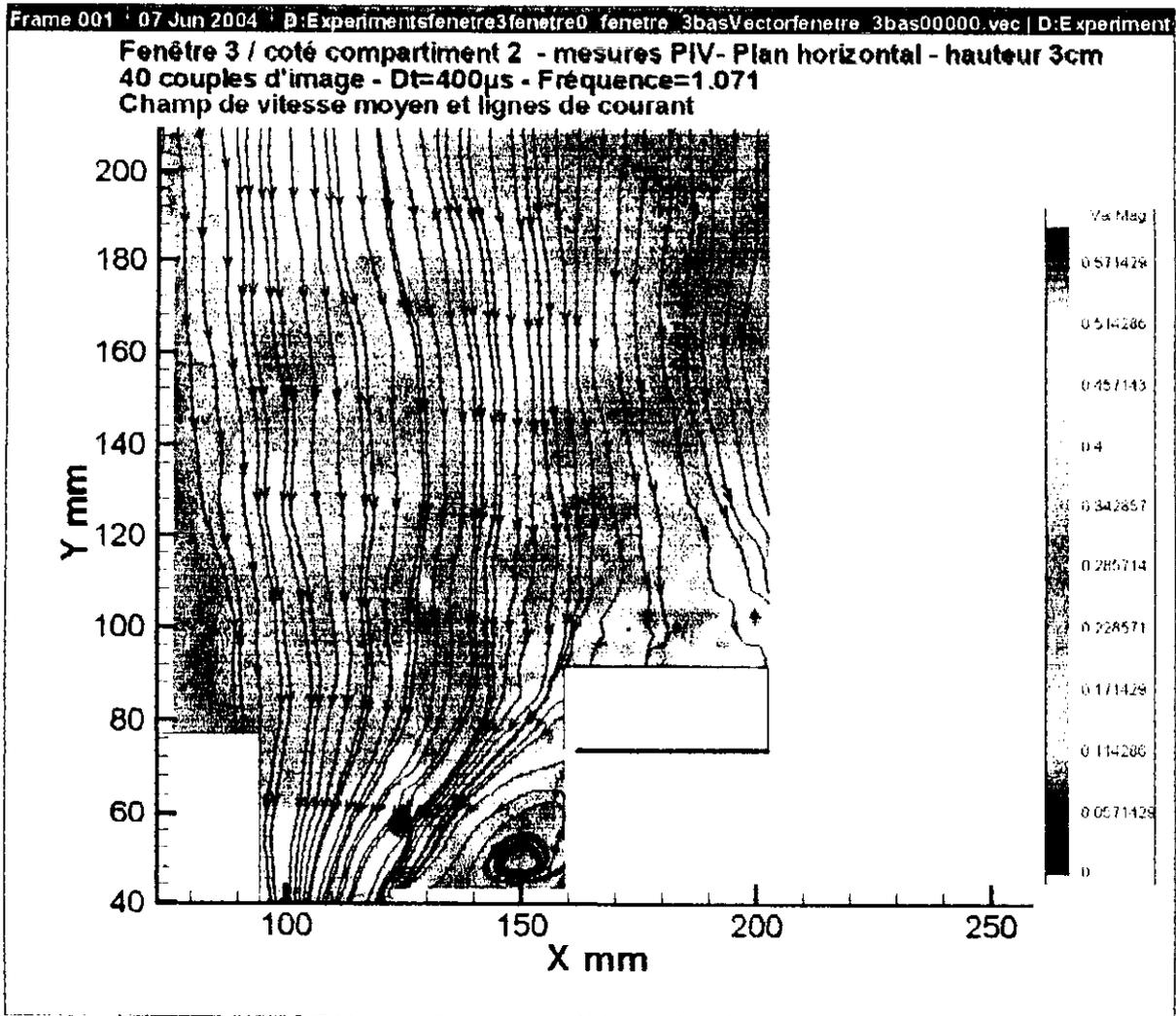


Figure 78. Plan PIV horizontal au niveau de l'ouverture F3 dans le compartiment C2 (m/s).

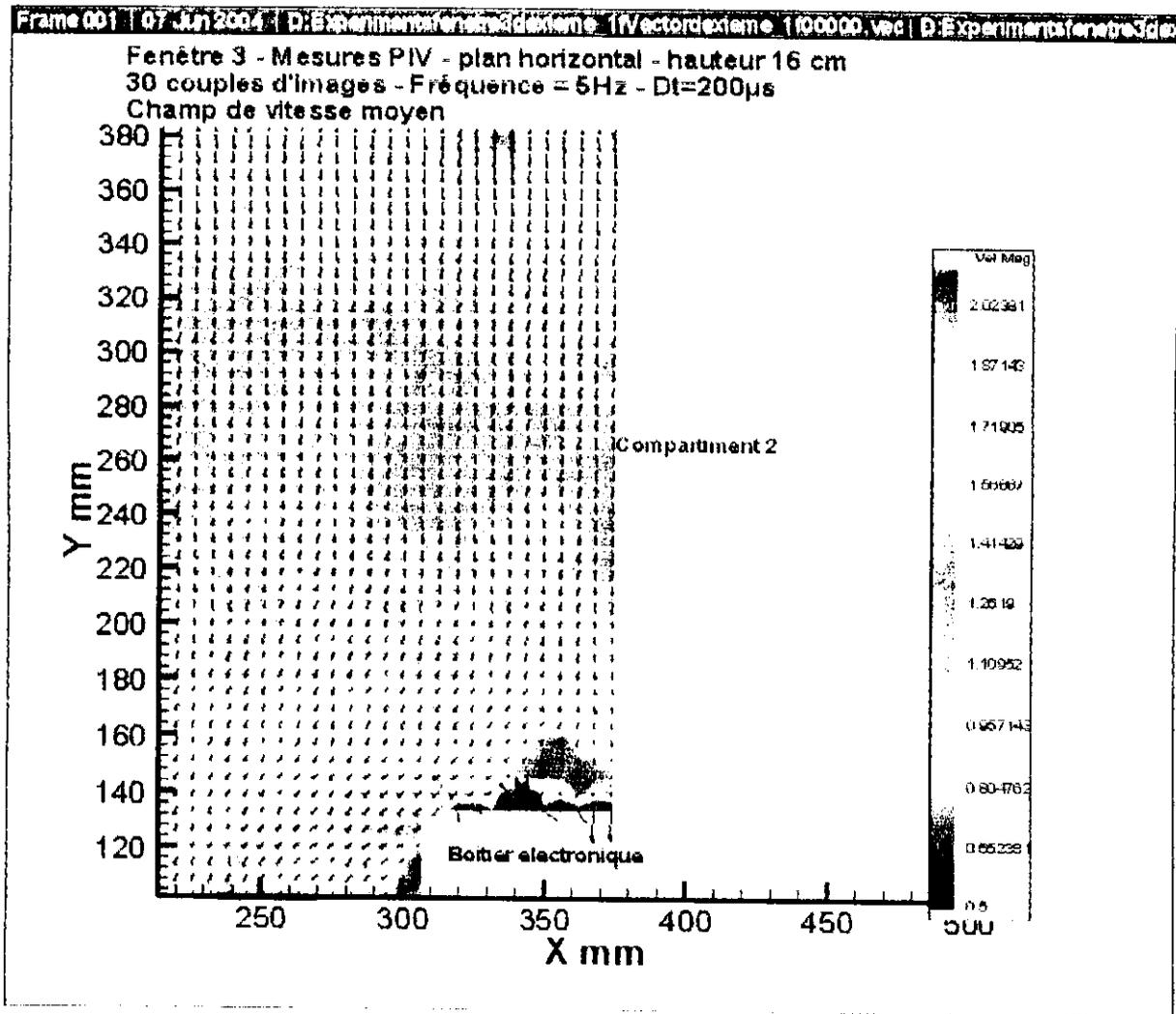


Figure 79. Plan PIV horizontal au niveau de l'ouverture F3 dans le compartiment C2 (m/s).

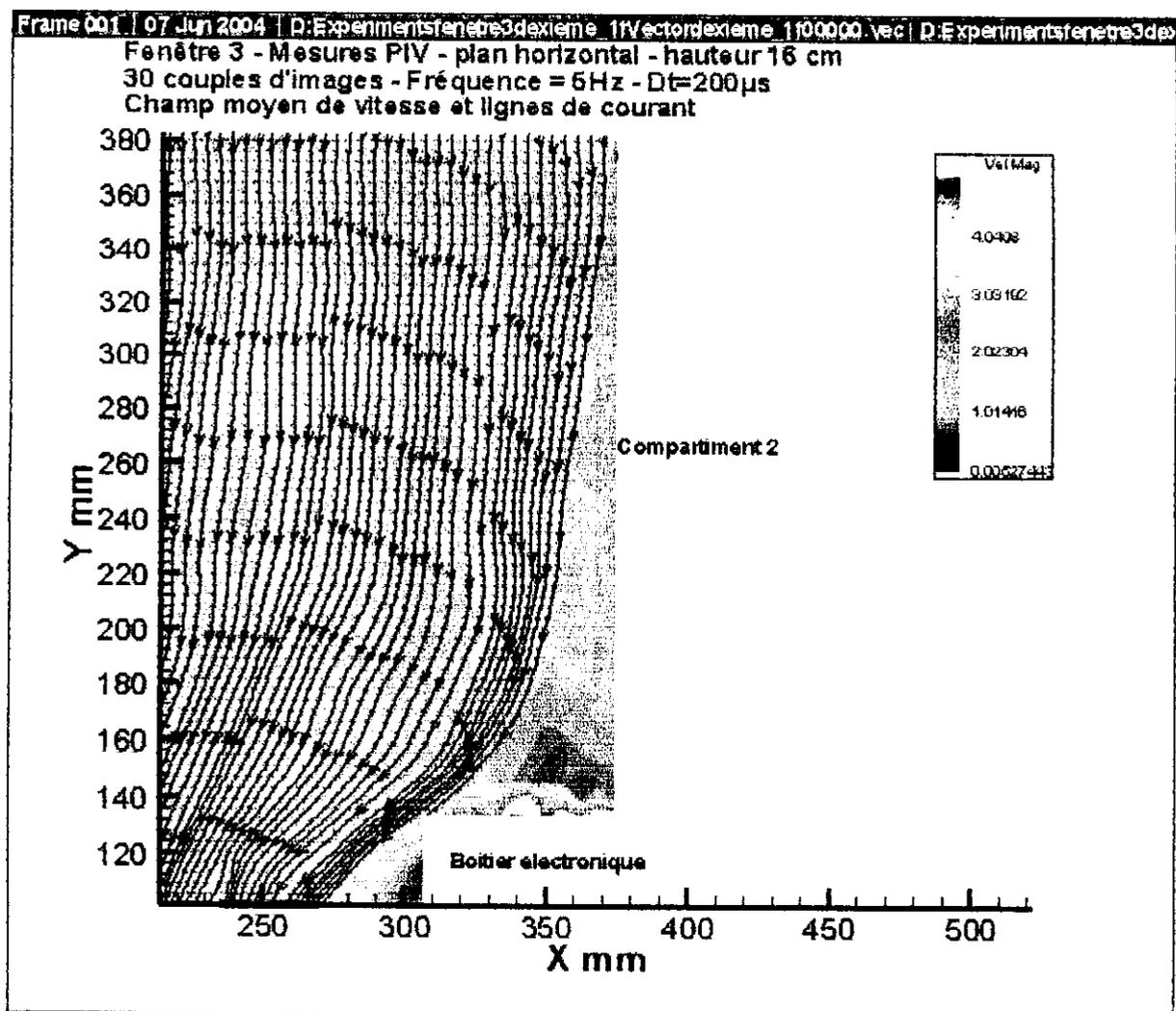


Figure 80. Plan PIV horizontal au niveau de l'ouverture F3 dans le compartiment C2 (m/s).

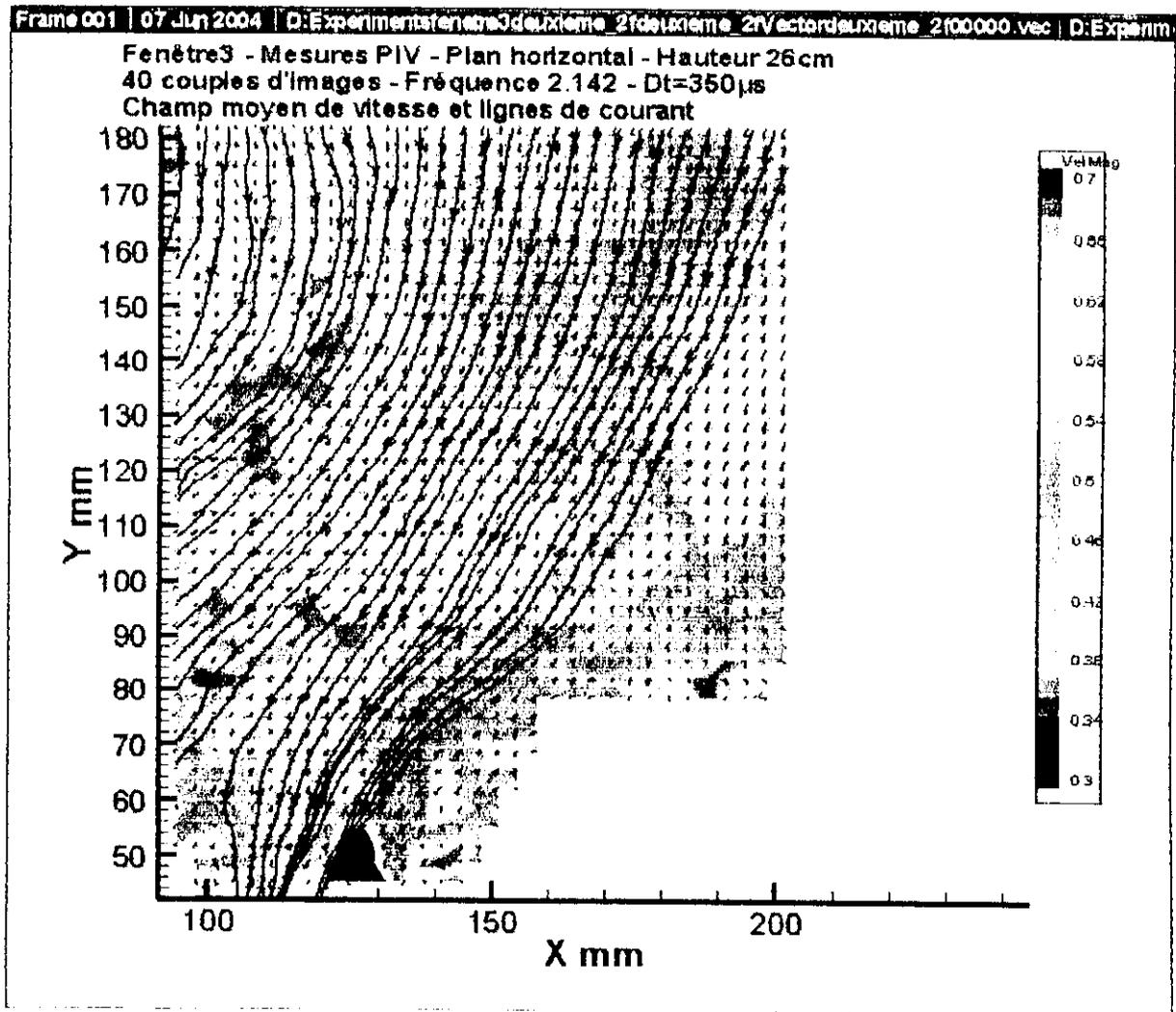


Figure 81. Plan PIV horizontal au niveau de l'ouverture F3 dans le compartiment C2 (m/s).

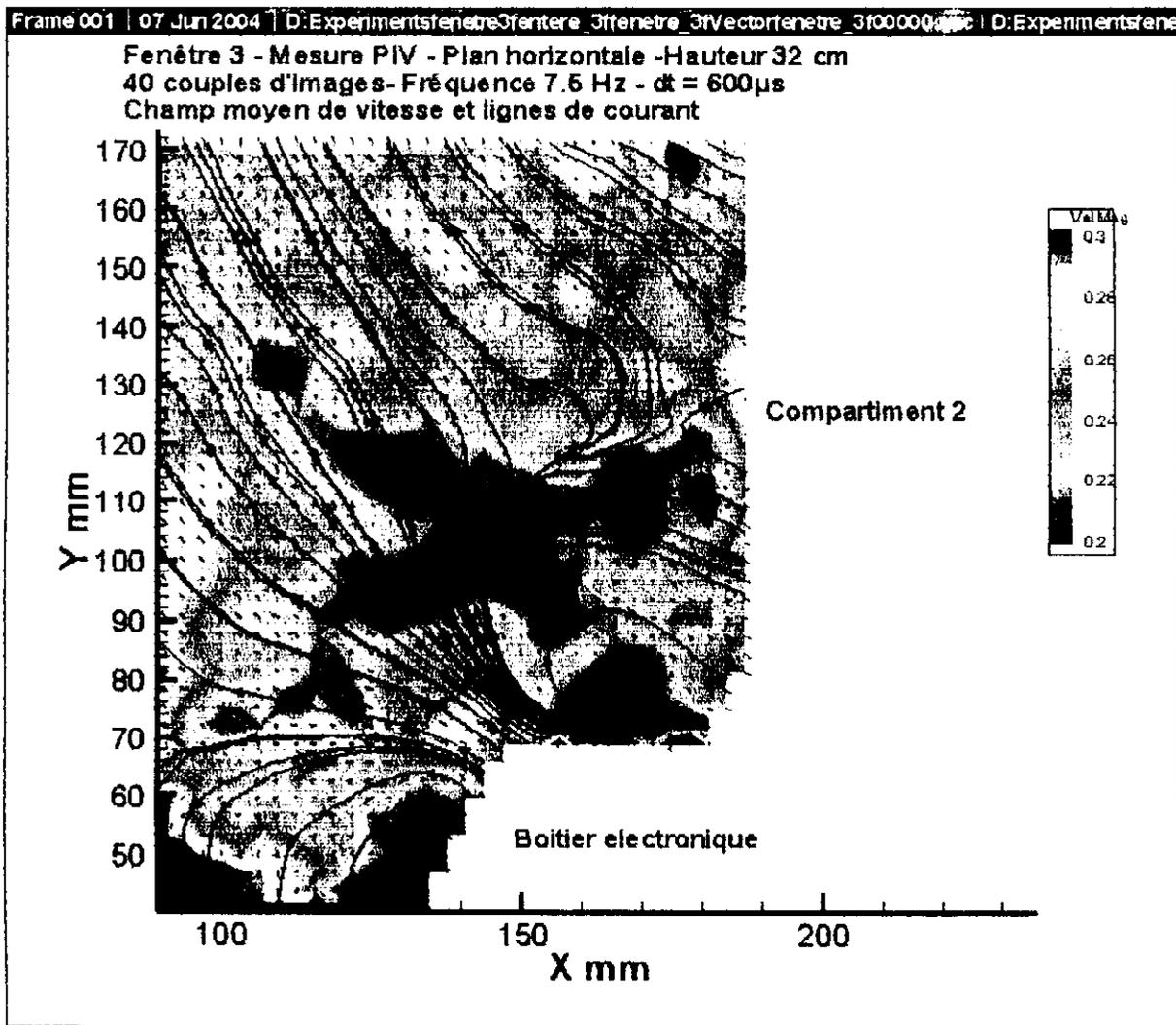


Figure 82. Plan PIV horizontal au niveau de l'ouverture F3 dans le compartiment C2 (m/s).

#### 5.1.2.2.4. Ecoulement au niveau de l'ouverture F4

##### Mesures LDV

Les mesures s'effectuent dans le milieu de l'ouverture pour différents déplacements du volume de mesure. La sonde est placée à côté de la maquette, horizontalement comme représenté sur la **Figure 83**.

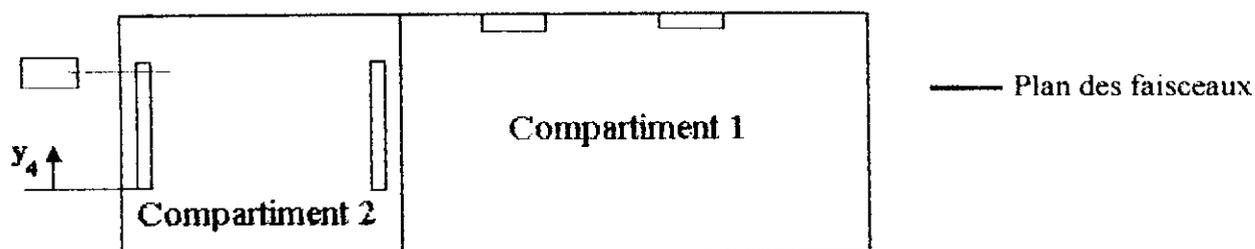


Figure 83. Positionnement de la sonde LDV pour la mesure sur l'ouverture F4

### Mesures PIV

Deux champs horizontaux de vitesse ont été obtenus par PIV à deux hauteurs de cette ouverture (Figure 84).

Le montage est similaire au montage réalisé pour la mesure sur l'ouverture F3.

La mesure est faite sur deux plans laser à différentes hauteurs, toujours dans le compartiment C2 :

Premier plan :  $y_4 = 88\text{mm}$  (Figures 88 à 93)

Deuxième plan :  $y_4 = 220\text{mm}$  (Figures 94 à 96)

La hauteur total de l'ouverture est de 410mm.

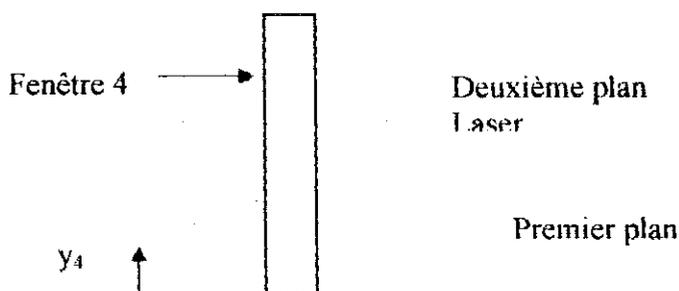


Figure 84. Disposition du plan Laser pour l'ouverture F4

Des mesures LDV ont également été réalisées (Figure 87).

### Résultats :

Ces deux techniques de mesures signalent un flux d'air unidirectionnel traversant l'ouverture F4, du compartiment C3 vers le compartiment C2 (Figures 87, 88 et 94).

Les mesures LDV au centre de cette ouverture et en sept hauteurs différentes, montrent un profil de vitesse non uniforme. Le gradient de vitesse selon la verticale est important. L'écoulement est beaucoup plus intense au niveau de la partie supérieure de l'ouverture (Figure 87).

Le mouvement de l'air est principalement dû à l'effet de la composante perpendiculaire au plan de l'ouverture. La vitesse tangentielle à ce plan est de l'ordre de 0.05 m/s (Figures 89, 90, 91, 95 et 96).

La comparaison des mesures LDV et PIV donne des résultats semblables (Figure 87).

Les lignes de courants décrivent la formation d'un tourbillon au niveau du boîtier caractérisé par une forte turbulence. Ces rotations décrivent des zones de recirculation (Figures 88 et

94). Elles sont, bien sûr, caractérisées par une vorticité et une fluctuation de vitesse élevées (Figures 92 et 93).

L'écoulement est similaire à un écoulement avec élargissement brusque de la section, avec la formation de zones de recirculation dans les coins (Figure 85).

Rappelons que tous les plans PIV sont des champs moyens de vitesse. Ce qui signifie que les tourbillons représentés sur les champs moyens sont présents dans l'écoulement tout au long de la mesure.

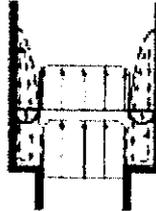


Figure 85. Ecoulement dans une conduite avec élargissement brusque

Les animations des champs PIV instantanés, montrent un écoulement très turbulent et instationnaire avec l'apparition, en aval de l'ouverture, de structures tourbillonnaires de façon sporadique.

Les fluctuations de vitesse enregistrées par la LDV au centre de l'ouverture sont faibles, comme le montre la courbe de la Figure 86 :

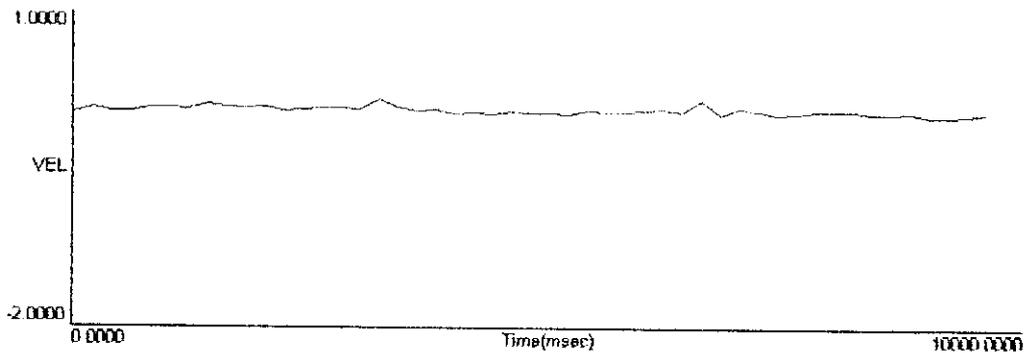


Figure 86. Variations de la vitesse au cours du temps en  $y_4 = 380\text{mm}$

Les intensités de turbulence varient de 20 % tout en haut jusqu'à 9 % en bas.

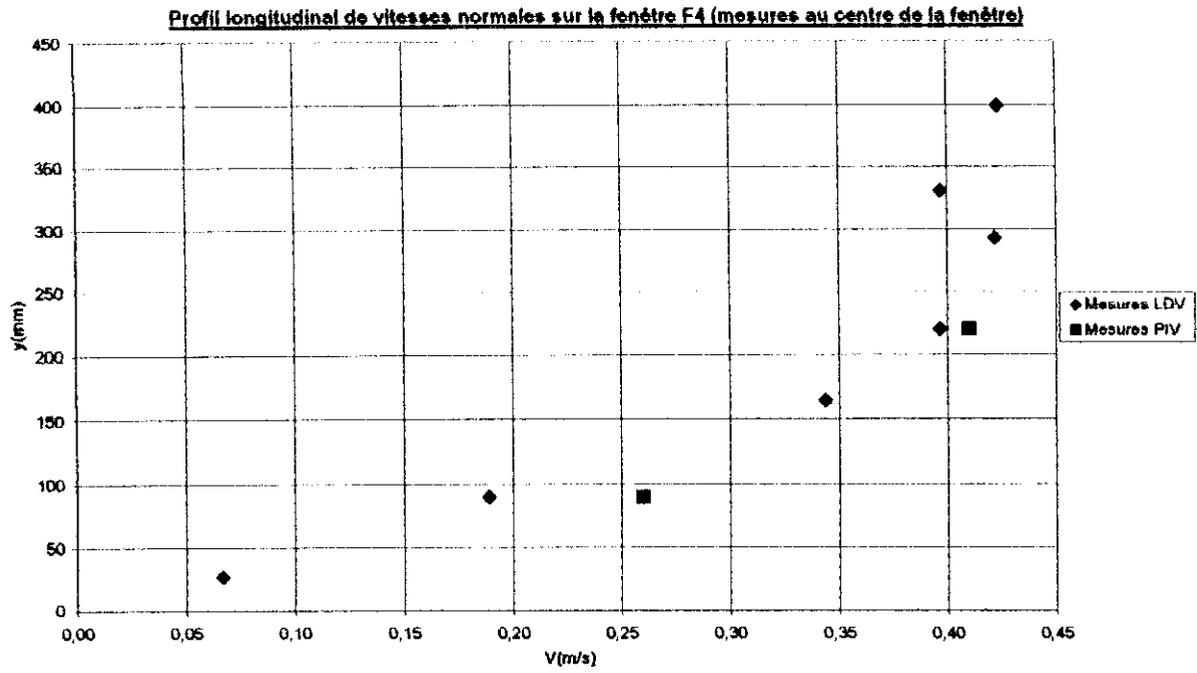


Figure 87. Vitesses normales à l'ouverture F4

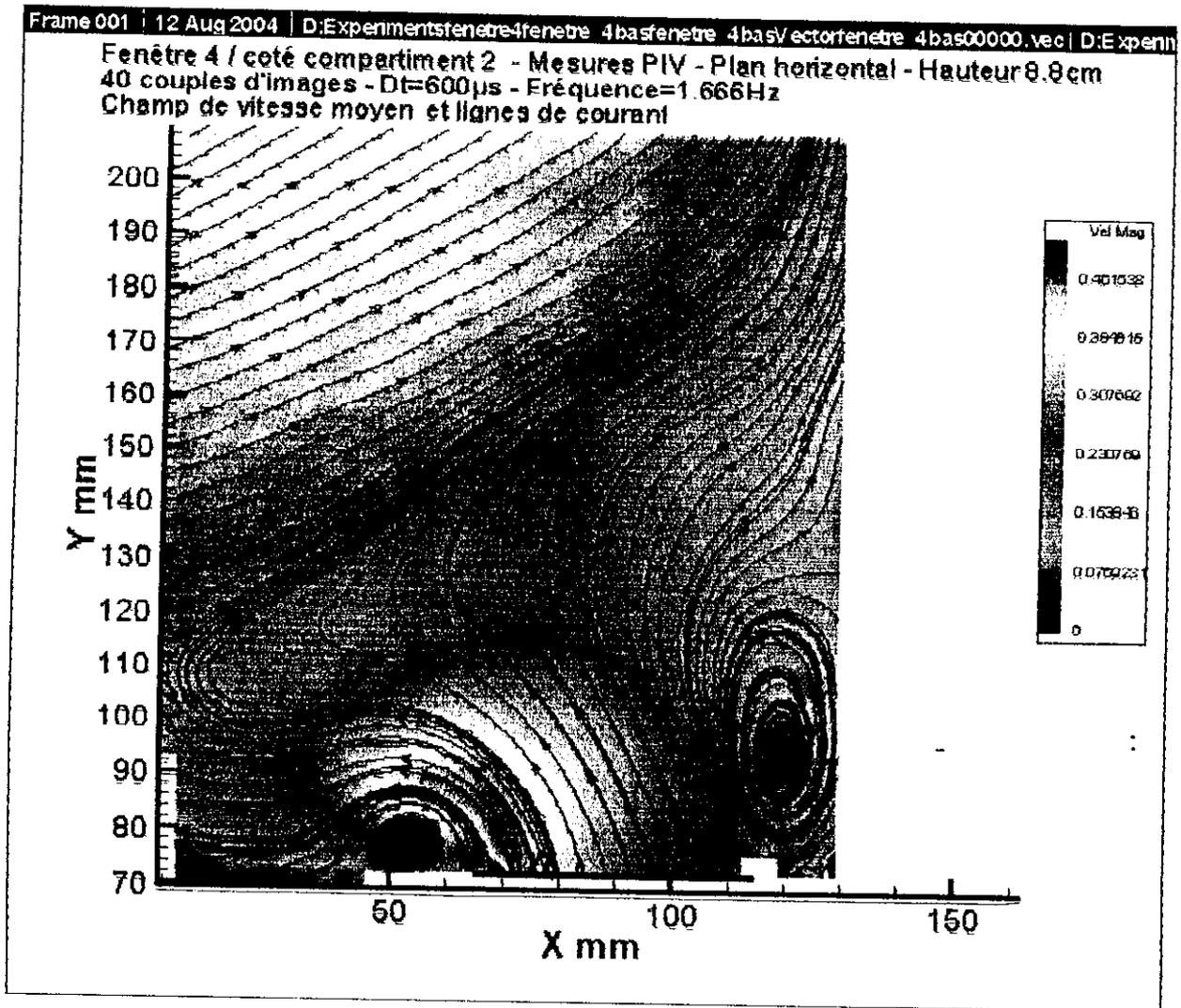


Figure 88. Plan PIV horizontal au niveau de l'ouverture F4 dans le compartiment C2 (m/s).

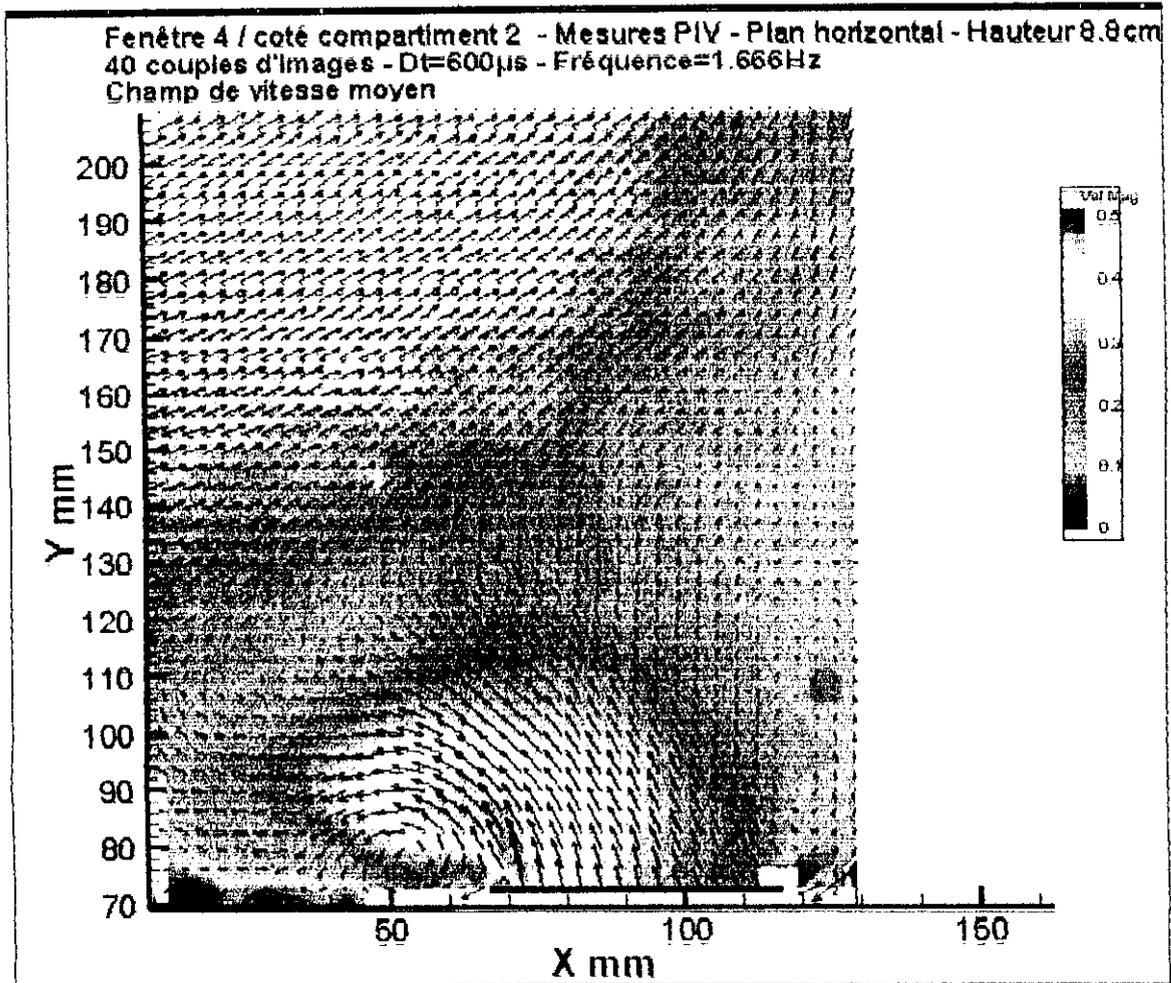


Figure 89. Plan PIV horizontal au niveau de l'ouverture F4 dans le compartiment C2 (m/s).

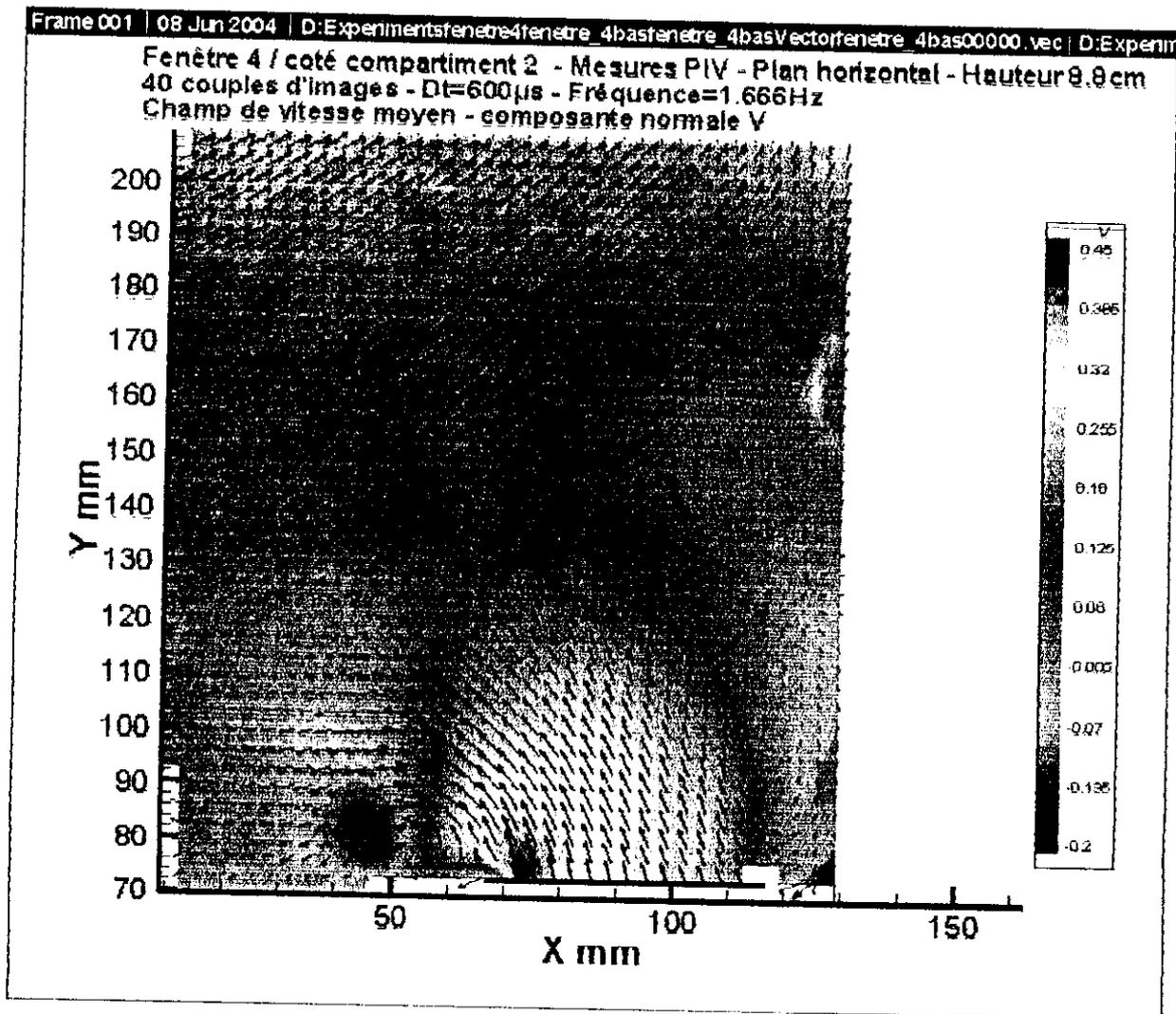


Figure 90. Plan PIV horizontal au niveau de l'ouverture F4 dans le compartiment C2 (m/s).

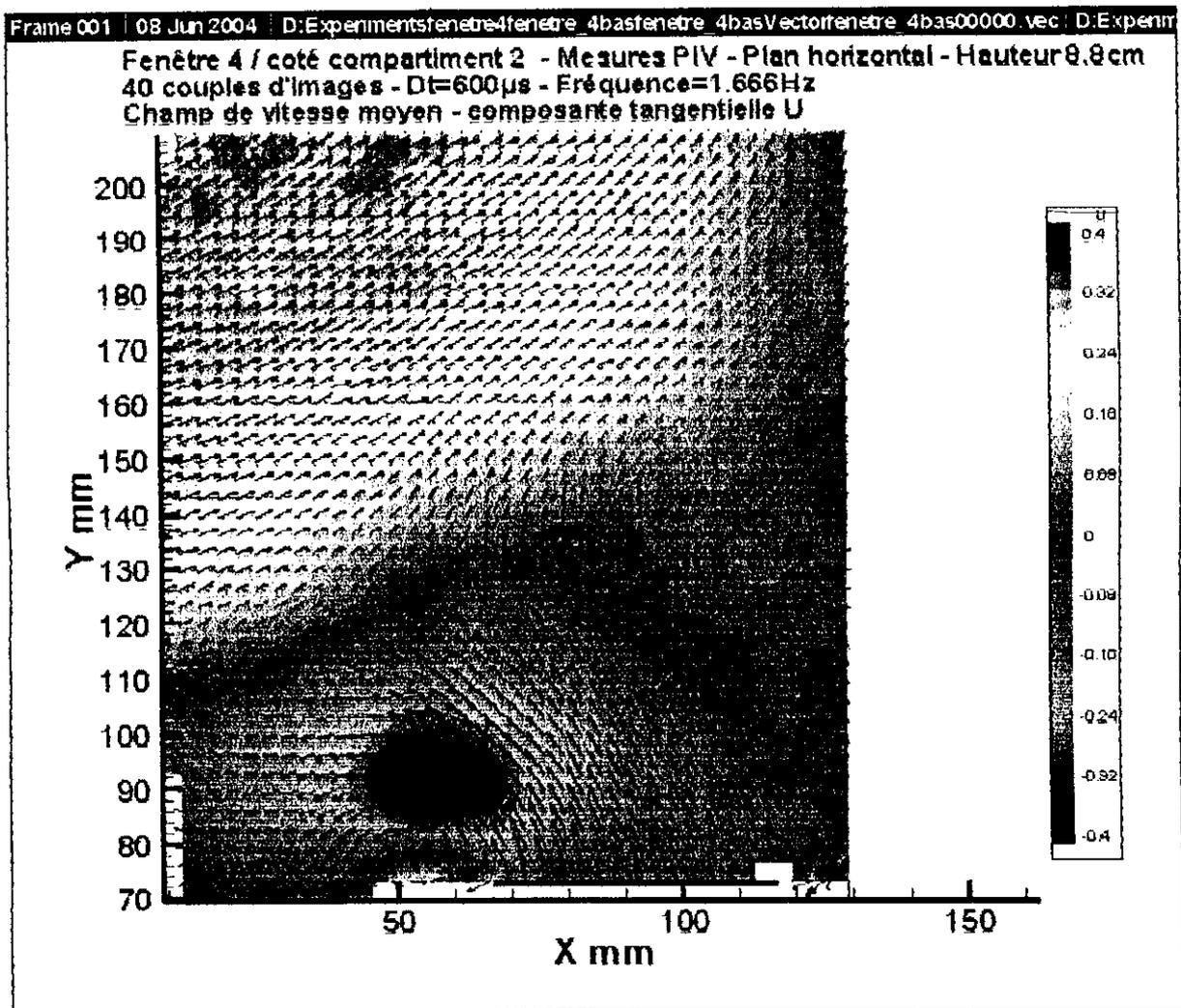


Figure 91. Plan PIV horizontal au niveau de l'ouverture F4 dans le compartiment C2 (m/s).

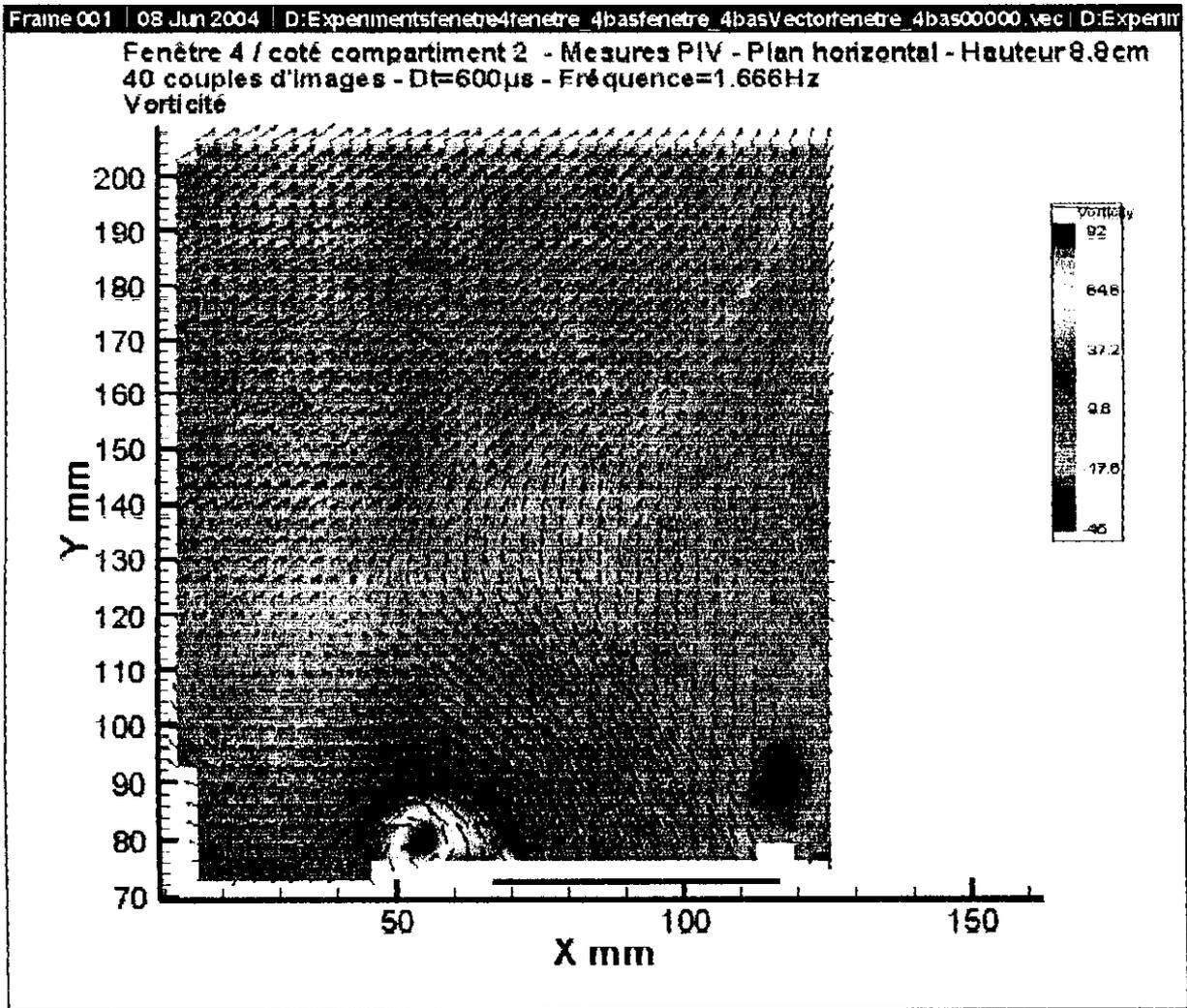


Figure 92. Plan PIV horizontal au niveau de l'ouverture F4 dans le compartiment C2 (m/s).

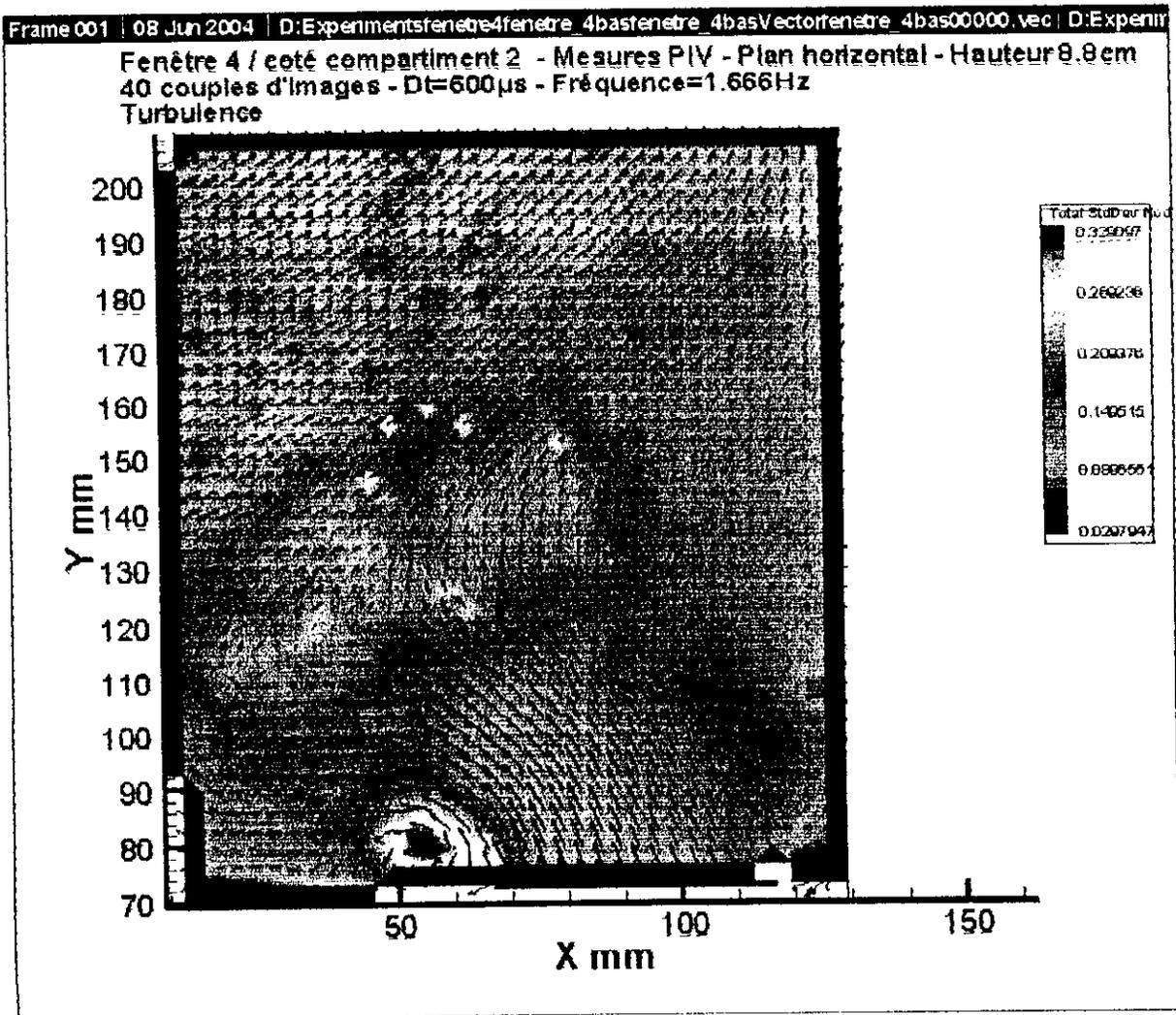


Figure 93. Plan PIV horizontal au niveau de l'ouverture F4 dans le compartiment C2 (m/s).

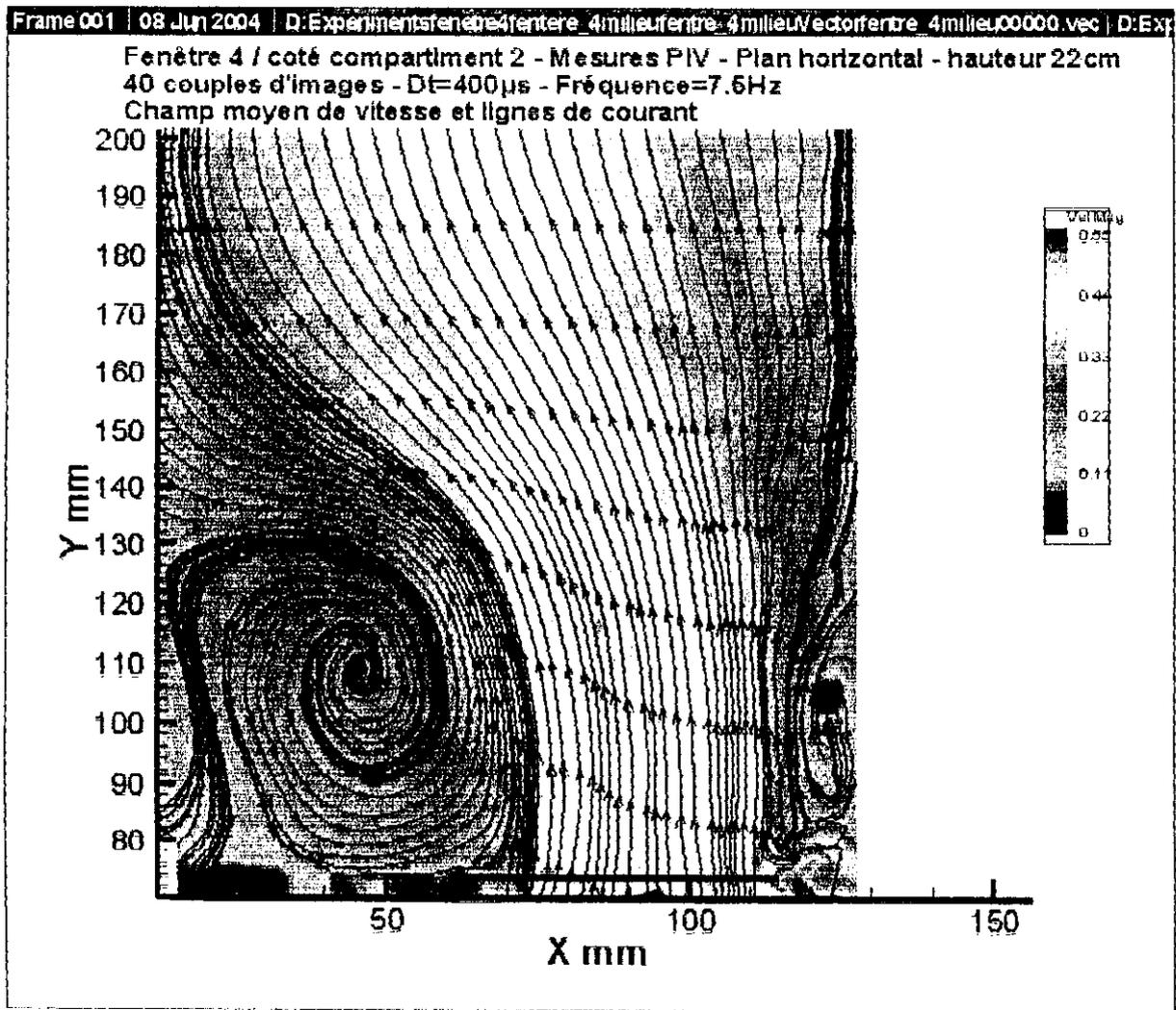


Figure 94. Plan PIV horizontal au niveau de l'ouverture F4 dans le compartiment C2 (m/s).

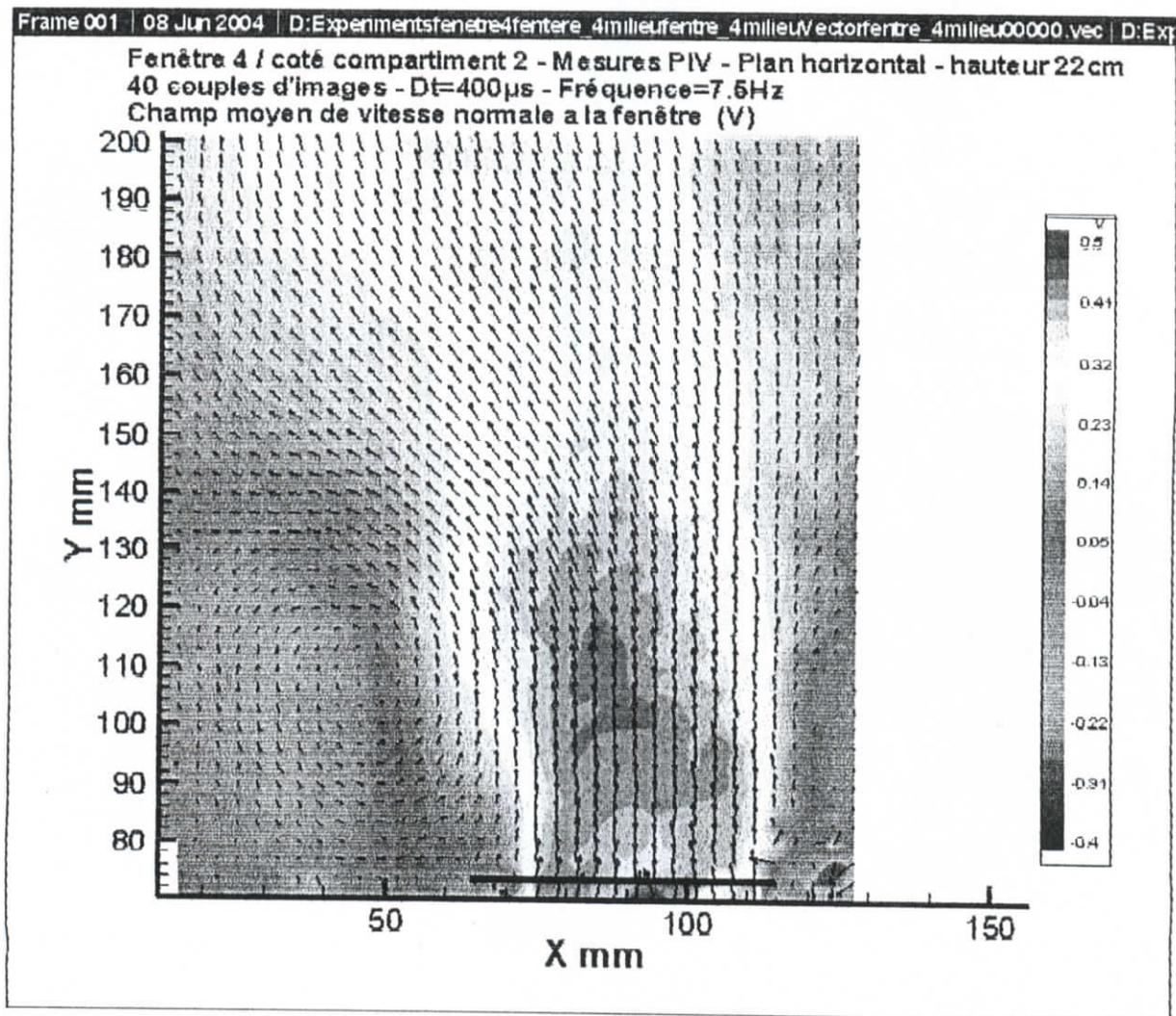


Figure 95. Plan PIV horizontal au niveau de l'ouverture F4 dans le compartiment C2 (m/s).

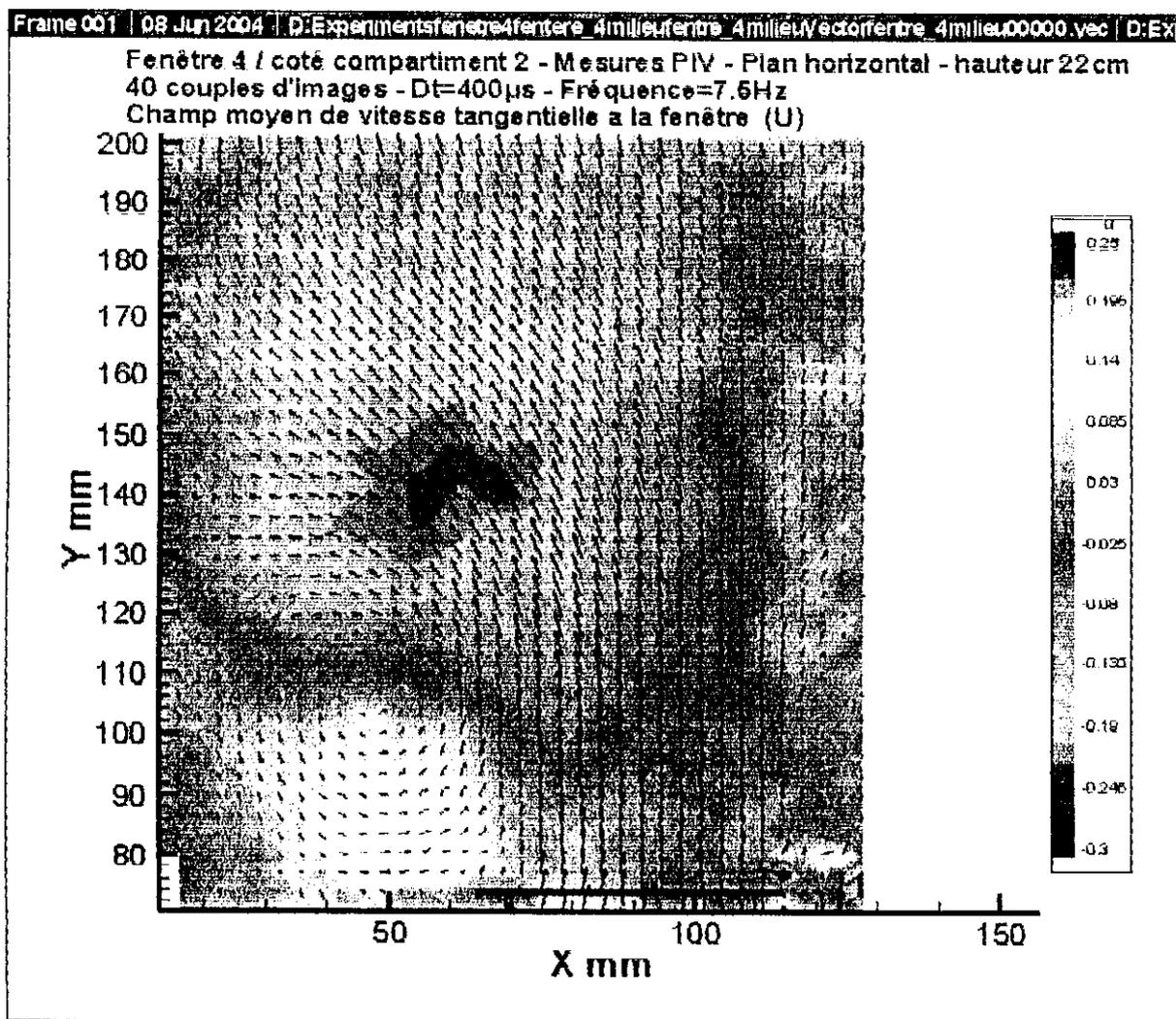


Figure 96. Plan PIV horizontal au niveau de l'ouverture F4 dans le compartiment C2 (m/s).

### 5.1.3. Visualisations par tomoscopie laser

Les visualisations par tomoscopie laser ont été pratiquées dans les trois compartiments. Il a été utilisé un générateur de fumée de spectacle pour ensemençer l'écoulement.

Les visualisations ne se sont révélées être exploitables et intéressantes qu'au niveau de la jonction entre le compartiment C1 et C2. Le plan laser a été positionné horizontalement et la caméra vidéo placée avec une vue plongeante sur la maquette.

Les images montrent l'écoulement tangentiel à l'ouverture F1, mais surtout chose qui n'avait pu être observée jusqu'alors, l'écoulement oblique traversant l'ouverture F2.

Les visualisations laser font ressortir un écoulement tangentiel à l'ouverture F1, décrivant un arc entre ses deux extrémités. Une partie de ce flux passe du compartiment C1 vers le compartiment C2 en direction de l'ouverture F3.

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

### 5.1.4. Expérience avec les fils de laine

Dans cette expérience, on se sert de petits fils de laine dont l'extrémité est collée sur le plafond de la maquette pour essayer de comprendre le mouvement global de l'air à ce niveau.

Rappelons qu'il est très probable que les fumées se propagent en hauteur, d'où l'intérêt d'un tel test.

Les fils de laine ont une longueur de 6 cm, ce qui est suffisant pour s'incliner dans le sens de l'écoulement.

Les fils dont on ne peut distinguer l'orientation, sont représentés par plusieurs flèches, ils indiquent la présence probable d'un centre de tourbillon, tandis que les fils représentés par des cercles, paraissent immobiles, comme ceux présents dans le compartiment C3 (Figure 97).

Les fils placés au niveau de la sortie des ventilateurs et sur les ouvertures montrent bien le mouvement de l'air. Comme par exemple, sur le ventilateur de gauche, où on remarque l'inclinaison du fil placé devant lui, et qui suit le mouvement de refoulement.

Cette expérience, nous a permis de tracer les lignes de courant de la figure 97 :

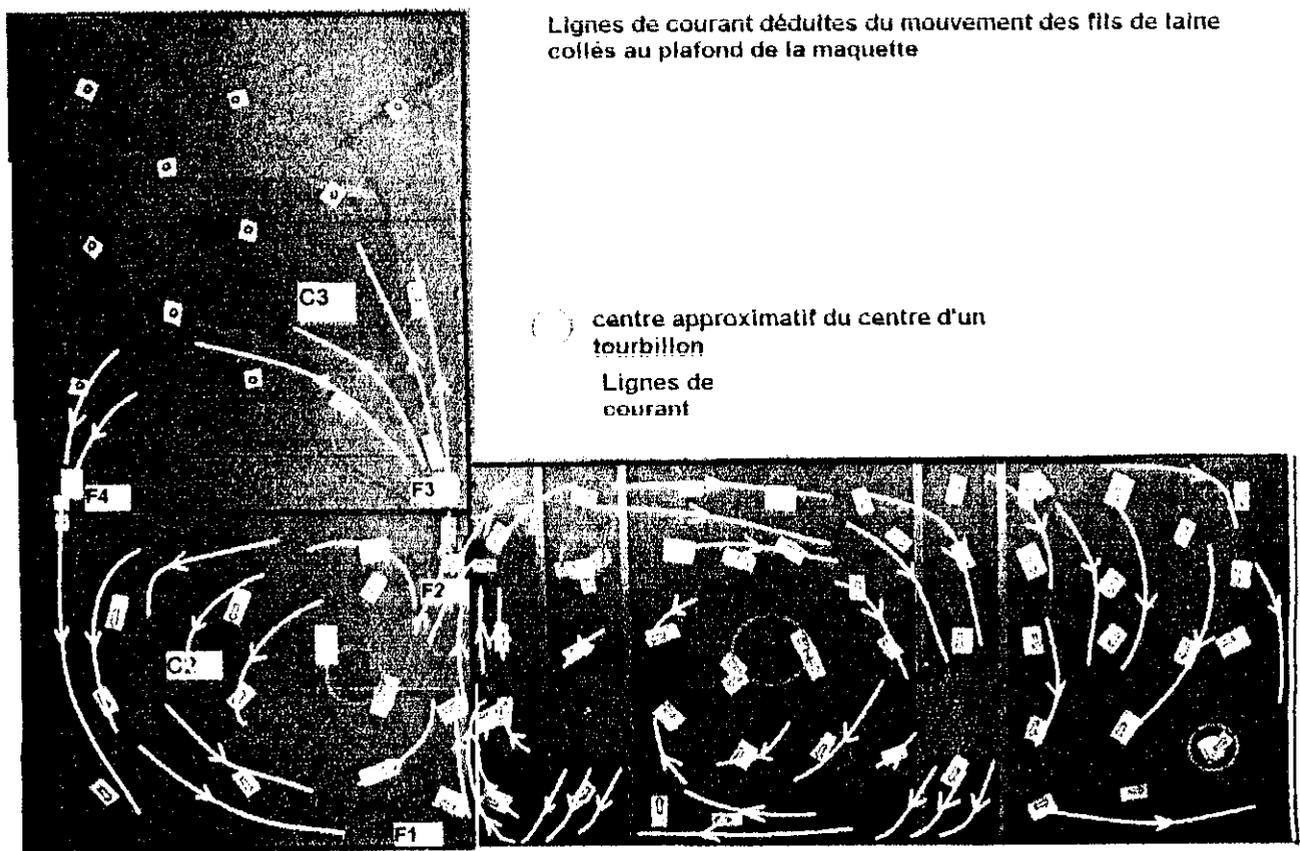


Figure 97. Lignes de courant

### 5.1.5. Résultats expérimentaux et simulations numériques

Les résultats expérimentaux de la présente étude ont été comparés avec les résultats des simulations numériques réalisées avec le code Fluent [38].

Des écarts importants dans les profils de vitesse au niveau des ouvertures, sont constatés (Figure 98). Cependant, les lignes de courant sont sensiblement les mêmes et les flux d'air à travers chaque ouverture sont correctement dirigés. Ce qui nous amène donc à dire que, qualitativement les simulations numériques sont confortées par les mesures expérimentales, mais quantitativement elles ne reproduisent pas les écoulements réels (Figures 99 et 100).

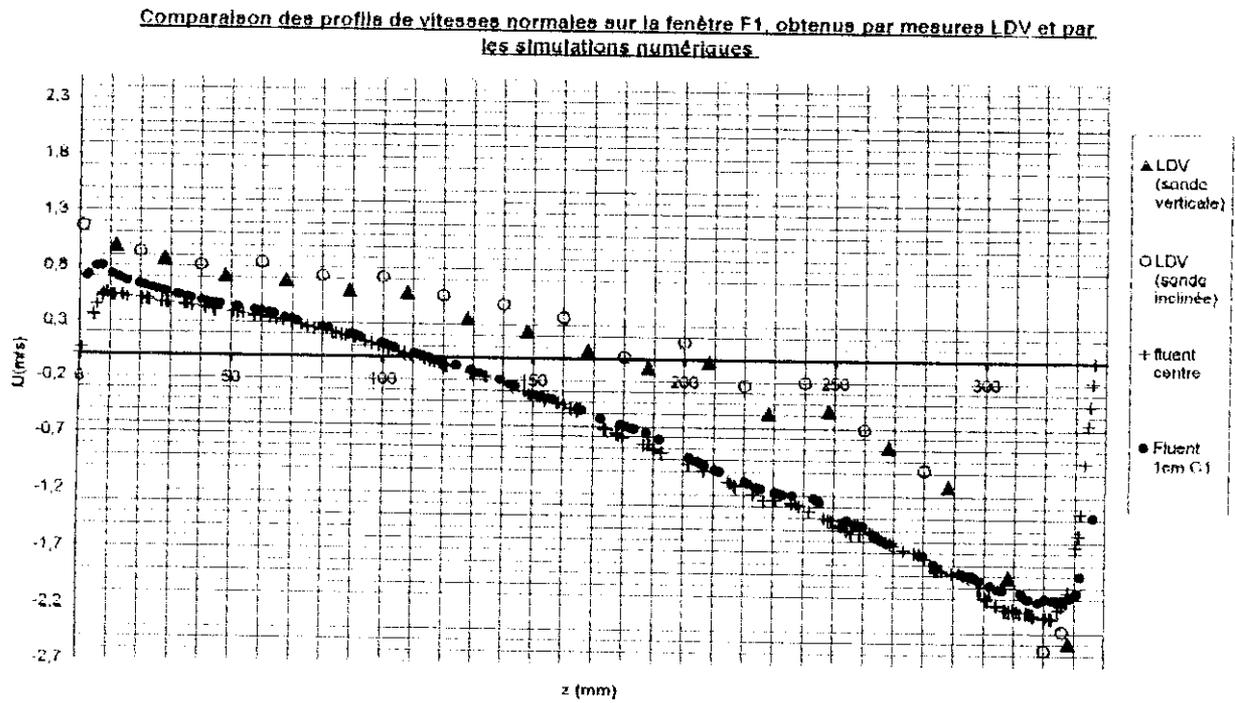


Figure 98. Comparaison des résultats expérimentaux et numériques sur l'ouverture F1

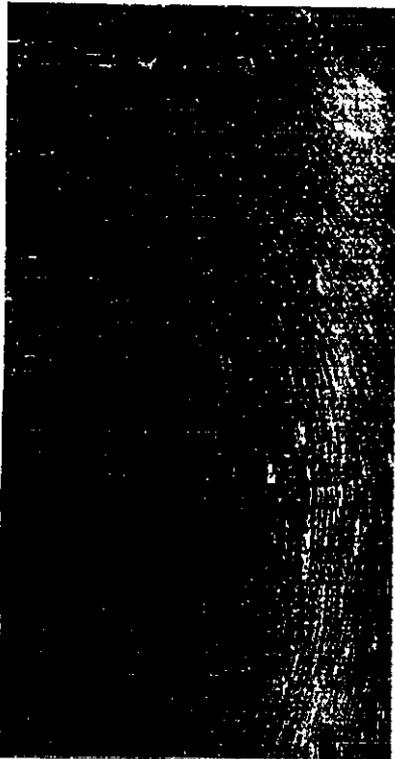


Figure 99. F1 résultats Fluent



Figure 100. F1 plan PIV (voir Fig.71)

Sans avoir nous-mêmes mené de simulations numériques, nous pouvons avancer quelques observations sur ce qui nous semble être à l'origine des différences constatées :

- Le calcul s'y déroule en stationnaire, alors que des structures tourbillonnaires instationnaires et intermittentes ont été observées. L'hypothèse d'un écoulement stationnaire a probablement été la première source d'erreurs ;
- Les ventilateurs ont été modélisés de façon très sommaire en entrant simplement comme conditions aux limites velocity outlet à l'aspiration et velocity inlet au refoulement ;
- Le mouvement de rotation du fluide en dessous du ventilateur (au niveau de l'aspiration), causé par la rotation du rotor n'est pas reproduit. Or ce mouvement influe en grande partie sur l'écoulement au niveau de l'ouverture F1 et de l'ouverture F2 par lesquelles les courants d'air sont générés dans les compartiments C2 et C3 ;
- Le modèle introduit dans la simulation est le modèle  $K-\epsilon$  standard, qui est mal adapté aux écoulements complexes en présence d'instationnarités et au voisinage de parois. Le modèle  $k-\epsilon$  est réputé pour ses faibles performances dans les couches de mélange et les couches limites non planes [28]. Sachant que la géométrie du convertisseur présente de nombreuses arêtes vives, provoquant le décollement des couches limites ainsi que des instabilités de couches de mélange, on peut émettre quelques réserves sur l'utilisation d'un tel modèle.

### 5.1.6. Conclusions

Les mesures PIV ont été indispensables à la caractérisation de l'écoulement à la sortie des ventilateurs. Les mesures LDV nous ont renseignés de façon plus précise sur le niveau de turbulence.

L'air est aspiré par le bas des ventilateurs et refoulé par leur face avant. Le flux refoulé par le ventilateur V1 impacte sur la paroi et se dirige parallèlement à celle-ci vers le refoulement du ventilateur V2 avant d'être dévié par l'éjection de ce ventilateur.

Par contre le flux refoulé par le ventilateur V2 se dirige vers l'ouverture F1, et se départage en deux parties. La première partie sort du compartiment C1 vers le compartiment C2, tandis que la deuxième partie est entraînée par le mouvement d'aspiration du ventilateur V2, qui est situé à proximité de cette ouverture.

L'écoulement à travers l'ouverture F4 est dû à l'introduction d'un débit dans le compartiment C3 par l'ouverture F3. La conservation de la masse impose donc (écoulement incompressible), que ce même débit ressorte par l'ouverture F4.

Les animations des champs de vitesse instantanés obtenus par PIV, illustrent très bien la non stationnarité de l'écoulement.

Enfin, nous pouvons affirmer, que nos mesures sont qualitativement semblables aux résultats des simulations numériques.

## 5.2. Simulations de propagation de fumées d'incendie

A ce stade de l'étude, nous pouvons présager de la trajectoire globale de fumées qui suivraient l'écoulement de l'air. Mais les mesures de vitesse et les visualisations ne couvrent pas l'ensemble de la maquette. De plus, la présence de gaz chauds de densité inférieure à l'air, modifie considérablement l'écoulement. Les fumées peuvent prendre des trajectoires opposées à celles de la ventilation, particulièrement dans les zones de faible vitesse. Comme c'est le cas dans les tunnels où l'on observe une propagation de fumée dans le sens opposé à celui de la ventilation appelée "nappe de retour" (pour certaines vitesses de ventilation) [20].

Nous ignorons la cinétique des fumées. Nous devons déterminer par exemple, si des fumées émises dans le compartiment C3, peuvent se propager suffisamment rapidement et si ces fumées peuvent traverser les fenêtres de communication se situant à une hauteur inférieure à celles-ci, sans trop de difficultés.

Dans les compartiments C2 et C3, on peut s'attendre à ce que la fumée s'élève, se stratifie en hauteur et se répande horizontalement selon la direction de l'écoulement tandis que dans le compartiment C1, il soit peu probable d'observer une stratification des fumées en raison de l'agitation qui y règne. Cela reste cependant à vérifier.

Par conséquent, la simulation de propagation de fumée est indispensable à cette étude.

Pour cela, il convient avant tout, de simuler le panache d'un feu de façon la plus réaliste possible, sachant que la maquette ne peut résister à des températures élevées.

Une technique de mesure de cette propagation, prenant en compte le caractère instationnaire du problème, doit être, aussi, trouvée.

### 5.2.1. Modèle expérimental

Dans la dynamique d'un panache de fumées d'un feu, les forces de flottabilité sont prépondérantes [21]. Il convient donc de les modéliser en priorité et de les reproduire lors des simulations.

Nous choisissons donc d'utiliser un modèle dit, de fumée froide, composée d'un mélange d'air et d'hélium [20]. Cette technique, de mise en œuvre simple, permet de reproduire les écarts de masse volumique d'un incendie sur une maquette en matériaux inflammables.

L'hélium est un gaz de faible masse volumique par rapport à celle de l'air. En fait, sa masse volumique correspond à celle de l'air à une température approximative de 1500 °C, ce qui permet de balayer une grande plage de puissance. Il est largement distribué, et facile à stocker, et offre une durée d'utilisation appréciable. Il est inerte et non toxique.

Le mélange est incolore, il doit par conséquent être marqué par un traceur.

La simulation du panache de l'incendie par le mélange air-hélium a l'avantage de permettre de simuler différentes puissances de feu en jouant sur la proportion de ce mélange et sur le débit. Elle garantit en outre une mise en œuvre simple et peu coûteuse des expérimentations tout en s'affranchissant des contraintes thermiques qu'un feu réel induirait sur la structure de la maquette.

Cependant, cette technique ne permet pas de reproduire les échanges thermiques tels que le rayonnement, les échanges pariétaux, le refroidissement des fumées stratifiées et donc la diminution des effets de la force de gravité (flottabilité) [22].

Remarque :

Lors des expérimentations, une attention particulière a été apportée à l'étanchéité de la maquette. Toutefois, de faibles fuites ont été constatées. Ces fuites sont suffisamment faibles et réparties pour ne pas modifier l'écoulement interne.

Nous rappelons les propriétés physiques de l'air et de l'hélium (**Tableau 6**) :

**Tableau 6. Propriétés physiques de l'air et de l'hélium**

	Densité $\rho$ (Kg/m <sup>3</sup> ) à 25°C	Chaleur spécifique à pression constante Cp (J/Kg- K)	Conductivité thermique k (w/m-K)	Viscosité dynamique $\mu$ (kg/m-s)	Masse molaire M (g/mol)	Diffusivité moléculaire D (m <sup>2</sup> /s)	Diamètre effectif de collision $\sigma$ (Å°)
He	0.163	5193	0.152	1.99*10 <sup>-5</sup>	4.0026	7*10 <sup>-5</sup>	2.55

air	1.184	1006.43	0.0242	$1.7894 \cdot 10^{-5}$	28.966	$7 \cdot 10^{-5}$	3.711
-----	-------	---------	--------	------------------------	--------	-------------------	-------

### L'augmentation de pression

Le modèle expérimental présenté implique l'introduction dans la maquette d'une quantité importante de fluide. La maquette étant, au même titre que le système réel, fermée, cette injection va engendrer une surpression. Cette surpression est en partie atténuée par les fuites qui tendent à rétablir la pression atmosphérique.

En appliquant la loi de gaz parfaits au fluide occupant la maquette, on trouve que l'injection du mélange pendant une minute à un débit de 100l/min provoque une augmentation de pression de 6,3%. Cette variation de pression est faible et correspond à une élévation de température de 18,8°K. L'augmentation de la pression due à l'injection du mélange n'est donc pas problématique, puisqu'elle reproduit celle engendrée par l'échauffement généré par un incendie réel.

#### 5.2.1.1. Hypothèses et restrictions

- Dans ce travail, la propagation de l'incendie ne sera pas abordée. Nous supposons la présence d'un foyer sans considérer sa progression. Cette restriction dans notre étude n'en diminue pas son intérêt, puisque la détection doit impérativement survenir avant toute propagation du feu, autrement le système de détection sera considéré en échec. De plus les matériaux utilisés sur des systèmes aussi sensibles que celui étudié, présentent une résistance au feu accrue ;
- Seule l'énergie de convection thermique de l'incendie est simulée ;
- Les transferts radiatif et conductif d'un incendie réel ne seront pas simulés ;
- L'écoulement est incompressible ;
- On signale que dans un incendie réel les fluctuations de température sont grandes et de l'ordre de 100%. Notre modèle expérimental ne reproduit pas les effets de ces fluctuations ;
- Vu la complexité des phénomènes intervenant dans l'évolution d'une fumée on peut considérer l'écoulement diphasique air-fumée. Expérimentalement, il serait difficile de différencier les différents composants de la fumée (CO<sub>2</sub>, CO, suies, ...). De plus nous ignorons la nature exacte du combustible et des produits de combustion. Cette hypothèse est acceptable car il a été observé que les différents produits de la combustion suivaient la même trajectoire [36].
- Nous supposons que le traceur et le mélange air-hélium se propagent de façon identique sur toute la durée d'une simulation.
- Nous supposons les effets de l'augmentation de la pression dans l'enceinte sur la propagation de la fumée négligeables.

Signalons, que les expérimentations menées en laboratoire consistant en l'injection de gaz de faible densité (y compris de l'air chaud) dans de l'air ambiant, ont témoigné d'une largeur « dynamique de panache »<sup>1</sup> inférieure à celle mesurée sur des panaches de feux réels.

#### 5.2.1.2. La similitude thermique massique

Nous cherchons en premier lieu à établir les règles de similitude nécessaires pour calculer les proportions du mélange air-hélium qui va être utilisé lors des simulations d'incendie.

<sup>1</sup> Distance de l'axe du panache à laquelle la vitesse ascendante peut être considérée faible relativement à la vitesse au centre du panache.

Identifions d'abord les nombres adimensionnels caractérisant les phénomènes qui se produisent dans un panache thermique, et tentons de faire ressortir des analogies avec un panache massique tel que celui du modèle expérimental utilisé.

**-Le nombre de Reynolds :**

Il caractérise le régime de l'écoulement, il représente le rapport des forces d'inertie sur les forces de viscosité.

$$Re = \frac{ud}{\nu} \quad (39)$$

**-Le nombre de Froude :**

Il représente le rapport des forces d'inertie sur les forces de gravité. (Il caractérise aussi le rapport de l'énergie cinétique sur l'énergie potentielle) [20] :

$$Fr = \frac{u^2}{gd}$$

**-Le nombre de Prandtl :**

Il représente le rapport de la diffusion de quantité de mouvement par rapport à la diffusion thermique.

$$Pr = \frac{\mu C_p}{\lambda} \quad (40)$$

-Le nombre de Schmidt : rapport entre la diffusion visqueuse et la diffusion moléculaire.

$$Sc = \frac{\nu}{D} \quad (41)$$

Avec :

u : vitesse de référence

d : Longueur de référence

$\lambda$  : Conductivité thermique.

$D_{i,j}$  est la diffusivité moléculaire des espèces i,j d'un mélange binaire. Elle est donnée par la théorie cinétique des gaz (voir Annexe 7). Elle donne pour la diffusion de l'hélium dans l'air :  $D = 7 * 10^{-5} m^2/s$ .

**Remarque 1 :**

Si en particulier, les transports de quantité de mouvement, de chaleur et de matière par diffusion moléculaire sont semblables, les deux nombres de Prandtl et de Schmidt sont proches de 1, les profils de vitesse, de concentration et de température sont les mêmes : on parle alors d'analogie de Reynolds.

**Remarque 2 :**

La similitude du nombre de Reynolds est délicate à satisfaire, mais le régime du panache de fumées est turbulent aussi bien pour les simulations que pour un incendie réel.

Afin de simuler au mieux un panache thermique, il est nécessaire que le profil de densité dans la panache thermique soit semblable au profil de densité dans le panache massique.

En supposant tous le gaz parfaits, dans un panache thermique, les effets mis en jeu sont ceux de la diffusion thermique, du transport par les mouvements de convection naturelle et des diffusions turbulente et moléculaire. Alors que dans un panache massique, la diffusion thermique n'intervient pas puisque le panache est isotherme.

On a :

$$\frac{\lambda_{th}}{\rho \cdot C_p} \sim D_{air-He} \sim 10^{-5} m^2 / s \quad (42)$$

Cependant, ceci n'est pas suffisant pour dire que la diffusion moléculaire de l'hélium dans l'air simule bien la diffusion thermique du panache réel. Une écriture plus rigoureuse pour s'assurer d'une meilleure identité des panaches thermique et massique voudrait, que la diffusion des produits de combustion et la diffusion turbulente soient également prises en compte. Nous serons tentés d'écrire la condition suivante :

$$v_{t-r\acute{e}el} + \left( D_{prodcomb-air} + \frac{\lambda_{th}}{\rho_{th} \cdot C_p} \right) \sim D_{air-He} + v_{t-simul} \quad (43)$$

Cependant, cette dernière écriture est assez hasardeuse et ne peut décrire la complexité des phénomènes qui se manifestent.

Cette analogie est d'autant moins vérifiée que le dégagement de chaleur est important, car, comme vu précédemment, la diffusion moléculaire est proportionnelle à la température. Ainsi dans le cas d'un panache thermique, la diffusion moléculaire des produits de combustion dans l'air frais est favorisée par la chaleur, tandis que la diffusion de l'hélium se fait à température ambiante. Cette diffusion va donc s'ajouter à la diffusion thermique rendant une analogie aérodynamique parfaite impossible.

Comme il a déjà été vu au **chapitre 3.2**, la contribution de la diffusion turbulente est importante. Si l'on suppose que les dynamiques de l'écoulement réel et de l'écoulement simulé sont semblables, car en grande partie dictées par l'écoulement d'air induit par les ventilateurs, on peut admettre que la diffusion turbulente est la même pour les simulations et dans la réalité. Autrement dit : les diffusions turbulentes des deux panaches (thermique et massique) sont équivalentes car elles ne sont associées qu'aux effets d'inertie et de flottabilité dont la similitude est supposée parfaite.

On peut donc admettre que :  $v_{t-r\acute{e}el} \sim v_{t-simul}$

Face à la difficulté d'établir une similitude parfaite, nous nous contenterons d'une similitude par les nombres de Froude massique et thermique :

Le nombre de Froude s'écrit :

$$\text{Pour un panache massique : } Fr_m = \frac{u_m^2}{g \cdot \frac{\Delta\rho}{\rho} \cdot L_m} \quad (44)$$

$$\text{Pour un panache thermique : } Fr_{th} = \frac{u_{th}^2}{g \cdot \beta \cdot \Delta T \cdot L_{th}} \quad (45)$$

Avec  $L_{th}$  et  $L_m$  respectivement les longueurs de référence du panache thermique et du panache massique qu'on supposera égales.

$u_{th}$  et  $u_m$  sont respectivement les vitesses d'émission du panache thermique et massique.

Avec  $\beta$  coefficient de dilatation thermique.  $\beta = \frac{1}{T_0}$  dans l'hypothèse des gaz parfaits ( $T_0$  : Température ambiante), et  $g$  la gravité.

$$\beta = -\frac{1}{\rho} \left( \frac{\partial \rho}{\partial T} \right) \quad (46)$$

Le critère de similitude du phénomène thermique et massique s'écrit donc sous la forme de la conservation du nombre de Froude densimétrique :

$$Fr_m = Fr_{th} \quad (47)$$

Ce qui donne :

$$\frac{\Delta \rho}{\rho_s} = \frac{\Delta T}{T_0} \quad (48)$$

Cette relation peut être retrouvée en écrivant simplement que le coefficient de dilatation thermique pour un gaz parfait  $\beta = -\frac{1}{\rho} \left( \frac{\partial \rho}{\partial T} \right) = \frac{1}{T_0}$ .

La différence de densité  $\Delta \rho$  est l'écart de densité entre le mélange air-hélium et l'air ambiant qui correspond à la différence de température entre les fumées et l'air ambiant

$$\Delta \rho = \rho_{air} - \rho_s \quad (49)$$

et nous avons :

$$\rho_s = X_{air} \rho_{air} + X_{Helium} \rho_{Helium} \quad (50)$$

$$X_{air} + X_{Helium} = 1 \quad (51)$$

A partir des relations (48), (49), (50) et (51), la proportion de l'hélium dans le mélange (fraction molaire) est :

$$X_{He} = \frac{\rho_{air} \Delta T}{\rho_{air} - \rho_{Helium} T_0 + \Delta T} \quad (52)$$

Avec  $\rho_s$  est la masse volumique du mélange gazeux.

La **Figure 101** représente la variation de la proportion d'hélium dans le mélange en fonction de l'écart de température simulé.

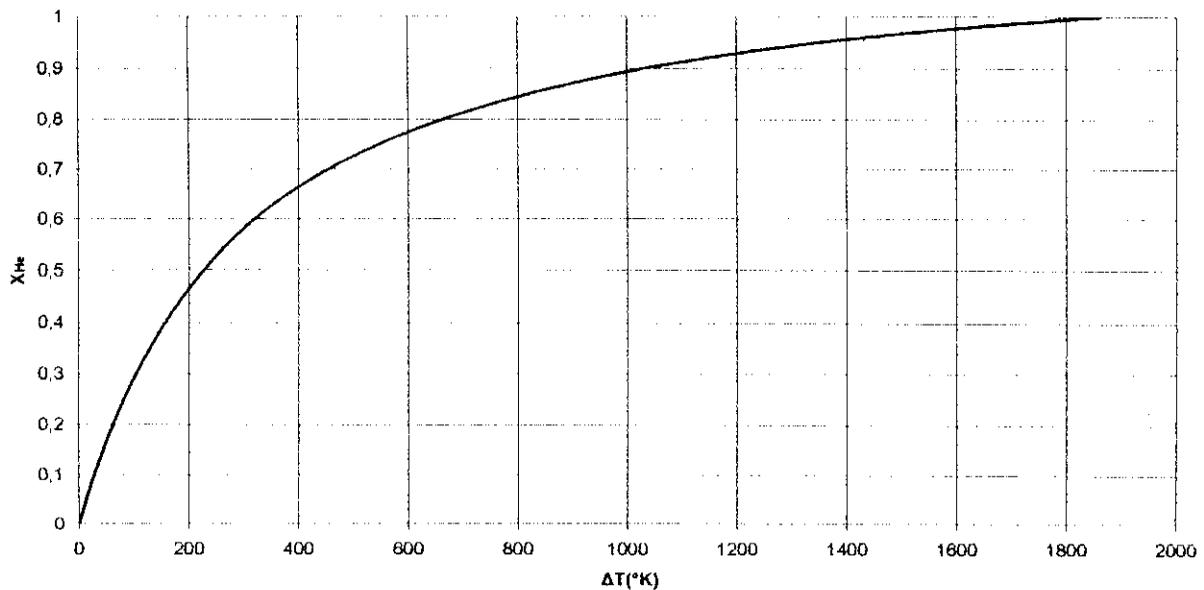


Figure 101. Proportion d'hélium dans le mélange en fonction de l'écart de température

### 5.2.1.3. Puissance du feu simulée

Les données thermiques d'énergie calorifique de combustion nous renseignent uniquement sur la répartition du combustible dans le système. Nous ne pouvons en déduire la puissance d'un éventuel incendie car nous ignorons la nature exacte des matériaux présents dans l'enceinte et donc le temps nécessaire à leur combustion (temps qui nous permettrait de déduire une puissance moyenne).

De plus, l'incendie est un phénomène fortement instationnaire, puisqu'il y'a à la fois variation de la température, de la quantité de combustible et de comburant, ainsi, le taux de réaction évolue en fonction du temps, de même que la quantité de chaleur dégagée et du débit de fumées.

Nous ignorons donc l'inflammabilité des matériaux, le temps de combustion et la loi de montée en puissance de l'incendie. Tout cela entrant dans le cadre de la cinétique chimique de la combustion.

Il a été évalué qu'entre 20 et 40% de l'énergie de combustion est perdue par rayonnement.

L'énergie transmise par convection par unité de temps, d'un incendie peut s'écrire

$$P_{conv} = \rho \cdot C_p \cdot Q \cdot \Delta T \quad (53)$$

$C_p$  : La chaleur spécifique des fumées

$\rho$  : Densité des fumées.

$\Delta T$  : Ecart de température entre l'air ambiant et les fumées.

$Q$  : débit volumique des fumées

Ainsi, il nous est possible de contrôler la puissance simulée en agissant sur deux paramètres de l'expérience qui sont le débit de fumées et la proportion d'hélium correspondant à la différence de température simulée.

Nous avons choisi de simuler une puissance totale de 616W, soit une puissance convective d'environ 410W. Ce qui correspond à une énergie dégagée de 37KJ en une minute. Rappelons que l'énergie calorifique de combustion du compartiment C2 est de 187MJ.

Il a été décidé de simuler une seule puissance de feu pour les différentes sources afin que les résultats obtenus soient comparables et pouvoir ainsi, évaluer la propagation des fumées et juger des performances relatives des différentes configurations de détection.

Des puissances importantes ne peuvent être simulées à cause du confinement du système. Une injection importante de fumées provoquerait une augmentation significative de la pression interne engendrant des fuites importantes de fluide qui risqueraient de modifier substantiellement l'écoulement. De plus, nous cherchons à simuler des feux couvant et garantir une détection la plus rapide possible dès la première phase de l'incendie, par conséquent, des puissances supérieures à une centaine de kilowatt ne peuvent être atteintes.

Ainsi nous obtenons un écart de température entre l'air ambiant et les fumées, de 200°C. Cet écart de température est tout à fait réaliste puisque l'air à l'intérieur du convertisseur en fonctionnement atteindra certainement des températures supérieures à la température ambiante du laboratoire d'expérimentations où les simulations ont été pratiquées. De plus, il est probable en cas de dysfonctionnement qu'une élévation de température de l'air dans l'unité précède l'incendie, de sorte que l'émission des fumées se fasse dans une ambiance dépassant largement les 25°C des conditions d'expérimentations.

Remarque :

Une méthode plus rigoureuse aurait consisté en l'évaluation de la chaleur de combustion moyenne des matériaux constituant l'unité (pouvoir calorifique). Puis, un hydrocarbure de formule chimique simple dont l'énergie spécifique de combustion est comparable à celle du combustible présent dans le convertisseur serait sélectionné. À partir de ces données et de l'équation de combustion, une température de flamme adiabatique aurait été calculée en incluant une corrélation pour la fraction d'air entraîné dans le panache....

La chaleur de combustion moyenne pourrait être également pondérée par un facteur pour traduire la non-adiabaticité du phénomène (dissipation de la chaleur par rayonnement et par dissociation), et obtenir ainsi une température de flamme plus réaliste.

#### 5.2.1.4. Influence de la vitesse d'éjection du mélange

L'envergure  $l$  d'un jet en fonction de la distance  $x$  selon la direction d'éjection est donnée par la relation empirique  $l(x)=0.246x$

En supposant la conservation du débit du jet, on peut écrire :

$$V_j \cdot \pi \cdot D^2 = V_x \cdot \pi \cdot (0.246 \cdot x)^2 \text{ avec } \frac{V_x}{V_j} = 1\% \Rightarrow x \approx 40D \quad (54)$$

Avec  $V_x$  vitesse moyenne à la distance  $x$  de la source et  $V_j$  vitesse débitante à la source.

Ce petit calcul permet de donner un ordre de grandeur de la distance  $x$  à partir de laquelle le jet est d'une vitesse moyenne égale à 1% de la vitesse d'éjection.

Dans nos expérimentations le diamètre de la buse d'éjection  $D$  est 1cm. Sachant que la vitesse débitante du jet de fumées est de 21m/s pour un débit de 100l/min, l'inertie du panache sera donc faible à une hauteur de 40cm. Tandis que la hauteur du plafond du convertisseur est de 57cm. Les effets de l'éjection du panache auront à ce niveau grandement diminué.

Habli et Al, [24] évalue numériquement la distance entre la buse circulaire d'éjection d'un jet turbulent chauffé et la région où les forces de flottabilité deviennent prépondérantes à 50 fois le diamètre de la buse.

On peut également admettre que l'inertie du jet du mélange air-hélium, simule la hauteur de flamme. Car, la hauteur de la flamme et le débit de fumées sont tous deux proportionnels à la puissance du feu. Le débit du mélange étant directement lié à la vitesse d'éjection, la portée

du jet, c'est-à-dire, la distance sur laquelle les forces inertielles sont largement prépondérantes, évoluera dans le même sens que la puissance. Ainsi, on peut concevoir une analogie entre la zone de cœur potentiel du jet de fumées simulant le feu et la flamme.

Il est important de signaler, que lors des simulations menées pour notre étude, le nombre de Froude dépassait les 10 000. Par conséquent, les modèles cités dans le **chapitre 3**, ne peuvent être, appliqués pour les simulations avec fumées froides que nous avons pratiquées. Car ces modèles, sont valables pour des panaches à un nombre de Froude faible, c'est-à-dire pour des forces de flottabilités prédominantes sur la majeure partie du panache.

La vitesse d'éjection du mélange est donc, malheureusement, trop élevée, puisqu'elle entraîne l'intervention des effets inertiels dans la dynamique du panache.

La méthode expérimentale de simulation d'incendie employée souffre donc de cette imperfection.

### 5.2.2. Procédure expérimentale

L'ensemencement par des particules d'huile d'olive, comme pratiqué pour les mesures PIV et LDV, n'est pas envisageable, car pour produire une fumée suffisamment dense, il serait nécessaire d'injecter un débit important d'air, ce qui ne permet pas de simuler les conditions d'incendie. La technique d'ensemencement choisie ne doit pas introduire de débit de fluide supplémentaire.

La méthode d'ensemencement retenue est la génération de particules par réaction chimique de type acide base : acide chlorhydrique - ammoniac. Cette réaction procure des fumées blanches suffisamment opaques.



La taille des particules est suffisamment petite pour qu'elles suivent l'écoulement, et permettent des temps d'expérience relativement longs (jusqu' 10 min). Avec ce procédé, on diminue l'effet des débits supplémentaires.

L'air et l'Hélium sont mélangés dans une tuyère. Ils pénètrent ensuite dans une bouteille contenant de l'acide, ils emportent des gouttelettes et pénètrent dans une autre petite bouteille contenant la base, et le tout est injecté dans la maquette. (voir **Annexe 11**).

L'hélium est stocké dans de grandes bouteilles d'une capacité de 81m<sup>3</sup>, le réglage se fait par des vannes reliées à des débitmètres électroniques, pour pouvoir faire des réglages précis.

L'alimentation en air est assurée par un compresseur qui fournit de l'air comprimé.

Le plancher de la maquette a été percé de onze trous d'un diamètre de 10mm en différentes positions (quatre dans les compartiments C1 et C2 et trois dans le compartiment C3) (**Figure 103**), afin de permettre l'injection du mélange air-Hélium. La désignation de ces ouvertures est : Source N° du compartiment, N°de la source (**Annexe 13**).

A chaque expérience, le mélange n'est injecté qu'au niveau d'une seule source.

Un détecteur de fumées optique est fixé au centre du plafond de chaque compartiment, ce qui permet de comparer leurs temps de détection pour chaque scénario et de décrire la propagation de la fumée dans l'enceinte. Les temps de détection nous renseignent ainsi sur l'évolution de la fumée dans l'enceinte

Lors des tests, un chronomètre est enclenché dès l'injection des fumées. Il est arrêté lorsque le signal sonore d'alarme du détecteur retentit.

**Remarque 1 :**

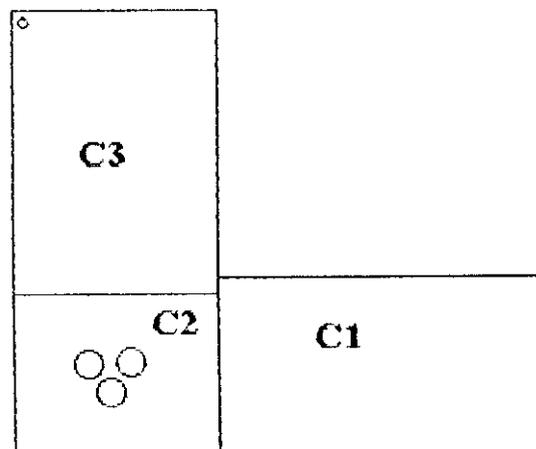
Après chaque simulation, la maquette est ouverte et l'air renouvelé afin de ne pas biaiser les mesures du test suivant.

Des tests préliminaires de répétabilité ont permis de s'assurer de la fidélité des détecteurs et de l'égalité de leurs niveaux de sensibilité (**Figure 102**) (**Annexe 15**).

**Remarque 2 :**

Des techniques expérimentales auraient permis le suivi de l'évolution de la teneur en hélium dans la maquette soit par prélèvement ponctuel par une sonde oxygène par exemple (mesure intrusive) ou par traitement d'images du profil de luminance d'un LASER éclairant l'écoulement (mesure non-intrusive) [25].

Un autre procédé dont l'exploitation serait intéressante, consisterait en l'utilisation d'une camera thermique pour filmer des simulations d'incendie par des fumées de gaz chauds.



**Figure 102. Positions des détecteurs pour le test préliminaire**

Ainsi, pour une puissance d'incendie donnée, une première série de mesures des temps de détection des trois détecteurs a été effectuée pour différents emplacements d'injection du mélange air-Hélium.

La composition du mélange injecté est de 45% d'Hélium et de 55% d'air (**Tableau 7**).

Une deuxième série de mesures réalisée avec injection d'air uniquement vise à évaluer, par comparaison avec les résultats de la première mesure, la contribution des forces de flottabilité dans la propagation de la fumée.

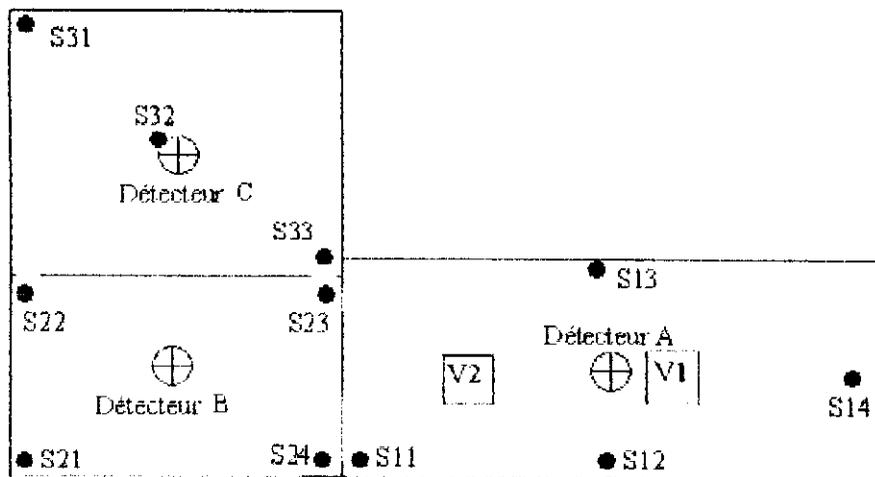


Figure 103. Répartition des sources d'injection du mélange air-Hélium, et des détecteurs

Tableau 7. Récapitulatif des paramètres des simulations

	$X_{air}$	$X_{hélium}$	Température simulée	Débit total (l/min)	Débit d'air (l/min)	Débit d'hélium (l/min)
1 <sup>ère</sup> série de mesures (mélange air-hélium)	55%	45%	200°C	100	55	45
2 <sup>ème</sup> série de mesures (air pure)	100%	0%	-	100	100	0

### 5.2.3. Matériel de détection utilisé

Le matériel de détection utilisé se base sur un principe optique comme expliqué au chapitre 4.1. On peut raisonnablement penser que la quantité de lumière diffusée par les fumées est proportionnelle à la concentration de ces fumées dans l'air.

La sensibilité des détecteurs de fumées optiques que l'on trouve dans le commerce est exprimée par un rapport d'extinction ou d'atténuation du signal par unité de longueur.

Les détecteurs employés lors des simulations d'incendie avaient une sensibilité de 2.06%±1.3% sur 0.3m (voir Annexe 12)

Des chicanes positionnées à la périphérie du capteur optique ne laissent passer que les particules de petite taille tout en empêchant les rayons lumineux d'y pénétrer.

La grosseur des particules pouvant entrer dans la cellule de détection ne dépasse pas 1mm de diamètre.

On a également fait des essais avec deux diodes infrarouges (émettrice et réceptrice), reliées à un oscilloscope. L'atténuation du signal lumineux par la fumée aurait induit une diminution de la tension aux bords de la diode réceptrice. Malheureusement, nos essais n'ont pas été concluants.

### 5.2.4. Temps de détection

Les résultats des simulations sont donnés dans les tableaux 8 et 9 :

**Tableau 8. Temps de détection. Résultats de la 1<sup>ère</sup> série d'expériences avec le mélange air-Hélium**

Position de la source		Temps de détection $t_1$ (s) ( $\pm 2s$ )			Ordre de déclenchement
Compartment	Désignation	Détecteur A	Détecteur B	Détecteur C	
Compartment C1	S11	25	63	120	A B C
	S12	32	80	137	A B C
	S13	16	76	135	A B C
	S14	27	76	136	A B C
Compartment C2	S21	70	18	101	B A C
	S22	66	14	70	B A C
	S23	40	15	29	B C A
	S24	62	16	127	B A C
Compartment C3	S31	77	45	16	C B A
	S32	80	46	15	C B A
	S33	96	75	15	C B A
Somme des temps de détection		591	524	910	

**Tableau 9. Temps de détection. Résultats de la 2<sup>ème</sup> série d'expériences sans hélium**

Résultats de la 2 <sup>ème</sup> série d'expériences avec injection d'air seulement					
Position de la source		Temps de détection $t_2$ (s) ( $\pm 2s$ )			Ordre de déclenchement
Compartment	Désignation	Détecteur A	Détecteur B	Détecteur C	
Compartment C1	S11	33	60	155	A B C
	S12	43	105	169	A B C
	S13	24	73	164	A B C
	S14	30	83	142	A B C
Compartment C2	S21	90	22	107	B A C
	S22	104	31	88	B C A
	S23	61	40	59	B C A
	S24	100	30	139	B A C
Compartment C3	S31	96	47	35	C B A
	S32	96	55	23	C B A
	S33	92	57	39	C B A

Nous dressons le tableau comparatif suivant (Tableau 10) :

**Tableau 10. Comparaison entre les résultats de la 1<sup>ère</sup> et 2<sup>ème</sup> séries d'expériences**

Position de la source		$t_1/t_2$ (%)		
Compartment	Désignation	Détecteur A	Détecteur B	Détecteur C
Compartment C1	S11	76	105	77
	S12	74	76	81
	S13	67	104	82
	S14	90	92	96
Compartment C2	S21	78	82	94
	S22	63	45	80
	S23	66	38	49
	S24	62	53	91
Compartment C3	S31	80	96	46
	S32	83	84	65
	S33	104	132	38

### **Observations et commentaires sur l'ordre de détection :**

Le premier tableau permet de faire ressortir trois ordres de déclenchement de l'alarme selon le compartiment où l'incendie est simulé :

- Dans le cas où le feu se déclare dans le compartiment C1, l'ordre de détection est A,B,C.
- Pour les scénarios d'incendie se déclarant dans le compartiment C2 l'ordre de détection est B,A,C.
- Enfin, l'ordre de détection des fumées d'un incendie survenant dans le compartiment C3 est C,B,A.

Seule exception à ces observations, la simulation d'incendie par la source S23. En effet, cette dernière a la particularité de se trouver au bas de deux ouvertures F2 et F3. A cet endroit, le flux d'air se scinde en deux pour se diriger vers le compartiment C1 à travers l'ouverture F2 et vers le compartiment C3 à travers l'ouverture F3. Une partie des fumées éjectées de la source S23 restera dans le compartiment C2 où elle est détectée en premier par le détecteur B, une autre fraction sera emportée par l'écoulement vers le compartiment C3 et déclenche l'alarme du détecteur C assez rapidement (29s). Enfin, après 40 secondes du début de la simulation, le détecteur A, stimulé par les fumées provenant de l'ouverture F2, donne l'alarme.

Nous remarquons donc, que pour une fumée émise dans un compartiment donné, l'ordre de déclenchement de l'alarme de chaque détecteur est indépendant de la position de la source dans ce compartiment.

Des ordres des détections répertoriés dans le **Tableau 8**, il apparaît clairement que le détecteur B placé dans le compartiment C2 présente les temps de détection les plus courts puisqu'il est dans toutes les configurations, le premier ou le deuxième détecteur à être alerté.

### **Observations et commentaires sur les temps de détection :**

On rappelle que le temps caractéristique de l'écoulement dans l'enceinte est de 13s (**Chapitre 1**).

- Simulations d'incendie dans le compartiment C1 :

Si un scénario d'incendie dans ce compartiment est le plus probable, il est également le plus critique, car les temps de détection sont (dans l'ensemble) les plus importants.

- Détecteur A

En raison de l'écoulement agité qui règne dans ce compartiment, les temps de détection sont supérieurs à 25 secondes, excepté pour la source S13 qui se trouve au côté opposé où soufflent les ventilateurs, le panache de fumées s'élève donc jusqu'au détecteur.

- Détecteur B

Les temps de détection sont pour ce détecteur supérieurs à une minute. Les fumées se propagent à travers l'ouverture F1 qui se trouve – rappelons-le – en hauteur, juste en dessous du détecteur du compartiment C2.

- Détecteur C

Cette configuration de détection est la moins efficace, puisqu'elle a produit des délais de détection supérieurs à deux minutes pour les quatre sources, car la propagation de la fumée se fait de façon homogène et diluée au niveau de l'ouverture F3.

- Simulations d'incendie dans le compartiment C2 :

Lors de ces simulations, les fumées sont repoussées au niveau de la première partie de l'ouverture F1 où l'écoulement s'effectue du compartiment C1 vers le compartiment C2. Un autre transfert des fumées toujours vers le compartiment C1 s'effectue à travers l'ouverture F2. L'ouverture F3 permet également le passage des fumées vers le compartiment C3.

○ Détecteur A

Excepté la simulation où les fumées sont émises de la source S23, le temps de détection de ce détecteur est pour un incendie touchant le compartiment C2, de l'ordre de la minute.

Les fumées sont introduites dans le compartiment C1 par l'ouverture F2, elles sont ensuite mélangées et diluées par l'agitation de l'air créée par les ventilateurs présents dans ce compartiment.

○ Détecteur B

Une partie des fumées injectées dans le compartiment C2 est détectée dans les vingt premières secondes par le détecteur B quel que soit la source d'injection des fumées.

○ Détecteur C

Hormis la simulation par la source S23 pour laquelle le temps de détection est assez court (grâce au transfert de fumée opéré par l'ouverture F3), les mesures ont donné des délais de détection longs, atteignant deux minutes pour la source S24. Ce retard dans la détection des fumées émises par la source S24 s'explique par la dilution du panache, qui lorsqu'il s'élève et se propage dans le compartiment C2 rencontre le jet d'air issu de l'ouverture F1.

Notons que la simulation d'incendie par la source S23 a donné des temps de détection courts sur les trois détecteurs, car cette source se trouve au bas de deux fenêtres de communication entre les compartiments.

• Simulations d'incendie dans le compartiment C3 :

○ Détecteur A

Le temps de détection du détecteur A dépasse dans cette configuration la minute. Les fumées produites dans le compartiment C3 sont successivement transférées par les ouvertures F4 puis F2, subissant au cours de leur parcours une dilution.

En considérant que l'écoulement dans le compartiment C3 décrit un arc de cercle dont les extrémités sont les ouvertures F3 et F4 (l'arc étant orienté de F3 vers F4), on comprend aisément que les temps de détection soient, pour ce détecteur (A) et relativement aux sources d'injection de fumées, classés dans l'ordre  $t_1(S31,A) < t_1(S32,A) < t_1(S33,A)$ . C'est-à-dire dans l'ordre d'éloignement de la source au détecteur suivant le parcours du fluide.

○ Détecteur B

De même que précédemment, considérant que l'écoulement dans le compartiment C3 décrit un arc de cercle dont les extrémités sont les ouvertures F3 et F4 (l'arc étant orienté de F3 vers F4), on comprend aisément que les temps de détection soient, pour ce détecteur (B) et relativement aux sources d'injection de fumées, classés dans l'ordre  $t_1(S31,B) < t_1(S32,B) < t_1(S33,B)$ . C'est-à-dire dans l'ordre d'éloignement de la source au détecteur suivant le parcours du fluide.

Le détecteur B détecte donc en second les fumées propagées à travers l'ouverture F4 du compartiment C3 au compartiment C2.

Notons que le temps de détection de fumées provenant de la source S33 dépasse la minute, ce qui traduit la dilution des fumées qui s'opère dans le compartiment C3 avant son transfert vers le compartiment C2.

○ Détecteur C

La détection des fumées est assez rapide (15s) car le mouvement de l'air dans ce compartiment est lent, les fumées montent donc rapidement sous l'effet des forces de

flottabilité sans être déviées de façon importante. Lorsque elles atteignent le plafond, elles se stratifient.

A titre indicatif, la somme des temps de détection de chaque détecteur a été calculée (voir **Tableau 8**). Ces valeurs permettent d'apprécier les performances de la détection pour différentes positions du détecteur et pour différents scénarios d'incendie. Ces quantités révèlent l'efficacité de la détection dans le compartiment C2 (détecteur B) ainsi que le retard accusé par le détecteur C, relativement aux autres positions de détection.

Nous remarquons que la détection se produit, dans le compartiment C1 à un niveau d'opacité inférieur à celui des autres compartiments. L'explication se trouve en partie dans une illusion d'optique : L'opacité d'un fluide chargé de particules observé à l'œil nu est une opacité apparente qui s'atténue avec la vitesse (relative), l'œil effectuant naturellement une intégration temporelle des images.

L'autre partie de l'explication tient dans le fait que les mouvements de l'air plus vifs dans le compartiment C1 favorisent l'introduction des fumées dans la cellule de détection.

### **Observations et commentaires sur les tests sans hélium (deuxième série de mesures) :**

Les écarts entre les temps de détection sont exprimés dans le **Tableau 10** sous forme d'un pourcentage de  $t_1/t_2$ .

Le tableau comparatif liste les rapports entre les temps de détection des fumées avec et sans hélium.

Ce tableau permet d'illustrer l'influence des forces de flottabilité sur la propagation de la fumée. Globalement, nous remarquons que dans la majorité des configurations d'incendie simulées, les temps de détection avec des fumées légères sont plus courts. Ceci s'explique par la position des détecteurs placés au plafond de la maquette. Les fumées mélangées à l'Hélium arrivent donc plus rapidement en hauteur (où se trouvent les détecteurs) et s'y maintiennent grâce à la poussée d'Archimède.

Les tests sans ajout d'hélium dans le mélange injecté ont été réalisés avec un débit volumique de fumées égal à celui injecté lors des simulations pratiquées avec hélium, soit 100l/min, afin de garantir une similitude dans les puissances d'incendie et une densité de fumée équivalente. Cependant, cette égalité de débit volumique pose le problème de différence des effets d'inertie dans le jet de fumée. A l'éjection, le jet avec ajout d'hélium aura un nombre de Reynolds beaucoup plus faible que pour un jet d'air seulement, compte tenu de l'égalité des débit et de la faible densité de l'hélium. Le jet étant dirigé vers le haut, la fumée portée par l'air atteint le plafond de la maquette sous les effets inertiels seulement.

En premier lieu, nous remarquons que les écarts entre les deux séries d'essai sont plus importants dans le cas de la détection dans le compartiment où se trouve la source. Ce qui nous permet de conclure que l'influence des forces de flottabilité est prépondérante dans la première phase de propagation des fumées c'est-à-dire la phase ascensionnelle. Les transferts de fumées entre compartiments sont davantage dictés par la dynamique de l'écoulement induit par les ventilateurs.

Notons également, toujours dans le cas de la détection dans le compartiment abritant l'incendie, que les écarts sont moins prononcés pour le compartiment C1 à cause des forts mouvements de circulation de l'air dans ce compartiment. L'influence des forces de flottabilité y est donc moins importante.

Une autre observation notable se porte sur les mesures de la simulation par la source S23, pour laquelle les forces de flottabilité semblent jouer un rôle déterminant.

**Simulation d'incendie sans ventilation :**

Nous avons procédé à un dernier test simulant le scénario le plus critique : le cas où le facteur accidentel amorçant l'incendie a également provoqué l'arrêt des ventilateurs.

La propagation de la fumée se fait alors selon sa propre dynamique et n'est plus assurée par la ventilation.

Comme pour les tests précédents, un mélange de 45% d'hélium et de 55% d'air a été injecté à un débit de 100l/min par la source S23.

Le choix de la position d'injection s'est porté sur la source S23 en raison des grands écarts des temps de détection enregistrés entre les simulations pratiquées sur cette source, avec et sans hélium.

Les résultats des mesures sont mentionnés dans le **Tableau 11** (les résultats de la simulation d'incendie par la source S23 avec ventilation y sont également rappelés à titre de comparaison) :

**Tableau 11 : Temps de détection avec et sans ventilation**

Détecteur		A	B	C
Temps de détection (s)	Sans ventilation	> 350	30	32
	Avec ventilation	40	15	29

Le détecteur C produit des temps de détection semblables avec ou sans ventilation, ce qui laisse à penser que la propagation de la fumée vers ce détecteur se fait principalement sous l'impulsion des forces de flottabilité et du jet. Cette observation confirme donc le résultat de la deuxième série de mesures stipulant que l'intervention des forces de flottabilité s'effectue essentiellement lors de la propagation dans le compartiment contenant la source.

Les deux autres détecteurs A et B présentent, dans le cas d'absence de ventilation, des délais de réponse plus longs qui dépassent même 6 minutes pour le détecteur A. Cette dernière remarque paraît cohérente si l'on considère que la ventilation a d'abord comme effet le transport des fumées jusqu'aux détecteurs sans oublier qu'elle force également, leur introduction dans la chambre de détection des capteurs optiques.

**5.2.5. Visualisations par lumière blanche**

Des simulations de propagation de fumées ont été filmées. La maquette a été éclairée par un projecteur puissant. Les films réalisés sont sur le CD-Rom au format wmv.

Dans les compartiments C2 et C3 on a pu observer que le panache de fumées s'inclinait dans la direction de l'écoulement local, le panache est alors assimilable à un jet en écoulement transverse qui a fait l'objet d'études [26] [27].

Les vidéos de propagation de fumées montrent que dans les compartiments C2 et C3, le mouvement de celles-ci est d'abord ascendant (sous l'impulsion des forces de flottabilité), et incliné dans la direction de l'écoulement de l'air, puis elles se propagent essentiellement sous l'effet de l'entraînement de l'air. Tandis que dans le compartiment C1, la stratification est rendue impossible par les écoulements très turbulents qui s'y produisent. L'opacité dans le compartiment C1 augmente très progressivement.

Le déclenchement précoce de l'alarme dans le compartiment C1 alors que l'air y semblait peu opaque, s'explique par le fait que l'opacité apparente est inversement proportionnelle à la vitesse du fluide observé.

Les deux vidéos C2S23\_1.wmv et C2S23\_2.wmv ont été réalisées lors de l'injection de fumées au niveau de la même source S23 mais avec des débits différents. Dans la première vidéo avec un faible débit d'injection, on voit que le panache se propage d'abord

horizontalement sous l'influence du mouvement de l'air, puis s'élève en dessous de l'ouverture F1. Arrivé au niveau de cette ouverture, il est dispersé. Tandis que sur la deuxième vidéo avec un fort débit de fumées, le panache est vertical et se propage à travers les ouvertures F2 et F3.

Ces deux visualisations montrent l'influence très importante du débit de fumées sur la propagation des fumées. Le débit de fumées est donc au même titre que la température du panache, déterminant dans le mouvement de ces fumées.

### **5.3. Synthèse et analyse des résultats**

Toutes les mesures et observations expérimentales s'accordent sur les résultats suivants : les ventilateurs assurent le brassage de l'air dans le convertisseur. Il génère des échanges au niveau des ouvertures comme suit :

- Ouverture F1 : écoulement parallèle à cette ouverture avec un bilan d'échange dirigé du compartiment C1 vers le compartiment C2.
- Ouverture F2 : flux d'air du compartiment C2 vers le compartiment C1.
- Ouverture F3 : flux d'air du compartiment C2 vers le compartiment C3.
- Ouverture F4 : flux d'air du compartiment C3 vers le compartiment C2.

Les visualisations par tomoscopie laser confirment les échanges entre compartiments déjà décrits lors des mesures PIV et LDV.

L'écoulement est stationnaire (permanent) qu'en moyenne.

L'évolution du panache est gouvernée par les caractéristiques dynamiques et gravitationnelles initiales du jet de fumée, par la dynamique des courants de ventilation et par les contraintes géométriques du système.

Chapitre 6

Conclusions

## Chapitre 6 : Conclusions

Les profils de vitesse au niveau de chaque ouverture ont été déterminés par des mesures LDV et PIV.

Des fluctuations turbulentes importantes au niveau des ventilateurs et de l'ouverture F1, ont pu être enregistrées et les instationnarités sont particulièrement visibles sur les animations des champs PIV instantanés des ouvertures F3 et F4 où l'on voit des tourbillons apparaître et disparaître.

L'étude dynamique de l'écoulement dans l'enceinte a été donc réalisée. Elle a permis de valider qualitativement les simulations numériques faites sous logiciel Fluent et de prédire, de façon satisfaisante, la propagation d'une fumée. Les tests de propagation de fumées le montrent. Elle a également fourni aux simulations numériques, les profils de vitesse et d'intensité turbulente à la sortie des deux ventilateurs. Ces profils ont été introduits avec succès comme conditions aux limites de type « Velocity Inlet » dans la modélisation numérique.

Les simulations avec mélange air-hélium ont permis de décrire le comportement de fumées se propageant dans l'enceinte. Les ventilateurs assurent efficacement la propagation des fumées entre compartiments à travers les ouvertures de communication, de sorte que les fumées d'un éventuel incendie ne resteraient pas circonscrites dans un seul compartiment. Ce résultat s'avèrera certainement décisif dans le choix d'une configuration de détection d'incendie. Le risque de voir les fumées piégées dans une zone de recirculation et donc retardées dans leur propagation a été écarté.

L'étude a également montré que l'écoulement dans le compartiment C3, qui est assez éloigné du compartiment où se trouvent les ventilateurs, était suffisant pour propager une fumée et assurer sa détection dans les compartiments voisins.

De plus, excepté dans le compartiment C1, la ventilation propage les fumées sans trop les disperser, ce qui garantit une détection rapide.

Il a également été observé que pour une fumée émise dans un compartiment donné, l'ordre de déclenchement de l'alarme de chaque détecteur est indépendant de la position de la source dans ce compartiment.

Lors des tests, la détection dans le compartiment C2 s'est avérée être la plus rapide. Néanmoins, pour des performances maximales, un détecteur devrait être installé dans chaque compartiment.

L'influence des forces de flottabilité est prépondérante dans la première phase de propagation des fumées, c'est-à-dire la phase ascensionnelle. Les transferts de fumées entre compartiments sont davantage dictés par la dynamique de l'écoulement induit par les ventilateurs. Il a été observé également, que l'influence des forces de flottabilité, dans le compartiment C1, était faible.

Globalement, la propagation de la fumée se fait selon le mouvement de l'air induit par les ventilateurs. La ventilation accélère donc la détection des fumées puisqu'elle les transporte jusqu'aux détecteurs et force leur introduction dans la cellule d'analyse. Mais en cas d'incendie avec arrêt des ventilateurs, la détection du feu risque de ne pas intervenir suffisamment tôt.

Chapitre 7

Perspectives

## Chapitre 7 : 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.

### Dans le domaine expérimental :

- Le profil de vitesse à l'entrée des ventilateurs reste à mesurer ;
- De larges plans PIV en différentes hauteurs de chaque compartiment rendraient bien compte de la complexité de l'écoulement ;
- Mieux caractériser le système de détection en fonction de la granulométrie des fumées injectées ;
- Simuler d'autres puissances de feux ;
- Visualiser la propagation d'une fumée dense par l'introduction dans la maquette d'un fumigène rouge par exemple ;
- Effectuer des mesures de vitesse sur l'ouverture F1 avec une sonde LDV à deux composantes ;
- Il serait intéressant d'effectuer des mesures de concentrations par des techniques optiques et d'obtenir une cartographie de la concentration dans le système en fonction du temps. Il est possible par exemple de filmer un plan laser de l'écoulement, la quantité de lumière diffusée par la fumée est alors proportionnelle à la concentration. Un système de traitement d'image au préalable calibré, donnera les lignes de niveau de la concentration. Ce système a l'inconvénient d'être coûteux et difficile à mettre en œuvre ;
- Une idée intéressante à explorer est l'emploi d'une camera thermique pour filmer l'évolution d'un panache thermique produit par une source de chaleur (résistance électrique) ventilée. Ainsi nous pourrions agir facilement sur le débit de fumées, leur température tout en n'introduisant pas de volume de fluide supplémentaire dans la maquette. L'aspiration du dispositif utilisé comme source de fumées chaudes modéliserait par la même occasion l'aspiration qu'exercerait un foyer d'incendie réel sur l'air frais l'environnant.

### Pour les simulations numériques :

- Différents modèles peuvent être développés. Nous proposons l'introduction dans les simulations Fluent de conditions aux limites de type "pours" pour évacuer le volume de gaz simulant les fumées ;
- Simuler de façon très simpliste les réactions de combustion ou injecter des fumées chaudes composées des principaux produits de la combustion (vapeur d'eau, dioxyde et monoxyde de carbone, suies...) avec un maillage fin, il sera alors peut être nécessaire de lancer ce calcul sur plusieurs calculateurs travaillant en parallèle afin de diminuer le temps de calcul qu'implique une telle simulation (écoulement polyphasique, résolution de l'équation d'énergie, calcul en instationnaire) ;

- Modéliser de façon plus réaliste les ventilateurs en introduisant des profils de vitesse à l'aspiration ;
- Des modélisations numériques instationnaires employant des modèles améliorés du modèle  $k-\varepsilon$  ( $k-\varepsilon$  RNG), devraient être menées ;
- Les constantes  $C_\mu$ ,  $C_{\varepsilon 1}$ ,  $C_{\varepsilon 2}$ ,  $\sigma_k$ ,  $\sigma_\varepsilon$ , du modèle  $k-\varepsilon$  doivent être adaptées par une procédure d'optimisation basée sur des comparaisons avec les résultats expérimentaux. Notons, cependant, que cette procédure pourrait s'avérer laborieuse vu la diversité des phénomènes se produisant dans le convertisseur (jet impactant sur paroi plane, écoulements autour d'obstacles, zones de recirculation, écoulement cisailé, rétrécissements et élargissements brusques...).
- Simuler des incendies grâce à des logiciels dédiés à ce type de calculs et utilisant un modèle de zones, tels que CFast ou FDS (gratuits) qui sont simples à faire tourner [37].

## Références Bibliographiques

[1] Roland Auber et Christian Atlani -*Prévention des accidents électriques*- Techniques de l'Ingénieur – Références D5100\_SE Volume SE2, Parution 08-2002.

[2] Brigitte Fallou - *Problèmes de feu dans le matériel électrique*- Techniques de l'Ingénieur – Références D2070\_SE, Volume SE2, Parution 08-1998.

[3] Direction de la Défense et de la Sécurité Civiles. *L'intervention des sapeurs pompiers lors des feux en volume clos ou semi - ouverts Guide du Formateur* - Version 5.12. Mission Sécurité des Sapeurs-Pompiers. Extrait du guide national de référence. France. 12-12-2000.

[4] D.W. Stroup, L. DeLauter, J. Lee and G. Roadarmel - *Passenger Minivan Fire Tests*. Report of Test Fr 4011 - Building and Fire Research Laboratory-National Institute of Standards and Technology U.S. Department of Commerce-Gaithersburg, MD 20899. NIST Large Fire Research Facility. December 1, 2001.

[5] Jean-Michel d'Hoop. *Sécurité incendie bâtiment*- Techniques de l'Ingénieur - Références SE2050\_SE, Volume SE1, Parution 04-2002.

[6] TIS/CFM. CERN - Materials and Cable Working Group. *Criteria and standard test methods for the selection of electric cables, wires and insulated parts with respect to fire safety and radiation resistance*. CERN Safety Policy document SAPOCO/42 and under the provisions of the CERN Safety Codes. 1992.

[7] G. Heskestad. *Dynamics of the fire plume*. Factory Mutual Research. Corporation, Norwood- MA 02062, USA. The Royal Society. *Engineering relations for fire plumes*. *Fire Safety Journal* 7, pp25-32. 1998.

[8] Davis et Reneke. *Predicting Smoke Concentration in a Ceiling Jet*- NIST, Building and Fire Research Publications. Article NISTIT6480. 2000.

[9] J.H.Klote - *Method of predicting smoke movement in an atria with application to smoke management* – NIST, Building and Fire Research Publications, USA-Article NISTIR 5516. November 1994.

[10] G. G. Rooney et P. F. Linden - *Strongly buoyant plume similarity and 'small-fire' ventilation* - *Fire Safety Journal*, Volume 29, Issue 4, November 1997, Pages 235-258.

[11] X. C. Zhou et J. P. Gore. - *Air entrainment flow field induced by a pool fire* - *Combustion and Flame*, Volume 100, Issues 1-2, January 1995, Pages 52-60.

[12] Bailly, C. et Comte-Bellot, G. - *Turbulence* - Collection Sciences et techniques de l'ingénieur. Editions CNRS Editions 2003, 379 p.

[13] Francis Dupriez et Jean-Pierre Flodrops- *Mesures locales de vitesse dans un fluide*- Techniques de l'Ingénieur – Références : R2110\_RC, Volume RC 1, Parution 03-2000.

- [14] Alain Boutier et Henri Royer - *Visualisations et mesures optiques en aérodynamique* - Techniques de l'Ingénieur. Références R2160\_RC, Volume RC1, Parution 03-1998.
- [15] Tsutomu Kambe et Nozomu Hatakeyama - *Statistical laws and vortex structures in fully developed turbulence* - *Fluid Dynamics Research*, Volume 27, Issue 4, October 2000, Pages 247-267.
- [16] Chassaing P. - *Turbulence en Mécanique des Fluides : Analyse du phénomène en vue de sa modélisation à l'usage de l'ingénieur* - CEPADUES Edition - 2000 Toulouse.
- [17] TSI - *LaserVec Diode Velocimetry System Instruction Manual* - September 1998.
- [18] TSI - *PIV Hardware Operations Manual Preliminary* - January 1997.
- [19] Feynman (Richard). - *Le Cours de physique de Feynman : Mécanique 2* - Dunod, 1999. (Les Cours de Référence).
- [20] Olivier Mégret - *Etude expérimentale de la propagation des fumées d'incendies en tunnel pour différents systèmes de ventilation* - Thèse de doctorat, Université de Valenciennes 1993.
- [21] Vauquelin O., Bertrand A., Kotarba - *Experimental investigation about ventilation effects on a buoyant layer*, 8th Int. Symp, on the Aerodynamics and Ventilation of Vehicle Tunnels - 1994.
- [22] Vauquelin O - *Simulations d'incendies en tunnel sur maquette froide*- Institut de Mécanique des Fluides de Marseille -Rapport Env. N°59-1995.
- [23] Dehmani L, Son D.K., Gbahoue L., Rongere F.X- *Influence of a strong density stratification on the entrainment of a turbulent axisymmetric plume*- - *Experimentations In Fluids*, vol. 21, pp. 170-180,1996.
- [24] Habli et Al. - *Étude numérique des conditions d'émission sur un écoulement de type jet axisymétrique turbulent*- *International Journal of Thermal Sciences* (2001) 40, 497-511.
- [25] O. Vauquelin- *Technical note : Absolute concentration measurements inside a jet plume using video digitization* - *Atmospheric Environment* -Vol. 30, No. 9, pp. 1523-1528. 1996.
- [26] Gregory Pinon - *Modélisation d'un jet en écoulement transverse par méthode particulière* - Laboratoire de Mécanique, Physique et Géosciences -Université. Le Havre. Colloque "Tourbillons en hydrodynamique". Centre IGESA de l'île de Porquerolles.
- [27] Alain Lefevre et Paul Vallette - *Mesures de flux turbulents dans un jet en écoulement transverse* - CIFQ2003 / 04-04. VIe Colloque Interuniversitaire Franco-Québécois Thermique des systèmes. 26-28 mai 2003, Québec.

[28] H. K. Versteeg et W. Malalasekera- *Introduction to computational fluid dynamics, The finite volume method*. Edition Prentice Hall, Pearson Education. Harlow, Angleterre. 1995.

[29] C. Van de Hulst. - *Light scattering by small particle* - Wiley Press. New York. 1981.

[30] Elisabeth Giacobino- *Optique des milieux matériels* -Techniques de l'Ingénieur, traité Sciences fondamentales - Références A1080, Volume AF3, Parution 05-1993.

[31] Gérard Gouesbet et Gérard Gréhan- *Diffusion des faisceaux laser par des particules* -Techniques de l'Ingénieur, traité Sciences fondamentales – Références AF3460, Volume AF3, Parution 07-1998.

[32] P.Vigliano - *Granulométrie des aérosols par diffusion lumineuse* -Session Métrologie Laser en Mécanique des Fluides- Institut National des Sciences et Techniques Nucléaires. Commissariat à l'Energie Atomique. Novembre 1992.

[33] Faouzi Derbel - *Performance improvement of fire detectors by means of gas sensors and neural networks* - Fire Safety Journal, Volume 39, Issue 5, July 2004, Pages 383-398.

[34] W.Kriaa, H.Mhiri, G.Le Palec, Ph.Bournot- *Numerical study of the interaction between two laminar and coaxial plane jets with variable density in an ambient fluid*- Energy Conversion and Management 44 (2003) 2037–2057.

[35] O. Keski-Rahkonen - *Revisiting Modelling of Fluid Penetration into Smoke Detectors Revisited for LowSpeed Ceiling Jets* - 12th International Conference on Automatic Fire Detection. Gaithersburg, MD, 25–28 March 2001. National Institute of Standards and Technology NIST (2001), pp. 506–516.

[36] Nedjla - *Etude expérimentale de la propagation d'un contaminant issu d'un panache d'une cheminée*. Thèse de doctorat Ecole d'Ingénieur de Monastir, 2000, Tunisie.

[37] Walter W. Jones & Glenn P. Forney- *Improvement in predicting smoke movement in compartmented structures* - Fire Safety Journal- 21 (1993) 269-297.

[38] Lepalec G. *Étude numérique de la propagation d'une fumée dans une enceinte confinée avec recirculation d'air forcée*. Rapport interne. IM2 UNIMECA. 2004.

*Annexes*

## Annexes

### **Annexe 1 : Exemple d'un fichier de statistiques (édité par le logiciel Laservec) d'une mesure LDV**

Data file acquired on 27-Jun-2020 at 12:21:01 using version LV10

Data file processed using version 1.3 of ldvstats.dll on Sat Jun 27 12:21:11 2020

Data file name = c:\windows\bureau\tertg~1\fenetr~1\casc0019.raw

Number of Points Processed in file = 5096, # good = 5096

Data Aquired using Random Mode

Measurement Position [X,Y,Z] = 0.000000, 0.000000, 0.000000

```
+-----+-----+
| VALUE |   U   |
+-----+-----+
| POINTS |  5096 |
+-----+-----+
| MEAN VEL | 3.971079e-001 |
+-----+-----+
| STD DEV | 3.349079e-002 |
+-----+-----+
| TURB INT | 8.433675e+000 |
+-----+-----+
| SKEW   | 6.174007e-002 |
+-----+-----+
| FLATNESS | 3.162613e+000 |
+-----+-----+
```

Processor Type : 600

[ON] Enable Velocity Bias Correction . Selection ignored, Transit Time is not selected

[OFF] Enable LDV Data Filtering. Std. Dev.(s) = 10. Number rejected = 0

[OFF] Enable Record range limit. Limits = record 0 to 5096.

[OFF] Enable Increment Mode. Increment = 1.

**Annexe 2 : Caractéristiques géométriques et dynamiques des ventilateurs :**

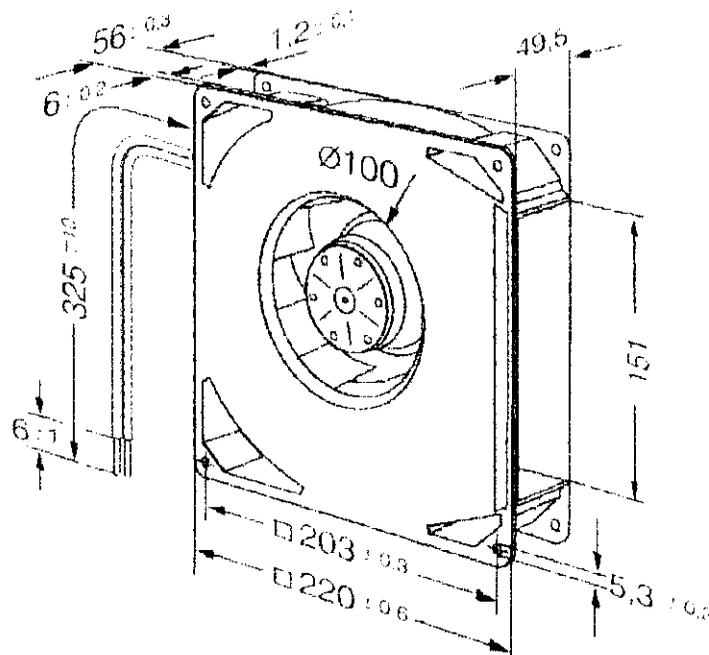


Figure 104. Dimensions des ventilateurs

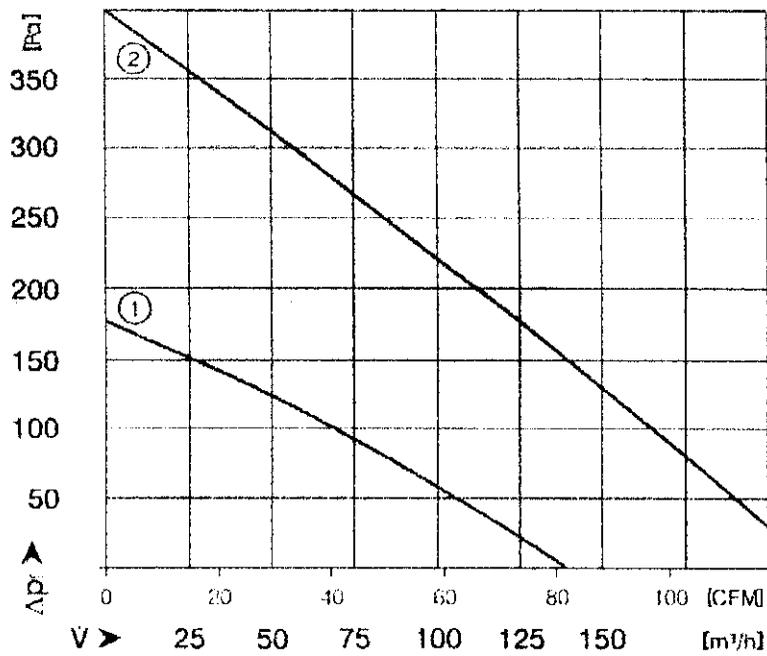


Figure 105. Débit des ventilateurs en fonction de la différence de pression statique (courbe n°2)

**Annexe 3 : programme pour le calcul des débits :**

Interpsu(x,y,v)

Prgm

©calcul de débit à travers une surface

©Par C.A

```

Local nx,ny
dim(x)»nx
dim(y)»ny
0»s
For i,1,nx-1
For j,1,ny-1
(v[j,i]+v[j,i+1]+v[j+1,i]+v[j+1,i+1])*(x[i]-x[i+1])*(y[j]-y[j+1])/4+s»s
EndFor
EndFor
EndPrgm

```

Dans le cas d'une série de mesures linéaire :

```

Interplin(x,y)
Prgm
Local x,y,i,n,xx
dim(x)»n
0»s
For i,1,n-1
(((y[i]-y[i+1])*xx-(y[i]*x[i+1]-y[i+1]*x[i]))/(x[i]-x[i+1]),xx,x[i],x[i+1])+s»s
EndFor
EndPrgm

```

### **Annexe 4 : 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).

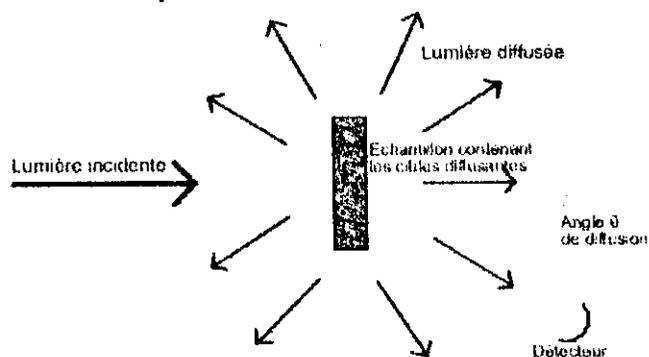


Figure 106. Diffusion de la lumière

#### **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.

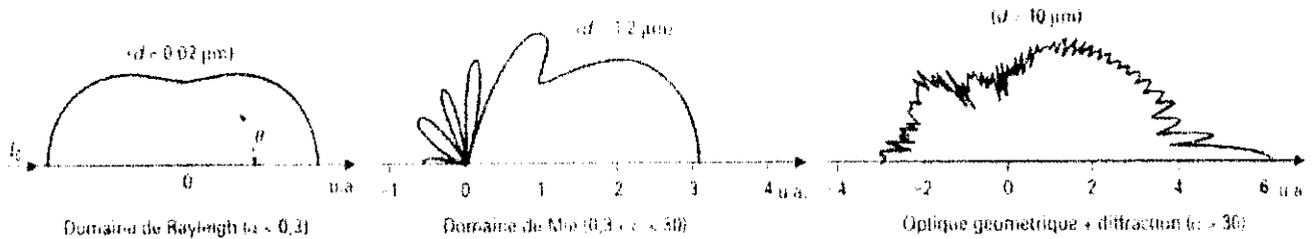
Elle a pour restriction la sphéricité de la particule. En général, elle est utilisée pour des particules de taille proche de la longueur d'onde du rayonnement incident [32]. Le paramètre de Mie  $\alpha$  permet d'apprécier la taille de la particule relativement à la longueur d'onde [32] :

$$\alpha = \frac{\pi d}{\lambda}$$

$\alpha < 0.2$  théorie de Rayleigh

$0.2 < \alpha < 300$  théorie de Mie

$\alpha > 300$  optique géométrique



(d) diamètre de la particule

(Nota : pour la clarté de la lecture, les échelles, en unités arbitraires, ne sont pas les mêmes pour les trois valeurs de d)

**Figure 107. Diffusion de la lumière**

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) [31], 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 [30]. 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).

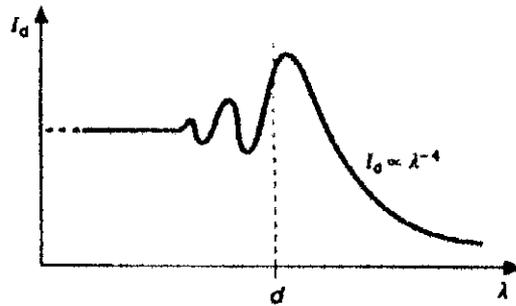


Figure 108. Intensité diffusée par une particule de diamètre  $d$  en fonction de la longueur d'onde.

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 [29] :

$$\frac{I}{I_0} = \frac{F(\theta)}{(kr)^2}$$

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  $0.6\mu\text{m}$

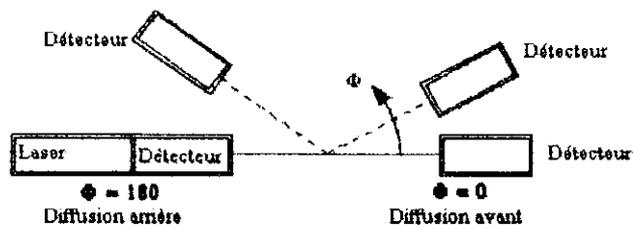
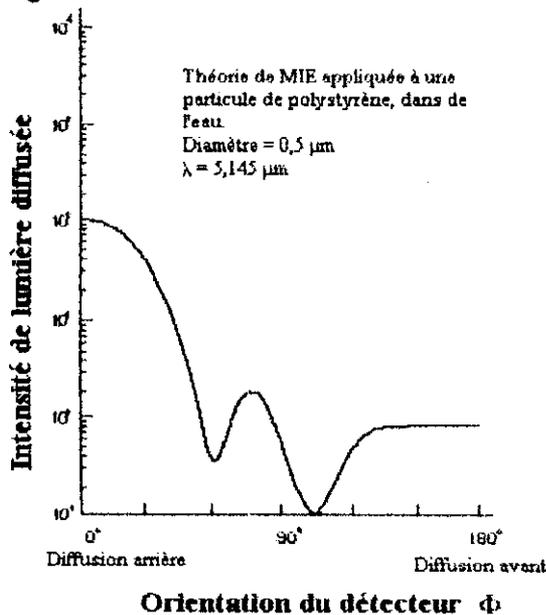


Figure 109. Intensité de lumière diffusée en fonction de l'angle de réception.

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) [31].

### Annexe 5 : signaux LDV

Les graphiques suivants (Figures 110 et 111) représentent respectivement la densité de probabilité des mesures LDV de vitesse et les variations de vitesse en fonction du temps à l'extrémité de l'ouverture F1 (vitesse normale  $-2.48\text{m/s}$ ).

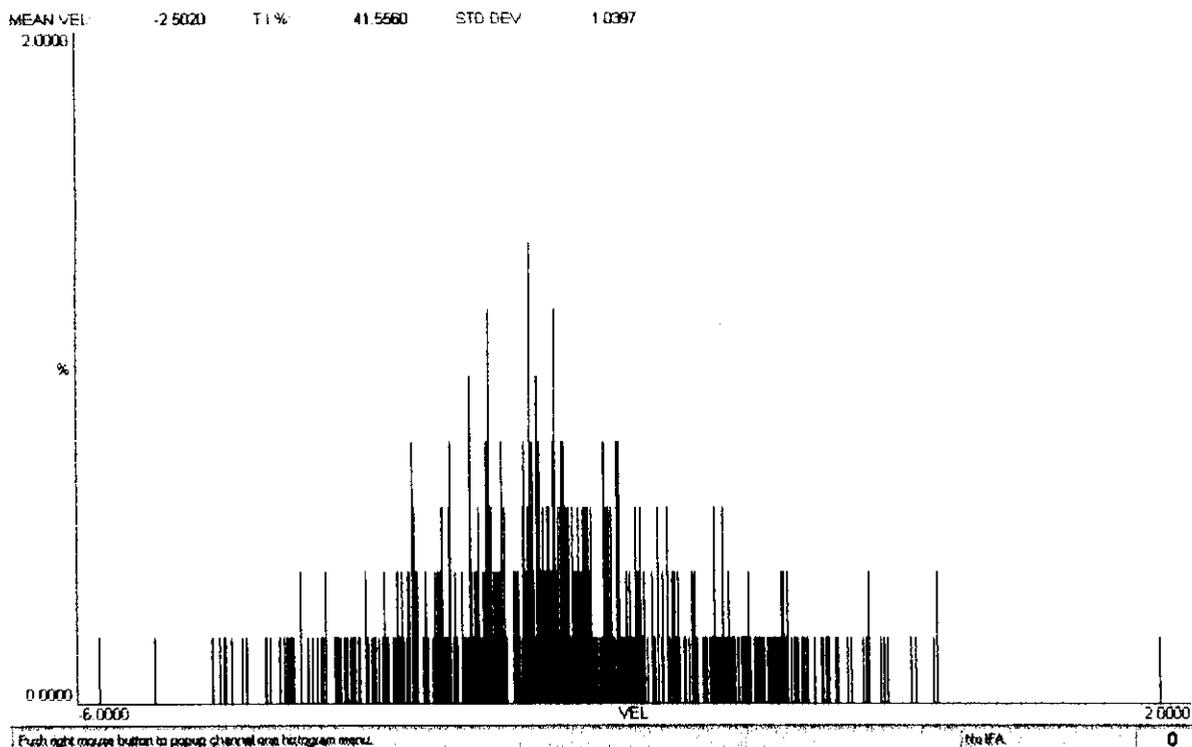


Figure 110. Densité de probabilité d'une mesure LDV de vitesse

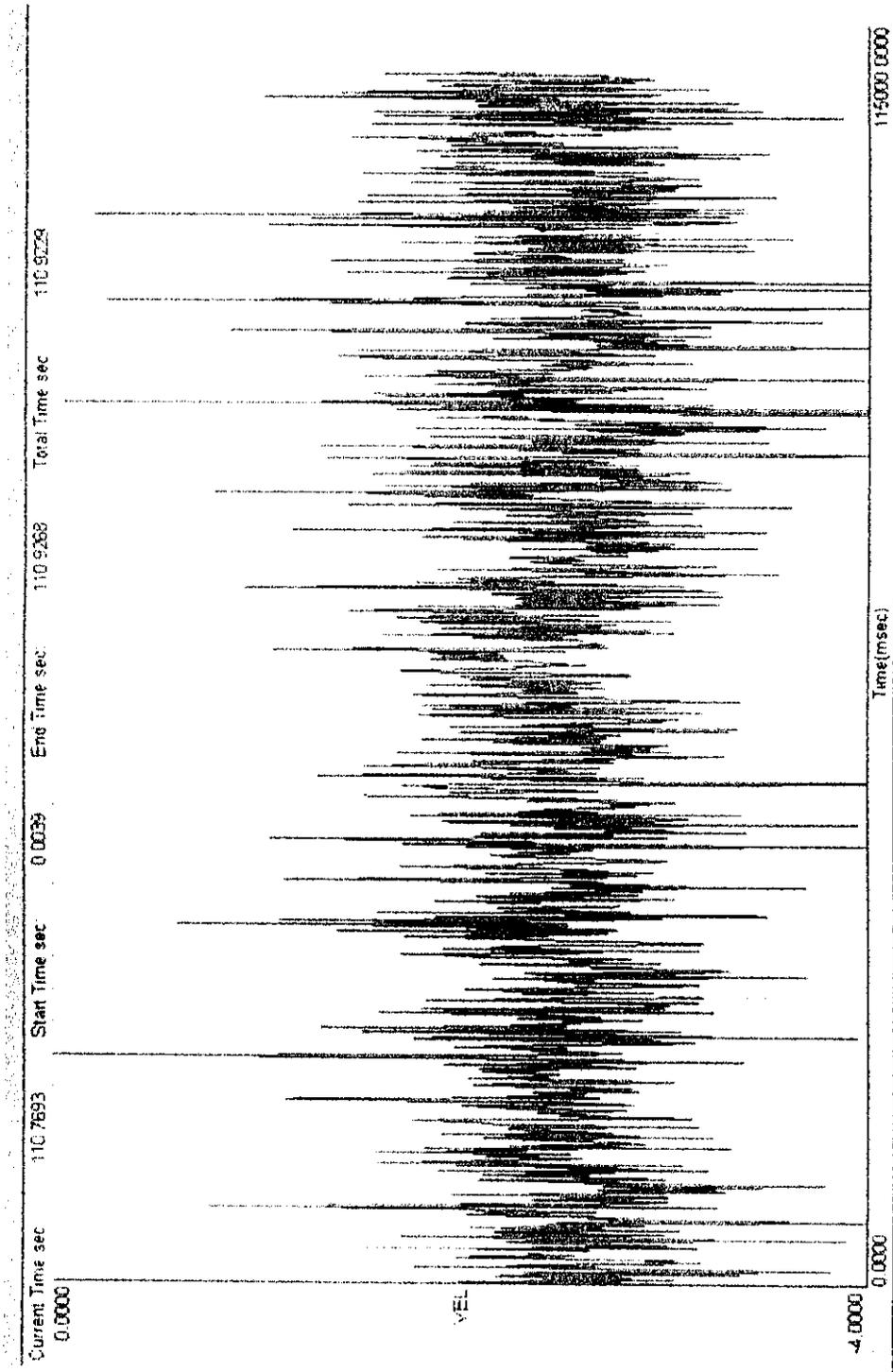


Figure 111. Mesure sur l'ouverture F1 (vitesse moyenne de -2.48m/s)

**Annexe 6 : performances de la détections optique**

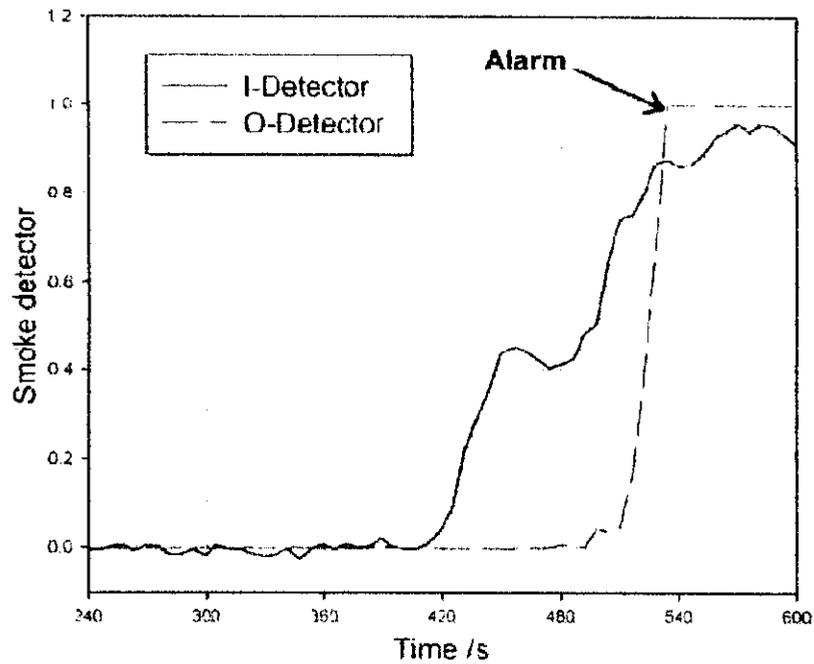


Figure 112. Réponse d'un détecteur optique et ionique à un feu couvant de bois

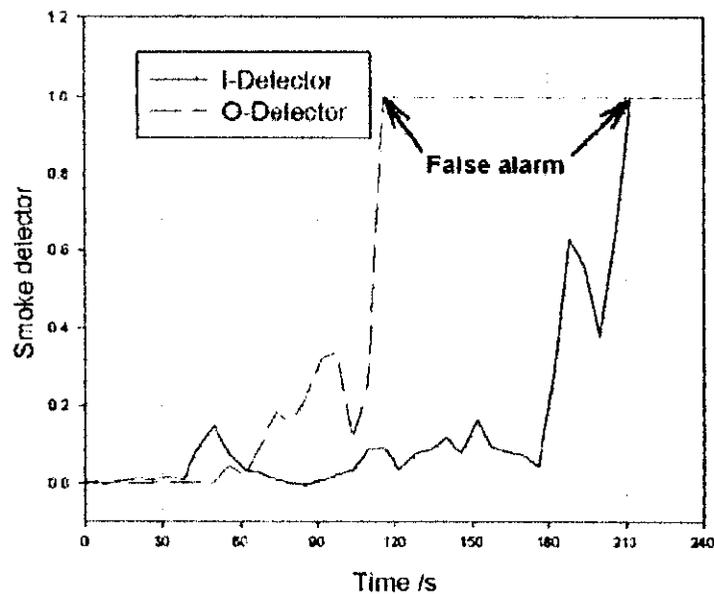


Figure 113. Réponse d'un détecteur optique et ionique à une fumée de cigarette [33].

### Annexe 7 : diffusion moléculaire

La diffusivité moléculaire des espèces  $ij$  d'un mélange binaire est donnée par la théorie cinétique des gaz [34]:

$$D_{ij} = D_{ji} = D = \frac{0.00266 T^{1.5}}{PM_{\text{mix}}^{1/2} \sigma_{\text{mix}}^2 \Omega_D}$$

$$M_{\text{mix}} = \frac{2}{\frac{1}{M_i} + \frac{1}{M_j}}$$

$$\sigma_{\text{mix}} = \frac{\sigma_i + \sigma_j}{2}$$

$$\Omega_D = 1.06/T^{(1.561)} + 1.193 \cdot e^{(-.47635 \cdot T)} + 1.03587 \cdot e^{(-1.52996 \cdot T)} + 1.76474 \cdot e^{(-3.89411 \cdot T)}$$

$\sigma_{\text{mix}}$  et  $\Omega_D$  sont respectivement le diamètre effectif de collision et l'intégrale de collision définie pour la diffusivité moléculaire.

### Annexe 8 : mesures PIV (ouverture F1)

Les plans présentés dans le chapitre 5.1.2.2.1, ont été assemblés à partir des plans suivants (Figures 114 à 125) :

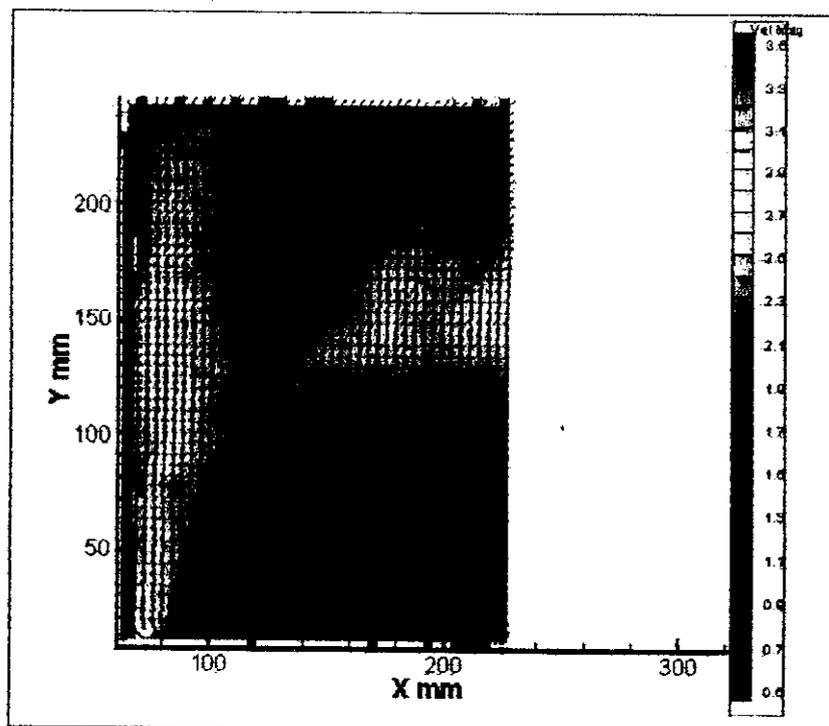


Figure 114. F1 Partie entrante

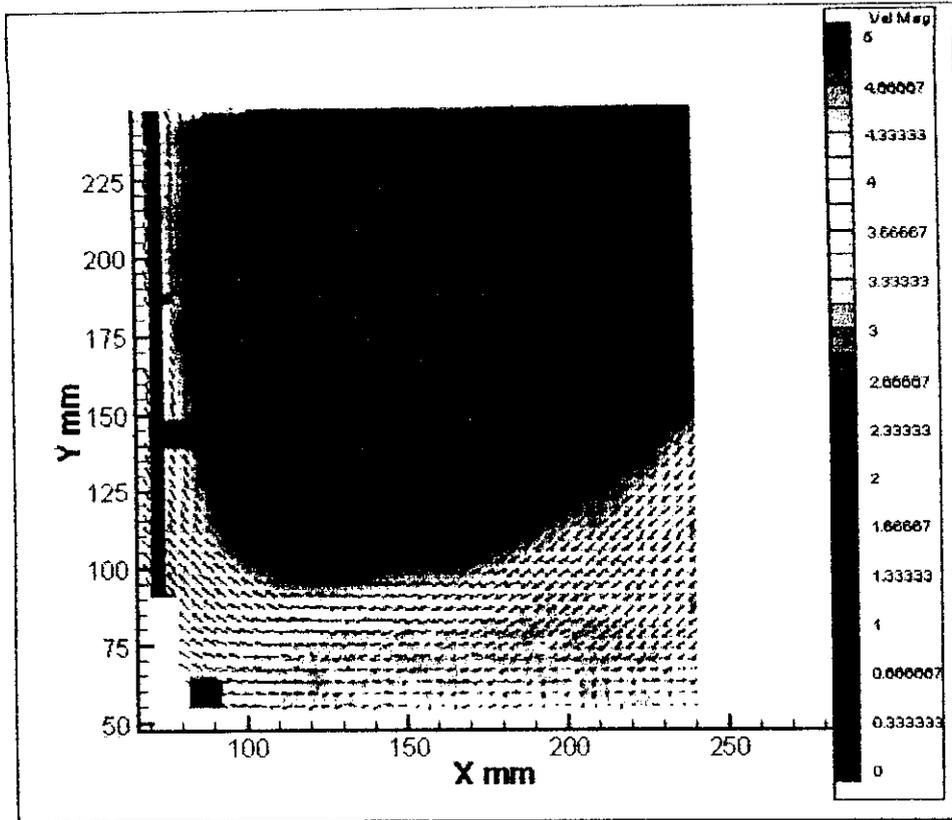


Figure 115. F1 Partie sortante

Champ moyen de vitesses.

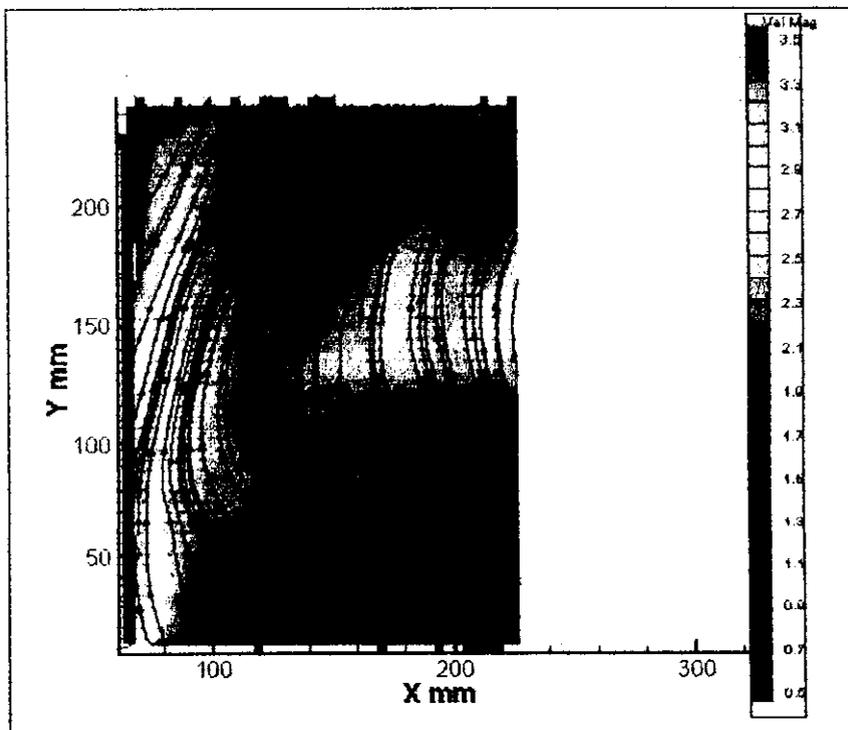


Figure 116. F1 Partie entrante

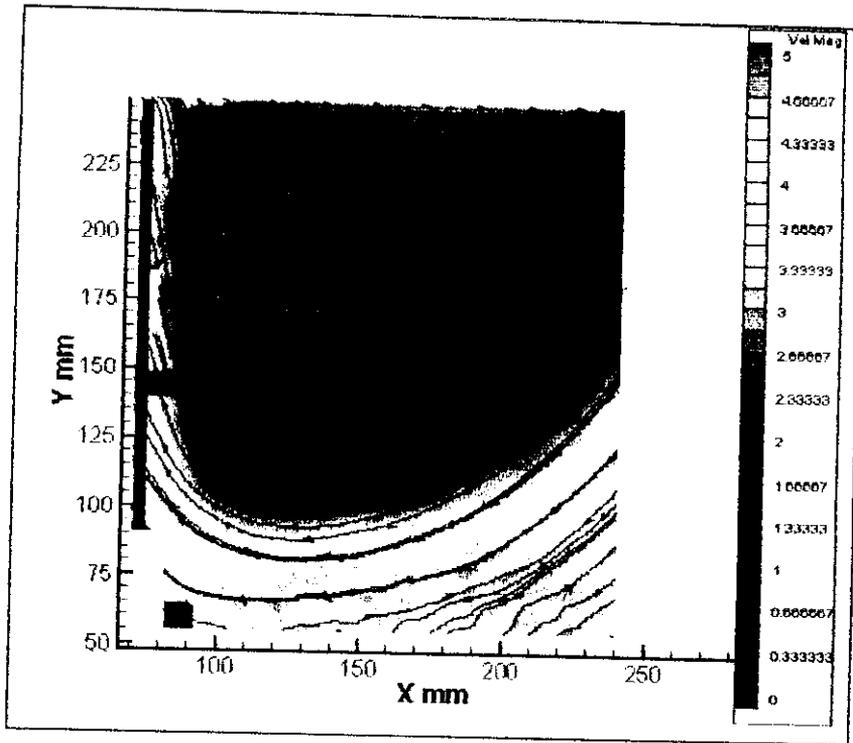


Figure 117. F1 Partie sortante

**Champ moyen de vitesses et lignes de courant**

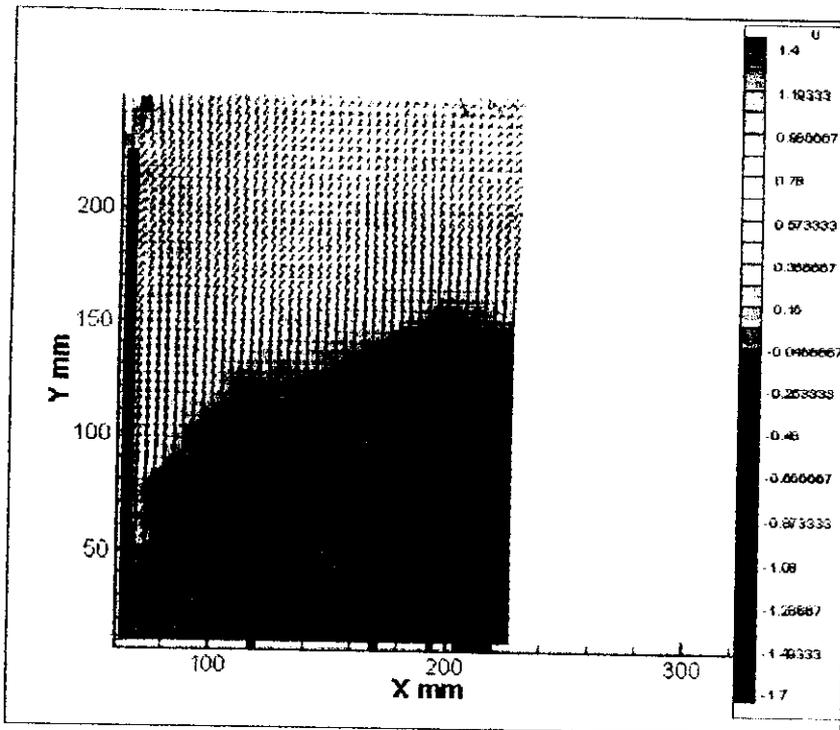


Figure 118. F1 Partie entrante, Champ moyen de vitesses normales au plan de l'ouverture F1

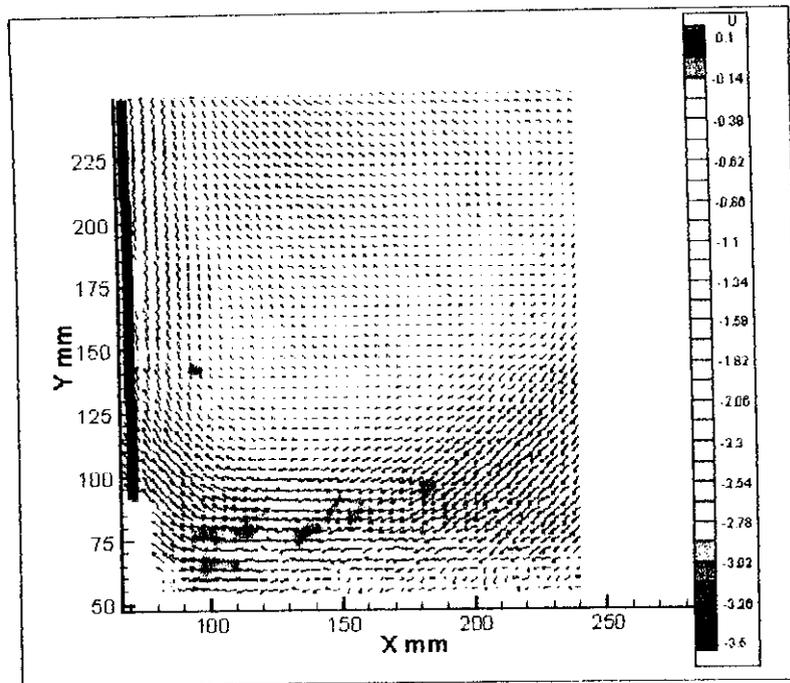


Figure 119. F1 Partie sortante, Champ moyen de vitesses normales au plan de l'ouverture F1.

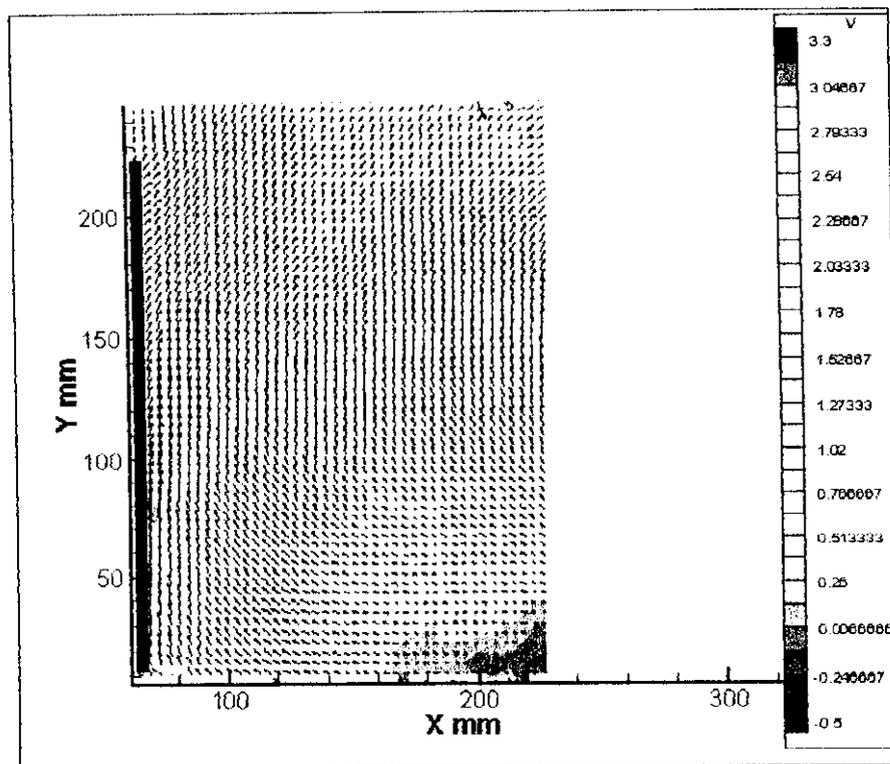


Figure 120. F1 Partie entrante. Champ moyen de vitesses tangentielles au plan de l'ouverture

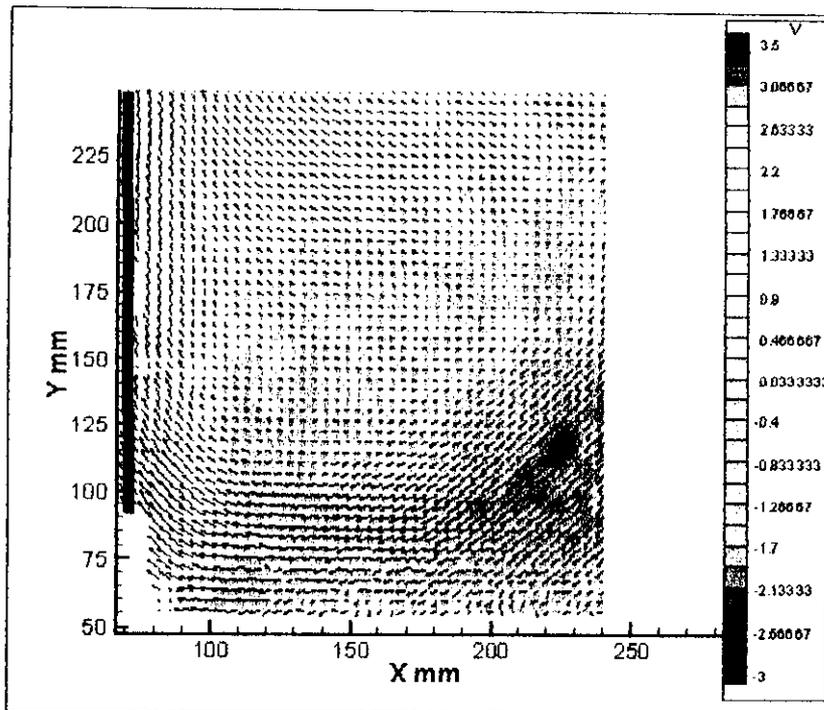


Figure 121. F1 Partie sortante. Champ moyen de vitesses tangentielles au plan de l'ouverture

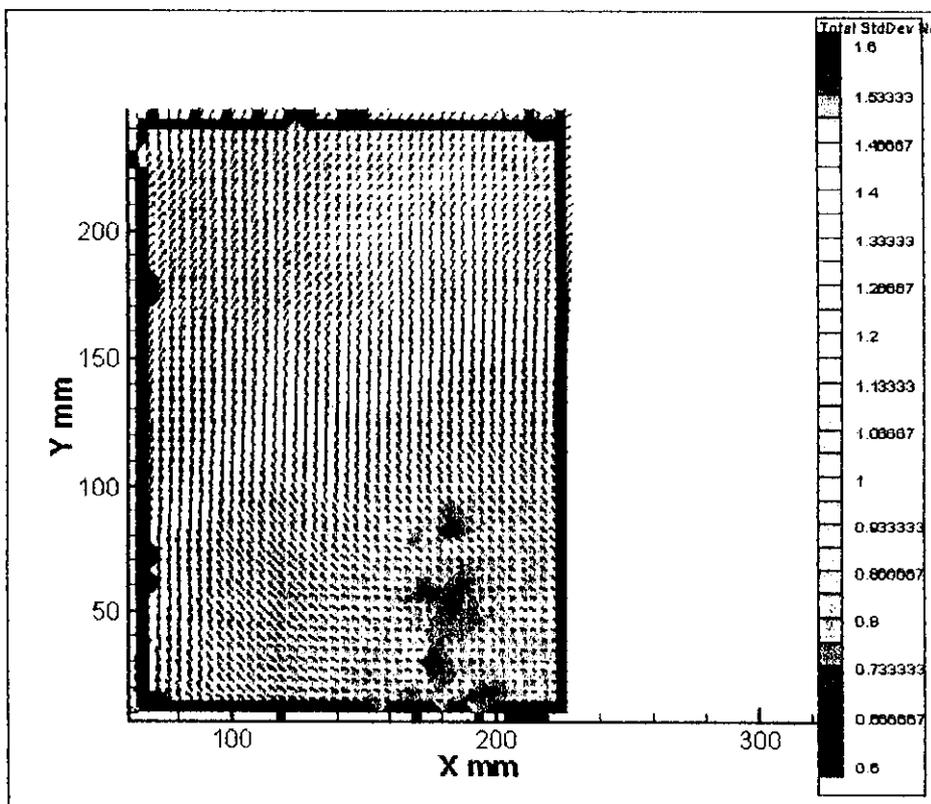


Figure 122. F1 Partie entrante. Distribution de la turbulence

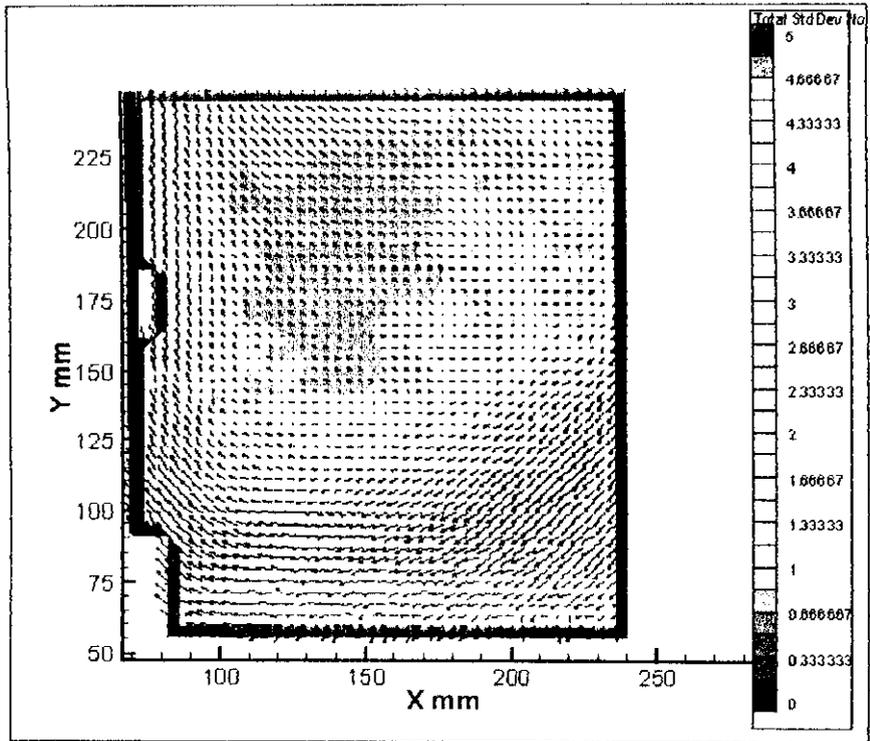


Figure 123. F1 Partie sortante. Distribution de la turbulence

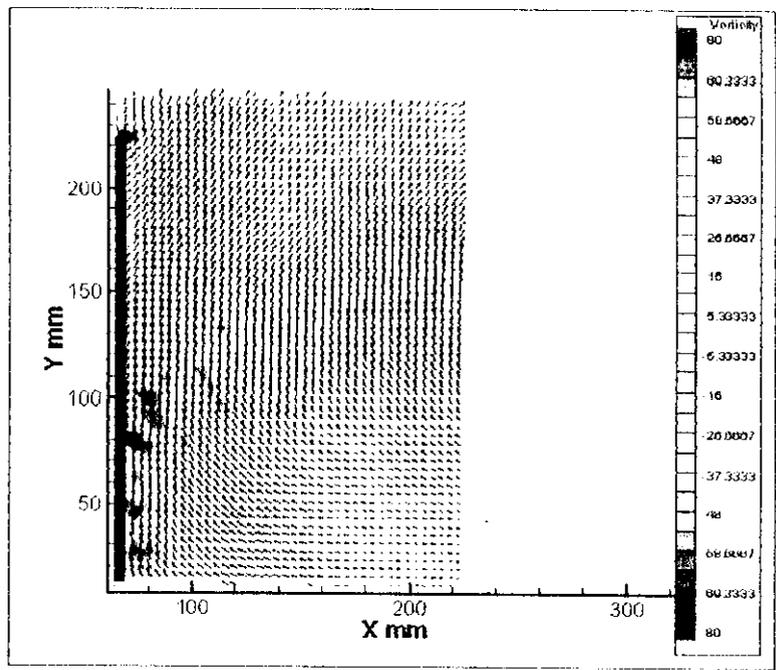


Figure 124. F1 Partie entrante. vorticité

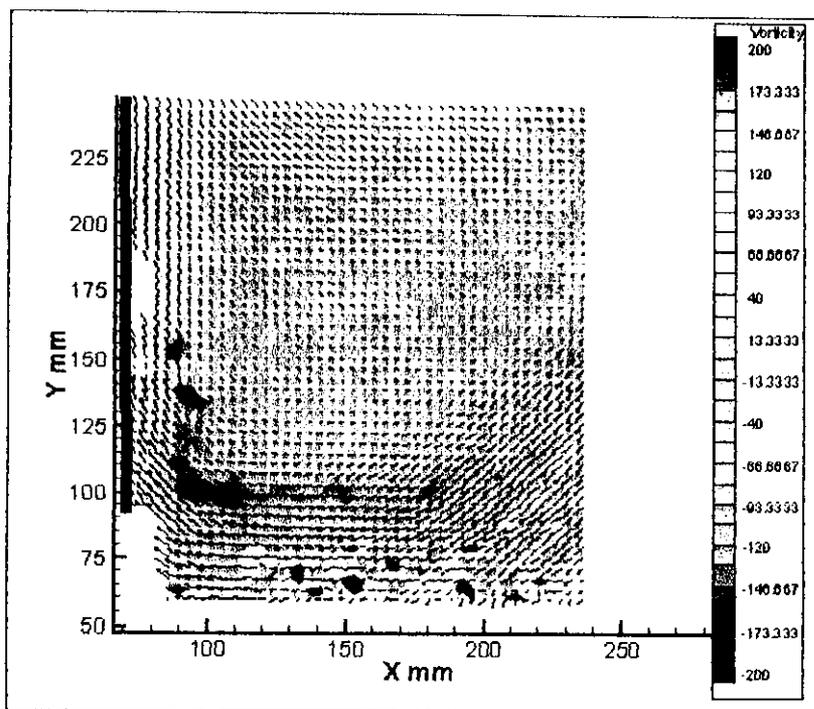


Figure 125. Partie sortante. Champ de vorticité

### Annexe 9 : Logiciel PIV Insight

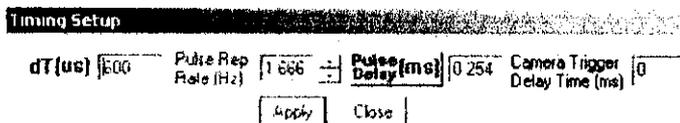


Figure 126. Fenêtre de détermination de l'intervalle de temps, ainsi que la fréquence entre les deux impulsions

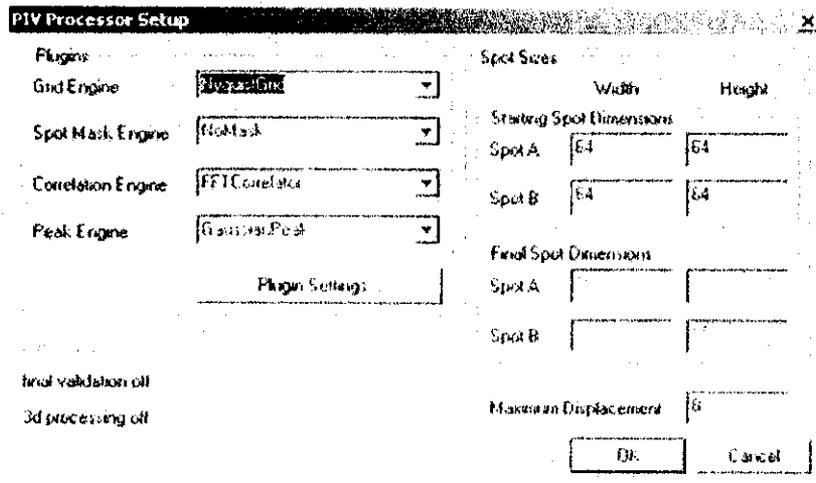


Figure 127. Fenêtre de détermination de la taille de la fenêtre d'interrogation

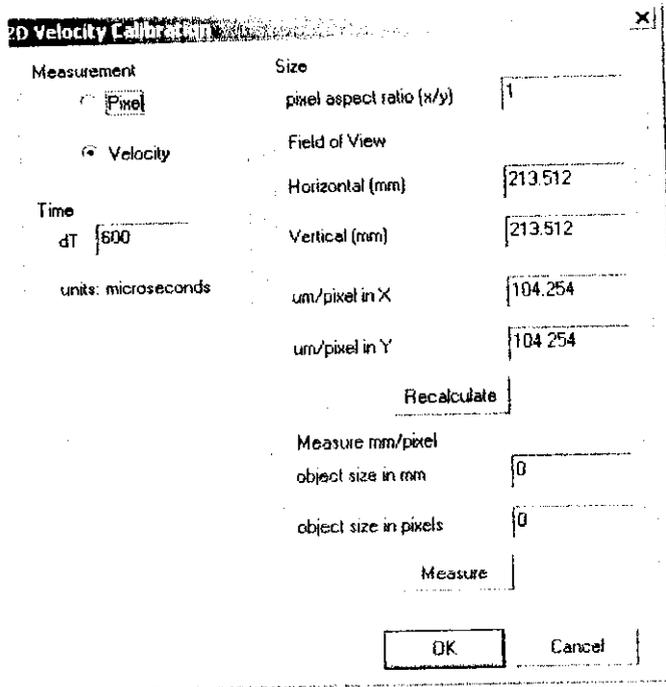


Figure 128. Fenêtre de la calibration.

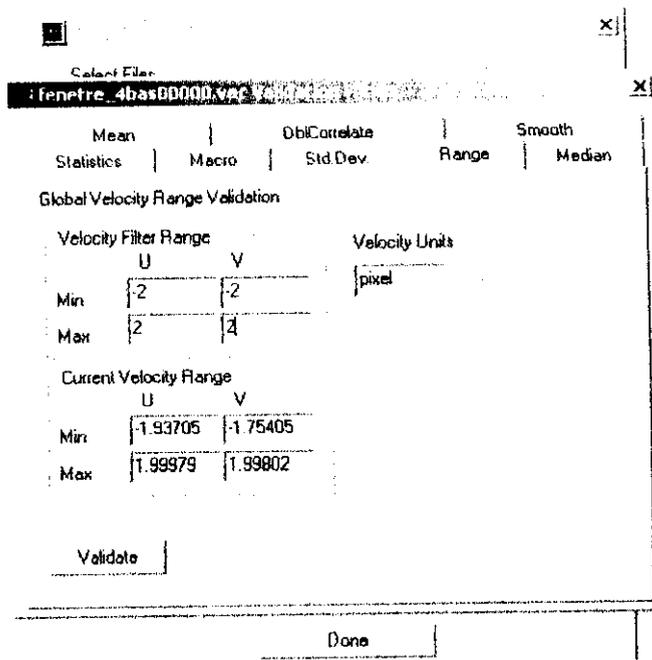


Figure 129. Fenêtre des filtres et de la Macro.

Procédure pour la mesure PIV.

1-La mise au point de la caméra.

2-La calibration.

3-Choix 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 10 : logiciel LDV LaserVec

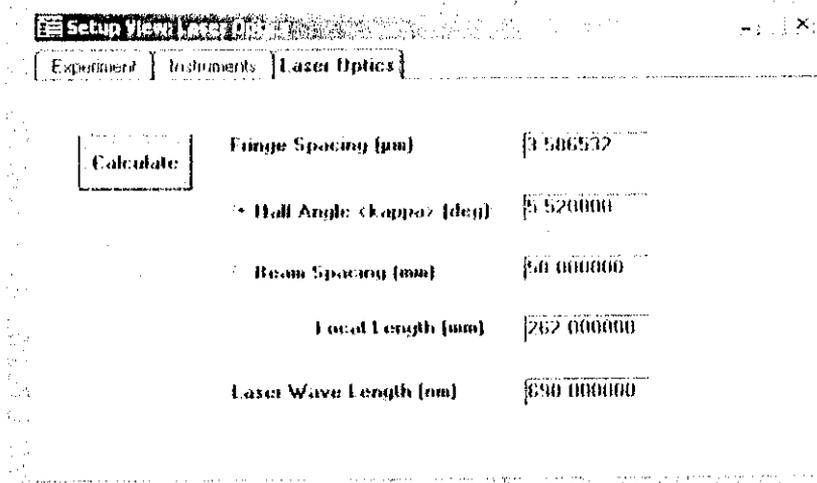


Figure 130. Paramètres optiques. Calcul de la valeur de l'interfrange.

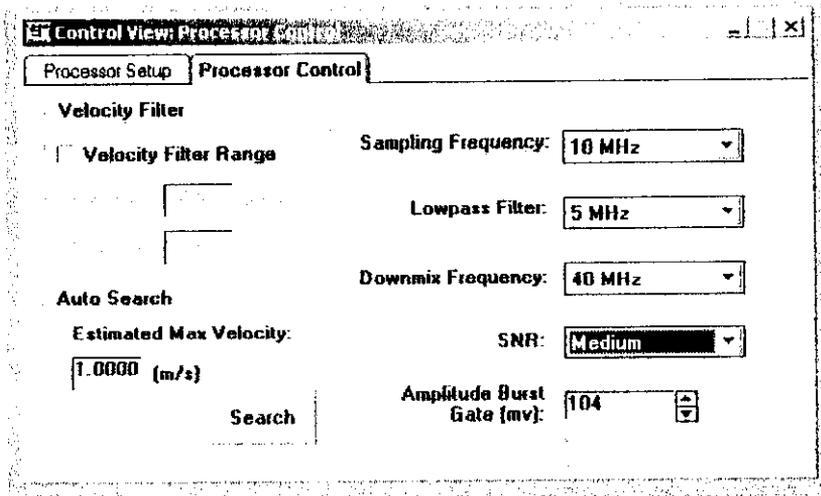


Figure 131. Filtres Passe-haut et passe-bas, et la fréquence d'échantillonnage, ainsi que le rapport Signal-bruit.

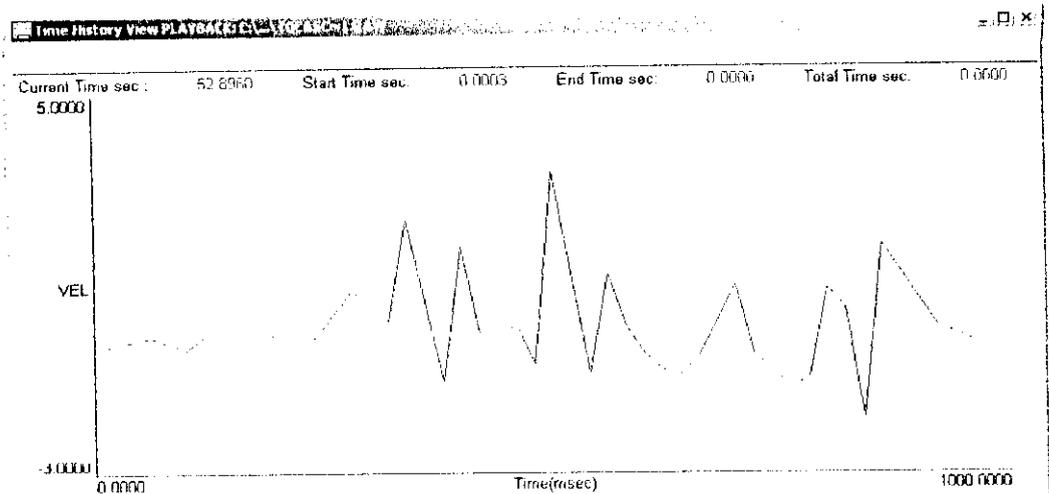


Figure 132. Signal de la fluctuation de vitesse en fonction du temps.

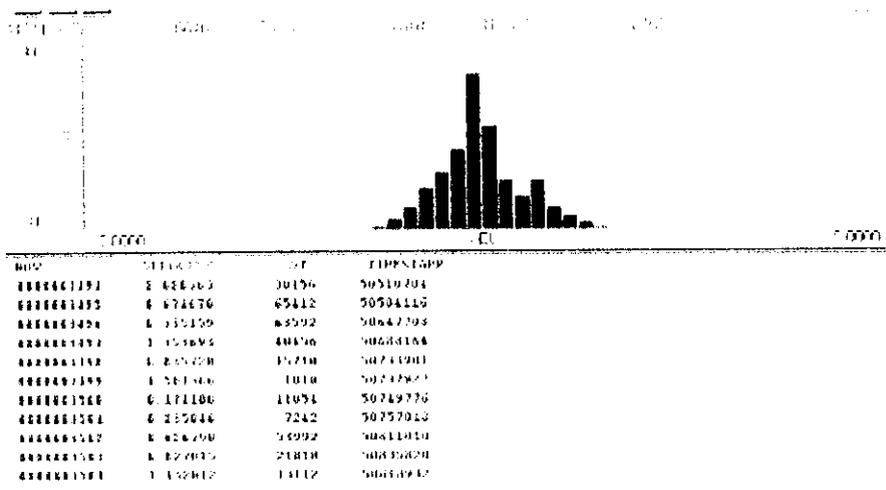


Figure 133. Courbe gaussienne représentant les fluctuations de vitesses.

**Annexe 11 : système d'injection des fumées froides**



Figure 134. Système de génération de fumée.

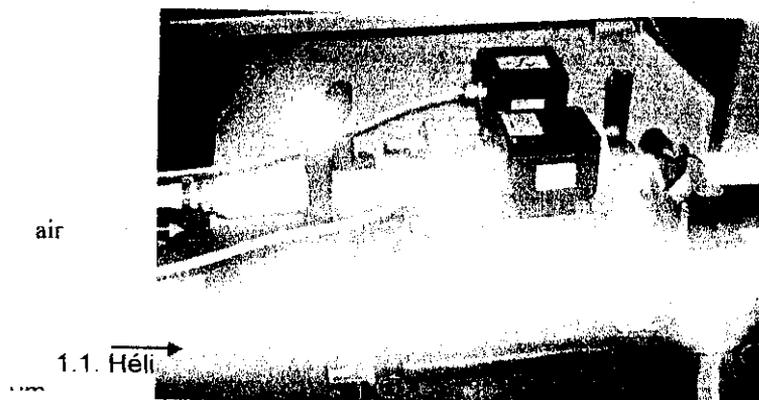


Figure 135. Débitmètres

### **Annexe 12 : détecteur Sicli P9:**

Fiche technique du Détecteur de fumée sans fil SICLI "P9".

*1-Présentation :*

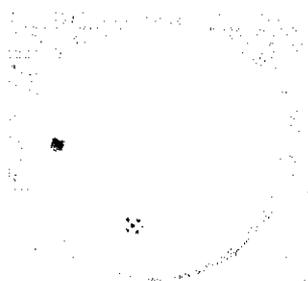


Figure 136. Détecteur Sicli P9

Ce détecteur avertit des risques d'incendie en détectant toute présence de fumées (combustion de papier, bois, carton, plastique). Il déclenche alors l'alerte.

*2-Caractéristiques techniques :*

Le **Tableau 12** donne les Caractéristiques techniques du détecteur de fumées

**Tableau 12. Caractéristiques techniques des détecteurs de fumées**

Fonctionnement	Signal émis	Largeur	Diamètre	Autonomie
Pile Alcaline 9 V	Sonore : 85 dB	35 mm	125 mm	2 ans

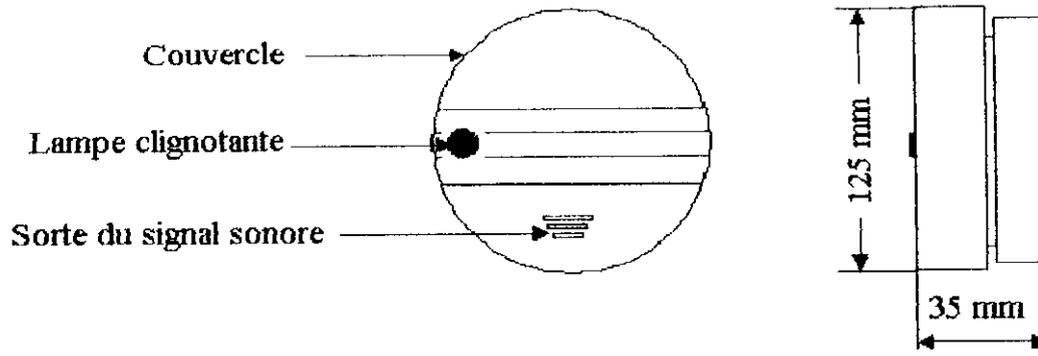


Figure 137. Dimensions du détecteur

### Annexe 13 : positions des sources d'injection des fumées

Côtes en centimètre :

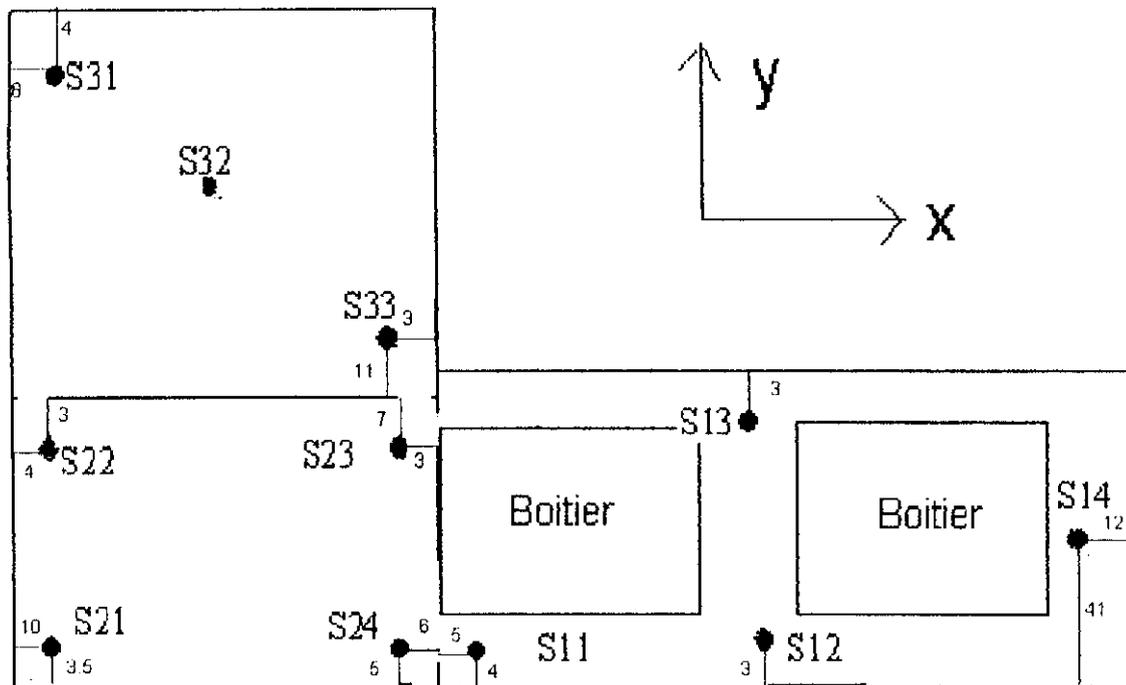


Figure 138. Cotes des sources aux parois adjacentes, en centimètres (x,y).

X représente la distance entre la source et la paroi la plus proche selon la direction x.

Y représente la distance entre la source et la paroi la plus proche selon la direction y.

S11:(5,4)

S12 :(x , 3) située exactement entre les deux boîtiers

S13 : (x ,3) située exactement entre les deux boîtiers

S14: (12,41)

S21: (10,3.5)

S22: (4,3)

S23: (3,7)

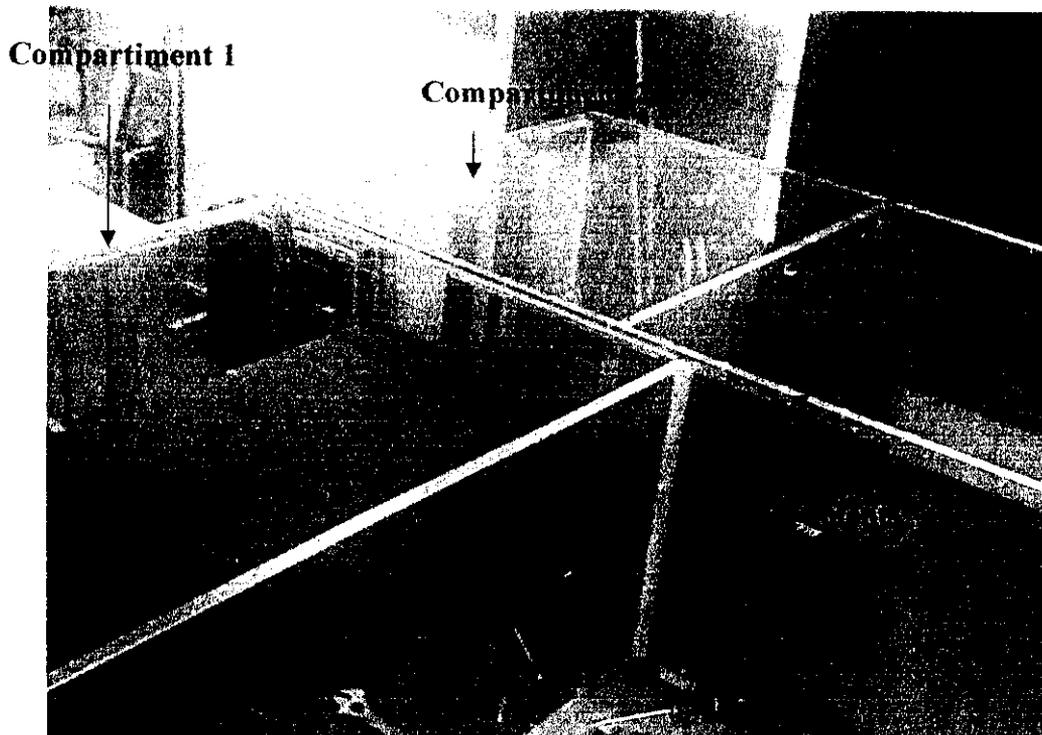
S24: (6,5)

S31: (8,4)

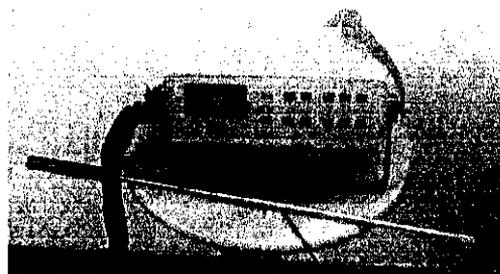
S32: centre du compartiment C3

S33: (3,11)

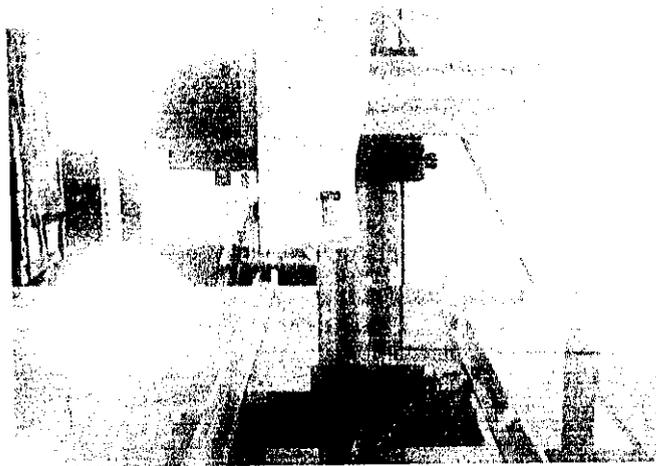
### ***Annexe 14 : Photos des montages***



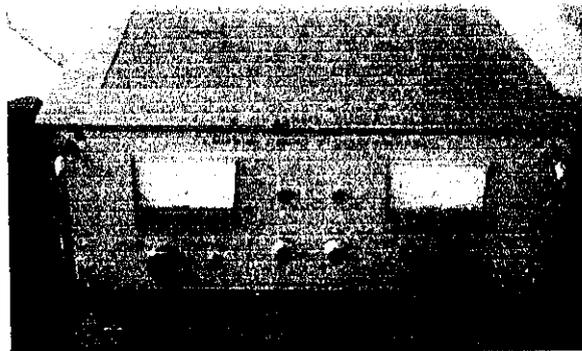
**Figure 139. Maquette**



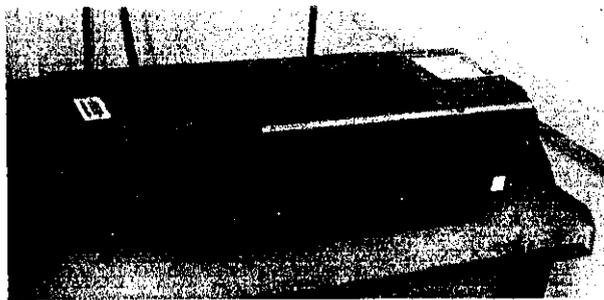
**Figure 140. Sonde de fil chaud, et le calculateur de vitesse**



**Figure 141. Montage pour la mesure de la composante tangentielle de la vitesse à la sortie des ventilateurs.**



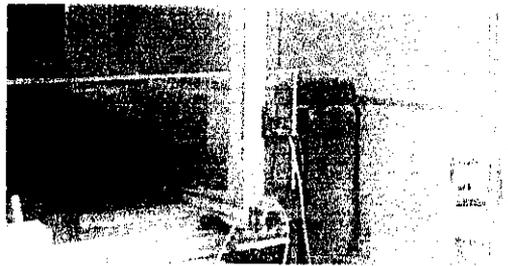
**Figure 142. Générateur de courant électrique pour le fonctionnement des ventilateurs.**



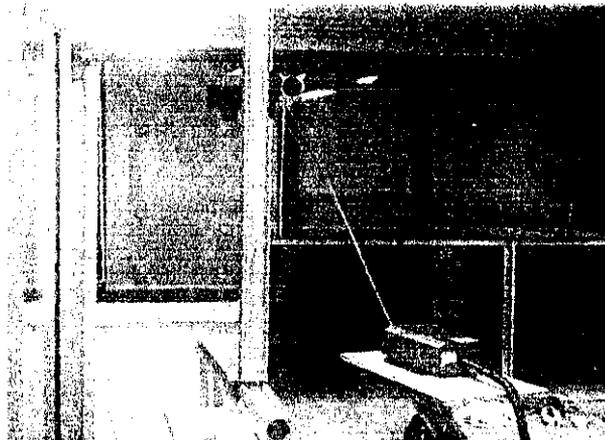
**Figure 143. Laser Nd-YAG**



**Figure 144. Unité de délivrance de puissance pour le Laser**



**Figure 145. Montage de la caméra sur les rails, permettant le déplacement dans toutes les directions.  
(Mesure sur les ventilateurs dans le cas de plan vertical)**



**Figure 146. Position du Laser par rapport à l'ouverture F4.**

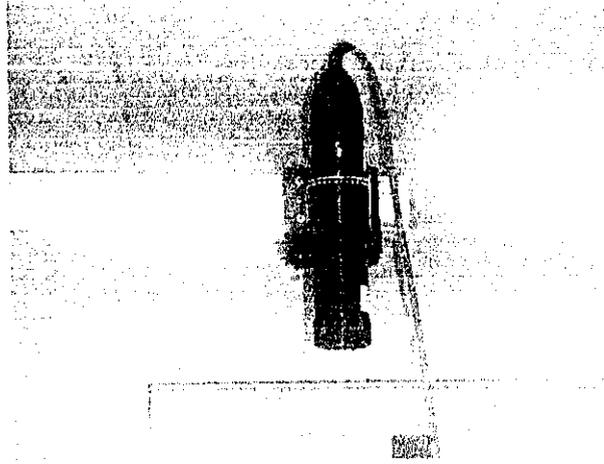


Figure 147. La sonde de mesures à deux composantes.

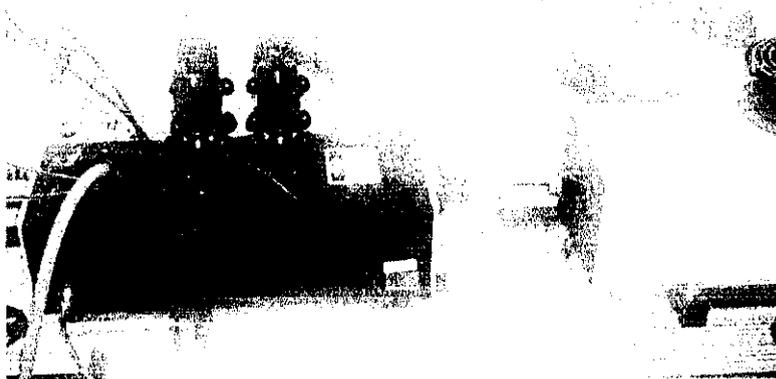
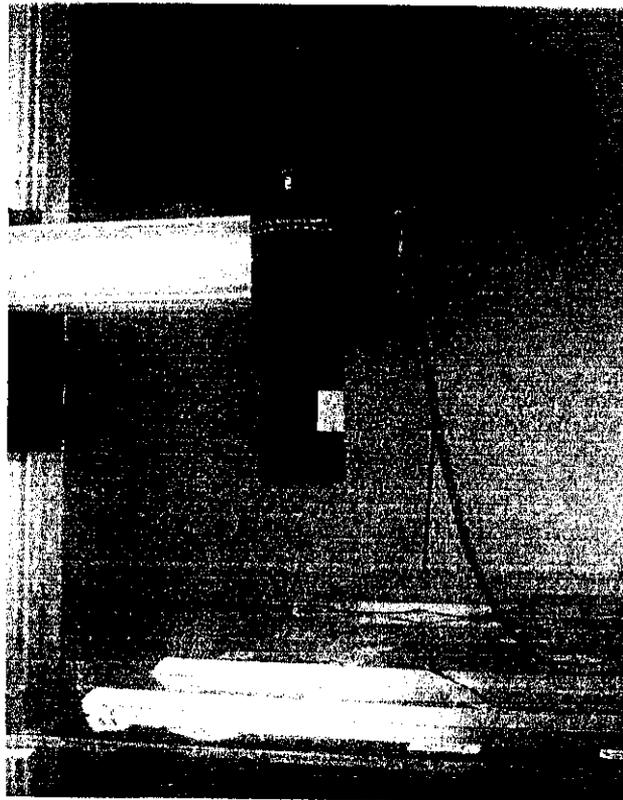


Figure 148. Système optique de division du faisceau, pour la sonde à deux composantes



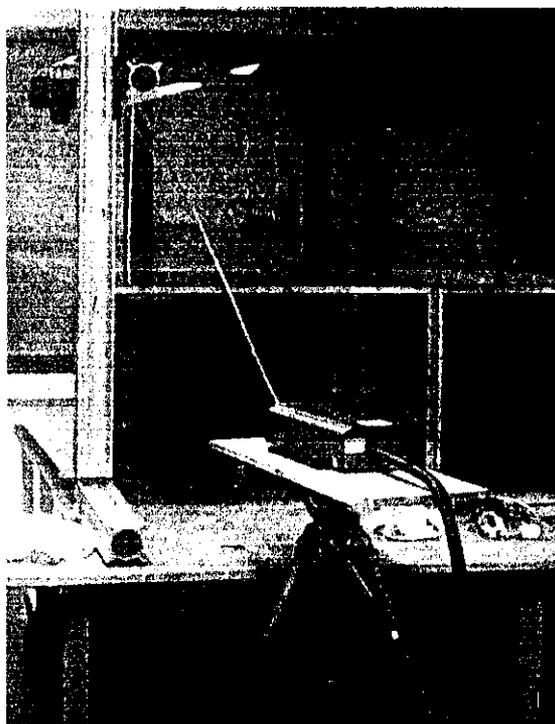
**Figure 149 . Inclinaison de la sonde et position du volume de mesure sur l'ouverture.**



**Figure 150. Sonde LDV à deux composantes**



**Figure 151. Générateur de fumée de spectacle**



**Figure 152. Mesure PIV sur l'ouverture F4**

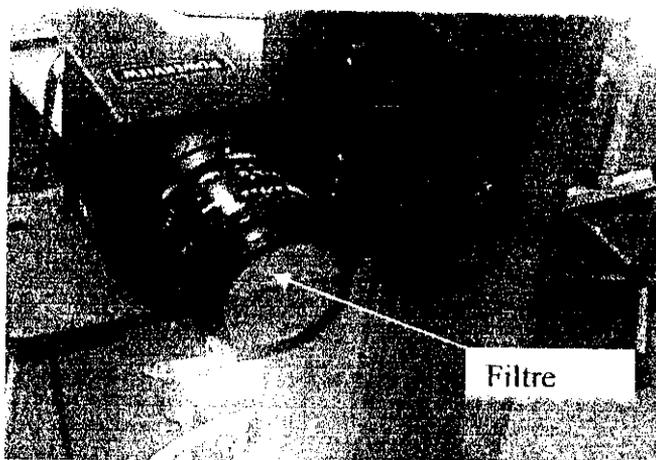


Figure 153. Caméra d'enregistrement.

### **Annexe 15 : essais de répétabilité et de fidélité des détecteurs**

#### **Essai avec un seul détecteur :**

Pour essayer l'habilité de ces détecteurs, on a fait un essai avec un seul détecteur, mis dans le compartiment C2, puis dans le compartiment C1.

Cet essai consiste à injecter de l'hélium seul, à partir d'une source du compartiment C3 (S33), et voir le temps de détection avec deux débits différents. Le détecteur est mis dans le compartiment C1 puis dans le compartiment C2.

Les résultats sont représentés dans le **tableau 13** :

**Tableau 13. Temps de détection des essais préliminaires des détecteurs**

Débit (l/min)	Temps de détection (s)
64	80
70	95

Essai dans le compartiment C1

**Tableau 14. Temps de détection des essais préliminaires des détecteurs**

Débit (l/min)	Temps de détection (s)
80	50
80	53

Essai dans le compartiment C2

#### **Essai avec trois détecteurs :**

Cet essai consiste à mettre 3 détecteurs (du même type), collés cote à cote, au centre géométrique du compartiment C2.

La source d'injection est située dans le compartiment C3, et le débit est de 130 l/mn (hélium seulement).

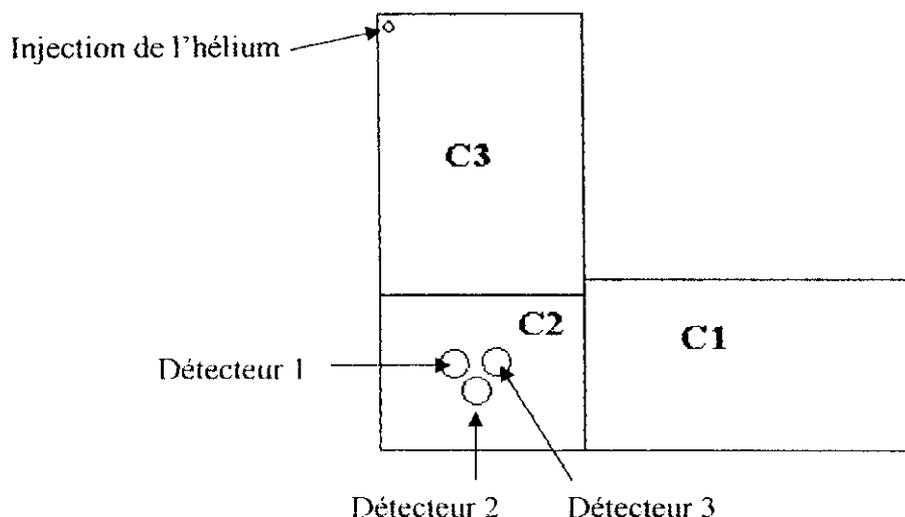


Figure 154. Test de comparaison entre les détecteurs

Les trois détecteurs ont réagi quasiment simultanément.

**Annexe 16 : Autres Principes de détection optique de fumée :**

-L'atténuation de la lumière par les fumées (détecteur opacimétrique linéaire ou ponctuel)



Figure 155. Principe de la détection par atténuation de la lumière

Le récepteur reçoit une intensité lumineuse constante, si la fumée diminue cette intensité au delà d'une certaine valeur, l'alarme s'enclenche.

**Influence de l'angle de diffusion d'un détecteur optique :**

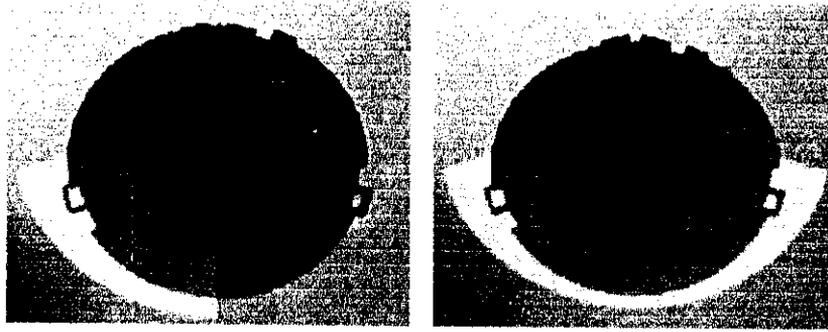


Figure 156. Angle de détection

L'angle de diffusion d'un détecteur représente la position de la diode réceptrice par rapport à la diode émettrice.

La plupart des détecteurs de fumée fonctionnent avec des angles de diffusion compris entre  $90^\circ$  et  $180^\circ$ . Ce secteur angulaire est appelé «diffusion avant». En revanche, la gamme comprise entre  $0^\circ$  et  $90^\circ$  est appelée «diffusion arrière». Plus l'angle s'approche de  $180^\circ$ , plus le signal utile est élevé.

Les détecteurs de fumée fonctionnant selon le principe de la diffusion avant détectent donc moins bien les aérosols sombres que les aérosols clairs. Pour assurer un déclenchement à bon escient de l'alarme en cas de présence d'aérosols sombres, ces détecteurs sont réglés de façon à réagir très tôt aux fumées claires ce qui tend à générer de nombreuses fausses alarmes. Quel que soit l'angle de diffusion choisi, il n'est pas possible de faire la distinction entre les types de fumées, car un seul signal est disponible. Or, cette distinction est indispensable si l'on veut diminuer le taux de fausses alarmes. Les dernières innovations en science de détection incendie éliminent ce problème par l'utilisation de deux faisceaux de lumière fonctionnant avec des angles différents et positionnés de façon qu'un des faisceaux détecte très bien les aérosols clairs tandis que l'autre reconnaît très bien les aérosols sombres. Il devient alors possible de faire la différence entre les types de fumée, puisque le résultat des mesures des deux faisceaux est comparé. Le rapport obtenu décrit la luminosité de la fumée et adapte la sensibilité du détecteur au type de fumée concerné. On obtient de cette façon une sensibilité presque constante, malgré la présence d'aérosols différents, ce qui entraîne une forte diminution du taux de fausses alarmes.

## Annexe 17 : Cotations

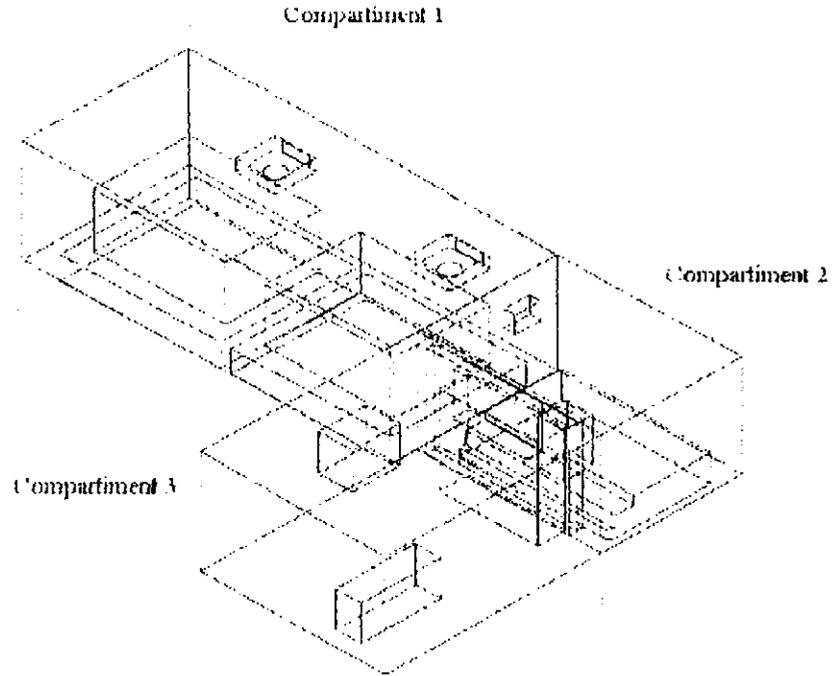


Figure 157. Vue 3D de la maquette et cotation

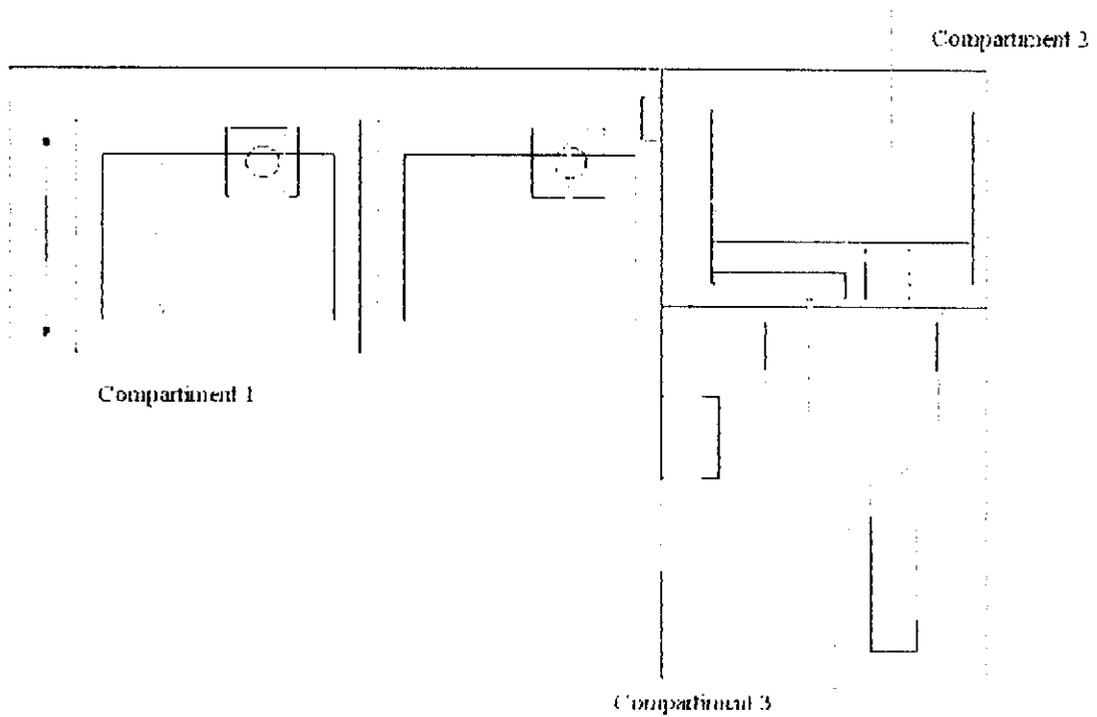
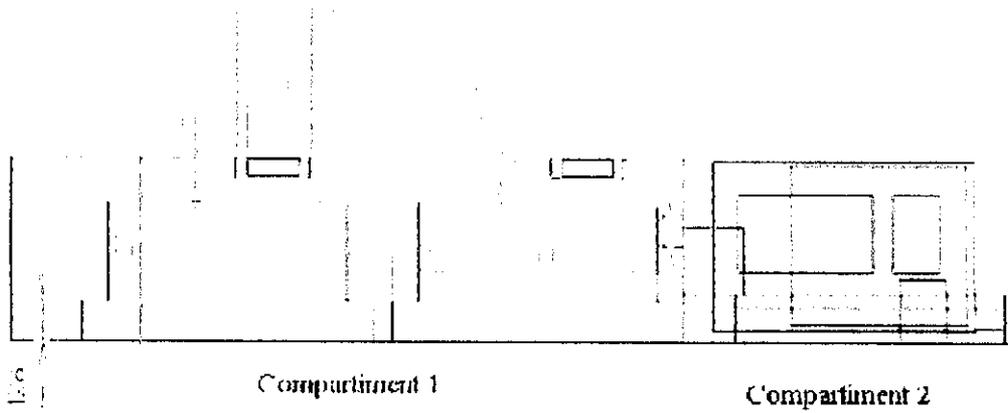
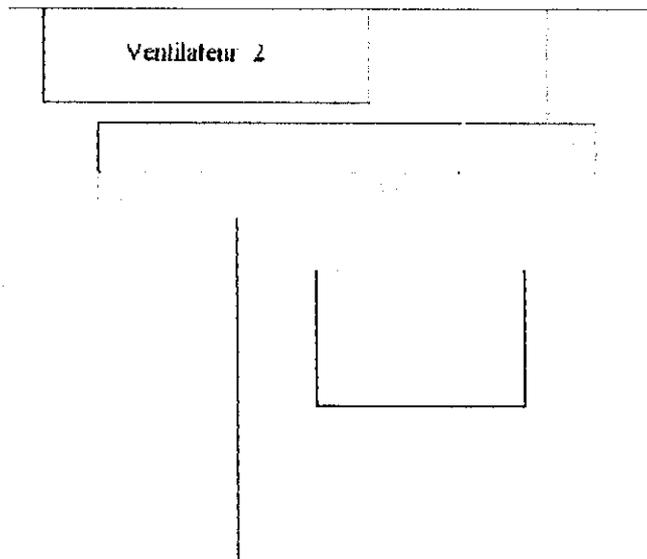


Figure 158. Vue de haut de la maquette et cotation



**Figure 159. Vue de coté de la maquette et cotation**  
*Compartment 1*



**Figure 160. Cotation de l'ouverture F1**

Compartiment 1

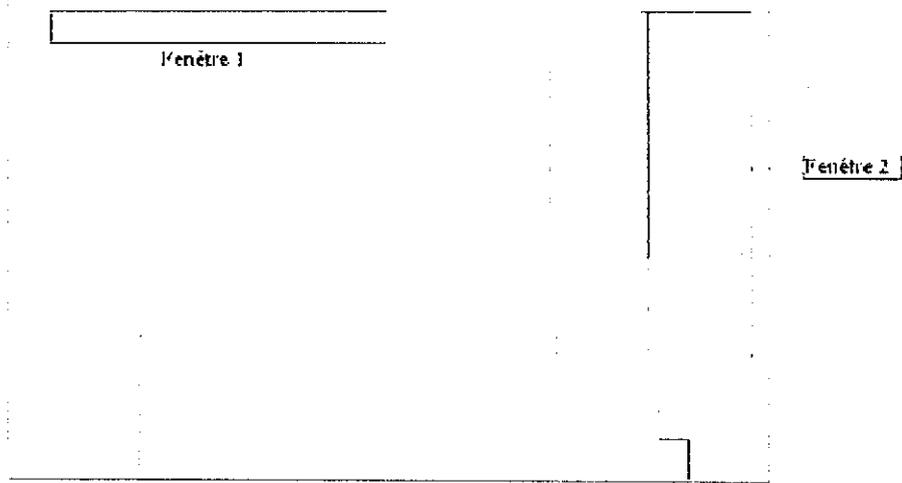


Figure 161. Cotation de l'ouverture F2

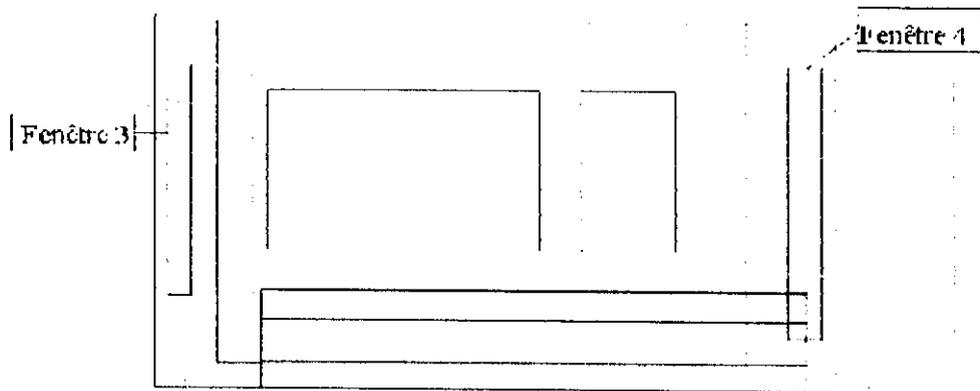


Figure 162. Cotation des ouvertures F3 et F4

## Lexique

On donnera ainsi les définitions suivantes pour désigner les phénomènes cités dans ce travail :  
**FEU COUVANT**. Angl. smouldering. Combustion lente d'un matériau, sans flamme ni émission visible de lumière, et généralement révélée par une élévation de la température ou par émission de fumée (ou les deux à la fois). Il correspond à une oxydation lente auto-entretenu de gaz combustibles, accompagnée d'une faible libération d'énergie. Le feu couvant se caractérise par la décomposition du matériau considéré, un fort dégagement de fumée et une incandescence locale due à la réaction entre le résidu solide et l'oxygène de l'air.

**BACKDRAFT ou EXPLOSION DE FUMÉES** : déflagration de gaz surchauffés présents dans la couche de fumées se produisant lors de l'apport d'oxygène dans un volume mal ventilé et présentant un déficit en comburant dû à la combustion.

**FLASH-OVER ou EMBRASEMENT GENERALISE ECLAIR** : passage brusque à l'état de combustion généralisé en surface de l'ensemble des matériaux combustibles dans un espace fermé.

# Tables

## Tables des illustrations :

Figure 1. Le TGV allemand ICE3 conçu par Siemens, dépasse les 300km/h de vitesse.	8
Figure 2. Schéma de la maquette	10
Figure 3. Schéma de la maquette	11
Figure 4. Schéma de la maquette (les sorties des ventilateurs et les ouvertures sont colorées)	11
Figure 5. Vue 3D de la maquette.	12
Figure 6. Disposition des ouvertures	13
Figure 7. Ventilateur centrifuge du convertisseur électrique [Source Papst]	13
Figure 8. Evolution de l'incendie [source Techniques de l'Ingénieur] [2].	16
Figure 9. Evolution de la température au dessus des sièges [source [4]].	18
Figure 10. Evolution de la concentration en oxygène, en dioxyde et monoxyde de carbone, en deux endroits du van [source [4]].	18
Figure 11. Produits de la combustion de Propane en fonction de la richesse. [Source NISTIR 6588]	19
Figure 12. Échantillon de polyéthylène subissant une pyrolyse.	20
Figure 13. Profil de température et de vitesse au centre du panache selon les observations de McCafrey 1979, Cox & Chitty 1980, Heskestad 1981, Kung & Stavrianidis 1983, Gengembre et al. 1984 [8].	22
Figure 14. Modèle simplifié de panache de fumée. [Source NISTIR 5516].	23
Figure 15. Expérience de Thorpe (Exp. O. Pouliquen, Polytechnique) (fluides de densité différente).	27
Figure 16. Diode Emettrice	30
Figure 17. Diode Réceptrice	30
Figure 18. Schéma de fonctionnement d'un détecteur optique de fumées	30
Figure 19. Dispositif de la LDV [14].	32
Figure 20. Volume de mesures	33
Figure 21. Dimensions du volume de mesure	33
Figure 22. Système LDV de la sonde compacte	35
Figure 23. Montage d'un système PIV.	37
Figure 24. Principe de la PIV	38
Figure 25. Déplacement des particules entre deux instants	38
Figure 26. Atomiseur immergé de type Laskin nozzle [13].	41
Figure 27. Générateur de particules utilisé pour nos expériences.	42
Figure 28. Repère lié aux ventilateurs	42
Figure 29. Repérage du ventilateur	43
Figure 30. Profil de vitesses normales à la sortie du ventilateur V2	44
Figure 31. Profil de vitesses normales à la sortie du ventilateur V1	45
Figure 32. Profil de vitesses tangentiels à la sortie du ventilateur V2	46
Figure 33. Ecartes types des mesures LDV relevées sur le ventilateur V2	47
Figure 34. Intensité turbulente relevée sur le ventilateur V2	48
Figure 35. Disposition verticale du plan de lumière	49
Figure 36. Disposition horizontale du plan lumière.	49
Figure 37. Champ de vitesse et niveaux de module du vecteur vitesse (m/s).	51
Figure 38. Plan PIV vertical à la sortie du ventilateur V1 (m/s)	52
Figure 39. Plan PIV vertical à la sortie du ventilateur V1 (m/s)	52
Figure 40. Plan PIV vertical à la sortie du ventilateur V1 (m/s)	53
Figure 41. Plan PIV vertical à la sortie du ventilateur V1 (m/s)	53
Figure 42. Plan PIV vertical à la sortie du ventilateur V2 (m/s)	54
Figure 43. Plan PIV vertical à la sortie du ventilateur V2 (m/s)	54
Figure 44. Plan PIV vertical à la sortie du ventilateur V2 (m/s)	55
Figure 45. Plan PIV horizontal à la sortie du ventilateur V1 (m/s)	56
Figure 46. Plan PIV horizontal à la sortie du ventilateur V1 (m/s)	57
Figure 47. Plan PIV horizontal à la sortie du ventilateur V1 (m/s)	58
Figure 48. Plan PIV horizontal à la sortie du ventilateur V1 (m/s)	59
Figure 49. Plan PIV horizontal à la sortie du ventilateur V1 (m/s)	60
Figure 50. Plan PIV horizontal à la sortie du ventilateur V2 (m/s)	61
Figure 51. Plan PIV horizontal à la sortie du ventilateur V2 (m/s)	62
Figure 52. Plan PIV horizontal à la sortie du ventilateur V2 (m/s)	63
Figure 53. Vitesses normales à la sortie du ventilateur V2 mesurées par PIV et LDV	64

Figure 54. Vitesses tangentielles à la sortie du ventilateur V2 mesurées par PIV et LDV	65
Figure 55. Schéma de l'ouverture F1, du repère associé et du croisement des faisceaux laser	66
Figure 56. Croisement de faisceaux laser (LDV)	66
Figure 57. Sonde LDV inclinée	69
Figure 58. Mesures LDV dans le compartiment C1 de vitesses normales à l'ouverture F1	69
Figure 59. Mesures LDV dans le compartiment C1 de vitesses normales à l'ouverture F1	70
Figure 60. Mesures LDV dans le compartiment C1 de vitesses normales à l'ouverture F1 (m/s).	70
Figure 61. Mesures LDV sur F1 inversion de la vitesse.	71
Figure 62. Mesures LDV dans le compartiment C2 de vitesses normales à l'ouverture F1	71
Figure 63. Comparaison des mesures LDV dans le compartiment C1 de vitesses normales à l'ouverture F1	72
Figure 64. Fluctuations de vitesse au niveau de la fenêtre F1	72
Figure 65. Signal d'une mesure LDV sur l'ouverture F1.	73
Figure 66. Intensité turbulente des vitesses normales à l'ouverture F1 (mesures LDV)	73
Figure 67. Signal LDV d'une mesure de vitesse au niveau de l'ouverture F1 (coté compartiment C1)	74
Figure 68. Schéma du montage PIV sur l'ouverture F1.	74
Figure 69. Mouvement de l'air au niveau de l'ouverture F1	75
Figure 70. Plan PIV horizontal au niveau de l'ouverture F1 dans le compartiment C1 (m/s).	76
Figure 71. Plan PIV horizontal au niveau de l'ouverture F1 dans le compartiment C1 (m/s).	77
Figure 72. Plan PIV horizontal au niveau de l'ouverture F1 dans le compartiment C1 (m/s).	78
Figure 73. Plan PIV horizontal au niveau de l'ouverture F1 dans le compartiment C1 (m/s).	79
Figure 74. Vitesses tangentielles ouverture F1	80
Figure 75. Comparaison des mesures de vitesses au niveau de l'ouverture F1	80
Figure 76. Mesures LDV des vitesses normales à l'ouverture F2 (réalisées dans le compartiment C1 à 1cm de l'ouverture)	82
Figure 77. Montage PIV sur l'ouverture F3 (maquette vue de côté)	82
Figure 78. Plan PIV horizontal au niveau de l'ouverture F3 dans le compartiment C2 (m/s).	84
Figure 79. Plan PIV horizontal au niveau de l'ouverture F3 dans le compartiment C2 (m/s).	85
Figure 80. Plan PIV horizontal au niveau de l'ouverture F3 dans le compartiment C2 (m/s).	86
Figure 81. Plan PIV horizontal au niveau de l'ouverture F3 dans le compartiment C2 (m/s).	87
Figure 82. Plan PIV horizontal au niveau de l'ouverture F3 dans le compartiment C2 (m/s).	88
Figure 83. Positionnement de la sonde LDV pour la mesure sur l'ouverture F4	89
Figure 84. Disposition du plan Laser pour l'ouverture F4	89
Figure 85. Ecoulement dans une conduite avec élargissement brusque	90
Figure 86. Variations de la vitesse au cours du temps en $y_4 = 380\text{mm}$	90
Figure 87. Vitesses normales à l'ouverture F4	91
Figure 88. Plan PIV horizontal au niveau de l'ouverture F4 dans le compartiment C2 (m/s).	92
Figure 89. Plan PIV horizontal au niveau de l'ouverture F4 dans le compartiment C2 (m/s).	93
Figure 90. Plan PIV horizontal au niveau de l'ouverture F4 dans le compartiment C2 (m/s).	94
Figure 91. Plan PIV horizontal au niveau de l'ouverture F4 dans le compartiment C2 (m/s).	95
Figure 92. Plan PIV horizontal au niveau de l'ouverture F4 dans le compartiment C2 (m/s).	96
Figure 93. Plan PIV horizontal au niveau de l'ouverture F4 dans le compartiment C2 (m/s).	97
Figure 94. Plan PIV horizontal au niveau de l'ouverture F4 dans le compartiment C2 (m/s).	98
Figure 95. Plan PIV horizontal au niveau de l'ouverture F4 dans le compartiment C2 (m/s).	99
Figure 96. Plan PIV horizontal au niveau de l'ouverture F4 dans le compartiment C2 (m/s).	100
Figure 97. Lignes de courant	101
Figure 98. Comparaison des résultats expérimentaux et numériques sur l'ouverture F1	102
Figure 99. F1 résultats Fluent	102
Figure 100. F1 plan PIV (voir Fig. 71)	102
Figure 101. Proportion d'hélium dans le mélange en fonction de l'écart de température	109
Figure 102. Positions des détecteurs pour le test préliminaire	112
Figure 103. Répartition des sources d'injection du mélange air-Hélium, et des détecteurs	113
Figure 104. Dimensions des ventilateurs	127
Figure 105. Débit des ventilateurs en fonction de la différence de pression statique (courbe n°2)	127
Figure 106. Diffusion de la lumière	128
Figure 107. Diffusion de la lumière	129
Figure 108. Intensité diffusée par une particule de diamètre d en fonction de la longueur d'onde.	130
Figure 109. Intensité de lumière diffusée en fonction de l'angle de réception.	130
Figure 110. Densité de probabilité d'une mesure LDV de vitesse	131
Figure 111. Mesure sur l'ouverture F1 (vitesse moyenne de -2.48m/s)	132
Figure 112. Réponse d'un détecteur optique et ionique à un feu couvant de bois	133

Figure 113. Réponse d'un détecteur optique et ionique à une fumée de cigarette [33].	133
Figure 114. F1 Partie entrante	134
Figure 115. F1 Partie sortante	135
Figure 116. F1 Partie entrante	135
Figure 117. F1 Partie sortante	136
Figure 118. F1 Partie entrante, Champ moyen de vitesses normales au plan de l'ouverture F1	136
Figure 119. F1 Partie sortante, Champ moyen de vitesses normales au plan de l'ouverture F1.	137
Figure 120. F1 Partie entrante, Champ moyen de vitesses tangentielles au plan de l'ouverture	137
Figure 121. F1 Partie sortante, Champ moyen de vitesses tangentielles au plan de l'ouverture	138
Figure 122. F1 Partie entrante, Distribution de la turbulence	138
Figure 123. F1 Partie sortante, Distribution de la turbulence	139
Figure 124. F1 Partie entrante, vorticité	139
Figure 125. Partie sortante, Champ de vorticité	140
Figure 126. Fenêtre de détermination de l'intervalle de temps, ainsi que la fréquence entre les deux impulsions	140
Figure 127. Fenêtre de détermination de la taille de la fenêtre d'interrogation	140
Figure 128. Fenêtre de la calibration.	141
Figure 129. Fenêtre des filtres et de la Macro.	141
Figure 130. Paramètres optiques. Calcul de la valeur de l'interfrange.	142
Figure 131. Filtres Passe-haut et passe-bas, et la fréquence d'échantillonnage, ainsi que le rapport Signal-bruit.	142
Figure 132. Signal de la fluctuation de vitesse en fonction du temps.	143
Figure 133. Courbe gaussienne repr�sant les fluctuations de vitesses.	143
Figure 134. Système de génération de fumée.	143
Figure 135. Débitmètres	144
Figure 136. Détecteur Sicli P9	144
Figure 137. Dimensions du détecteur	145
Figure 138. Côtes des sources aux parois adjacentes, en centimètres (x,y).	145
Figure 139. Maquette	146
Figure 140. Sonde de fil chaud, et le calculateur de vitesse	146
Figure 141. Montage pour la mesure de la composante tangentielle de la vitesse à la sortie des ventilateurs.	147
Figure 142. Générateur de courant électrique pour le fonctionnement des ventilateurs.	147
Figure 143. Laser Nd-YAG	147
Figure 144. Unité de délivrance de puissance pour le Laser	148
Figure 145. Montage de la caméra sur les rails, permettant le déplacement dans toutes les directions. (Mesure sur les ventilateurs dans le cas de plan vertical)	148
Figure 146. Position du Laser par rapport à l'ouverture F4.	148
Figure 147. La sonde de mesures � deux composantes.	149
Figure 148. Système optique de division du faisceau, pour la sonde à deux composantes	149
Figure 149. Inclinaison de la sonde et position du volume de mesure sur l'ouverture.	150
Figure 150. Sonde LDV à deux composantes	150
Figure 151. Générateur de fumée de spectacle	151
Figure 152. Mesure PIV sur l'ouverture F4	151
Figure 153. Caméra d'enregistrement.	152
Figure 154. Test de comparaison entre les détecteurs	153
Figure 155. Principe de la détection par atténuation de la lumière	153
Figure 156. Angle de détection	154
Figure 157. Vue 3D de la maquette et cotation	155
Figure 158. Vue de haut de la maquette et cotation	155
Figure 159. Vue de coté de la maquette et cotation	156
Figure 160. Cotation de l'ouverture F1	156
Figure 161. Cotation de l'ouverture F2	157
Figure 162. Cotation des ouvertures F3 et F4	157

### Table des tableaux :

Tableau 1. Répartition de la charge combustible dans le convertisseur	14
Tableau 2. Caractéristiques de la sonde LDV utilisée. [Source Documentation TSI [17]]	36
Tableau 3. Dimension, vitesse de sédimentation et temps de réponse des particules. [Source TSI réf (17)]	41

<i>Tableau 4. Comparaison entre les vitesses normales des deux ventilateurs</i>	46
<i>Tableau 5. Débits des ventilateurs</i>	65
<i>Tableau 6. Propriétés physiques de l'air et de l'hélium</i>	104
<i>Tableau 7. Récapitulatif des paramètres des simulations</i>	113
<i>Tableau 8. Temps de détection. Résultats de la 1<sup>ère</sup> série d'expériences avec le mélange air-Hélium</i>	114
<i>Tableau 9. Temps de détection. Résultats de la 2<sup>ème</sup> série d'expériences sans hélium</i>	114
<i>Tableau 10. Comparaison entre les résultats de la 1<sup>ère</sup> et 2<sup>ème</sup> séries d'expériences</i>	114
<i>Tableau 11 : Temps de détection avec et sans ventilation</i>	118
<i>Tableau 12. Caractéristiques techniques</i>	144
<i>Tableau 13. Temps de détection des essais préliminaires des détecteurs</i>	152
<i>Tableau 14. Temps de détection des essais préliminaires des détecteurs</i>	152