



Département de Génie Mécanique
Projet de fin d'études

Réalisé par

Ahmed AMRAOUI

Pour l'obtention du

Diplôme d'Ingénieur d'Etat

En Génie Mécanique

**Sujet : Etude du comportement d'un jet d'air excité
acoustiquement impactant une plaque chauffée**

Proposé et dirigé par :

Mr Bouzid BENKOUSSAS, MC(A),ENP

Mr Amor BOUHDJAR, DR, CDER

En collaboration avec :

Mr Philippe CAMINAT, Prof., Université de la Méditerranée de Marseille

Mr Philippe BOURNOT Prof., Université de la Méditerranée de Marseille

ملخص

يتضمن هذا العمل دراسة تجريبية لنفاثة هواء مثار مصطدم بصفحة مستوية أفقية ساخنة. الهواء المنبعث من النفاثة الأسطوانية، مثار بواسطة موجة صوتية جيبية. تم إعداد جهاز تجريبي ومعدات وتقنيات قياس مناسبة لتحقيق هذه الدراسة. أبرزت النتائج المحصل عليها أثرا لإثارة الصوتية على بنية الهواء المنفوث و كذا التبادل الحراري بين الهواء و الصفيحة. تم إجراء مشاهد بواسطة توموغرافيا الليزر، والقيام بدراسة نوعية لتأثير الموجة الصوتية. قياسات درجة الحرارة مكنت من توضيح أثر هذه الإثارة على سرعة تبريد الصفيحة، كما أن قياسات السرعة بواسطة الليزر أكدت ملاحظات توموغرافيا الليزر. النتائج المحصل عليها في هذا العمل، أثبتت مدى نجاعة الإثارة الصوتية في تحسين التبادل الحراري بين الهواء و الصفيحة .

كلمات مفتاحية : نفاثة ، إثارة صوتية ، نفاثة مصطدمة.

Résumé

Ce travail comporte une étude expérimentale du comportement d'un jet d'air excité impactant une plaque plane horizontale chauffée. L'éjection est axisymétrique pulsée par une onde acoustique sinusoïdale. Un dispositif expérimental et une instrumentation adéquate ont été mis en place pour réaliser cette étude. Les résultats trouvés ont mis en évidence l'effet de la perturbation sur la structure du jet ainsi que sur le couplage thermique fluide-plaque. Les visualisations par tomographie laser ont été faites pour identifier les aspects qualitatifs de l'écoulement. Les mesures thermiques sont effectuées par pyrométrie et thermométrie conventionnelle, pour montrer l'influence de la perturbation sur la qualité du refroidissement. La technique de l'LDV est utilisée pour la mesure de vitesse. Cette dernière est utilisée pour caractériser l'écoulement. Les résultats obtenus montrent l'efficacité de l'excitation vis-à-vis du refroidissement.

Mots clés : jet impactant, écoulement pariétal, résonance, excitation acoustique, turbulence.

Abstract

This work includes a study of an excited air jet impinging a heated flat plate. The axisymmetric ejection is disturbed by a sinusoidal acoustic wave. An experimental device and an adequate instrumentation were set up to realize the study. The results show the effect of the disturbance on the structure of the jet as well as on the thermal coupling fluid-plate. Visualizations by tomography laser are made to identify the qualitative aspects. The thermal measures are made by pyrometry and conventional thermometry, in order to show the effect of the excitation on the quality of the cooling. The LDV technique is used for velocity measurement. The last is used to characterize the flow. Obtained results show the efficiency of the excitation upon the cooling.

Keywords: jet impacting, resonance, acoustic excitation, turbulence, laser tomography.

Remerciements

Louanges au bon Dieu qui m'a donné la foi et le courage de mener à bien ce Modeste travail.

Je tiens tout d'abord à témoigner ma grande reconnaissance à mes encadrateurs, Messieurs Bouzid BENKOUSSAS et Amor BOUHDJAR, maître de conférences à l'Ecole Nationale Polytechnique d'Alger et directeur de recherche au CDER, qui m'ont soutenu et conseillé tout le long de ce stage à fin de mener à bien ce travail.

Un remerciement particulier à Monsieur Philippe CAMINAT professeur à l'IM², pour son soutien, ses conseils judicieux, sa gentillesse et sa disponibilité. Qu'il veuille bien trouvé ici l'expression de ma profonde et très respectueuse gratitude.

Je remercie également Monsieur Philippe BOURNOT, pour m'avoir accueilli au sein de l'UNIMECA, pour avoir veillé à ce que le stage se déroule dans de ci bonnes conditions. Et pour ses conseils et son encouragement.

Merci aux membres du jury, Messieurs BENBRAIKA, LARBI et BOUBAKEUR, d'avoir pris le temps et le soin de lire ce rapport.

Pour finir, je remercie toutes les personnes qui ont contribué, de près ou de loin, à la réalisation de ce travail.

Dédicaces

Je dédie le fruit de mes efforts à toutes les personnes chères à mon cœur, qui par leur soutien, amour et encouragement ont contribué à l'aboutissement de ce travail.

A mes chers parents qui ont toujours été là pour moi, et qui m'ont donné un magnifique modèle de labeur et de persévérance. J'espère qu'ils trouveront dans ce travail toute ma reconnaissance et tout mon amour pour leurs sacrifices, leur soutien et leur confiance en moi.

A mon frère Mohammed, Brahim, Amine, Houssine et à toute ma famille sans oublier personne.

A mes chers amis les étudiants du département du génie mécanique à l'École Nationale Polytechnique

Egalement, je remercie Rabah, Houda et tous les stagiaires du programme MED-Accueil pour m'avoir accompagné dans cette aventure.

Une pensée pour tous ceux qui m'ont soutenu de près ou de loin durant mes études.

Ahmed.

Sommaire

INTRODUCTION GENERALE	1
CHAPITRE I ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE SUR LES JETS.....	2
I.1. DEFINITIONS ET GENERALITES	2
I.1.1. Définition d'un jet	2
I.1.2. Régime d'écoulement	3
I.1.3. Développement d'un jet libre	3
I.1.4. Développement d'un jet impactant.....	5
I.2. JET PULSE PAR UNE EXCITATION ACOUSTIQUE.....	6
I.3. MODES DE TRANSFERT THERMIQUE.....	7
I.3.1. La conduction	7
I.3.2. La convection.....	8
I.3.3. Rayonnement.....	10
I.4. PROBLEMATIQUE	11
I.5. ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE SUR LES JETS.....	12
CHAPITRE II DISPOSITIF EXPERIMENTAL ET INSTRUMENTATIONS.....	15
II.1. PRESENTATION DU DISPOSITIF EXPERIMENTAL DE BASE	15
II.2. DISPOSITIF D'ALIMENTATION DU JET, D'ENSEMENCEMENT ET D'EXCITATION	18
II.3. EQUIPEMENTS DE TRAITEMENT ET D'ACQUISITION DES DONNEES.....	21
II.4. INSTRUMENTS DE VISUALISATION ET DE MESURE	22
II.4.1. Tomographie laser	22
II.4.2. Thermométrie	26
II.4.3. Pyrométrie.....	28
II.4.4. La Vélocimétrie Laser Doppler LDV.....	29

II.5. CONCLUSION.....	32
CHAPITRE III RESULTATS EXPERIMENTAUX DE L'ETUDE ACOUSTIQUE	33
III.1. INTRODUCTION.....	33
III.2. NOTIONS D'ACOUSTIQUE	33
III.2.1. Onde acoustique	33
III.2.2. Intensité et puissance acoustique	34
III.2.3. Phénomène de résonance.....	35
III.2.4. Résonateur de Helmholtz	35
III.3. ETUDE DE LA REPOSE FREQUENTIELLE.....	36
III.3.1. Conditions de l'expérience	36
III.3.2. Résultats et discussions	37
III.3.3. Etude du comportement du jet libre	40
III.4. CONCLUSION	43
CHAPITRE IV ETUDE THERMIQUE DU COUPLAGE FLUIDE-PAROI.....	44
IV.1. INTRODUCTION.....	44
IV.2. PARAMETRES OPERATOIRES ET RESULTATS DES VISUALISATIONS	44
IV.2.1. Influence de la température de la plaque	47
IV.2.2. Influence du nombre de Reynolds	48
IV.2.3. Influence de la hauteur adimensionnelle H/D.....	49
IV.2.4. Influence de l'excitation acoustique	50
IV.3. MESURE DE TEMPERATURE.....	54
IV.3.1. Conditions d'expérience.....	54
IV.3.2. Résultats et discussion.....	55
IV.4. MESURE DU PROFIL DE VITESSE A LA SORTIE DE LA BUSE	58
IV.5.1 Condition d'expérience.....	58
IV.5.2. Effet de l'excitation dans le cas laminaire	59
IV.5.3. Effet de l'excitation dans le cas turbulent	60

IV.6. EVOLUTION DE LA VITESSE AXIALE.....	62
IV.7. COURBES DE REFROIDISSEMENT.....	63
IV.7.1. Condition d'expérience.....	63
IV.7.2. Résultats et discussion.....	64
IV.7.3. Effet de l'excitation dans le cas laminaire.....	64
IV.7.4. Effet de l'excitation dans le cas turbulent.....	65
IV.7.5. Autres cas de régime d'écoulement.....	66
IV.8. APPROCHE D'EVALUATION DU COEFFICIENT GLOBAL DU TRANSFERT DE CHALEUR.....	67
IV.8.1. Isolation de la plaque.....	68
IV.8.2. Bilan thermique.....	69
CONCLUSION GENERALE.....	71
BIBLIOGRAPHIE ET WEBOGRAPHIE.....	73
ANNEXES.....	75

Liste des figures

Figure I-1 Développement d'un jet libre.....	4
Figure I-2 développement d'un jet impactant.....	5
Figure I-3 Tomographie laser d'un jet plan excité ($Re = 500$).....	6
Figure I-4 Transfert de chaleur par conduction.....	8
Figure I-5 Principe de fonctionnement de la convection thermique.....	9
Figure I-6 Représentation schématique de la convection naturelle.....	10
Figure I-7 Représentation schématique de la convection forcée.....	10
Figure II-1 Buses d'éjection.....	15
Figure II-2 Plaque chauffée.....	16
Figure II-3 Vulcanic 32045-12.....	17
Figure II-4 Maquette réelle.....	18
Figure II-5 (a) Ensemenceur,(b) détenteur,(c)débitmètre.....	19
Figure II-6 Fixation du haut parleur à l'intérieur de l'enceinte.....	20
Figure II-7 Enceinte de tranquillisation.....	20
Figure II-8 Poste d'alimentation et d'acquisition.....	21
Figure II-9 Principe de fonctionnement du Tomographie laser.....	22
Figure II-10 Image du jet dans un plan laser.....	23
Figure II-11 Laser BeamLok Spectra physics.....	24
Figure II-12 Lunette de protection.....	25
Figure II-13 Caméra SONY.....	25
Figure II-14 Mesure de la f.é.m. générée par un couple thermoélectrique.....	26
Figure II-15 Pyromètre.....	29

Figure II-16 Volume de mesure	29
Figure II-17 Signal électrique du récepteur.....	30
Figure II-18 Principe de fonctionnement de la LDA.....	31
Figure III-1 Propagation d'une onde sonore	34
Figure III-2 Courbe de résonance.....	35
Figure III-3 Schéma d'un résonateur de Helmholtz	36
Figure III-4 Configuration utilisée pour l'étude de la réponse fréquentielle.....	36
Figure III-5 Sensibilité de la réponse fréquentielle à la longueur de la buse.....	38
Figure III-6 Sensibilité de la réponse fréquentielle au changement du Re	39
Figure III-7 : Configuration utilisée pour l'étude d'un jet libre	40
Figure III-8 Visualisation par tomographie laser d'un jet libre $Re= 1700$; $L=53$ cm	42
Figure III-9 Visualisation par tomographie laser d'un jet libre $Re= 5260$; $L=53$ cm	43
Figure IV-1 Configuration utilisée pour le jet impactant une plaque chauffée	45
Figure IV-2 Influence de la température de la plaque sur la position du point de décollement	47
Figure IV-3 Influence du nombre de Reynolds sur la position du point de décollement	48
Figure IV-4 Influence du nombre de Reynolds sur la position du point de décollement	49
Figure IV-5 Influence de la hauteur sur la position du point de décollement	50
Figure IV-6 Influence de l'excitation sur la position du point de décollement	51
Figure IV-7 Influence de l'excitation sur la position du point de décollement	52
Figure IV-8 Thermocouple utilisé pour la mesure de température.....	54
Figure IV-9 les points de mesure	55
Figure IV-10 Distribution spatiale de la température	55
Figure IV-11 Evolution de la température de l'air.....	56
Figure IV-12 Distribution spatiale de la température pour $Re=1700$	57

Figure IV-13 Mesure de vitesse à la sortie de la buse par LDV	58
Figure IV-14 Les points de mesure de vitesse.....	59
Figure IV-15 Profil de vitesse à la sortie de la buse.....	59
Figure IV-16 Mesure du RMS	60
Figure IV-17 Profil de vitesse à la sortie de la buse (Re=5080).....	61
Figure IV-18 Jet libre Re=5260 (a)-F=320HZ, (b)-F=0Hz	61
Figure IV-19 Mesure du RMS	62
Figure IV-20 Evolution de la vitesse axiale Re=5260.....	63
Figure IV-21 Dispositif de mesure de la température	63
Figure IV-22 Courbes de refroidissement (Re=1700).....	64
Figure IV-23 Courbes de refroidissement (Re=5260).....	65
Figure IV-24 Courbes de refroidissement (Re=3500,Re=7000)	66
Figure IV-25 Comparaison des courbes de refroidissement (Re=5260, Re=7000).....	67
Figure IV-26 Flux de chaleur dans la plaque avant et après l'isolation	68
Figure IV-27 Mesure de la puissance électrique consommée dans la résistance	69

Liste des tableaux

Tableau II-1 Désignation des équipements	21
Tableau II-2 Caractéristiques techniques de la caméra.	25
Tableau III-1 Les différents tests effectués pour l'étude de la réponse fréquentielle	37
Tableau III-2 Fréquences de résonance pour les tests 1 et 2	38
Tableau III-3 Fréquences de résonance pour les tests 3 et 4	39
Tableau III-4 Différents cas visualisés par tomographie laser	41
Tableau IV-1 Différents cas visualisés par tomographie.....	45
Tableau IV-2 Coordonnées des points de mesure	54
Tableau IV-3 Bilan thermique	70

Nomenclature

Lettres Latines

c : vitesse du son (m/s)

D : diamètre caractéristique de la buse [m]

F : fréquence d'excitation acoustique [Hz]

H : hauteur de la buse à partir de la plaque [m]

h : coefficient de transfert de chaleur par convection [$W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$]

I : intensité sonore

L : longueur de la buse [cm]

S : surfaces [m^2]

T : température statique [$^{\circ}C$]

U : composante de la vitesse axiale [m/s]

x, y, z : coordonnées cartésiennes

Re : nombre de Reynolds

Nu : nombre du Nusselt

Pr : nombre de Prandtl

Ra : nombre de Rayleigh

Lettres Grecques

Γ : angle d'incidence entre les deux faisceaux laser [rd]

Δ : différence, petite variation

δ : l'interfrange [mm]

ε : facteur d'émission de la surface

θ : température adimensionnelle

λ : Conductivité thermique du milieu [$W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$]

ν : viscosité cinématique [m^2/s]

ρ : masse volumique du fluide [kg/m^3]

σ : constante de Stephan [$W \cdot m^{-2} \cdot K^{-4}$]

φ : flux de chaleur transmis par conduction [W]

Indice:

c : convection

i : initial

m : moyen

p : paroi ou surface

R : rayonnement

∞ : ambiant

0 : référence

Introduction Générale

L'utilisation des jets, dans leurs différentes configurations, est très répandue dans le milieu industriel. Une configuration souvent utilisée est celle du jet impactant. Les traits caractéristiques de cet écoulement sont le transfert de chaleur et de masse intensif. Les jets impactants trouvent, par conséquent, des applications dans des domaines variés tels que le refroidissement des aubes de turbines aéronautiques, de composants électroniques, la trempe des surfaces vitrées, le refroidissement des miroirs de laser, l'isolation des cordons lors du soudage par laser, le séchage du papier et des textiles . . . etc.

Il devient alors important d'étudier tous les aspects concernant un écoulement de type jet afin de comprendre les phénomènes le régissant.

L'objectif principal de ce travail est d'étudier l'effet de l'excitation acoustique sur le développement du jet impactant. La pulsation favorise la turbulence et l'épanouissement du jet, ce qui peut augmenter le coefficient d'échange convectif et élargir la surface impactée par le jet ce qui améliore la qualité de refroidissement. Nous passerons pour cela par des étapes de visualisation de l'écoulement, de mesures de vitesse et de mesures de température.

Le travail est réparti sur quatre chapitres : Le premier chapitre présente une description générale des caractéristiques des jets et une bibliographie sur les études antérieures faites sur ce type d'écoulement, dans le deuxième on présente les techniques de mesures et l'instrumentation utilisée. Le chapitre suivant est consacré pour l'étude acoustique afin de caractériser notre système d'excitation. Dans le dernier chapitre nous procéderons à une étude du couplage thermique fluide-paroi où on effectue des mesures de température et de vitesse, il contient une approche pour déterminer un coefficient d'échange global qui sera utile, par exemple, pour prévoir les temps nécessaires au refroidissement de composants impliqués dans diverses applications.

Chapitre I

Notions sur les jets et étude bibliographique

Chapitre I : Etude bibliographique sur les jets

I.1. Définitions et généralités

I.1.1. Définition d'un jet

Un jet est un écoulement obtenu à partir d'une différence de pression entre deux milieux différents qui sont le milieu source, c'est-à-dire l'alimentation et le milieu extérieur dans lequel il va être injecté. La forme et la vitesse de ce jet dépendent de la géométrie de la canalisation de la source ainsi que du milieu extérieur qui peut ne pas être au repos. Le fluide injecté est doté d'une certaine quantité de mouvement, Il en résulte un phénomène de mélange entre les deux fluides [1].

Au fur et à mesure que l'on s'éloigne de la buse :

- l'entraînement induit de l'air ambiant augmente;
- le jet s'élargit;
- la vitesse axiale du jet diminue.

Les jets peuvent être classés selon la buse d'éjection utilisée, on distingue :

- Jet plan : Un jet est dit plan lorsque la section de sortie est très allongée. Le rapport d'allongement, c'est-à-dire la longueur de la buse divisée par sa largeur doit être en pratique de l'ordre ou supérieur à 20.
- Jet axisymétrique : La section de sortie est circulaire.

Il existe deux principales configurations pour un jet [2]. Il peut être :

- Jet Libre : dans le cas où le fluide éjecté se développe naturellement sans heurter d'obstacle ;
- Jet Impactant : dans le cas où le fluide issu de la buse heurte un obstacle placé en travers de l'écoulement.

1.1.2. Régime d'écoulement

On distingue deux types d'écoulement : un écoulement laminaire où le fluide se déplace sous forme de filets parallèles à la paroi solide. Un écoulement turbulent caractérisé par un mélange de filets et apparition de structures tourbillonnaires de différentes tailles.

Pour connaître le régime de l'écoulement, on définit un nombre sans dimension qui est fondamental en mécanique des fluides visqueux. Il évalue le rapport entre les forces d'inertie et les forces de viscosité et est donné par la relation :

$$\text{Re} = \frac{\bar{U}D}{\nu} \quad (\text{I-1})$$

Avec :

U= vitesse moyenne de l'écoulement (m/s).

D= diamètre de la buse (m).

ν = viscosité cinématique ($\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$).

Pour des configurations bien déterminées, comme l'écoulement à l'intérieur d'une conduite cylindrique, le régime de l'écoulement est considéré laminaire pour $\text{Re} < 2100$, transitoire pour $2100 < \text{Re} < 2400$ et turbulent ailleurs. Mais en générale, il n'y a pas de règle générale pour le nombre de Reynolds critique au-delà duquel l'écoulement devient turbulent. Celui-ci prend des valeurs particulières pour chaque type de configuration.

1.1.3. Développement d'un jet libre

Pour un jet à profil de vitesse initial uniforme, l'écoulement se développe en trois régions [3] :

○ **Région I :**

Elle se situe en sortie de tuyère où, les forces d'inertie sont prépondérantes par rapport aux forces de cisaillement. Le jet dans cette région sera constitué d'un noyau potentiel (cône potentiel). La vitesse axiale dans ce noyau reste pratiquement constante et égale à la vitesse moyenne d'éjection. A l'extérieur du cône, se constitue une zone de mélange entre le fluide éjecté et celui ambiant (Figure I.1). Des couches cisillées se développent sous l'effet

d'instabilités de Kelvin-Helmholtz créant de grosses structures périodiques en espace qui sont transportées par l'écoulement moyen.

○ **Région II :**

C'est la zone de transition. Elle est adjacente à la première et est caractérisée par des forces d'inertie et de frottement qui sont du même ordre de grandeur ce qui conduit à :

- ❖ la décroissance de la vitesse axiale avec l'augmentation de la distance de la buse ;
- ❖ La fusion de la couche de mélange sur l'axe, la totalité de l'écoulement participera donc au mélange avec le milieu extérieur.

○ **Région III :**

C'est la zone développée du jet. Elle est caractérisée par des forces d'inertie négligeables devant les forces de frottement. Pour une valeur suffisante du nombre de Reynolds, le jet sera pleinement turbulent.

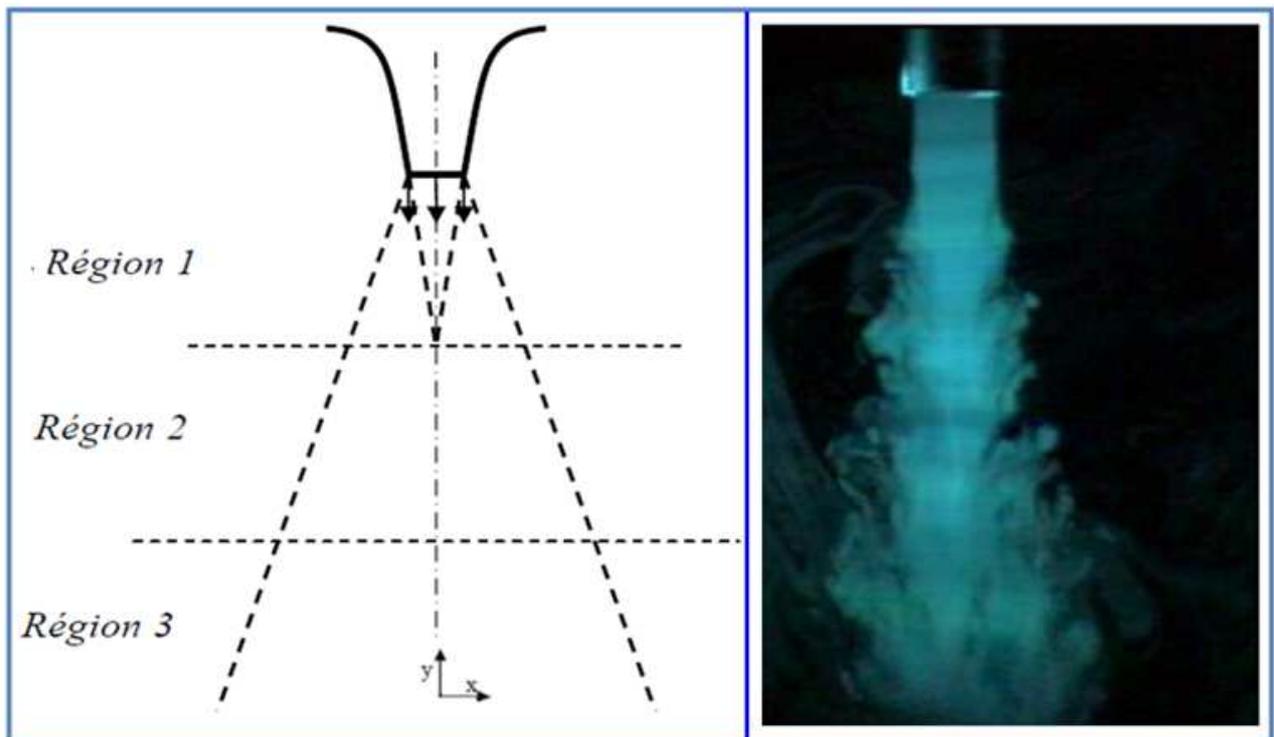


Figure I-1 Développement d'un jet libre

I.1.4. Développement d'un jet impactant

Pour le jet impactant, on distingue aussi trois zones différentes [4] :

○ **Région I :**

C'est la zone du jet libre, elle est similaire à la région I du jet libre. Dans cette zone, la présence de la plaque n'affecte en rien l'écoulement, et le cœur potentiel subsiste ainsi que la zone de mélange.

○ **Région II :**

Appelée zone de stagnation, le développement du jet dans cette région, est perturbé, on observe une augmentation de la pression locale et une diminution de la composante axiale de la vitesse jusqu'à son annulation à la paroi. La fin de cette zone est très importante du point de vue transfert de chaleur vu la faible épaisseur de la couche limite à cet endroit.

○ **Région III :**

L'écoulement est dévié ensuite, pour constituer ce qu'on appelle la zone du jet pariétal où se développe une couche limite laminaire au début et transitant vers un écoulement turbulent. La vitesse ainsi que les transferts de masse et de chaleur diminuent le long de la paroi.

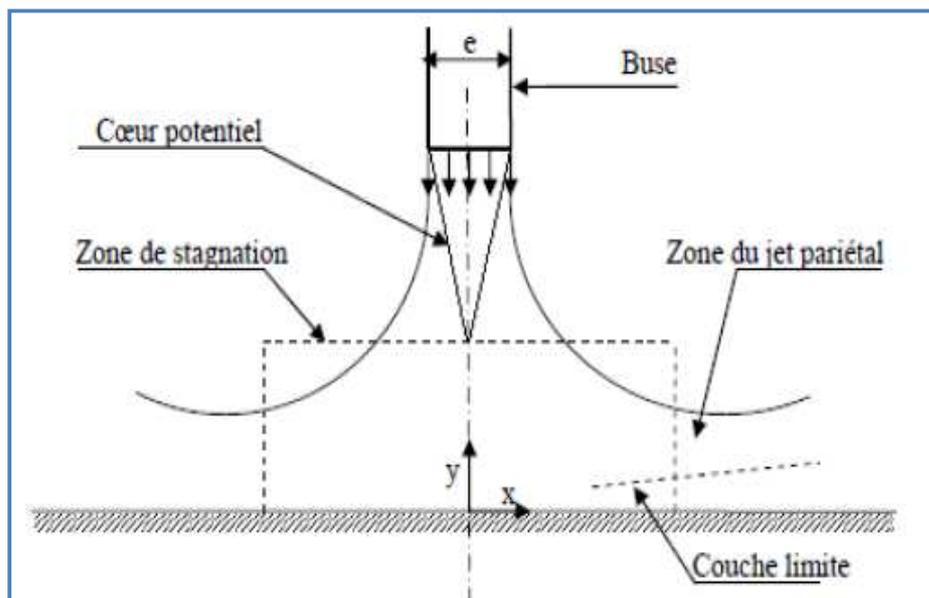


Figure I-2 développement d'un jet impactant

1.2. Jet pulsé par une excitation acoustique

Le jet pulsé est un jet excité à la sortie de l'orifice. Il consiste à imposer une variation temporelle périodique d'une ou plusieurs variables de l'écoulement telle que la vitesse, la pression ou la densité volumique. Une onde acoustique, générée par un haut parleur, donne lieu à des variations temporelles et spatiales. L'onde sonore va créer une faible variation de la pression dans le fluide. Cette perturbation peut donner lieu à l'instabilité du jet à la sortie de la buse (Figure I-3).

L'excitation acoustique d'un jet présente dans plusieurs applications industrielles peut se voir dans divers domaines :

- Dans le transfert thermique :

On cherche à améliorer le refroidissement d'une plaque chauffée impactée par jet d'air en lui imposant une excitation acoustique.

- Dans les moteurs à quatre temps :

L'excitation sera très utile si elle permet d'augmenter la diffusion d'un jet de combustible dans la chambre de combustion. En effet, plus le brassage entre l'air et le combustible est bon, plus la combustion est meilleure.

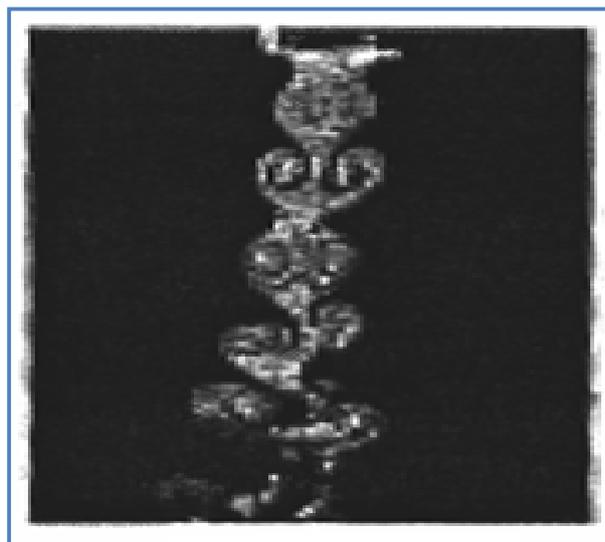


Figure I-3 Tomographie laser d'un jet plan excité ($Re = 500$)

1.3. Modes de transfert thermique

Il existe trois modes de transfert :

- ❖ Conduction : la chaleur passe d'un corps à un autre, par contact.
- ❖ Convection : un corps qui se déplace emmène la chaleur qu'il contient. La quantité de chaleur ainsi transportée peut être importante, notamment dans le cas d'un changement de phase.
- ❖ Radiation (Rayonnement) : tous les corps émettent de la lumière, en fonction de leur température, et se font eux-mêmes chauffer par la lumière qu'ils reçoivent.

Dans le cas de l'étude du refroidissement de la plaque chauffée par un jet d'air, on trouve le mode de transfert thermique par conduction, par convection avec ses deux formes, naturelle et forcée, et par rayonnement.

1.3.1. La conduction

Le transfert par conduction est un échange d'énergie avec contact quand il existe un gradient de température au sein d'un système.

C'est le transfert de chaleur au sein d'un milieu, sans déplacement de matière, sous l'influence d'une différence de température. La propagation de la chaleur par conduction à l'intérieur d'un corps s'effectue selon deux mécanismes distincts : une transmission par les vibrations des atomes ou molécules et une transmission par les électrons libres.

La théorie de la conduction repose sur l'hypothèse de Fourier : la densité de flux est proportionnelle au gradient de température : En régime permanent, la relation qui lie le flux avec les températures de deux objets en contact peut s'écrire en utilisant la relation suivante :

$$\varphi = -\lambda S \frac{\partial T}{\partial x} \quad (\text{I-2})$$

Avec :

- Φ : Flux de chaleur transmis par conduction (W).
- λ : Conductivité thermique du milieu ($\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$).
- x : Variable d'espace dans la direction du flux (m).
- S : Aire de la section de passage du flux de chaleur (m^2).

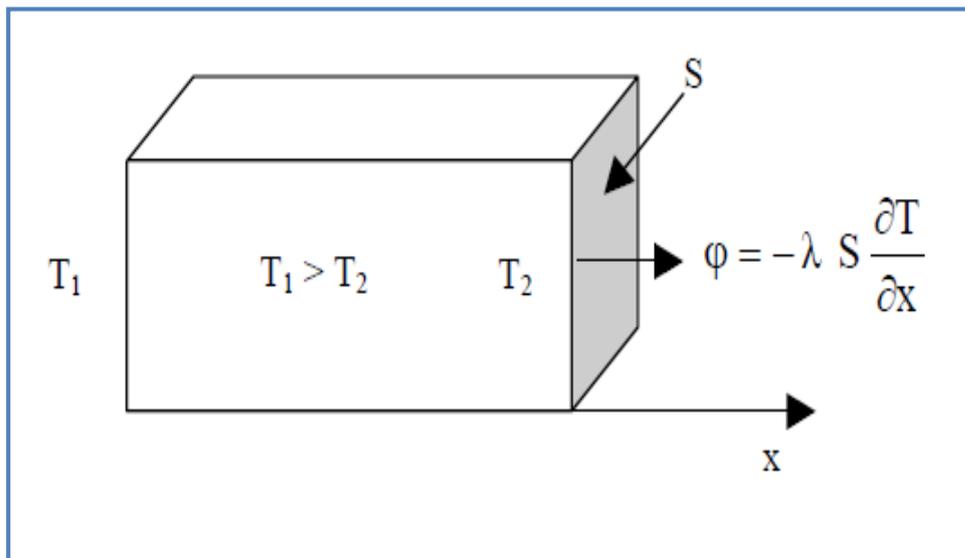


Figure I-4 Transfert de chaleur par conduction

1.3.2. La convection

La convection est un mode de transfert de chaleur où celle-ci est advectée (transportée ou conduite) par au moins un fluide. Ainsi durant la cuisson des pâtes, l'eau se met en mouvement spontanément : les groupes de particules de fluide proches du fond de la casserole sont chauffés, se dilatent donc deviennent moins denses (cf. masse volumique) et montent, ceux de la surface de la casserole sont refroidis par le contact de la surface avec un milieu moins chaud, se contractent donc gagnent en densité et plongent..

Le flux transféré par convection est donné par la relation :

$$\varphi_c = h S (T_p - T_\infty) \quad (\text{I-3})$$

Avec :

- φ_c : Flux de chaleur transmis par convection (W).
- h : Coefficient de transfert de chaleur par convection ($\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$)
- T_p : Température de surface du solide ($^\circ\text{C}$).
- T_∞ : Température du fluide loin de la surface du solide ($^\circ\text{C}$).
- S : Aire de la surface de contact solide/fluide (m^2).

Ce phénomène physique très commun se produit dans de nombreux systèmes (casserole, manteau terrestre, étoile, ...) sous des formes diverses.

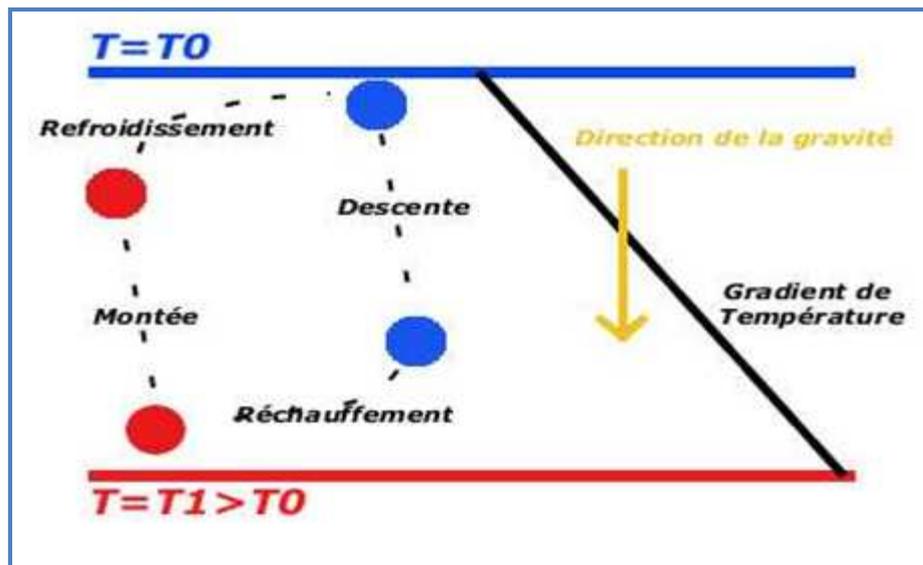


Figure I-5 Principe de fonctionnement de la convection thermique

Une particule de fluide située à la base du fluide est réchauffée au contact de la surface chaude, devient plus légère et remonte sous l'effet de la poussée d'Archimède. Elle arrive à la surface froide, échange sa chaleur et se refroidit. Elle devient alors plus lourde et redescend vers le bas, où elle sera à nouveau réchauffée (figure I-5).

On distingue deux grands types convection :

- **la convection naturelle** : elle est un phénomène de la mécanique des fluides, qui se produit lorsqu'une zone change de température et qu'elle se déplace alors verticalement sous l'effet de la poussée d'Archimède. Le changement de température d'un fluide influe en effet sur sa masse volumique, qui se trouve modifiée par rapport à la masse volumique du fluide environnant (figure I-6) [5].
- **la convection forcée** : elle est provoquée par une circulation artificielle (pompe, turbine) d'un fluide (figure I-7). Le transfert est plus rapide que dans le cas de convection naturelle. Voici quelques exemples de convection forcée dans des appareillages : chauffage central avec accélérateur, chauffages électriques avec soufflerie, chauffe-eau solaire et four à convection de cuisinière. Le corps humain a son propre système de convection forcée, la circulation sanguine [5].

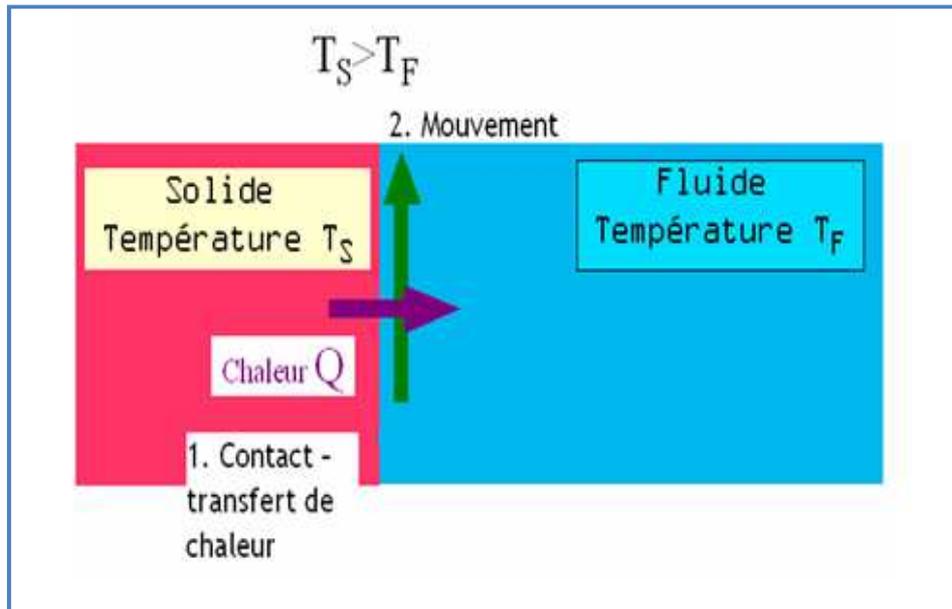


Figure I-6 Représentation schématique de la convection naturelle

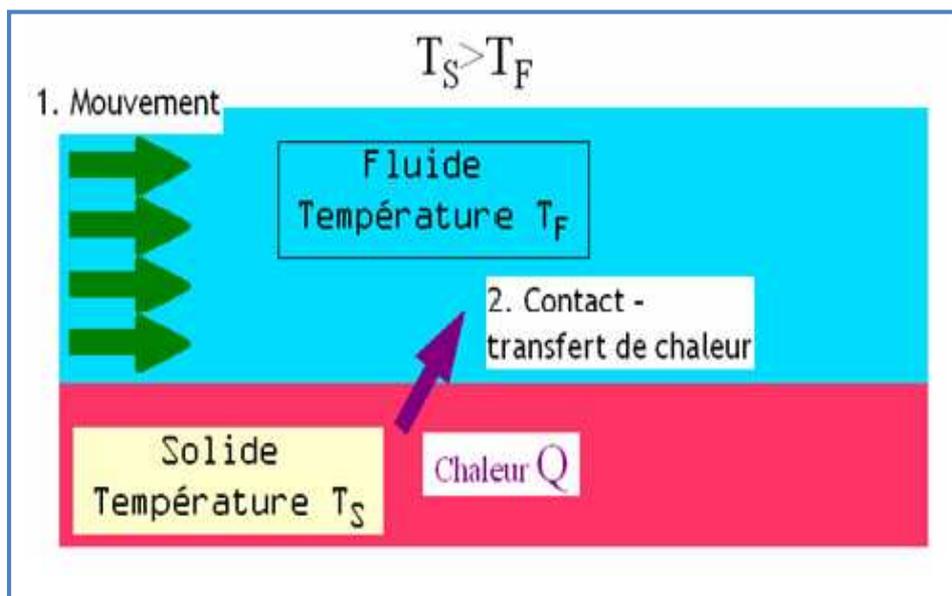


Figure I-7 Représentation schématique de la convection forcée

I.3.3. Rayonnement

C'est un mode de transfert d'énergie sans matière. Le transfert se fait par rayonnement électromagnétique (par exemple : infrarouge). Le transfert peut en effet se réaliser dans le vide. L'exemple caractéristique de ce type de transfert est le rayonnement du soleil dans l'espace. Un exemple de transfert par rayonnement : Système de chauffage dit par radiant Soleil.

C'est la loi de Stefan-Boltzmann (ou loi de Stefan) qui permet de quantifier ces échanges. Le rayonnement entre un solide et le milieu environnant est donné par la relation suivante :

$$\Phi_R = \sigma \varepsilon S (T_p^4 - T_\infty^4) \quad (\text{I-4})$$

Avec :

- Φ_R : Flux de chaleur transmis par rayonnement (W).
- σ : Constante de Stephan ($5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$).
- ε : Facteur d'émission de la surface
- T_p : Température de la surface (K).
- T_∞ : Température du milieu environnant la surface (K).
- S : Aire de la surface (m^2)

Si le corps récepteur réfléchit certaines longueurs d'ondes ou est transparent à d'autres, seules les longueurs d'onde absorbées contribuent à son équilibre thermique. Si par contre le corps récepteur est un corps noir, c'est-à-dire qu'il absorbe tous les rayonnements électromagnétiques, alors tous les rayonnements contribuent à son équilibre thermique.

1.4. Problématique

Le thème de recherche préparé à étudier le comportement d'un jet d'air axisymétrique excité acoustiquement impactant une plaque plane. La pulsation favorise la turbulence et l'épanouissement du jet ce qui peut augmenter le coefficient d'échange convectif et d'élargir la surface impactée par le jet.

En effet, une étude expérimentale du comportement aérothermique d'un jet d'air impactant une paroi plane chauffée est élaborée. L'éjection est perturbée acoustiquement lors de son émission, ce qui affecte le développement et la stabilité de l'écoulement et le rendre plus *turbulent*. On cherche à améliorer la qualité de refroidissement d'une plaque chauffée.

Lorsqu'un fluide s'écoule en **mouvement laminaire** le long d'une surface dont la température est différente de celle du fluide, la chaleur est transmise seulement par conduction aussi bien à l'intérieur du fluide qu'à l'interface entre le fluide et la surface. Par contre dans un écoulement turbulent, le mécanisme de conduction est modifié et favorisé par d'innombrables tourbillons. Les petits volumes de fluide en se mélangeant avec d'autres jouent le rôle de

porteur d'énergie. Par conséquent un accroissement de turbulence amène une augmentation de la quantité de chaleur s'écoulant par convection.

Nous envisageons de mettre en évidence les liens existant entre les différents paramètres de l'expérience qui sont :

- ❖ Le régime d'écoulement, caractérisé par le nombre de Reynolds Re .
- ❖ Nature de la perturbation acoustique : amplitude, fréquence.
- ❖ facteurs de forme (H/D) avec :
 - H: hauteur de la buse (distance entre la section de sortie de la buse et la plaque).
 - D: diamètre de la buse.
- ❖ Température de plaque (asservie).

Nous réaliserons des visualisations par tomographie laser pour identifier les aspects qualitatifs. Les mesures thermiques seront effectuées par pyrométrie et thermométrie conventionnelle. On observera l'influence de l'excitation acoustique sinusoïdale (fréquence) sur l'évolution des coefficients d'échange fluide/paroi.

1.5. Etude bibliographique sur les jets

La compréhension des phénomènes physiques des écoulements de type jet isotherme ou non constitue en soit un objectif car ceux-ci font intervenir des phénomènes complexes de la mécanique des fluides et de la thermique : en particulier, le passage d'un état stable du jet à l'injection vers un état turbulent en aval, est mal connu (on sait que l'écoulement est laminaire sur une distance très faible de la sortie de la buse, mais plus loin en aval, l'écoulement du jet est turbulent).

L'une des propriétés les plus intéressantes des jets au niveau des applications industrielles est leur capacité de se mélanger avec le fluide ambiant. Ces dernières années, plusieurs tentatives ont été faites pour améliorer le taux de mélange des jets par des tourbillons. Ces derniers sont produits soit en modifiant la géométrie de la buse, soit en imposant des perturbations périodiques dans le jet. Les effets de la géométrie de la buse ont été étudiés par plusieurs auteurs dont Quinn (1973) [6,7], Hill et al. (1977) [8], Bradbury et al. (1975) [9], Binder et al. (1972) [10] ainsi que Husain et al. (1983) [11]. Ces auteurs ont trouvé que l'intensité turbulente augmente dans la région voisine de la buse, sur des distances de l'ordre de quelques diamètres, alors que la vitesse sur l'axe décroît rapidement.

Il est bien connu que les propriétés de l'écoulement d'un jet peuvent être modifiées par l'application d'une force périodique telle qu'une excitation acoustique. L'interaction entre un bruit et un jet provoque la transition du régime laminaire vers la turbulence ainsi que l'ont montré Brown (1935) [12], Sato et al. (1960), (1964) [13,14]. Ces travaux permettent d'étudier l'effet de la perturbation sur la structure des jets turbulents en analysant, par exemple, les augmentations du taux d'élargissement du jet. Becker et al. (1968) [15] et Goldschmidt et al. (1971) [16] ont étudié un jet d'air plan soumis à une excitation acoustique transversale et ont trouvé que les taux d'élargissement et de désintégration du jet sont sensibles à la fréquence d'excitation bien que la ressemblance entre le champ des écoulements pulsés et non pulsés soit maintenue.

Une étude détaillée de la réponse d'un jet plan turbulent à l'excitation acoustique a été aussi réalisée par Chambers et al. (1977), (1981) [17]. Ils ont trouvé que pour une large gamme de fréquences, les champs acoustiques produisent des changements dans la structure de l'écoulement moyen. Certaines fréquences permettent d'augmenter les intensités turbulentes et les tensions de Reynolds dans la région principale du jet. Ils ont trouvé aussi que l'interaction de la perturbation acoustique avec le jet apparaît principalement dans les couches de cisaillement de la région initiale de l'écoulement et que les effets de cette interaction diminuent à mesure qu'on s'éloigne de la buse.

Dans le cas du jet axisymétrique, Crow et al. (1971) [18] ont utilisé un haut-parleur pour créer des ondes acoustiques ayant une amplitude décelable à la buse. Ils ont constaté que pour des nombres de Reynolds de l'ordre de 10^4 , des instabilités prennent naissance au voisinage de celle-ci. Elles se développent en anneaux-vortex axisymétriques qui très souvent se rejoignent à une distance de l'ordre de 2 à 3 diamètres de la buse et donnent ensuite naissance à de grosses structures dont la taille à pour ordre de grandeur la largeur du jet.

Hussain et al. (1977) [19], ainsi que Kelmanson (1968) [20], pour le cas d'un jet plan perturbé, ont aussi trouvé des taux d'entraînement très élevés dans les premiers diamètres par rapport au cas non perturbé. Dans une deuxième publication, Hussain et al. (1980) [21] ont étudié expérimentalement la réponse d'un jet d'air plan soumis à une perturbation sinusoïdale contrôlée. L'excitation est introduite avec un haut-parleur placé dans une chambre de tranquillisation en amont du jet. Ils ont observé que l'influence de l'excitation sur les champs de vitesses moyennes et fluctuantes est beaucoup plus faible que dans le cas du jet circulaire qui a été étudié en 1980 par Zaman et al. [22] ainsi que Hussain et al. [21].

Ferrington et al. (1994) [23] ont montré que le jet entraîne le fluide environnant plus rapidement qu'un jet non pulsé et que, par conséquent, un jet pulsé se dissipe plus rapidement que s'il ne l'est pas. Ces mêmes auteurs ont observé que l'écoulement est constitué de tourbillons périodiques axisymétriques se propageant le long de l'écoulement

Baccar S. [24] (2008), sur l'instrumentation d'un dispositif expérimental permettant de caractériser un jet plan excité et qui impacte une plaque plane uniformément chauffée. Il a été remarqué que pour certaines fréquences d'excitation, le jet devient turbulent et des vortex se créent à la sortie de l'orifice. Ainsi, l'écoulement entre en résonance avec la fréquence d'excitation qui présente un écart par rapport à la fréquence de résonance du résonateur d'Helmholtz.

Chapitre II

Techniques de mesure et instrumentations

Chapitre II Dispositif expérimental et instrumentations

II.1. Présentation du dispositif expérimental de base

Parmi les diverses applications des jets impactant, le refroidissement est celui qui nous intéresse le plus. Lorsqu'on envoie de l'air à basse température sur une plaque chauffée, le refroidissement de la plaque va augmenter sa température.

Il s'agit, d'une part, d'une plaque plane en Aluminium chauffée par effet Joule grâce à une résistance chauffante et d'autre part d'un jet d'air issu d'une buse *axisymétrique*. Le dispositif expérimental de base se compose des éléments suivants :

➤ **la buse d'éjection :**

C'est une buse cylindrique en PVC d'un diamètre intérieur de 27 mm, placée verticalement sur un banc d'essai et reliée à un réseau d'air comprimé par un tuyau souple. Dans le cas où on a besoin d'une buse plan, il y a un embout profilé de forme rectangulaire de dimensions $56 \times 6 \text{ mm}^2$ qui peut être placé facilement à son extrémité.

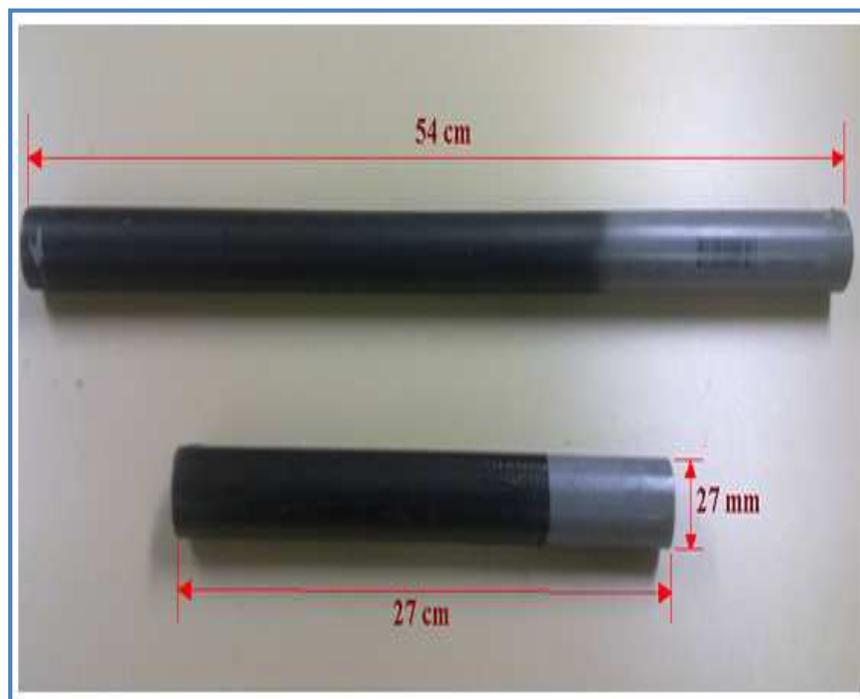


Figure II-1 Buses d'éjection

La distance H entre la buse et la plaque est réglable à l'aide d'un système de fixation. La figure II-1 montre les deux buses utilisées dans nos expériences.

➤ **La Plaque cible :**

De dimensions $280 \times 200 \times 15 \text{ mm}^3$ et placée orthogonalement au jet à une distance H. Elle est en aluminium, essentielle pour avoir une température constante sur toute la surface de la plaque. La plaque est chauffée à l'aide d'une résistance électrique, reliée à un système de régulation, qui est commandé à travers un thermocouple placé sur une des surfaces latérales de la plaque, ce qui permet de garder la température de la plaque constante.

La figure II-2 montre la plaque utilisée, nous avons mis de la laine de roche tout autour afin d'assurer une bonne isolation thermique.

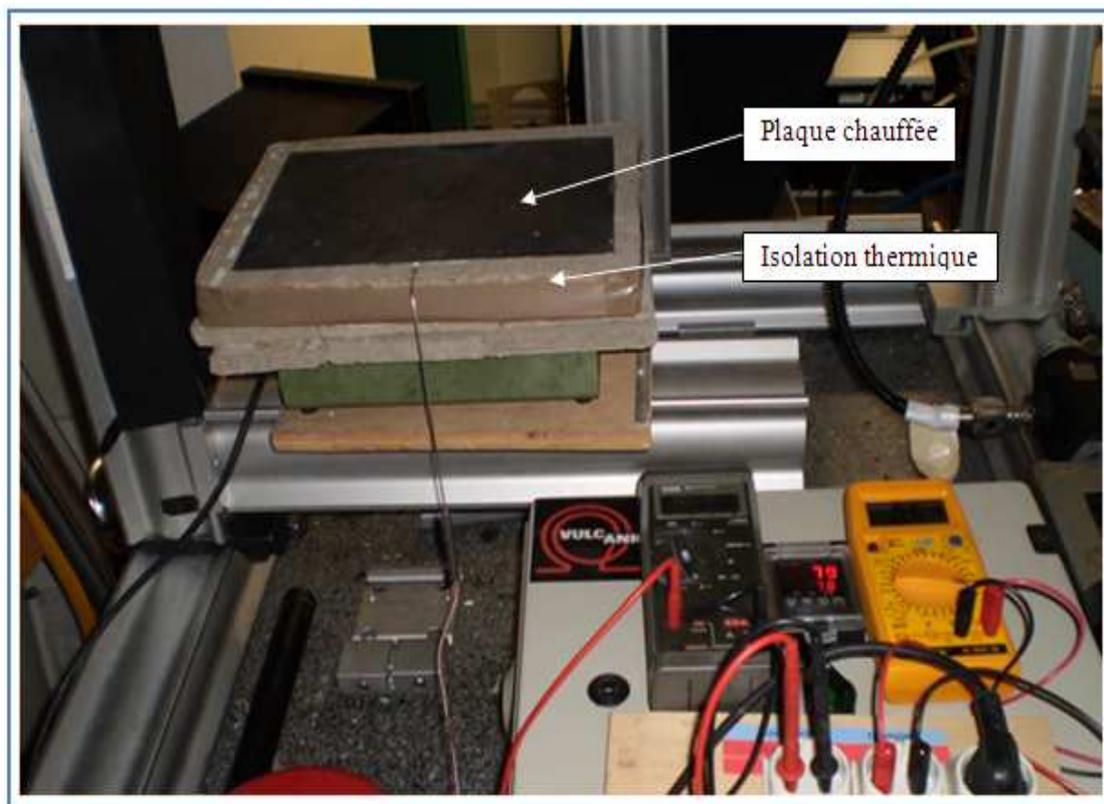


Figure II-2 Plaque chauffée

➤ **Régulateur de température**

Afin d'assurer une température constante de la plaque chauffée, nous avons utilisé le régulateur de température présenté dans la figure II-3.



Figure II-3 Vulcanic 32045-12

- Puissance maximale : 3 KW
- Entrée régulateur : Pt 100
- Organe de puissance : relais statique
- Plage de température : 0/+300°C
- un régulateur PID à face avant IP65,
- un interrupteur marche / arrêt à témoin intégré
- une protection de la charge par fusible. .
- Dimensions (mm) : L = 400 - H = 400 - P = 200.
- Alimentation : 230 V Mono

La figure II-4 montre la maquette réelle sur laquelle nous avons mené cette étude expérimentale, à noter que la buse montée sur la figure est une buse plane alors que celle de notre manipe est une buse circulaire.

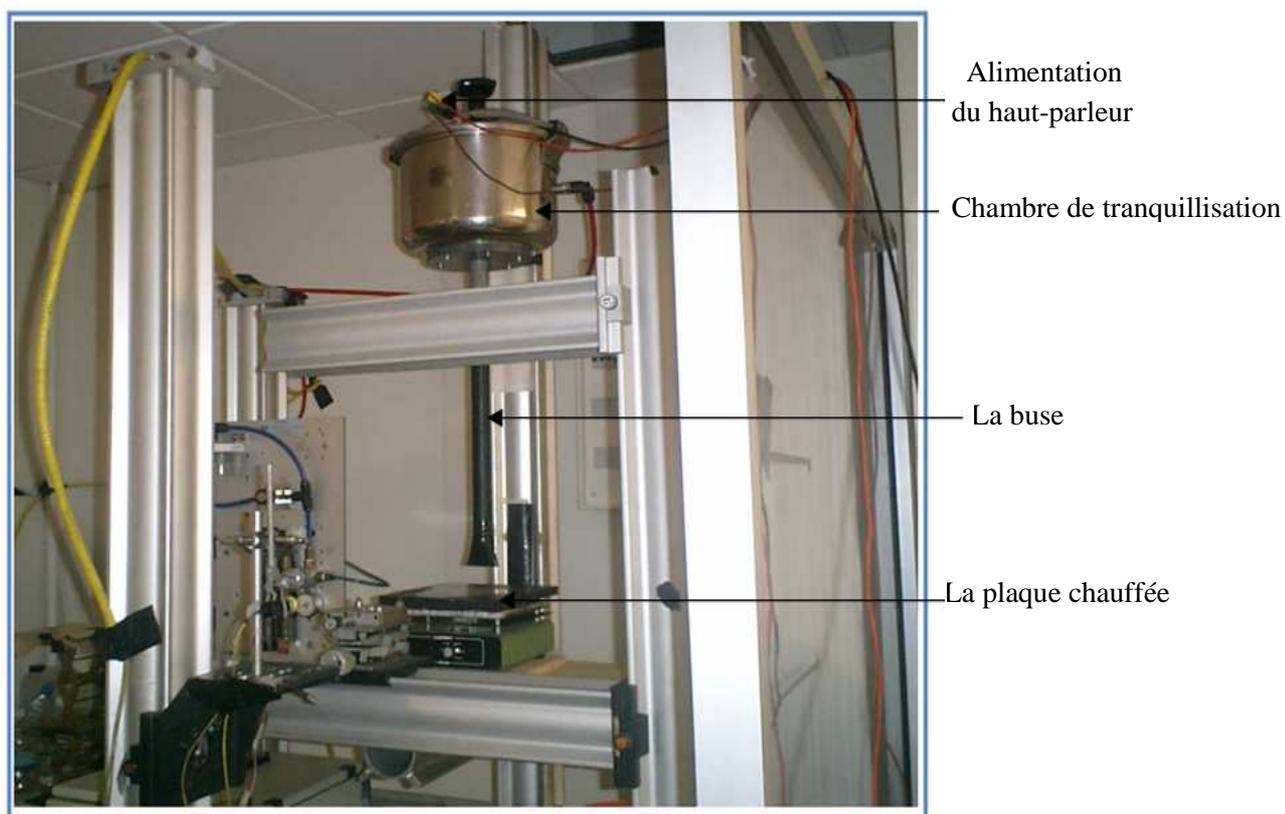


Figure II-4 Maquette réelle.

En effet, Le montage comporte :

- 1- Un dispositif d'alimentation du jet, d'ensemencement et d'excitation.
- 2- Des équipements de traitement et d'acquisition des données.
- 3- Des instruments de visualisation et de mesure.

II.2. Dispositif d'alimentation du jet, d'ensemencement et d'excitation

➤ Le circuit d'air

Le laboratoire de l'UNIMECA est équipé par réseau d'air comprimé, qui a comme source un réservoir relativement grand qui permet d'assurer une pression d'alimentation quasi-constante.

➤ Détendeur et débitmètre

Le détendeur et le débitmètre sont reliés à l'arrivée de l'air comprimé, nous avons fixé la pression du détendeur à 6 bars. Le débitmètre utilisé est un débitmètre à bill, gradué en litres/minutes. La lecture est corrigée en utilisant la courbe d'étalonnage du débitmètre (annexe A).

➤ L'ensemenceur :

Il permet d'introduire des particules de glycérine dans le jet d'air afin de former une fumée visible par la caméra. Les particules utilisées pour marquer l'écoulement sont de l'ordre de $1\mu\text{m}$. Elles doivent être de taille adéquate pour suivre l'écoulement et fournir un signal de bonne intensité. Elles ne doivent pas être trop grandes non plus sinon, elles risquent de rester toujours éclairées si leur diamètre est supérieur l'interfrange.

Dans ce cas, le signal reçu ne s'annulerait jamais. L'airensemencé issu de l'ensemenceur est ensuite filtré par un décanteur afin d'éviter à la glycérine de coller aux parois et de boucher les tuyaux. L'air ainsi filtré accède à une chambre où il subit une excitation perturbation acoustique.

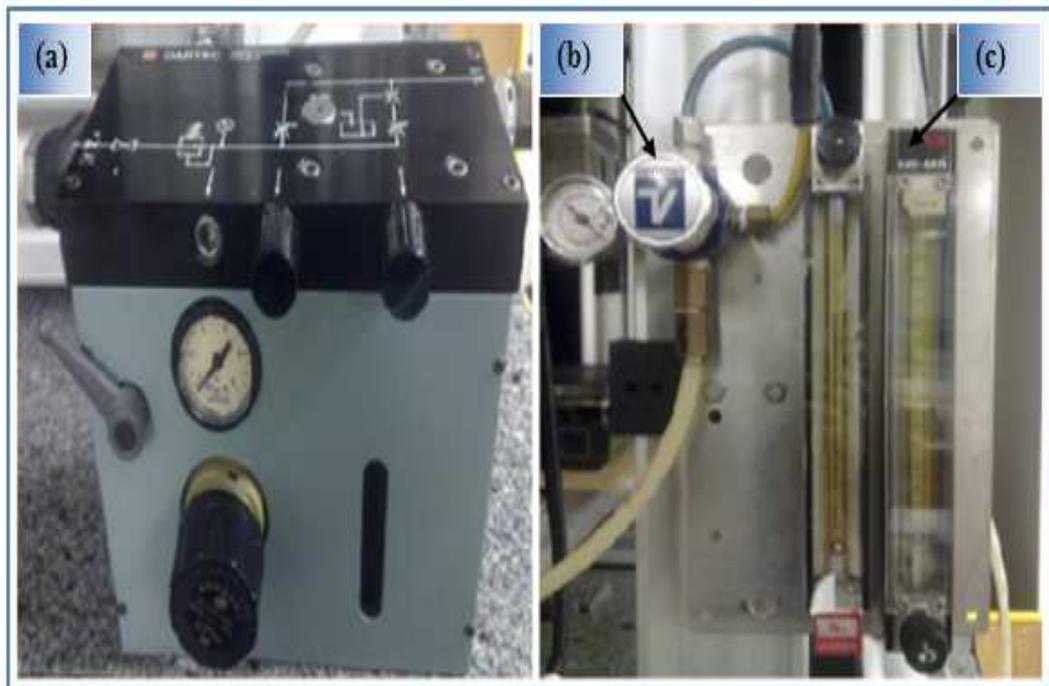


Figure II-5 (a) Ensemenceur,(b) détenteur,(c)débitmètre

➤ Système d'excitation

L'airensemencé et filtré arrive et entre dans une chambre de tranquillisation (la cocotte) dans laquelle est placé un haut parleur pour générer des ondes acoustiques en amont de la buse (figures II-6 et II-7). La plage de fréquence balayée est entre 100 et 2000 Hz car le haut parleur utilisé est de type médium, ce dernier est alimenté par un signal électrique généré par un générateur de signaux.



Figure II-6 Fixation du haut parleur à l'intérieur de l'enceinte

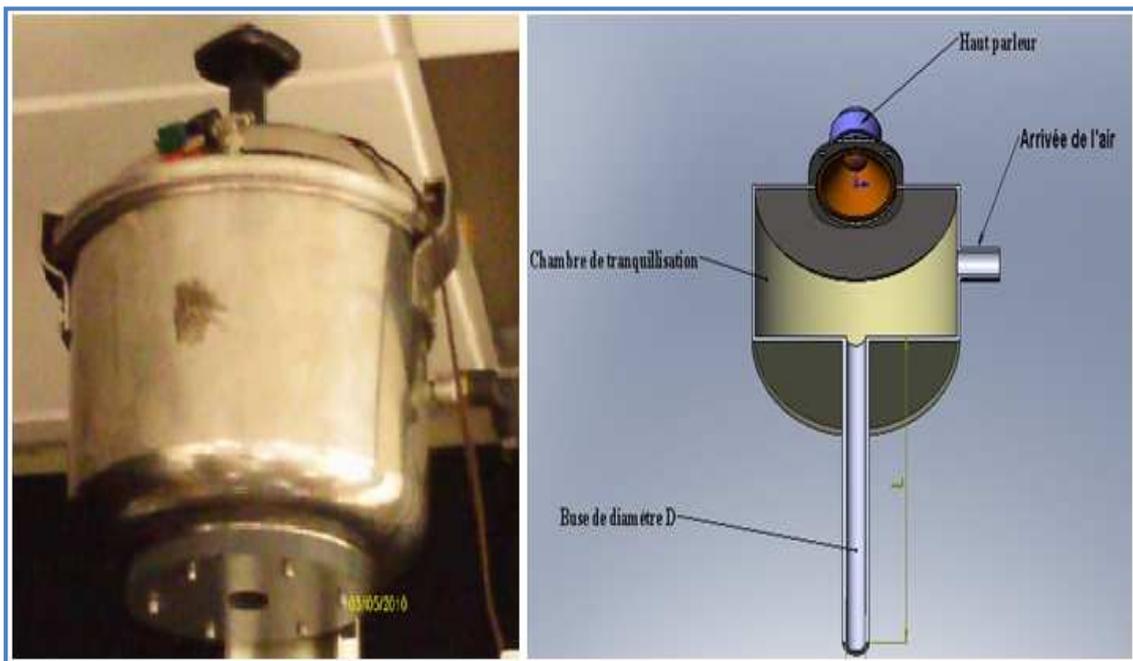


Figure II-7 Enceinte de tranquillisation

II.3. Equipements de traitement et d'acquisition des données

La figure II-8 présente le dispositif d'alimentation, d'acquisition et de traitement de notre maquette. Les désignations des équipements marqués dans cette figure sont présentées dans le tableau II-1.

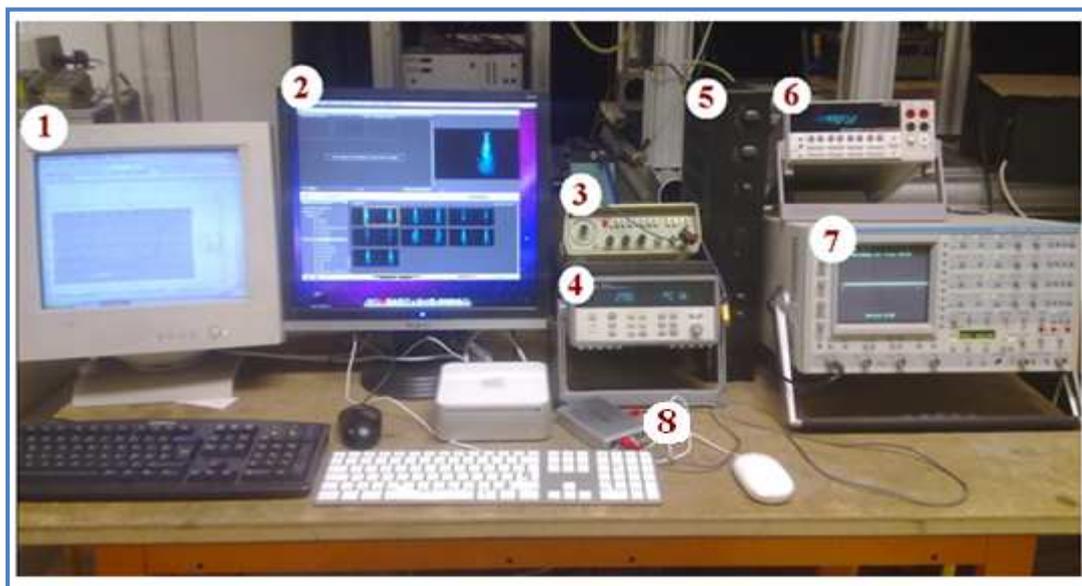


Figure II-8 Poste d'alimentation et d'acquisition

Tableau II-1 Désignation des équipements

N° (figure II-7)	Désignation
1	PC du traitement des données.
2	PC pour enregistrer les vidéos des jets éclairés par la tomographie laser.
3	Générateur de signaux pour alimenter le haut parleur.
4	Boitier de mesure multimètre <i>hp</i> (DMM [*])
5	Amplificateur du signal.
6	Boite de mesure multimètre <i>KEITHLEY</i> (DMM).
7	Oscilloscope
8	Boitier de synchronisation pour relier la caméra au PC d'enregistrement.

* Digital Multimeter Measurement.

II.4. Instruments de visualisation et de mesure

II.4.1. Tomographie laser

Le but de la tomographie est de réaliser l'observation d'un écoulement en visualisant des coupes de celui-ci (figure II-9). Pour cela, on éclaire, avec une nappe laser, une tranche de cet écoulement, préalablement ensemençé avec des particules. Les particules contenues dans cette section diffusent la lumière du laser selon un mécanisme obéissant aux lois de Lorenz-Mie. L'image des particules ainsi éclairées est alors enregistrée à l'aide d'une caméra.

Cette technique peut être utilisée pour quantifier le mélange de deux gaz (ensemencé différemment), suivre et caractériser des structures tourbillonnaires à l'aide d'une caméra.

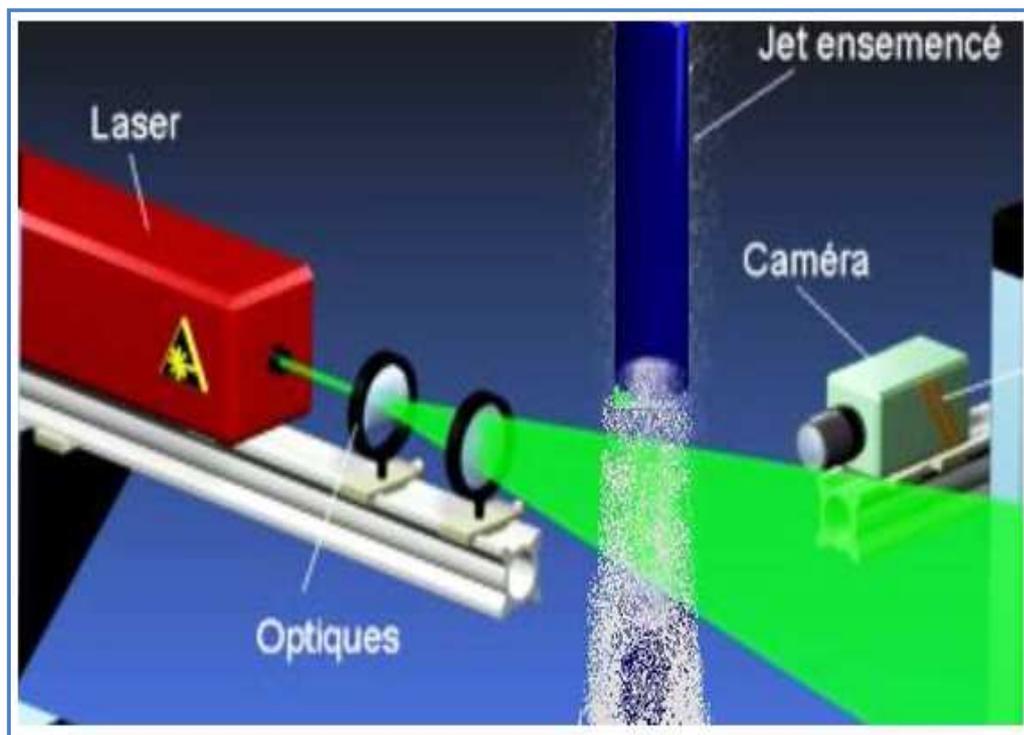


Figure II-9 Principe de fonctionnement du Tomographie laser

L'avantage de cette technique de visualisation vient du fait que l'éclairage étant non intrusif, il ne perturbe en rien l'écoulement ainsi que le dispositif nécessaire est peu encombrant et rapide à mettre en place et qu'elle donne une visualisation immédiate de la structure de l'écoulement mais seulement en 2D.

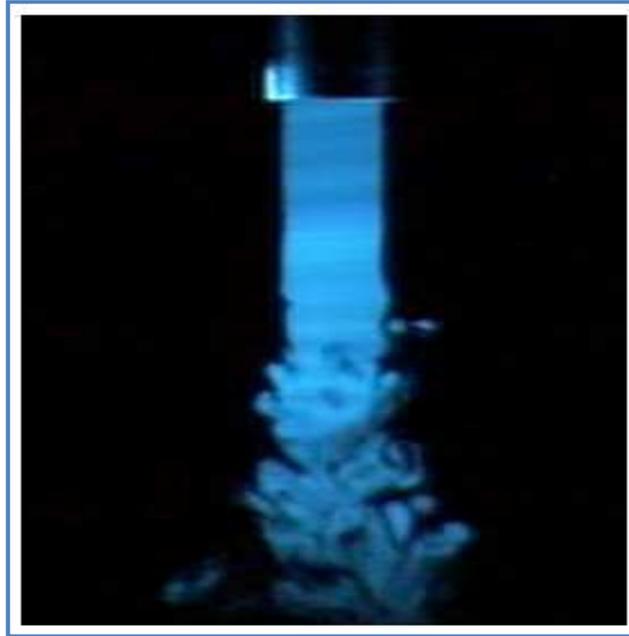


Figure II-10 Image du jet dans un plan laser

Les instrumentations nécessaires pour cette technique sont un Laser et une caméra, nous trouvons dans ce qui suit une description de leurs caractéristiques techniques.

➤ **Le laser**

Pour les visualisations, on a utilisé un laser, ayant les propriétés suivantes :

- ❖ laser à argon ionisé.
- ❖ longueur d'onde 514 nm (lumière verte).
- ❖ diamètre du faisceau 5 mm.
- ❖ puissance maximale 5 Watts.
- ❖ classe IV.

Le laser est relié à une fibre optique qui achemine le rayon lumineux jusqu'au dispositif expérimental grâce à un embout placé au bout de la fibre, ce qui permet de créer le plan laser qu'on projette dans l'axe de la buse.



Figure II-11 Laser BeamLok Spectra physics

- Sécurité laser

Notre laser est de classe 4 (puissance maximale de sortie est plus grande que 500mW), donc le faisceau direct est définitivement un danger pour l'œil. Même les réflexions diffuses sont susceptibles de causer des dommages ce qui nécessite une protection maximale dans notre milieu de travail.

Les mesures de sécurité mises en place dans ce laboratoire sont les suivantes :

- ❖ Entourer le dispositif expérimental par un rideau noir opaque pour empêcher la réflexion du rayonnement laser.
- ❖ Utiliser des lunettes de protection laser (figure II-12).
- ❖ Atténuer au maximum le faisceau (manuellement) chaque fois que l'émission maximale n'est pas nécessaire (pour les réglages).
- ❖ Eliminer tout corps réfléchissant.



Figure II-12 Lunette de protection

➤ **Caméra**

La caméra utilisée ainsi que ses caractéristiques techniques sont respectivement données sur la figure II-13 et le tableau II-2.

Tableau II-2 Caractéristiques techniques de la caméra.

Modèle	video camera Recorder Hi8
Vitesse d'obturation	1/50e → 1/10000e
Zoom optique	× 10



Figure II-13 Caméra SONY

II.4.2. Thermométrie

Un thermocouple ou couple thermoélectrique est constitué de deux métaux A et B, de natures différentes, reliés par deux jonctions (formant ainsi un thermocouple) aux températures T_1 et T_2 par effet Seebeck, le thermocouple génère une différence de potentiel qui dépend de la différence de température ΔT entre les jonctions.

Notons que les thermocouples ne mesurent pas à proprement parler une température mais une différence de température. Pour mesurer une température inconnue, l'une des deux jonctions doit être maintenue à une température connue, par exemple celle de la glace fondante (0°C). Il est également possible que cette température de référence soit mesurée par un capteur (température ambiante, par exemple). La mesure de température est donc une mesure indirecte, puisque les thermocouples mesurent en fait une différence de potentiel électrique. Il est donc nécessaire de connaître la réponse du thermocouple utilisé en fonction de la température pour pouvoir relier la différence de potentiel électrique à la différence de température. La mesure passant par la détermination d'une différence de potentiel, sa précision dépend fortement du voltmètre utilisé.

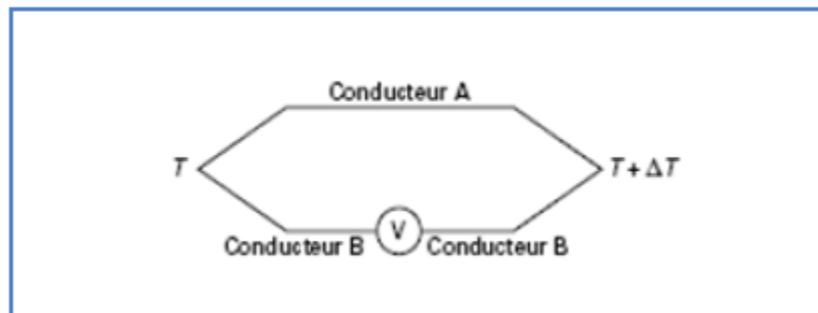


Figure II-14 Mesure de la f.é.m. générée par un couple thermoélectrique

La force électromotrice e résultante (f.é.m. Seebeck) dépend, selon une loi non linéaire, de l'écart $\theta = T - T_0$ et de la température T_0 de la jonction prise pour référence. On utilise souvent une loi approchée de la forme :

$$e = a\theta + b\theta^2 \quad (\text{II-1})$$

Le domaine d'utilisation des différents couples thermoélectriques couvre une gamme étendue qui va des très basses températures (quelques kelvins) aux températures élevées (1500,

voire 2500 °C avec des métaux réfractaires ou des couples thermoélectriques non métalliques). Leur sensibilité est plus faible que celle des thermomètres à résistance, mais ils permettent des mesures plus ponctuelles.

Il existe plusieurs types de thermocouples différents. Tous sont utilisés pour une gamme précise de température de quelques degrés à quelques milliers de degrés. Les signaux électriques de ces sondes sont de l'ordre du microvolt au millivolt et non linéaires. Les signaux sont traités par des modules électroniques intégrant une fonction adaptée au thermocouple qui rend le signal linéaire et le corrige avec la soudure froide.

➤ **Jonction de référence**

La f.é.m. générée par un couple thermoélectrique dépend à la fois de la température T_c de la jonction placée au point de mesure, du profil de température appliqué et de la température T_{ref} de sa jonction de référence. L'emploi d'un bain de glace fondante était pénalisant pour des mesures industrielles. Trois cas peuvent être envisagés :

- la jonction de référence est maintenue à 0 °C par un autre moyen que le bain de glace fondante ou bien une compensation de la soudure froide.
- la jonction de référence est maintenue à une température constante mais différente de 0 °C.
- la jonction de référence est placée à température variable, généralement à la température ambiante.

➤ **Types d thermocouples**

Il existe différents types de thermocouples, correspondant chacun à une gamme de température ou à une plus ou moins grande précision. La différence entre eux est essentiellement dans les métaux utilisés pour réaliser les jonctions et par conséquent de la gamme de température mesurée. On trouve les thermocouples de type E, J, K, N, T...etc.

[24]

Dans notre étude expérimentale nous avons utilisé des thermocouples de type K qui sont standard et dont la composition peut être en Chromel (alliage nickel + chrome) / Alumel (alliage nickel + aluminium (5%) + silicium). Ces alliages peuvent, de plus, former entre eux des couples dont le pouvoir thermoélectrique (sensibilité) est très élevé (environ $40\mu\text{V}/^\circ\text{C}$) et pratiquement constant dans un intervalle de température étendu. Ce type permet une mesure dans une gamme de température large : $-270\text{ }^\circ\text{C}$ à $1372\text{ }^\circ\text{C}$.

➤ **Avantages et inconvénients des couples thermoélectriques**

Les principaux avantages en sont la simplicité, le faible prix, les petites dimensions, une réponse rapide, la facilité d'adaptation à chaque application et la robustesse. Ces capteurs sont donc bien adaptés aux mesures ponctuelles, le régime thermique étant permanent ou transitoire. De plus, leur domaine d'utilisation va de quelques kelvins à 1 400 K sans problème, jusqu'à 2600 K avec du tungstène, voire 2 800 K avec des couples thermoélectriques non métalliques.

Leurs inconvénients sont un certain manque de sensibilité et, surtout, une perturbation importante de la température locale due à l'effet de conduction de la chaleur par les fils du capteur. Il faudra donc faire particulièrement attention à ce dernier point.

II.4.3. Pyrométrie

La pyrométrie optique est une méthode de mesure de la température basée sur la théorie du corps noir. Chaque objet émet des radiations en fonction de la température.

Le pyromètre mesure la température par quantification de l'énergie radiative émise dans l'infrarouge. Tout objet au-dessus du zéro absolu (0 K) émet ces radiations. Le pyromètre le plus basique est composé d'une lentille qui focalise l'énergie radiative infrarouge sur un détecteur qui la convertit en signal électrique. Après compensation, ce signal est converti à son tour en température. Ce dispositif permet ainsi de mesurer à distance la température d'un objet avec une grande précision. Parmi les applications courantes, on trouve les mesures sur les objets en mouvement, corrosifs, en réacteur sous vide ou soumis à des champs électromagnétiques intenses ainsi que toutes les applications exigeant des temps de réponses très courts. Une électronique permet d'intégrer des facteurs comme l'émissivité pour fournir une valeur fiable.

L'intérêt de la pyrométrie optique est de permettre la mesure de température sans contact avec un temps de réponse très court. Ils sont utilisés à chaque fois que les thermomètres classiques comme les thermocouples sont difficilement utilisables voire impossibles.



Figure II-15 Pyromètre

II.4.4. La Vélocimétrie Laser Doppler LDV

La détermination de la vitesse en mécanique des fluides est fondamentale pour avoir une meilleure connaissance du comportement des écoulements.

La vélocimétrie laser est parfois préférée aux autres techniques de mesures de vitesses d'écoulement tel que le tube de Pitot, car le capteur se trouve à l'extérieur du flux mesuré et ne perturbe donc pas la mesure. La Vélocimétrie Laser Doppler « LDV » permet de mesurer les vitesses locales des particules dans tout point de l'espace.

Son principe de fonctionnement repose sur l'analyse des signaux issus de la diffusion de la lumière par des particules sphériques. Le croisement de deux faisceaux laser cohérents engendre à leur intersection la formation d'un réseau de frange d'interférences planes. L'intersection de ces deux faisceaux constitue ce qu'on appelle un volume de mesure présenté sur la figure II-16. L'interfrange δ est proportionnel à la longueur d'onde λ et est inversement proportionnelle au demi-angle Γ d'incidence entre les deux faisceaux laser.

La relation liant ces trois paramètres est la suivante :

$$\delta = \lambda \div 2 \sin \left(\frac{\Gamma}{2} \right) \quad (\text{II-2})$$

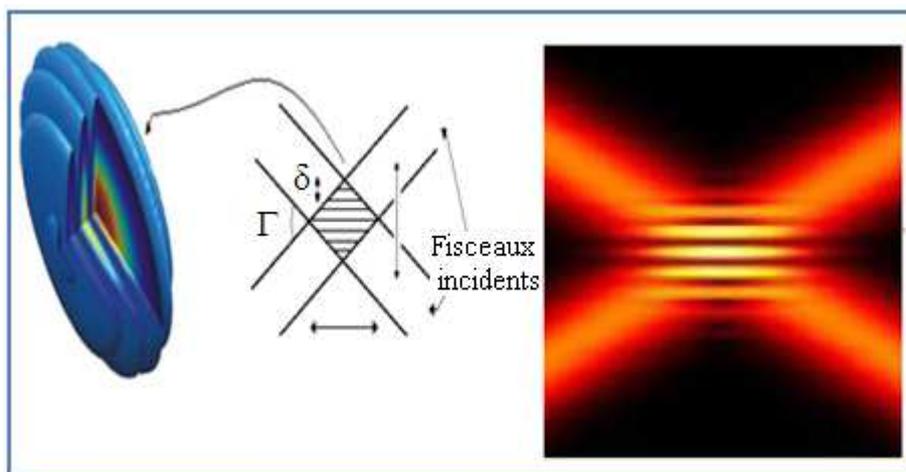


Figure II-16 Volume de mesure

Lorsqu'une particule passe dans le volume de mesure, elle diffuse successivement la lumière des franges qu'elle coupe. Cependant, l'intensité de la lumière diffusée varie selon la trajectoire des particules dans le volume de mesure.

Le signal fourni par les particules est constitué de courtes bouffées survenant de façon aléatoire. Elles sont souvent bruitées, notamment par des réflexions parasites et peuvent ne posséder que quelques cycles de la fréquence Doppler utile. Le traitement de chaque bouffée se fait numériquement en calculant sa transformée de Fourier (FFT : Fast Fourier Transform en Anglais) avec plusieurs fréquences d'échantillonnage. On conserve alors celle qui est la mieux adaptée et qui fournira donc la valeur la plus exacte de la vitesse.

Après le calcul de la transformée de Fourier, le signal subit un traitement à l'aide d'un filtre passe-bande et la période du signal reçu peut être connue avec précision. La composante de vitesse mesurée est celle qui est perpendiculaire aux franges du volume de mesure.

La composante de la vitesse perpendiculaire au plan des franges d'interférences U_y est proportionnelle à la fréquence Doppler f_d et à l'interfrange δ , elle est évaluée à partir de l'équation suivante :

$$U_y = f_d * \delta = f_d * (\lambda \div 2 \sin(\frac{\Gamma}{2})) \quad (\text{II-3})$$

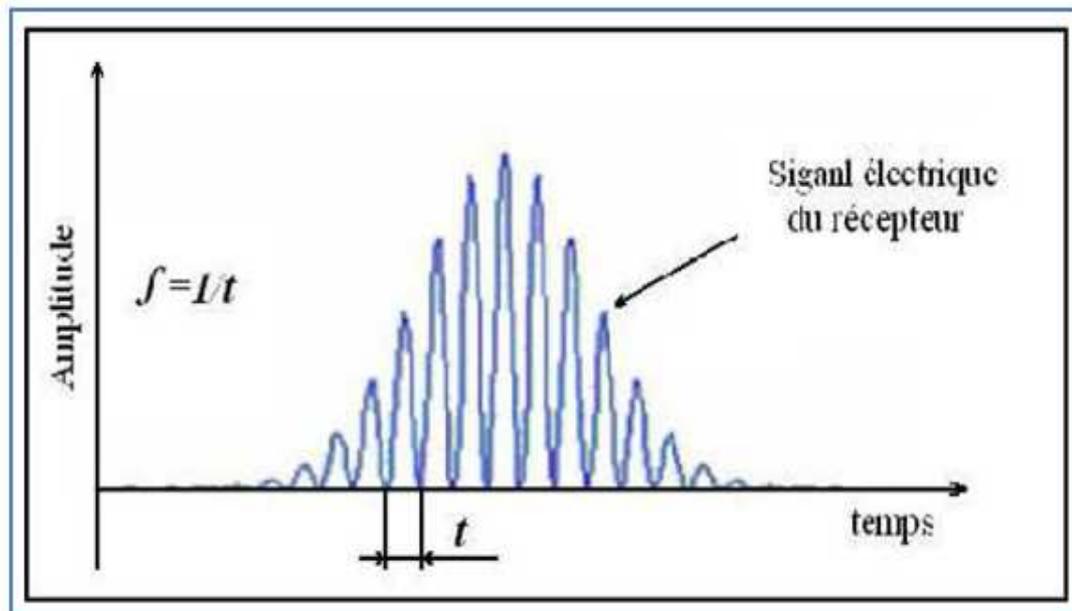


Figure II-17 Signal électrique du récepteur

L'introduction de la cellule de Bragg sur un des faisceaux laser est réalisée pour remédier à l'indétermination dans le sens de l'écoulement. Le rôle de cette cellule est de faire défiler les franges du volume de mesure, généralement à 40 ou 80 MHz. Si la particule qui traverse le volume de mesure va dans le même sens que celui du défilement des franges, sa fréquence de passage sera plus faible que dans le cas où elle irait dans le sens inverse. Cela se répercute sur le gradient de fréquence et permet de connaître le sens de l'écoulement.

Le signal recueilli (figure II-17) sur le photo-détecteur est traité par un logiciel informatique BSA Flow software. Ce logiciel est multitâche :

- Il permet l'acquisition des données,
- Il assure le traitement et stockage des données,
- Il permet la présentation et l'exploitation des résultats.

L'interface du logiciel permet à l'utilisateur de contrôler la mise en place de toute l'instrumentation du Vélocimétrie Laser Doppler et de configurer ses paramètres internes selon le genre de l'application, les types de mesures et les conditions de mesures.

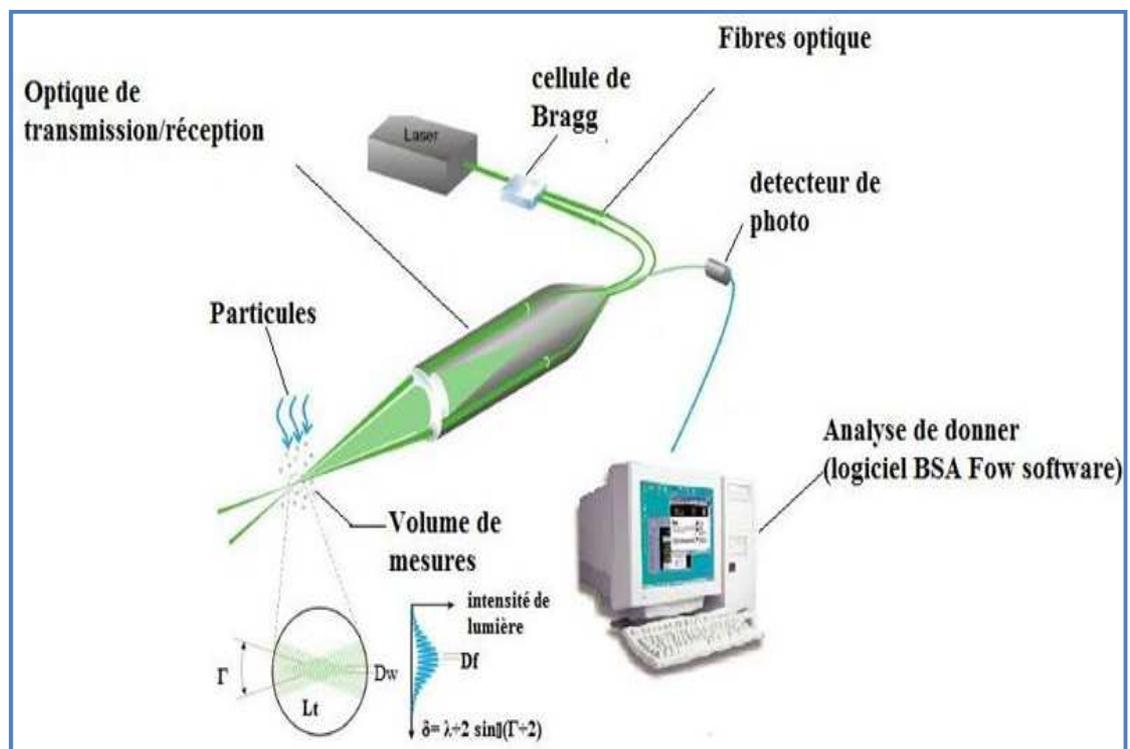


Figure II-18 Principe de fonctionnement de la LDA

Les avantages de cette technique de mesure sont multiples :

-Technique de mesure non intrusive. Aucune sonde n'est introduite venant perturber localement les caractéristiques de l'écoulement.

-La gamme de vitesses mesurables est très large allant typiquement du $\mu\text{m/s}$ à des vitesses supérieures à 100m/s.

-La fréquence d'acquisition est très élevée permettant de stocker un grand nombre de mesures pendant un laps de temps très faible (environ 50 000 acquisitions par seconde).

II.5. Conclusion

La présentation des différentes techniques de mesures et la description de l'instrumentation utilisée nous a permis de comprendre le principe de fonctionnement des différents instruments ainsi que les spécifications utiles des différents capteurs ce qui nous permettra une meilleure acquisition des résultats expérimentaux de notre étude.

Chapitre III

Résultats expérimentaux de l'étude acoustique

Chapitre III Résultats expérimentaux de l'étude acoustique

III.1. Introduction

Le but principal de ce travail est d'étudier le couplage thermique fluide-paroi et analyser l'effet de l'excitation sur la qualité de l'échange thermique mais comme nous nous intéressons au jet excité il devient important d'étudier notre système d'excitation afin de comprendre sa réponse avec les différentes fréquences utilisées.

III.2. Notions d'acoustique

III.2.1. Onde acoustique

Pour qu'il y ait phénomène acoustique il faut qu'il y ai production d'une onde. Il faut donc un émetteur et un récepteur. Une onde acoustique ou sonore se déplace dans un milieu matériel, elle est caractérisée par la perturbation du milieu élastique dans lequel elle se déplace. L'absence de ce milieu (vide) empêche la propagation.

La perturbation se déplace dans le milieu selon une onde longitudinale si le milieu est liquide ou gazeux et des ondes longitudinales, transversales et mêmes superficielles si le milieu est solide.

Dans l'air, le son qui est une onde acoustique se transmet sous la forme d'une oscillation longitudinale de pression périodique autour de la valeur moyenne, engendrant une suite d'états de compression et de dépression des "particules" du milieu (figure III-1), causés par le passage de la perturbation acoustique. La valeur de cette oscillation de pression est appelée pression acoustique.

Le haut-parleur émet un son lorsque sa membrane vibre et c'est cette vibration qui crée la pression acoustique et génère par conséquent l'onde acoustique (le son).

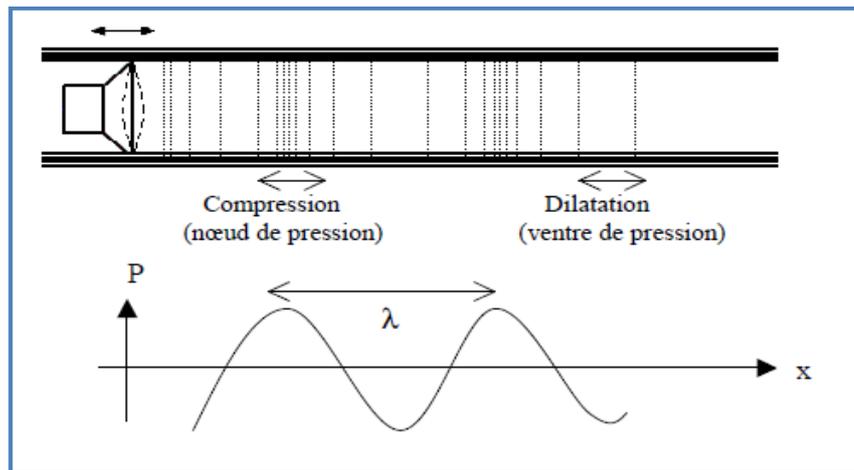


Figure III-1 Propagation d'une onde sonore

III.2.2. Intensité et puissance acoustique [25]

Les ondes sonores mettent en mouvement des régions de l'espace initialement au repos. Elles transportent donc une énergie nécessaire à cette mise en mouvement. La notion d'énergie sonore se retrouve principalement dans les quantités suivantes : l'intensité et la puissance acoustique.

L'intensité acoustique I est par définition l'énergie qui traverse l'unité de surface, elle s'exprime en watts par mètre carré ($\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$).

L'intensité acoustique d'une onde progressive est la puissance qu'elle transporte par unité de surface. Elle est calculée comme suit :

$$I [\text{W} / \text{m}^2] = \frac{\text{puissance acoustique} [\text{W}]}{\text{surface} [\text{m}^2]} \quad (\text{III-1})$$

Pour mesurer l'intensité du son, on utilise généralement une grandeur logarithmique appelée décibel. Toute grandeur physique G peut être exprimée en décibel. Il suffit de se donner une valeur de référence G_0 . On forme ensuite le logarithme de base 10 du rapport $\frac{G}{G_0}$.

On exprime ce rapport en bel (B). Le sous multiple du bel couramment utilisé est le décibel (dB). Dans notre exemple, la quantité G aura une valeur en décibel de :

$$10 * \log\left(\frac{G}{G_0}\right) \text{ dB} \quad (\text{III-2})$$

De même, on définit le niveau d'intensité sonore L_I correspondant à la grandeur intensité acoustique par :

$$L_I = 10 * \log\left(\frac{I}{I_0}\right) \quad (\text{III-3})$$

Où I_0 est l'intensité de référence : $I_0 = 10^{-12} \text{W.m}^{-2}$.

III.2.3. Phénomène de résonance

Si l'on mesure l'amplitude de l'oscillation en fonction de la fréquence d'excitation, on obtient la courbe de résonance (Figure III.2). Par convention, la bande passante représente l'intervalle de fréquences comprises entre des fréquences basse (F_b) et haute (F_h) pour lesquelles l'amplitude est supérieure à $A_{\max} / \sqrt{2}$, A_{\max} étant l'amplitude à la résonance [26].

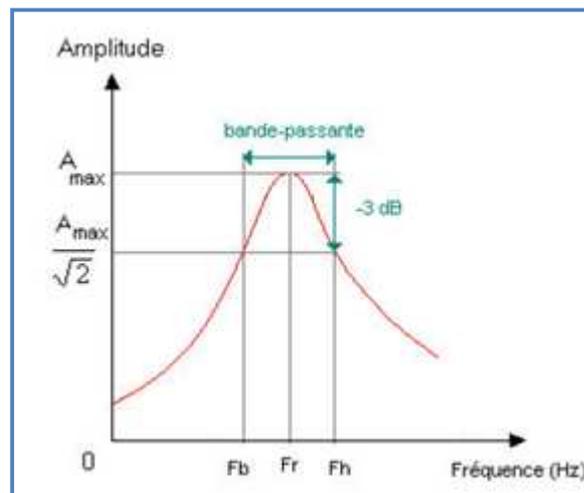


Figure III-2 Courbe de résonance

III.2.4. Résonateur de Helmholtz

Un résonateur acoustique de Helmholtz est une cavité de volume V ouverte par un tube de diamètre D (section S) et de longueur L .

L'air contenu dans le tube se comporte comme un piston de masse $m = \rho.L.S$ qui agit sur l'air contenu dans la cavité (constante élastique K), la fréquence de résonance de Helmholtz est donnée par la relation suivante :

$$f_0 = \frac{c}{2\pi} \sqrt{\frac{A}{VL}} \quad (\text{III-4})$$

Avec : C : La vitesse du son.

A : La section de la partie étroite (m^2).

V : Le volume de la cavité (m^3).

L : La longueur de la partie étroite (m).



Figure III-3 Schéma d'un résonateur de Helmholtz

III.3. Etude de la réponse fréquentielle

III.3.1. Conditions de l'expérience

Nous proposons d'étudier la réponse de la configuration utilisée (Figure III-4) à la variation de la fréquence.

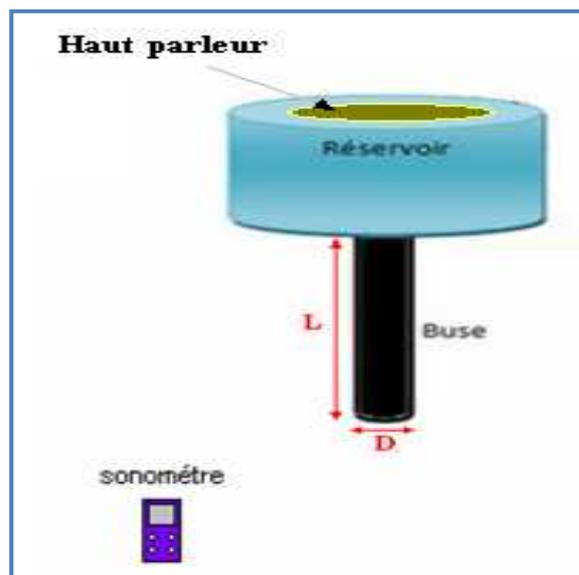


Figure III-4 Configuration utilisée pour l'étude de la réponse fréquentielle

Nous utilisons un sonomètre qui est un instrument qui donne des mesures reproductives et instantanées du niveau de pression acoustique. Un sonomètre donne donc une mesure du niveau global sonore (valeur efficace), il contient un microphone qui joue le rôle d'un récepteur. il affiche directement la valeur en décibel.

Pour chaque cas de test, nous varions la fréquence entre 100 et 2000 Hz (plage nominale du haut-parleur) et nous mesurons l'intensité acoustique à l'aide du sonomètre. Nous faisons varier la longueur de la buse ainsi que le régime d'écoulement, les différents cas étudiés sont résumés dans le tableau suivant :

Tableau III-1 Les différents tests effectués pour l'étude de la réponse fréquentielle

Essai N°	Sensibilité	Tension(V)	L buse(cm)	Écoulement	Fréquence(Hz)
1	Longueur de la buse	5	27	sans	100...2000
2		5	53	sans	100...2000
3	Écoulement	5	53	Re=3000	100...2000
4		5	53	Re=5000	100...2000

III.3.2. Résultats et discussions

➤ Sensibilité de la réponse fréquentielle à la longueur de la buse

La figure III-5 montre le tracé de la réponse fréquentiel du système (haut-parleur, chambre et la buse) pour deux longueurs différentes de la buse. Nous remarquons que les deux se ressemblent, les deux contiennent deux pics de résonance remarquables mais à la différence qu'il y a un décalage en fréquence pour le premier pic par contre le deuxième reste quasiment inchangé. Ceci s'explique par le fait que la fréquence de 320Hz et de 561Hz sont des fréquences propre du système (elles dépendent de la configuration géométrique étudiée) alors que les deux autres sont des résonances électriques du haut-parleur.

Dans toutes les mesures acoustiques nous avons besoin d'un niveau de référence qui est lié directement aux conditions d'expérience telles que l'isolation phonétique, le bruit...etc. le niveau de référence donné par le sonomètre est de -40dB (courbe pour L=53cm), pour le premier pic on passe de -40dB à -11dB et donc nous avons une augmentation de 29 dB.

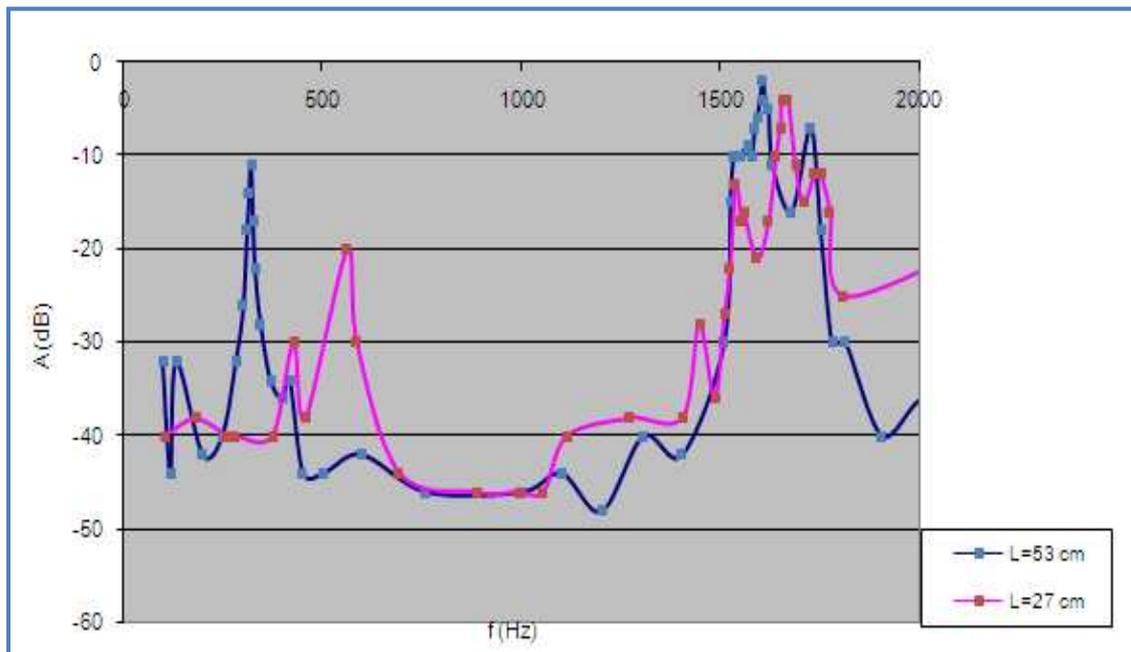


Figure III-5 Sensibilité de la réponse fréquentielle à la longueur de la buse

Les deux fréquences trouvées celles de 320Hz et de 561Hz correspondent aux fréquences de résonance de Helmholtz.

Le tableau comporte les pics de résonances des courbes tracées dans la figure III-5

Tableau III-2 Fréquences de résonance pour les tests 1 et 2

L=27cm		L=53cm	
F.reson (Hz)	A (dB)	F.reson (Hz)	A (dB)
561	-20	320	-11
1656	-4	1604	-2

➤ Sensibilité de la réponse fréquentielle au régime d'écoulement

Dans le 3ième et 4ième essai nous avons fixé la longueur de la buse à 53 cm et nous avons mesuré de même l'intensité sonore avec la présence de l'écoulement. Les résultats trouvés sont représentés dans la figure III-6.

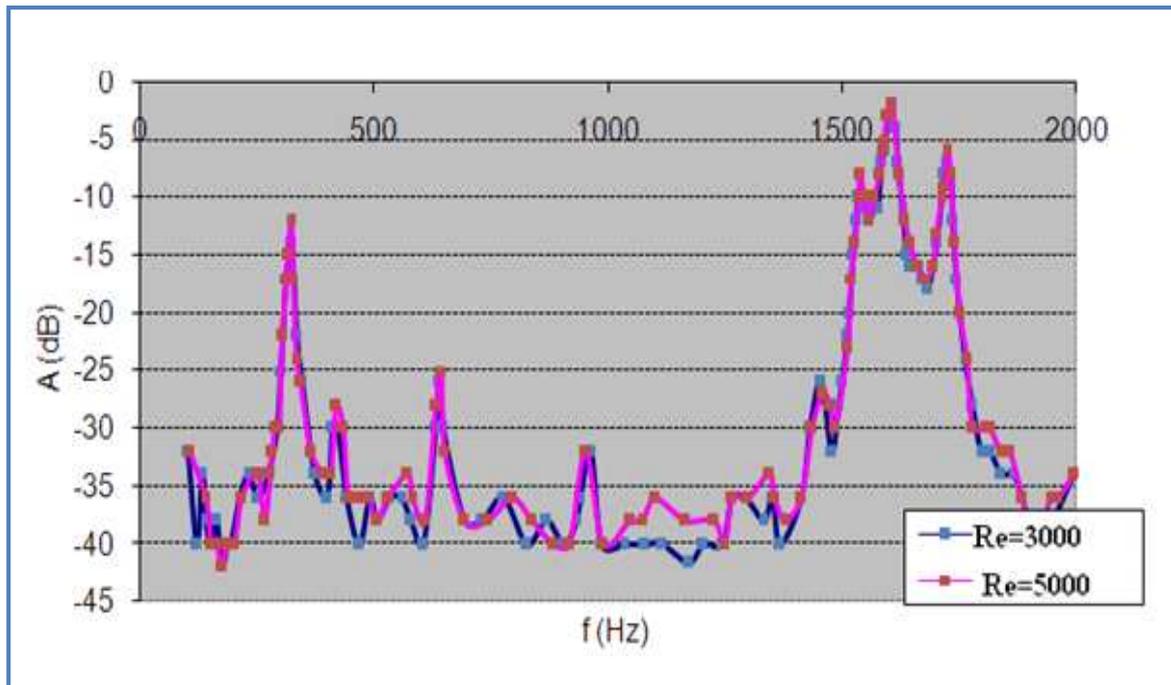


Figure III-6 Sensibilité de la réponse fréquentielle au changement du Re

Le tableau comporte les pics de résonances des courbes tracées dans la figure III-6.

Tableau III-3 Fréquences de résonance pour les tests 3 et 4

L= 54 cm			
Re=3000		Re=5000	
F.réson (Hz)	A (dB)	F.réson (Hz)	A (dB)
320	-12	320	-12
1604	-2	1604	-2

La figure III-6 représente l'évolution de l'intensité acoustique en fonction de la fréquence pour deux nombre de Reynolds différents ($Re=3000$ et $Re=5000$). Nous notons que les deux courbes sont pratiquement confondues, nous remarquons aussi que nous avons les mêmes fréquences de résonances avec et sans écoulement pour $L=53$ cm et ceci en comparons le tableau III-2 avec le tableau III-3. Nous concluons donc que l'intensité sonore n'est pas sensible ni à la présence de l'écoulement ni au changement du régime d'écoulement.

III.3.3. Etude du comportement du jet libre

Afin d'étudier et d'identifier les aspects qualitatifs du comportement du jet libre excité acoustiquement, nous avons utilisé la technique de la tomographie laser pour faire les visualisations du jet à travers des séquences vidéo de cinq secondes en variant à chaque fois l'un des paramètres de l'expérience qui sont :

- Le régime de l'écoulement : Turbulent ($Re=5260$) ou laminaire ($Re=1700$)
- La longueur de la buse : $L=53\text{cm}$ et $L=27\text{cm}$
- Les fréquences d'excitation : 320 Hz, 558Hz, 1000Hz et 1604Hz.

Nous avons réalisé plusieurs séquences vidéo en faisant varier les paramètres mentionnés ci-dessus et nous les avons classés dans une grille sous Excel avec des liens hypertextes afin de faciliter l'accès et la manipulation de ces vidéos. Les différents cas tests considérés sont résumés dans le tableau III-4.

Un schéma du dispositif expérimental utilisé pour l'étude du jet libre est présenté dans la figure III-7.

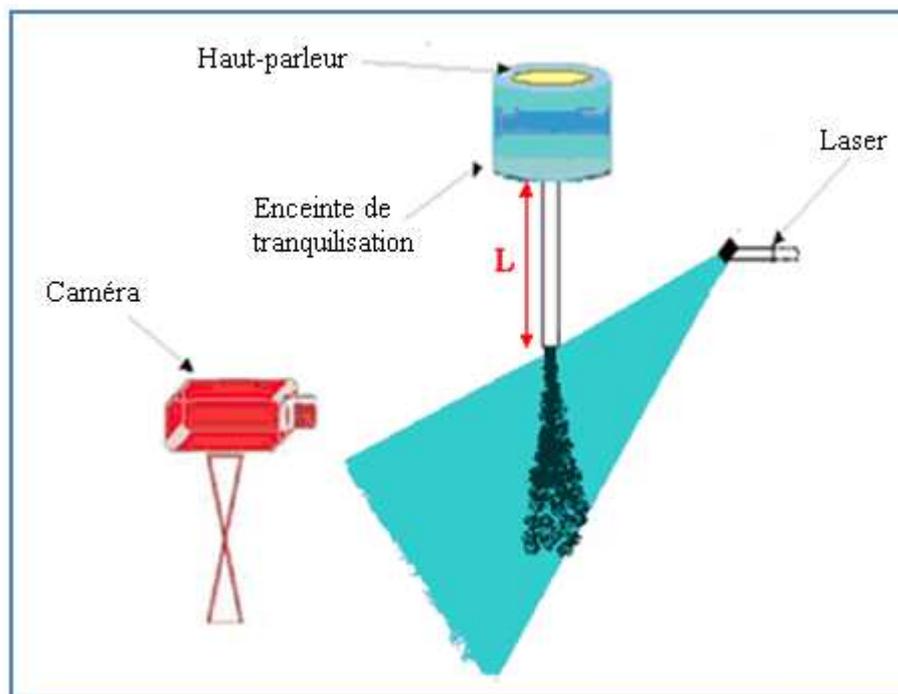


Figure III-7 : Configuration utilisée pour l'étude d'un jet libre

Tableau III-4 Différents cas visualisés par tomographie laser

	Régime d'écoulement		fréquences				Longueur de la Buse		Rapport H/D		Videos
	Re=1700	Re=5260					L= 29 cm	L=52 cm	H/D=2	HD=1	
Jet libre	X						X			CLIC	
Jet libre	X		320				X			CLIC	
Jet libre	X			558			X			CLIC	
Jet libre	X				1000		X			CLIC	
Jet libre	X					1604	X			CLIC	
Jet libre		X					X			CLIC	
Jet libre		X	320				X			CLIC	
Jet libre		X		558			X			CLIC	
Jet libre		X			1000		X			CLIC	
Jet libre		X				1604	X			CLIC	
Jet libre	X						X			CLIC	
Jet libre	X		320				X			CLIC	
Jet libre	X			558			X			CLIC	
Jet libre	X				1000		X			CLIC	
Jet libre	X					1650	X			CLIC	
Jet libre		X					X			CLIC	
Jet libre		X	320				X			CLIC	
Jet libre		X		558			X			CLIC	
Jet libre		X			1000		X			CLIC	
Jet libre		X				1650	X			CLIC	

Remarque : Pour les vidéos citées dans le tableau, elles seront présentées dans certains cas d'étude dans ce qui suit.

➤ Cas laminaire

Le but est d'étudier l'effet de l'excitation acoustique généré par le haut-parleur sur la turbulence du jet. La figure III-8 montre des photos prises à partir des vidéos pour un jet libre laminaire ($Re=1700$) et pour des fréquences d'excitation différentes. Nous remarquons que pour $F=320\text{Hz}$, le jet devient complètement déstructuré et turbulent avec un taux d'élargissement grand et une absence de la zone laminaire est visible ce qui n'est pas le cas pour $F=0\text{ Hz}$.

Nous avons choisi une autre fréquence intermédiaire ($F=1000\text{Hz}$) et nous avons observé que le jet se développe normalement comme si l'excitation n'existe pas.

Pour le troisième cas ($F=1604$), nous remarquons que cette fréquence affecte aussi le développement du jet ainsi que sa turbulence et son élargissement mais pas autant comme celle de $F=320\text{Hz}$.

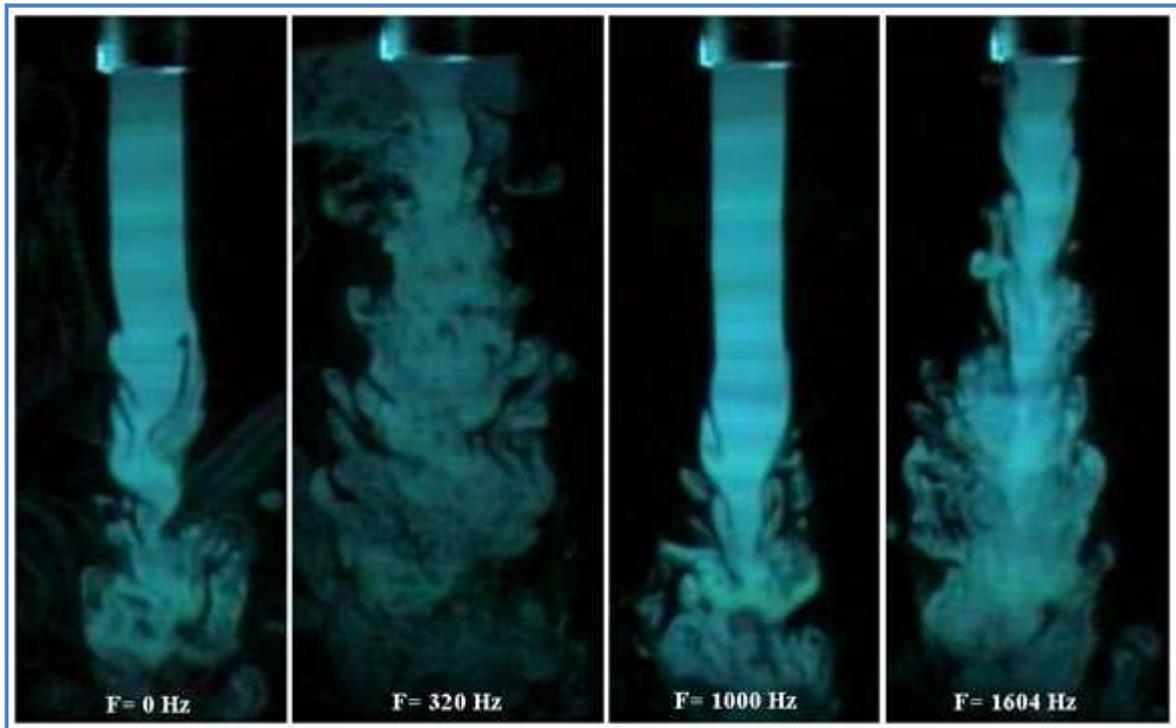


Figure III-8 Visualisation par tomographie laser d'un jet libre $Re=1700$; $L=53$ cm pour des fréquences d'excitation différentes

Nous remarquons aussi que le jet ne se comporte pas de la même manière pour les deux fréquences de résonance. En effet, pour la fréquence $F=320\text{Hz}$, le jet est turbulent dès sa sortie de la buse (absence de la zone laminaire) et ne fait apparaître aucune forme spécifique alors qu'il y a des structures périodiques qui apparaissent pour $F=1604\text{Hz}$.

Nous concluons que l'excitation acoustique en dehors des zones de résonances $F=320\text{Hz}$ et $F=1604\text{Hz}$ n'a aucun effet sur le comportement du jet.

➤ Cas turbulent

La figure III-9 montre des photos prises à partir des vidéos pour un jet libre turbulent ($Re=5260$) et pour des fréquences d'excitation différentes. Nous remarquons que les deux fréquences d'excitation (1000Hz et 1604Hz) n'ont pas d'influence remarquable sur le développement et la turbulence du jet libre, par contre pour la fréquence de Helmholtz ($F=320$)

il y a un rétrécissement radial à la sortie de la buse du jet qui se développe par la suite en forme d'un cône. Nous remarquons aussi que le jet est moins large par rapport aux autres cas.

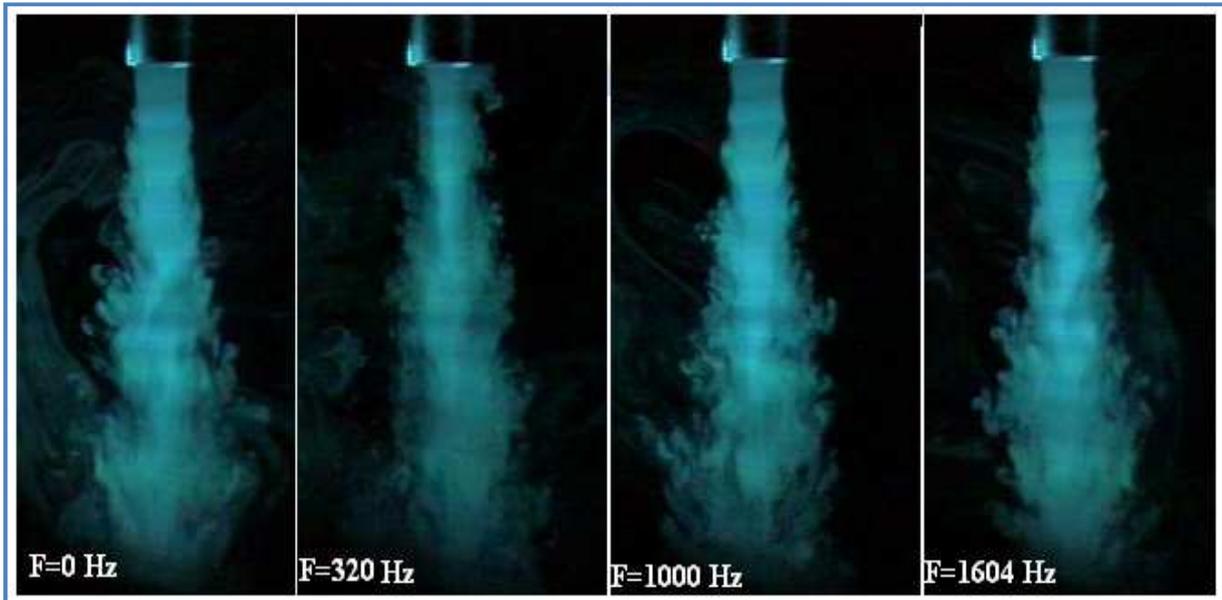


Figure III-9 Visualisation par tomographie laser d'un jet libre $Re= 5260$; $L=53$ cm pour des fréquences d'excitation différentes

III.4. Conclusion

Nous avons traité dans ce chapitre la phénoménologie acoustique de notre système d'excitation afin d'identifier les fréquences de résonance particulières. En effet, deux fréquences particulières ont été trouvées, l'une propre au système et l'autre est purement électrique. Nous avons constaté à l'aide de la tomographie laser que seules ces deux fréquences de résonance ont une influence sur le jet libre et particulièrement la fréquence de Helmholtz ($F=320\text{Hz}$).

Chapitre IV

Etude du couplage thermique fluide-paroi

Chapitre IV Etude thermique du couplage fluide-paroi

IV.1. Introduction

Parmi les diverses applications industrielles des jets impactants, le refroidissement reste le domaine qui nous intéresse. C'est pour cela que nous avons essayé à travers ce travail d'étudier l'effet de l'excitation acoustique sur le comportement du jet impactant et sur le refroidissement de la plaque. Nous avons utilisé la tomographie laser pour la visualisation de l'écoulement dans les expériences que nous avons mené afin de cerner sa phénoménologie, en l'occurrence dans la zone pariétal, aussi nous avons réalisé la mesure du profil de vitesse à la sortie de la buse, la mesure de la température du fluide et de la plaque afin de répondre à la question de l'efficacité du système vis-à-vis du refroidissement estompé.

IV.2. Paramètres opératoires et résultats des visualisations

Comme nous l'avons fait pour le jet libre excité, Nous avons aussi réalisé des visualisations par tomographie laser pour le cas impactant en variant les paramètres suivants ci-dessous. Les différents cas visualisés sont résumés dans le tableau IV-1 ;

- La température de la plaque est prise égale à T_{ambiante} , 40°C et 80°C.
- La hauteur adimensionnelle donnée par le rapport H/D est prise égale à 1 et 2.
- Les nombres de Reynolds considérés sont $Re= 1700$ et $Re=5260$.
- La longueur de la buse est prise égale à $L=27$ cm et $L=53$ cm.
- Les fréquences d'excitation utilisées sont : $F=320\text{Hz}$, 558Hz , 1000Hz et 1604Hz .

Rappelons que $F=320\text{Hz}$ et $F=558\text{Hz}$ sont les fréquences de résonance pour le cas où on a respectivement la longueur de la buse $L=53\text{cm}$ et $L=27\text{cm}$. Le choix de $F=1000$ Hz est arbitraire afin de montrer que seules les fréquences particulières ont un effet sur le comportement du jet. Un schéma du dispositif expérimental pour le jet excité impactant une plaque chauffée est présenté dans la figure IV-1 ;

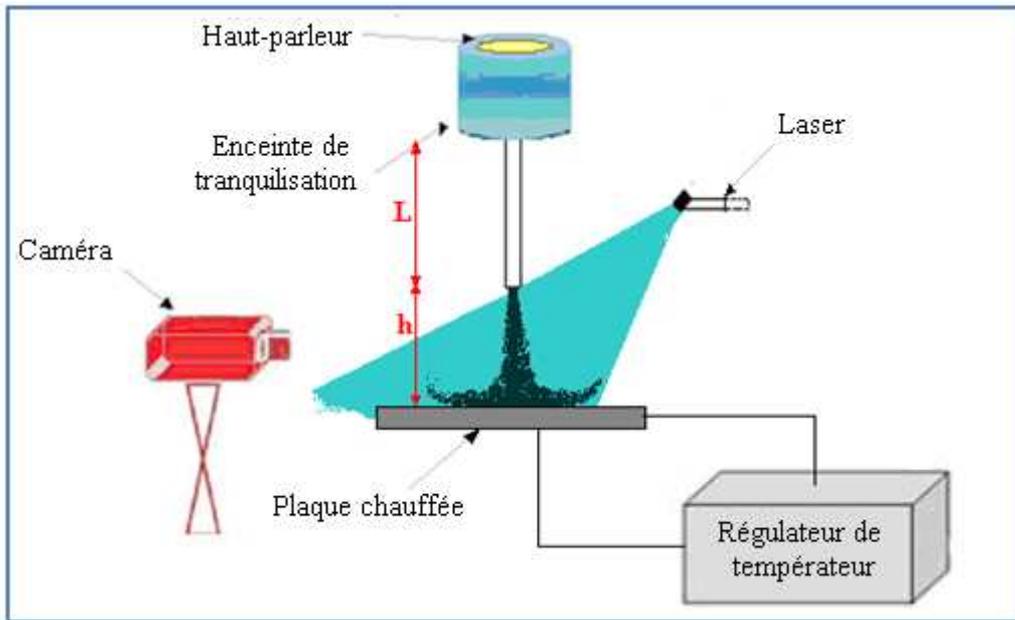


Figure IV-1 Configuration utilisée pour le jet impactant une plaque chauffée

Tableau IV-1 Différents cas visualisés par tomographie

	Régime d'écoulement		chauffage de la plaque			fréquences				Longueur de la Buse		Rapport H/D		Videos
	Re=1700	Re=5260	T amb	T= 40 C°	T=80 C°					L= 29 cm	L=52 cm	H/D=2	HD=1	
Jet Impactant	X		19 C°								X	X		CLIC
Jet Impactant	X		19 C°			320					X	X		CLIC
Jet Impactant	X		19 C°				558				X	X		CLIC
Jet Impactant	X		19 C°					1000			X	X		CLIC
Jet Impactant	X		19 C°						1604		X	X		CLIC
Jet Impactant		X	19 C°								X	X		CLIC
Jet Impactant		X	19 C°			320					X	X		CLIC
Jet Impactant		X	19 C°				558				X	X		CLIC
Jet Impactant		X	19 C°					1000			X	X		CLIC
Jet Impactant		X	19 C°						1604		X	X		CLIC
Jet Impactant	X			X							X	X		CLIC
Jet Impactant	X			X		320					X	X		CLIC
Jet Impactant	X			X			558				X	X		CLIC
Jet Impactant	X			X				1000			X	X		CLIC
Jet Impactant	X			X					1604		X	X		CLIC
Jet Impactant		X		X							X	X		CLIC
Jet Impactant		X		X		320					X	X		CLIC
Jet Impactant		X		X			558				X	X		CLIC
Jet Impactant		X		X				1000			X	X		CLIC
Jet Impactant		X		X					1604		X	X		CLIC
Jet Impactant		X		X							X	X		CLIC
Jet Impactant		X		X		320					X	X		CLIC
Jet Impactant		X		X			558				X	X		CLIC
Jet Impactant		X		X				1000			X	X		CLIC
Jet Impactant		X		X					1604		X	X		CLIC

	Régime d'écoulement		chauffage de la plaque			fréquences				Longueur de la Buse		Rapport H/D		Videos
	Re=1700	Re=5260	T amb	T= 40 C°	T=80 C°					L= 29 cm	L=52 cm	H/D=2	HD=1	
Jet Impactant	X		19 C°							X		X		CLIC
Jet Impactant	X		19 C°			320				X		X		CLIC
Jet Impactant	X		19 C°				558			X		X		CLIC
Jet Impactant	X		19 C°					1000		X		X		CLIC
Jet Impactant	X		19 C°						1650	X		X		CLIC
Jet Impactant		X	19 C°							X		X		CLIC
Jet Impactant		X	19 C°			320				X		X		CLIC
Jet Impactant		X	19 C°				558			X		X		CLIC
Jet Impactant		X	19 C°					1000		X		X		CLIC
Jet Impactant		X	19 C°						1650	X		X		CLIC
Jet Impactant	X		19 C°								X		X	CLIC
Jet Impactant	X		19 C°			320					X		X	CLIC
Jet Impactant	X		19 C°				558				X		X	CLIC
Jet Impactant	X		19 C°					1000			X		X	CLIC
Jet Impactant	X		19 C°						1604		X		X	CLIC
Jet Impactant		X	19 C°								X		X	CLIC
Jet Impactant		X	19 C°			320					X		X	CLIC
Jet Impactant		X	19 C°				558				X		X	CLIC
Jet Impactant		X	19 C°					1000			X		X	CLIC
Jet Impactant		X	19 C°						1604		X		X	CLIC
Jet Impactant	X			X							X		X	CLIC
Jet Impactant	X			X		320					X		X	CLIC
Jet Impactant	X			X			558				X		X	CLIC
Jet Impactant	X			X				1000			X		X	CLIC
Jet Impactant	X			X					1604		X		X	CLIC
Jet Impactant		X		X							X		X	CLIC
Jet Impactant		X		X		320					X		X	CLIC
Jet Impactant		X		X			558				X		X	CLIC
Jet Impactant		X		X				1000			X		X	CLIC
Jet Impactant		X		X					1604		X		X	CLIC
Jet Impactant	X		19 C°							X			X	CLIC
Jet Impactant	X		19 C°			320				X			X	CLIC
Jet Impactant	X		19 C°				558			X			X	CLIC
Jet Impactant	X		19 C°					1000		X			X	CLIC
Jet Impactant	X		19 C°						1650	X			X	CLIC
Jet Impactant		X	19 C°							X			X	CLIC
Jet Impactant		X	19 C°			320				X			X	CLIC
Jet Impactant		X	19 C°				558			X			X	CLIC
Jet Impactant		X	19 C°					1000		X			X	CLIC
Jet Impactant		X	19 C°						1650	X			X	CLIC

Remarque : Pour les vidéos citées dans le tableau, elles seront présentées dans certains cas d'étude dans ce qui suit.

IV.2.1. Influence de la température de la plaque

On présente dans la figure IV.2 les visualisations de l'écoulement sans excitation pour trois températures différentes de la plaque ($T=T_{amb}$, 40°C et 80°C). Le nombre de Reynolds, la longueur L de la buse et le rapport H/D sont pris égaux respectivement à 1700, 53cm et 2.

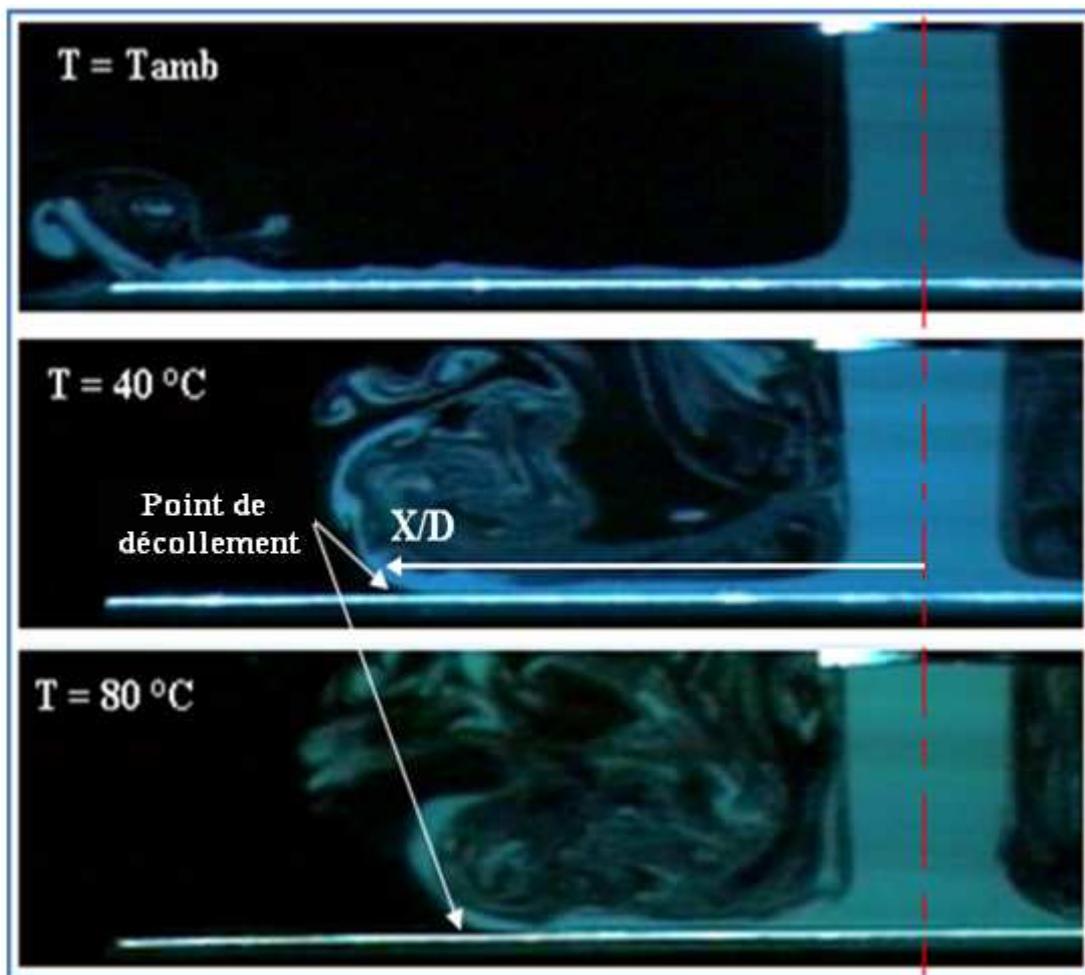


Figure IV-2 Influence de la température de la plaque sur la position du point de décollement

On constate que pour la température ambiante, le fluide ne se décolle pas et l'écoulement pariétal est collé sur toute la plaque. Pour les températures de la plaque différentes de la température ambiante, plus la température est élevée, plus le point de décollement s'approche du point d'impact du jet vertical. En effet lorsqu'on augmente la température de la plaque, le fluide s'échauffe plus ainsi les forces de flottabilité deviennent plus intenses et le décollement du fluide se fait plus tôt.

Du point de vue thermique, plus la convection est importante plus le fluide s'échauffe vite. En effet la chaleur diffusée par la plaque provoque une différence de densité entre l'air de l'écoulement pariétal et l'air ambiant, donc l'air qui est en contact avec la plaque devient plus léger et s'élève provoquant le décollement.

IV.2.2. Influence du nombre de Reynolds

La figure IV.3 présente les visualisations de l'écoulement sans excitation pour deux nombres de Reynolds différents ($Re=1700$ et 5260). La température, la longueur L de la buse et le rapport H/D sont pris égaux respectivement à T_{Ambiante} , 53cm et 2 .

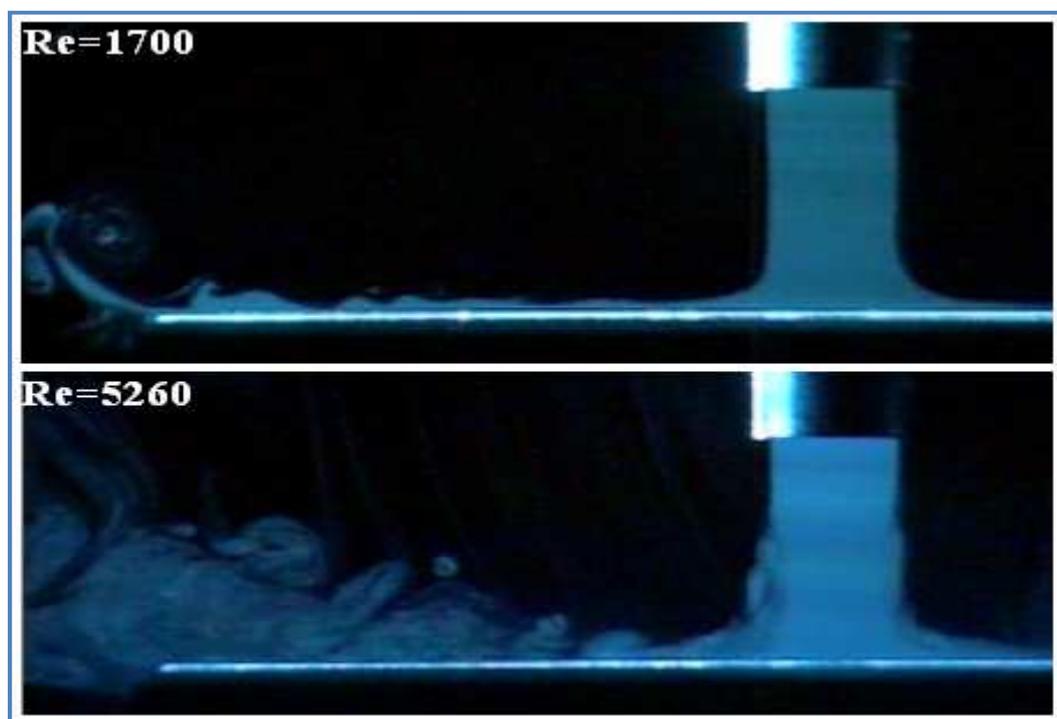


Figure IV-3 Influence du nombre de Reynolds sur la position du point de décollement

Après avoir atteint la plaque, l'écoulement est dévié et se transforme en jet pariétal. Il évolue sur la plaque en oscillant en surface. De petites structures se détachent de l'écoulement principal et se désagrègent. Elles sont plus nombreuses lorsque le régime d'écoulement est plus turbulent.

Dans le cas où la plaque est chauffée ($T=80^{\circ}\text{C}$), on remarque dans la figure IV-4 que, plus le nombre de Reynolds est élevé, plus le point de décollement est éloigné du point d'impact.

En effet lorsqu'on augmente le nombre de Reynolds, les forces d'inertie deviennent prépondérantes devant les forces de flottabilité, et le jet tend à s'éloigner du centre de la buse.

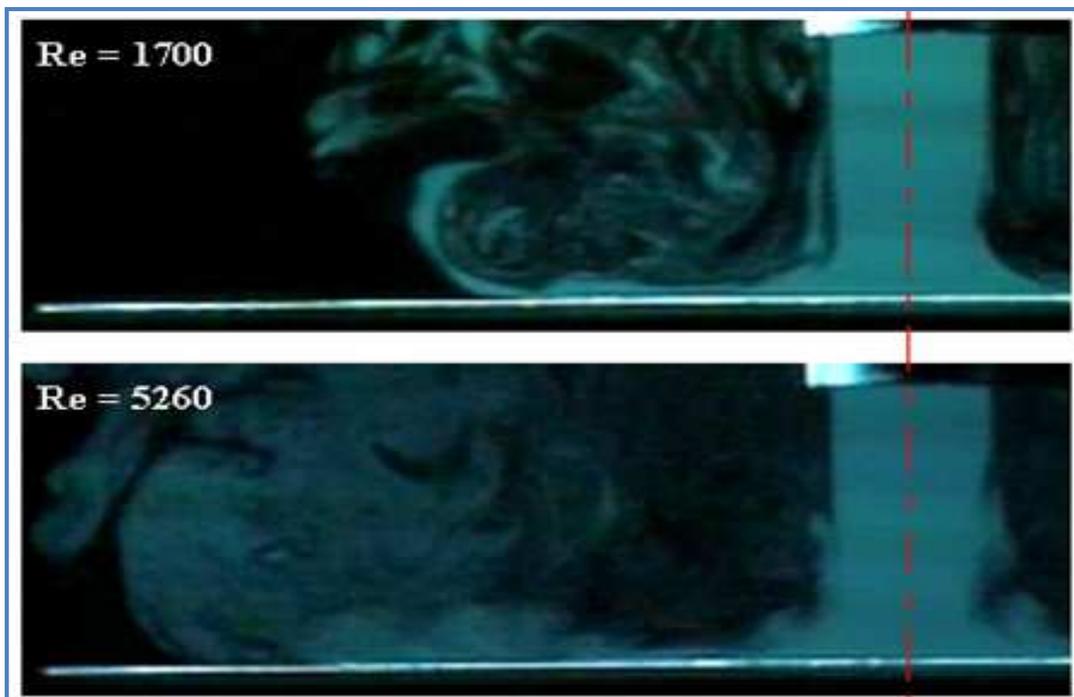


Figure IV-4 Influence du nombre de Reynolds sur la position du point de décollement

Donc nous pouvons conclure que le meilleur refroidissement de la plaque correspond au nombre de Reynolds $Re = 5260$ puisque le jet pariétal couvre une surface de la plaque plus grande que celle pour $Re = 1700$, nous constatons aussi que les forces d'inertie ont une tendance à plaquer le fluide contre la paroi et l'empêcher de se décoller.

IV.2.3. Influence de la hauteur adimensionnelle H/D

La figure IV.5 présente les visualisations de l'écoulement sans excitation pour deux hauteurs différents ($H/D=1$ et $H/D=2$). La température, la longueur L de la buse et le nombre de Reynolds sont pris égaux respectivement à 80°C , 53cm et 1700 .

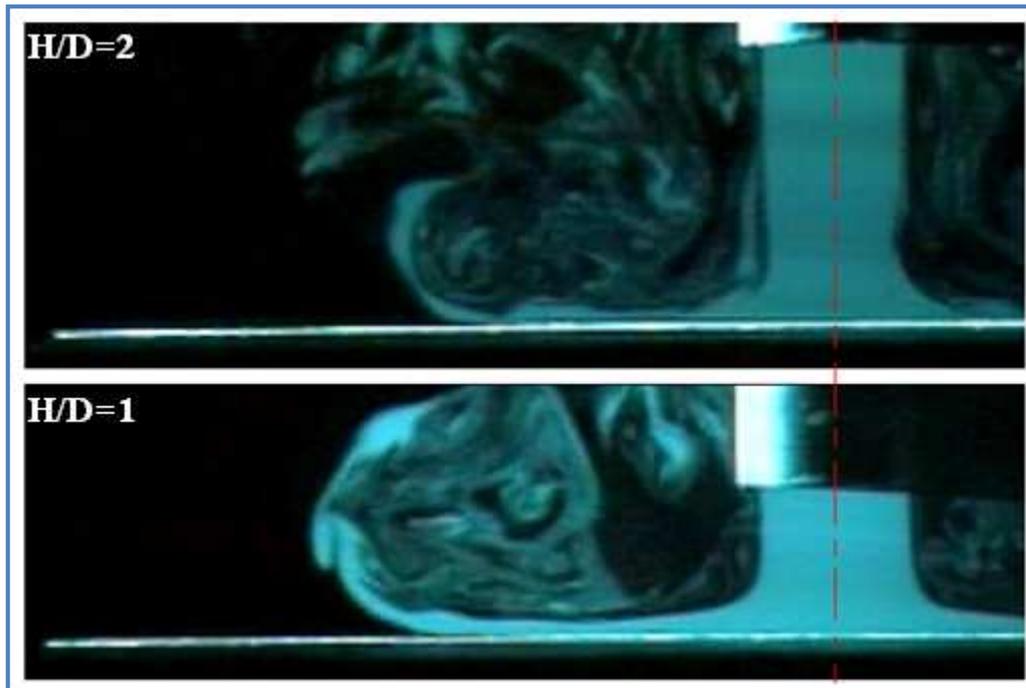


Figure IV-5 Influence de la hauteur sur la position du point de décollement

Nous remarquons d'après la figure IV.5 que la diminution de la distance entre la buse et la plaque éloigne le point de décollement du point d'impact. En effet, lorsqu'on augmente la hauteur de la buse, la vitesse du jet vertical diminue puisque le jet sera plus développé, la vitesse de l'écoulement radial diminue, par conséquent les forces de flottabilité deviennent prépondérantes devant les forces d'inertie et le fluide aura tendance à dévier en se détachant de la plaque.

IV.2.4. Influence de l'excitation acoustique*

Afin de d'étudier l'effet de l'excitation sur le développement du jet impactant, nous avons fixé la température de la plaque à $T=80^{\circ}\text{C}$, la hauteur $H/D=2$ et la longueur de la buse $L=53\text{cm}$. Les fréquences d'excitation particulières de résonance $F=320\text{Hz}$, $F=1609\text{Hz}$ qui sont déterminées préalablement pour la buse de longueur $L=53\text{cm}$, ainsi que la fréquence intermédiaire arbitraire de 1000Hz ont été utilisées et ceci pour deux régimes d'écoulement laminaire ($Re=1700$) et turbulent ($Re=5260$).

* Dans ce qui suit un jet pulsé veut dire excité

➤ Cas laminaire

En observant la figure IV-6 nous constatons que seule la fréquence de Helmholtz affecte l'écoulement pariétal du jet et rend le point de décollement plus proche du centre de la buse, pour les autres excitations le jet se comporte comme étant un jet non pulsé.

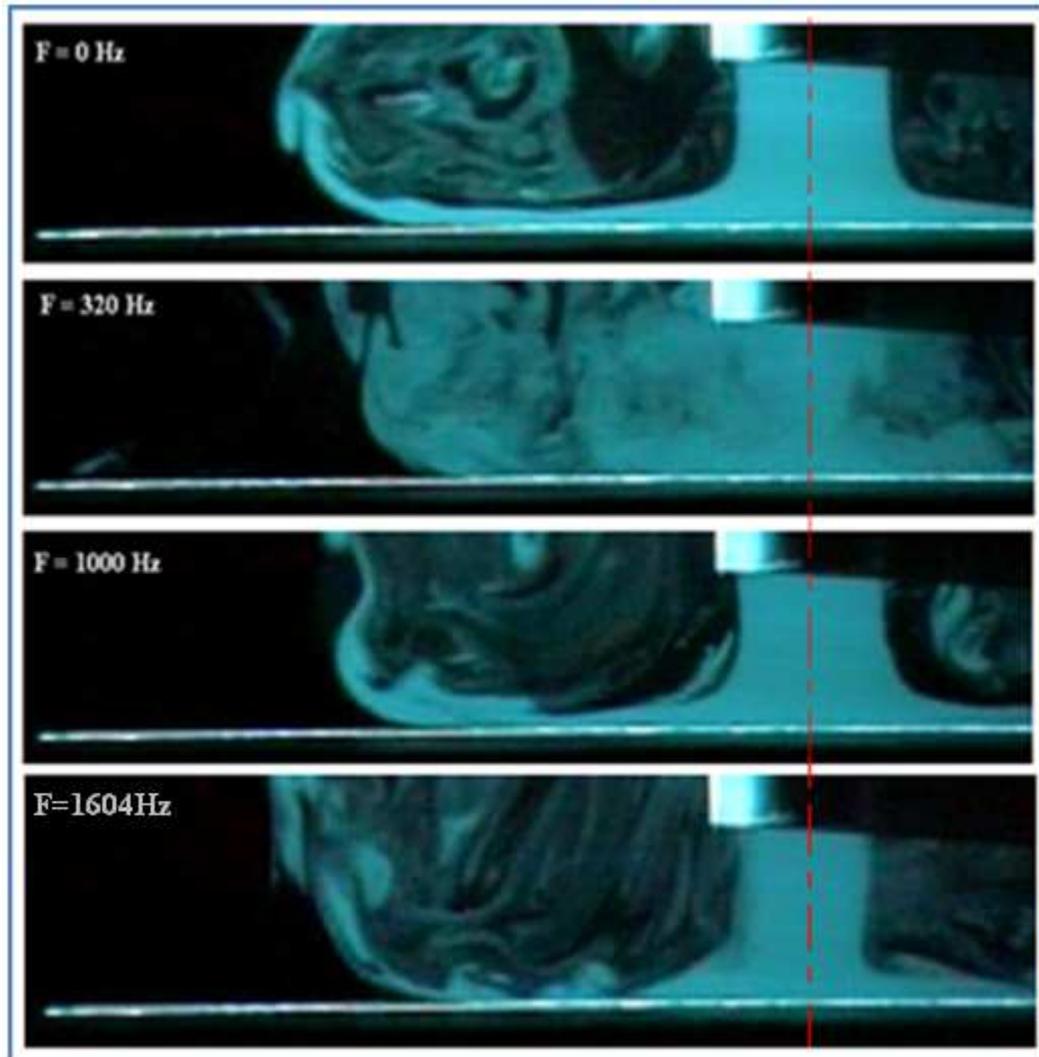


Figure IV-6 Influence de l'excitation sur la position du point de décollement

A noter aussi que dans le cas où nous avons un phénomène de résonance, on passe du jet laminaire vers un jet turbulent. Dans ce cas le fluide absorbe le maximum d'énergie, il devient déstructuré et fluctuant. Le décollement rapide s'explique par le fait que la turbulence du jet favorise le transfert de chaleur entre la plaque et le fluide en contact.

En effet, le mécanisme de conduction est modifié et favorisé l'apparition d'innombrables tourbillons. Les petits volumes de fluide en se mélangeant avec d'autres, jouent le rôle de porteur d'énergie. Par conséquent un accroissement de turbulence implique une augmentation de la quantité de chaleur qui s'écoule par convection. Les forces de flottabilité prépondérantes devant les forces d'inertie ce qui provoque le phénomène de décollement.

➤ **Cas turbulent**

La première constatation qui peut être tirée à partir de la figure IV-7 est que seule la fréquence de résonance de Helmholtz affecte l'écoulement. En dehors de cette fréquence le jet se comporte comme étant non excité.

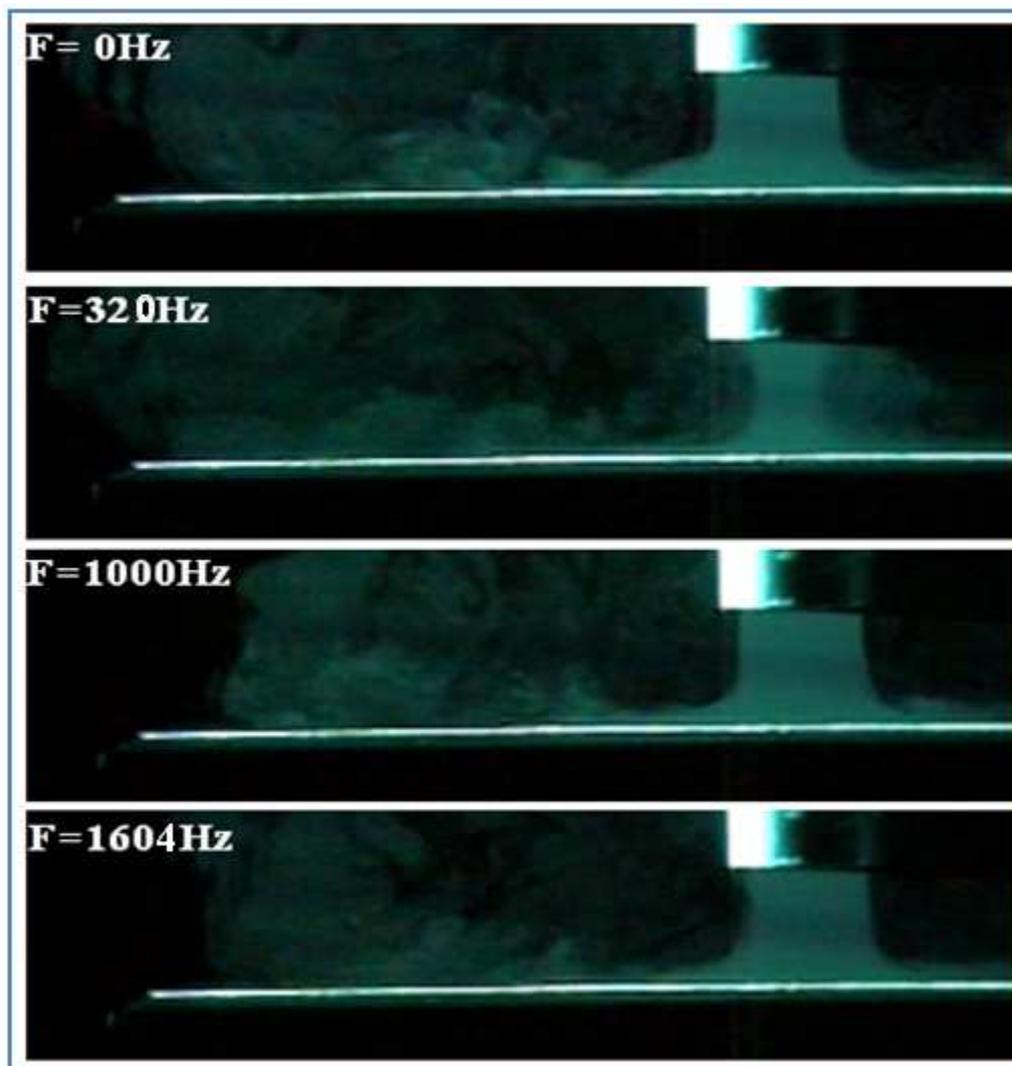


Figure IV-7 Influence de l'excitation sur la position du point de décollement

Cependant, nous remarquons que dans le cas de l'excitation $F=320\text{Hz}$ l'écoulement pariétal se décolle plus loin, il atteint presque le bord de la plaque.

Si nous observons le jet à la sortie de la buse, nous remarquons qu'il y a une convergence et une divergence de l'écoulement avant d'atteindre la plaque. En passant par le col il s'accélère, sa vitesse augmente, par conséquent les forces d'inertie augmentent, ce qui rend le décollement plus loin. L'excitation acoustique améliore l'épanouissement du jet et augmente la surface de contact entre le fluide et la plaque chauffée et améliore le transfert thermique convectif.

Conclusion

Les visualisations de l'écoulement ont permis d'identifier les aspects qualitatifs de l'écoulement. Ils nous ont permis aussi de confirmer les résultats trouvés auparavant par d'autres auteurs concernant l'influence du nombre de Reynolds, de la température et de la plaque et la hauteur de la buse sur le point de décollement.

Notre étude sur l'effet de la pulsation a montré que seule la fréquence de résonance de Helmholtz a un grand effet sur le jet impactant, cette influence varie selon le type d'écoulement. Le rapport X/D (point de décollement) diminue quand il y a l'excitation acoustique pour le cas laminaire et c'est l'inverse pour le cas turbulent.

IV.3. Mesure de température

IV.3.1. Conditions d'expérience

Le but de cette expérience est de tracer une cartographie thermique du jet par la mesure de la température dans les cas d'existence et non existence de la perturbation acoustique afin d'expliquer les différents décollements observés par tomographie laser. Cette mesure de température est réalisée à l'aide d'un thermocouple qui balaye le plan médian avec un système de déplacement approprié, (figure IV-8).

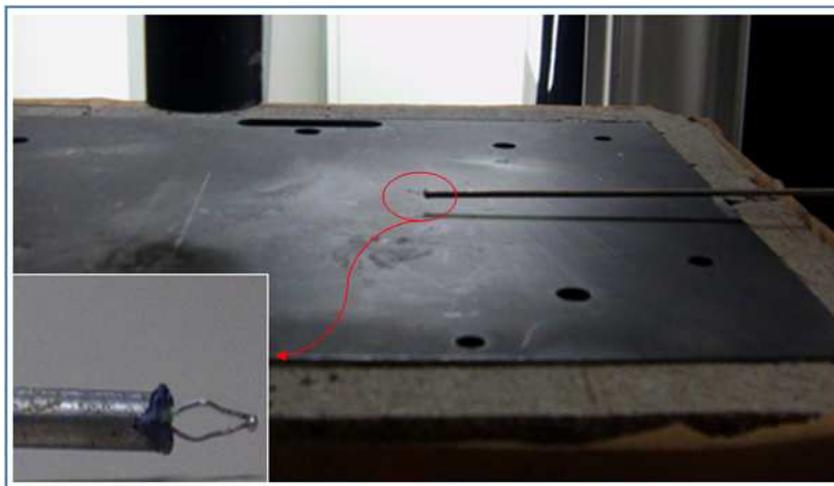


Figure IV-8 Thermocouple utilisé pour la mesure de température

Dans le tableau IV-2 et la figure IV-9 on montre les coordonnées des différents points de mesure et le plan médian considéré. Le domaine a été choisi de telle sorte que les points de décollement soient inclus dans la mesure. Le thermocouple est connecté à un multimètre qui effectue une moyenne de 500 mesures dans 20 ms.

Tableau IV-2 Coordonnées des points de mesure

		l'abscisse X/D								
		0	0.5	1	1.5	2	2.5	3	3.5	4
l'abscisse Y/D	U									
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75
	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1

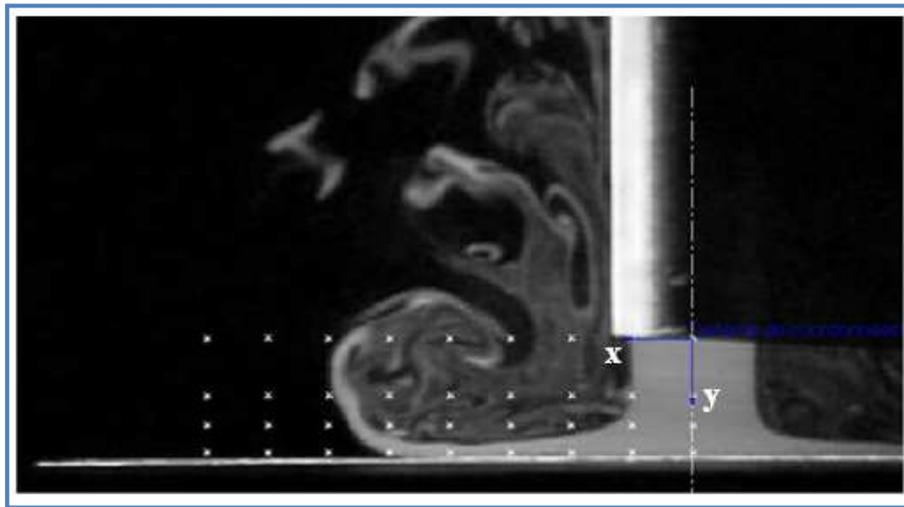


Figure IV-9 les points de mesure

IV.3.2. Résultats et discussion

Après Avoir réalisé une série de mesure de la température, nous avons utilisé le logiciel MATLAB pour interpoler la température sur tout le domaine afin d'avoir la distribution spatiale de cette dernière dans le domaine.

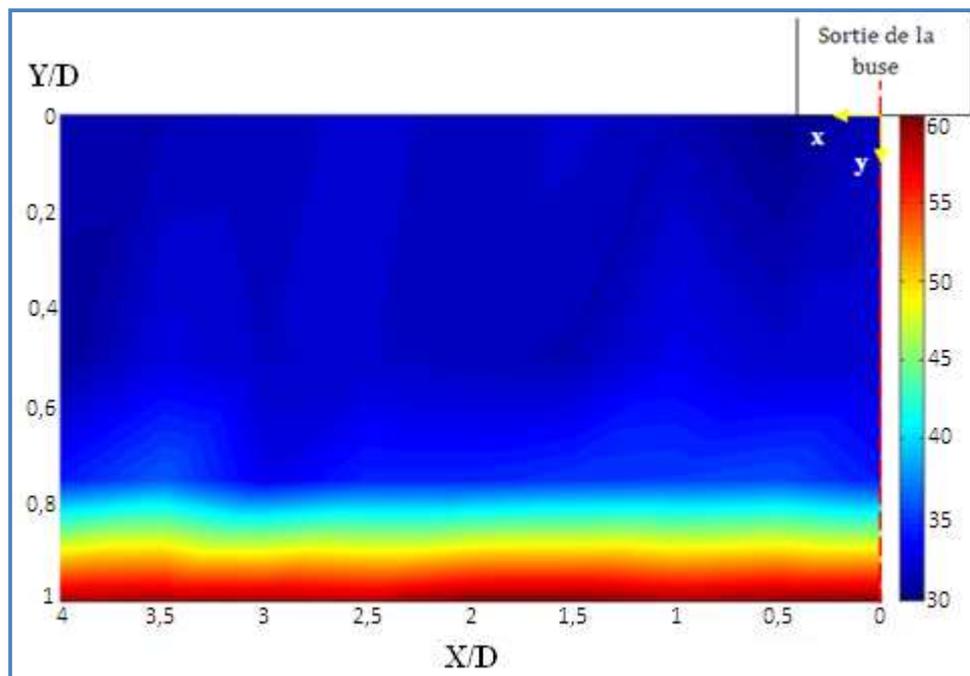


Figure IV-10 Distribution spatiale de la température

Dans la figure IV-10, nous constatons que la température de surface de la plaque chauffée est homogène, c'est une condition importante dans ce genre d'étude de transfert thermique.

La figure IV-11 montre l'évolution de la température pour le cas d'un jet laminaire et pour différentes positions ($Y/D=0, 0.5, 0.75, 1$). Les courbes de couleur bleue et rouge représentent respectivement l'évolution de la température en fonction de la position radiale X/D , pour un jet non excité et pulsé avec la fréquence de Helmholtz.

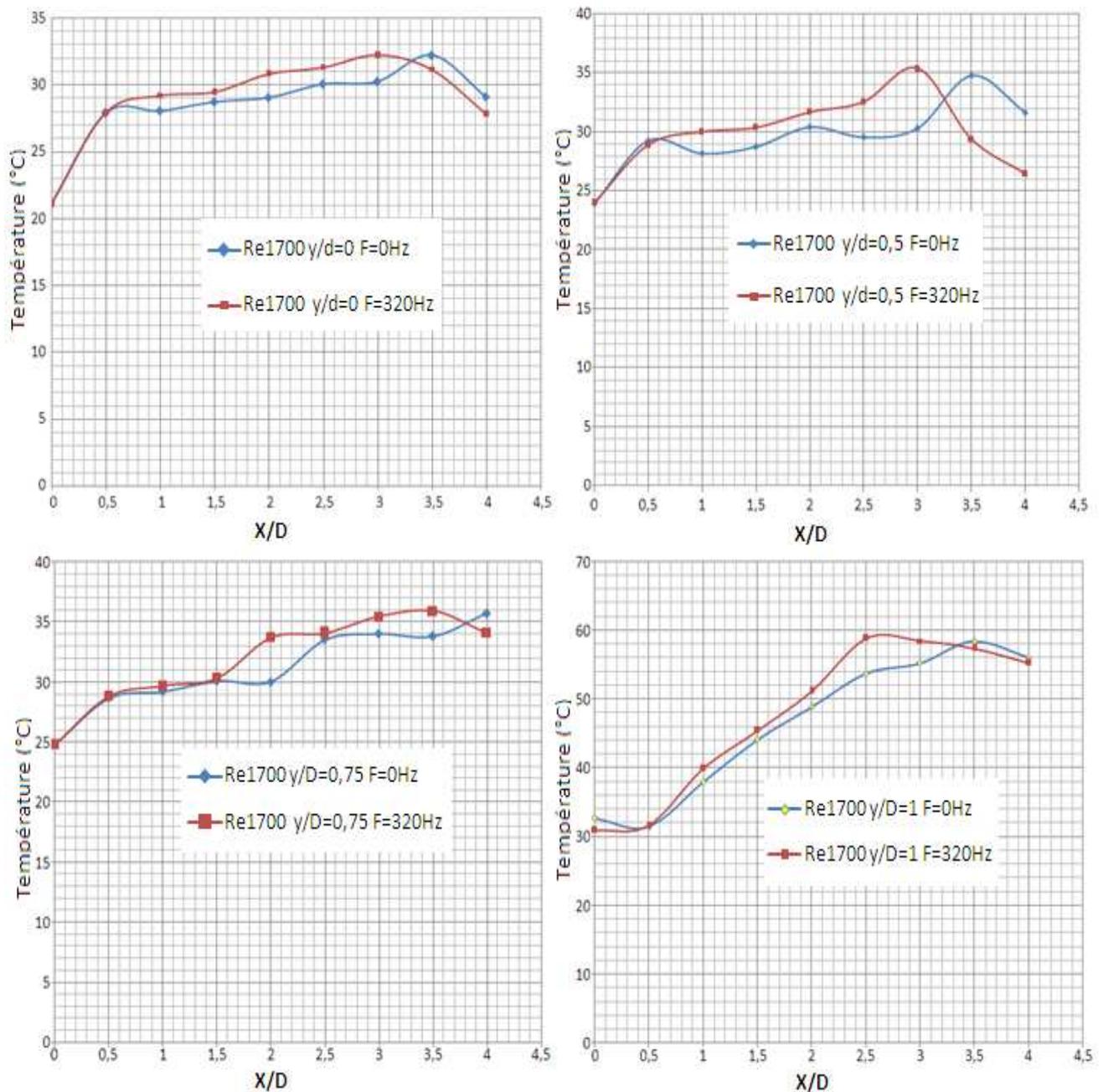
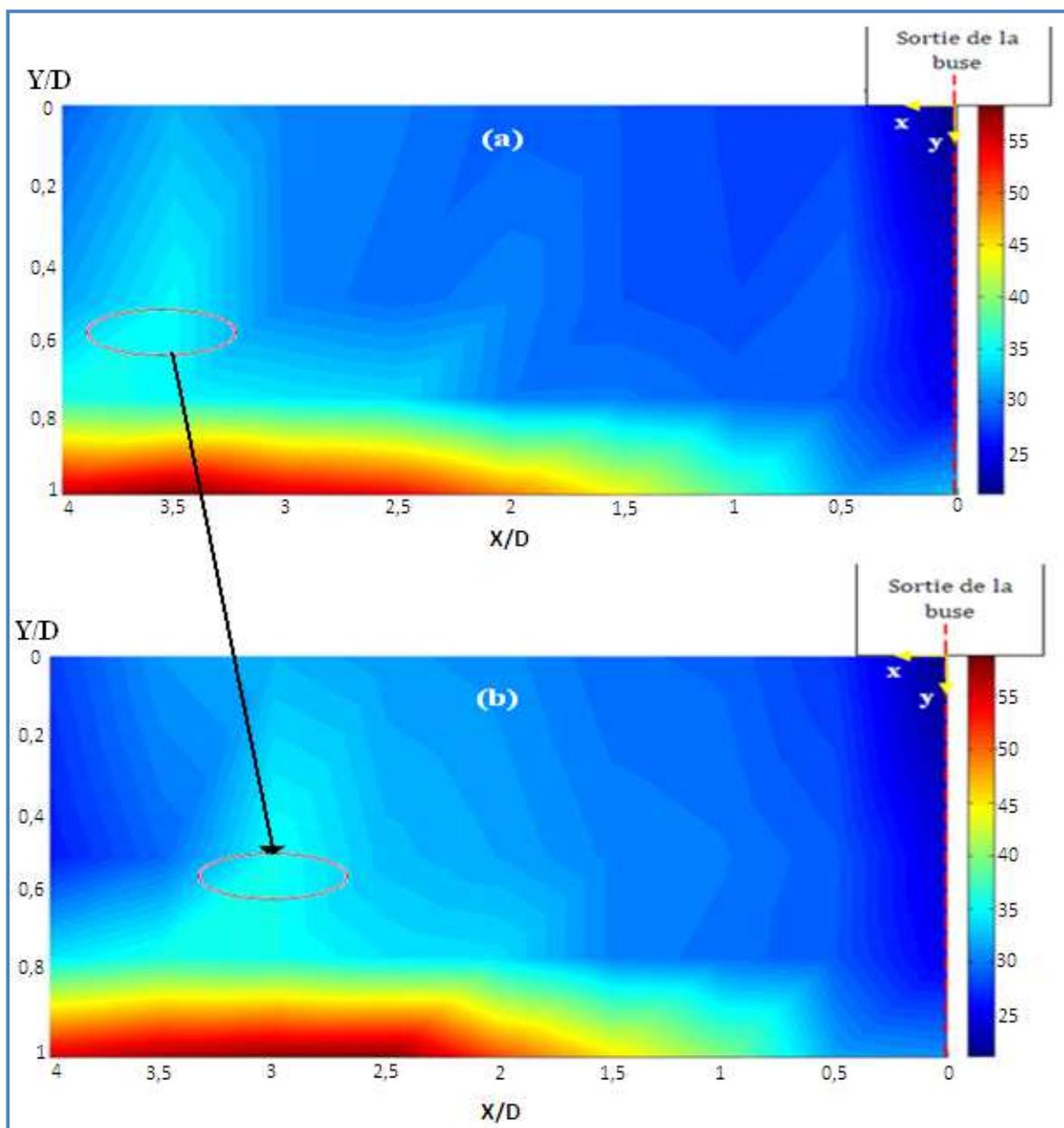


Figure IV-11 Evolution de la température de l'air

Pour les différentes hauteurs Y/D , on constate que la température pour le jet pulsé est toujours supérieure à celle pour le jet non excité. Cette situation se produit toujours avant le point de décollement. La perturbation acoustique favorise le transfert de chaleur convectif. Au voisinage du point de décollement, un appel d'air environnant vient se mélanger avec le jet provoquant une baisse de température plus marquée pour le jet pulsé.

Nous pouvons suggérer à partir des courbes d'évolution de température pour les deux modes de jet que le point de décollement correspond au point de décroissance de la température du fluide.



**Figure IV-12 Distribution spatiale de la température pour $Re=1700$
(a)-Jet non excité (b)-Jet excité**

La figure IV-12 montre aussi que le jet excité dans la zone pariétal s'échauffe plus rapidement. La mesure de la température confirme les conclusions obtenues par les visualisations laser. Nous concluons donc que pour un jet laminaire la pulsation favorise la turbulence ainsi elle améliore la quantité de chaleur échangée par convection et provoque un décollement précoce du fluide par rapport au cas non pulsé.

IV.4. Mesure du profil de vitesse à la sortie de la buse

IV.4.1. Condition d'expérience

Dans cette série de mesure nous avons utilisé la technique LDV pour déterminer le profil de vitesse à la sortie de la buse pour un jet libre, en prenant plusieurs mesures tout le long du diamètre de la buse. Le dispositif expérimental exploité est présenté dans la figure IV-13. Les points de mesure de la vitesse sont représentés dans la figure IV-14. La mesure de la vitesse axiale sera commentée dans la suite de ce chapitre.

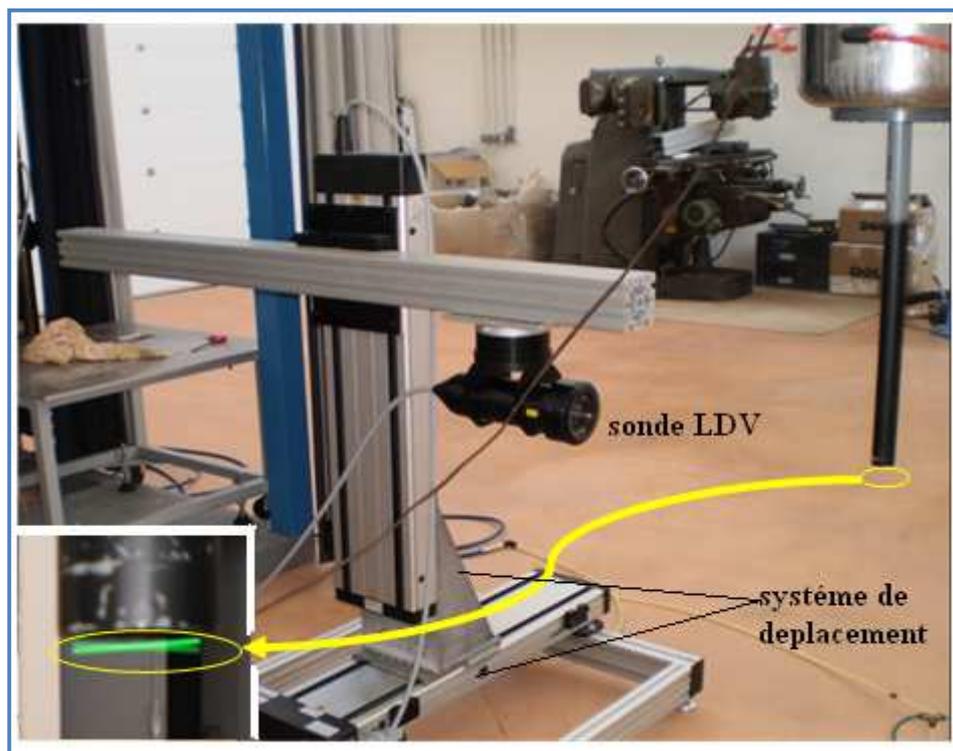


Figure IV-13 Mesure de vitesse à la sortie de la buse par LDV

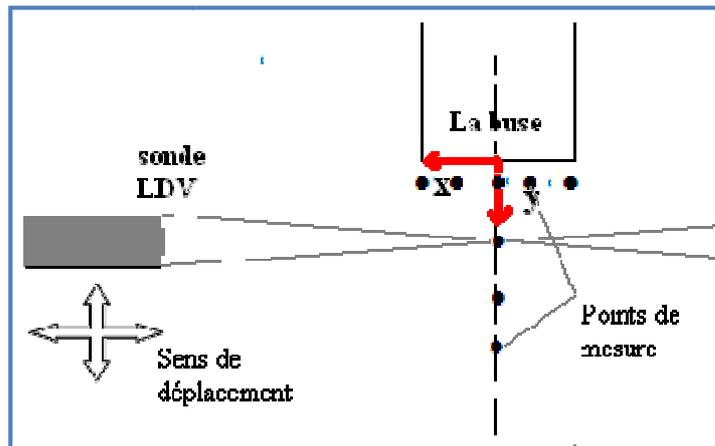


Figure IV-14 Les points de mesure de vitesse

IV.4.2. Effet de l'excitation dans le cas laminaire

La figure IV-15 montre le profil de vitesse à la sortie de la buse pour $Re=1700$. Nous remarquons dans le cas où le jet n'est pas excité que le profil de vitesse est parabolique. L'écoulement est donc laminaire de type écoulement de poiseuille.

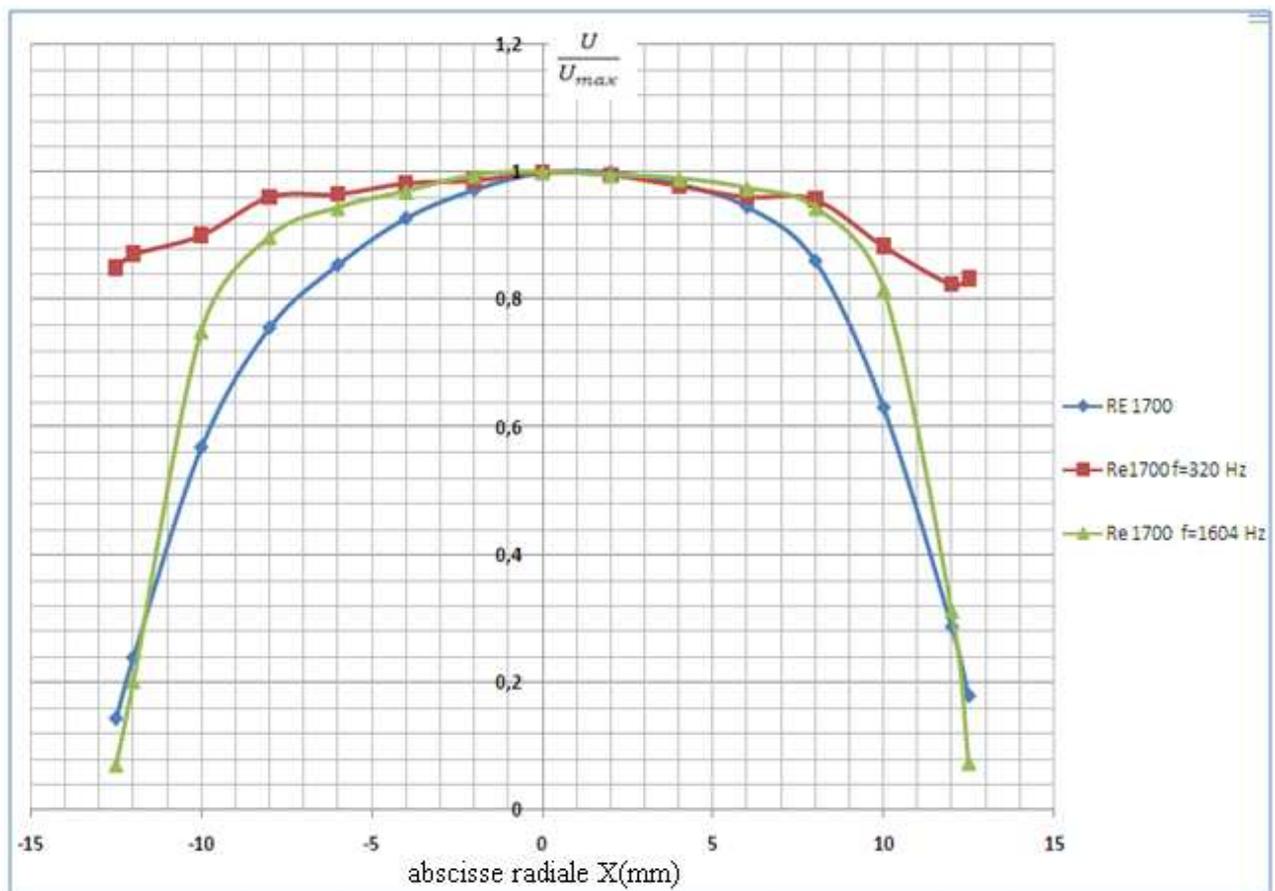


Figure IV-15 Profil de vitesse à la sortie de la buse

En introduisant la perturbation acoustique, le profil de vitesse tend vers un profil aplati pour la fréquence $F=1604\text{Hz}$, puis il devient complètement aplati pour la fréquence de Helmholtz $F=320\text{Hz}$. Ceci montre et confirme l'effet effectif de la pulsation acoustique sur la turbulence.

Il y a un autre indice de turbulence, qui est le 'RMS', qui est une mesure de la moyenne carré des fluctuations autour de la valeur moyenne. Cette mesure est donnée directement par le logiciel de traitement de signal qui accompagne la LDV. La figure IV-16 montre les résultats de cette mesure. Nous remarquons que la plus grande valeur du rapport $\text{RMS}/U_{\text{moy}}$ est obtenue pour la fréquence d'excitation de Helmholtz. Ce résultat conforte bien les conclusions faites en analysant le profil de vitesse.

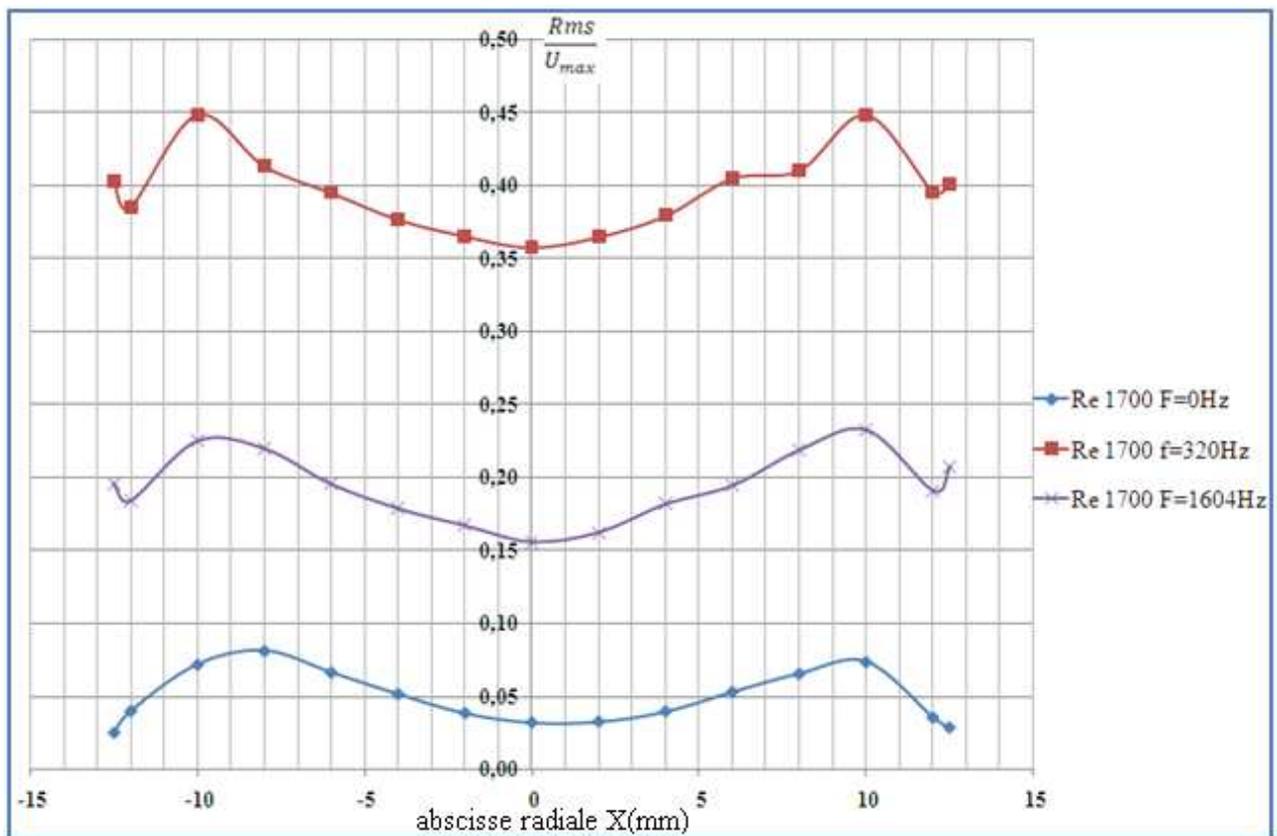


Figure IV-16 Mesure du RMS

IV.4.3. Effet de l'excitation dans le cas turbulent

Pour un jet turbulent nous remarquons que le profil de vitesse est un profil aplati pour les trois cas ($F=0\text{Hz}$, $F=320\text{Hz}$, $F=1604\text{Hz}$). Néanmoins nous remarquons que dans le cas de l'excitation $F=320\text{Hz}$ le profil de vitesse est plus étroit (figure IV-17). Le diamètre du jet se rétrécit même avant au voisinage de l'intérieur de la sortie de la buse. La section effective débitante devient plus étroite (figure IV-18).

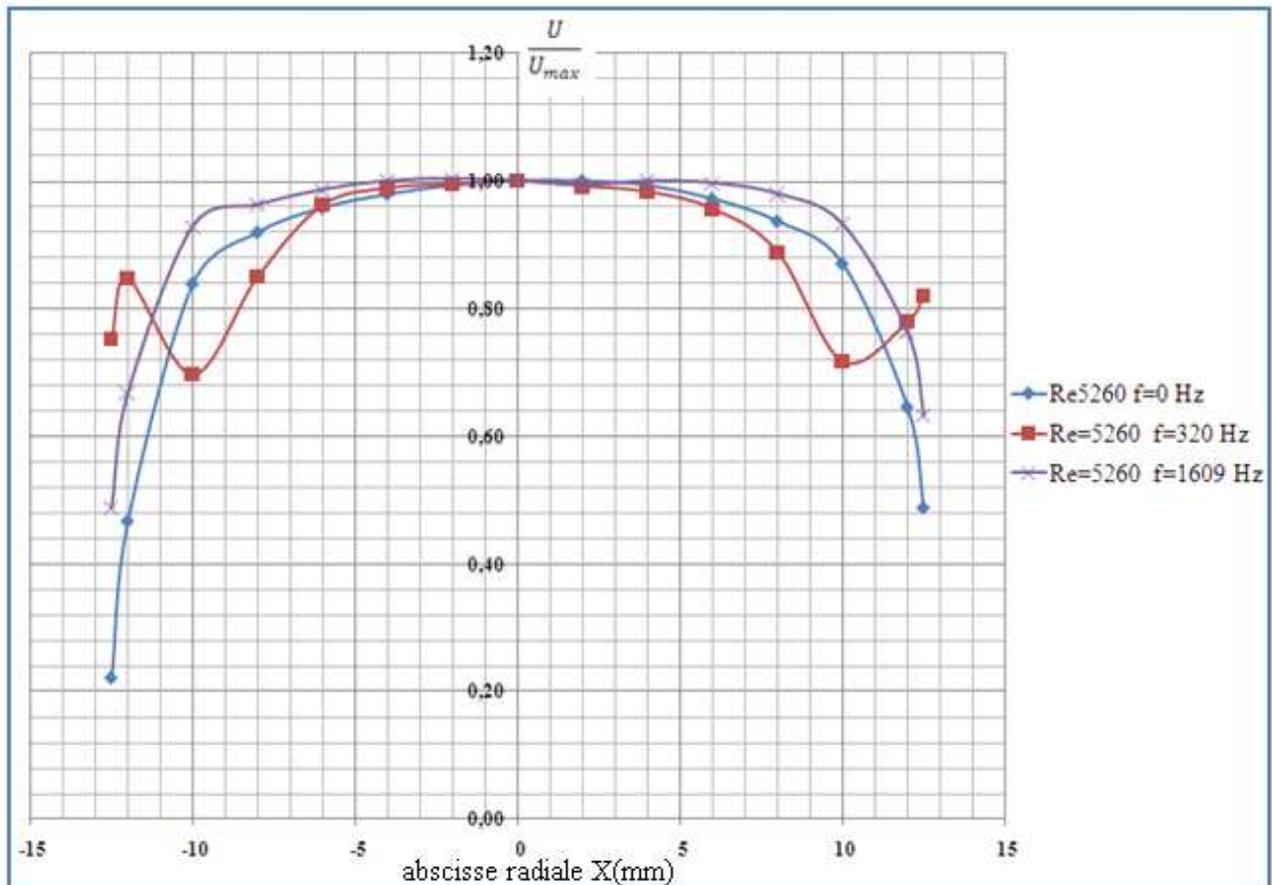


Figure IV-17 Profil de vitesse à la sortie de la buse ($Re=5080$)

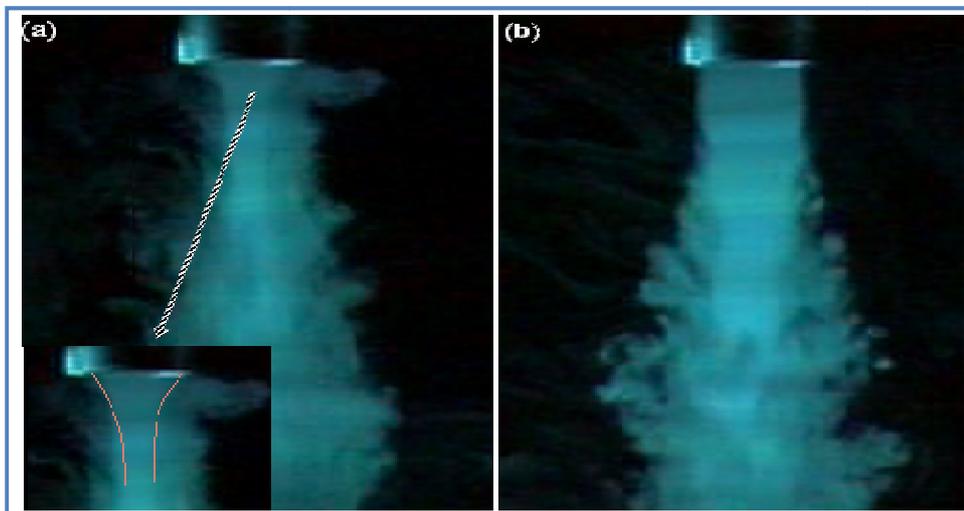


Figure IV-18 Jet libre $Re=5260$ (a)- $F=320$ Hz, (b)- $F=0$ Hz

Nous montrons dans la figure (IV-19) que la plus grande valeur du rapport RMS/U_{moy} correspond toujours à la fréquence d'excitation de Helmholtz, nous remarquons également que la turbulence générée par la fréquence $F=1604$ Hz est beaucoup plus meilleure pour $Re=5080$

que pour $Re=1700$. Le maximum de la turbulence se situe au voisinage de la paroi de la buse par contre le minimum se trouve à l'axe de la buse.

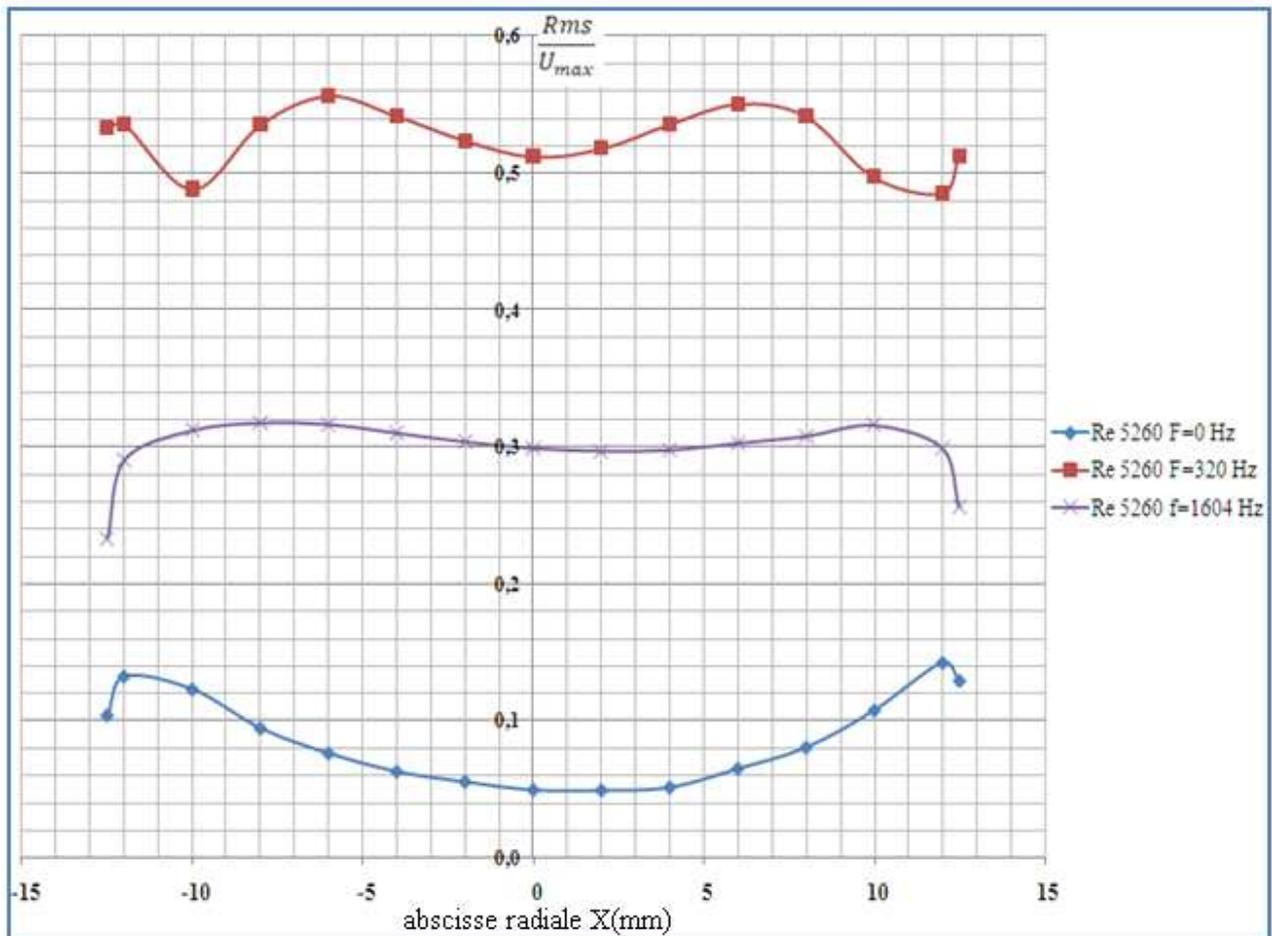


Figure IV-19 Mesure du RMS

IV.5. Evolution de la vitesse axiale

Nous avons remarqué à travers les visualisations dans le paragraphe (IV-2-4) pour le régime turbulent que le jet se décolle plus loin à cause de la présence de l'excitation $F=320\text{Hz}$ et nous avons expliqué ceci est dû à l'augmentation de l'inertie du jet. Afin de confirmer cette observation, nous avons procédé à la mesure de la vitesse axiale en fonction de la distance adimensionnelle Y/D . Dans la figure IV-20, nous constatons que pulsation acoustique de Helmholtz conduit effectivement à une augmentation de vitesse.

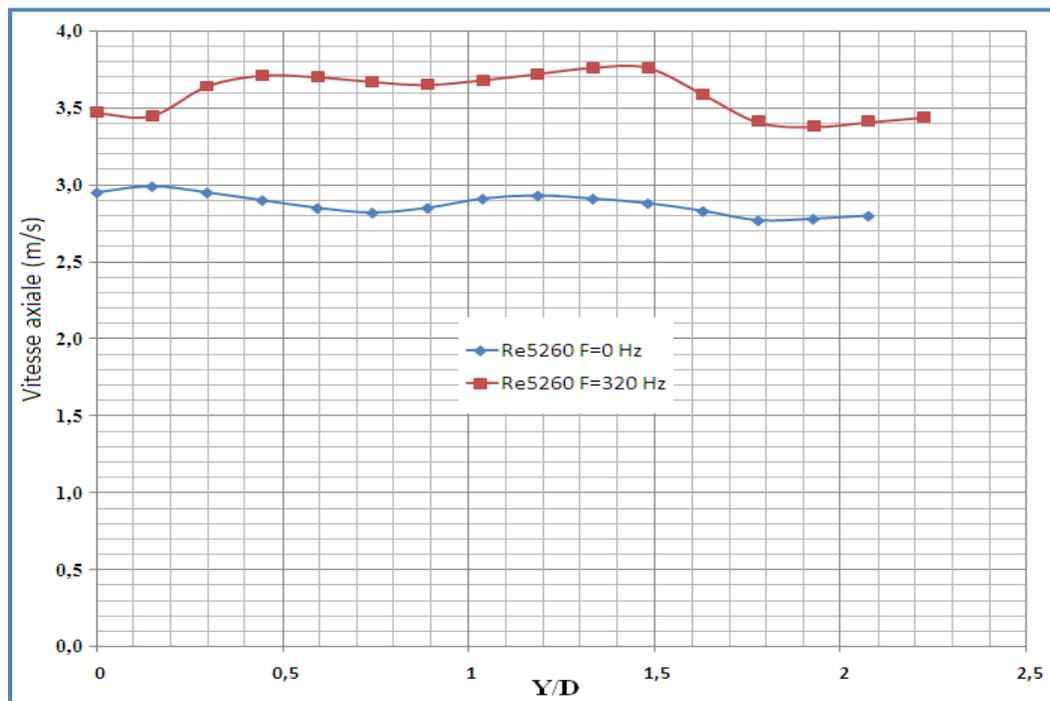


Figure IV-20 Evolution de la vitesse axiale Re=5260

IV.6. Courbes de refroidissement

IV.6.1. Condition d'expérience

Dans cette partie nous nous intéresserons à l'évolution de la température de la plaque au cours du temps, l'expérience consiste à chauffer la plaque jusqu'à une température $T_i=80^\circ\text{C}$ puis la laisser refroidir. Pour cela, nous avons utilisé un pyromètre relié à un multimètre qui est à son tour relié à un pc via un port série RS 232, pour permettre l'enregistrement du data, le point visé par le pyromètre est le point du centre de la plaque (figure IV-21).

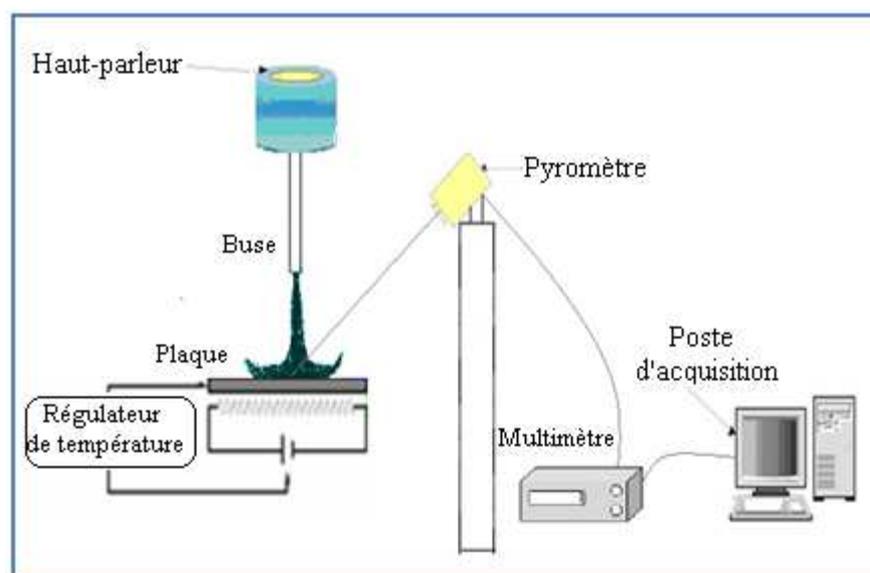


Figure IV-21 Dispositif de mesure de la température

IV.6.2. Résultats et discussion

IV.6.3. Effet de l'excitation dans le cas laminaire

La figure montre l'évolution de la température adimensionnelle θ en fonction du temps pour un jet impactant laminaire ($Re=1700$) sans et avec la présence de la pulsation acoustique. La courbe noir est une courbe de référence dans laquelle nous avons laissé la plaque se refroidir naturellement sans écoulement ($Re=0$).

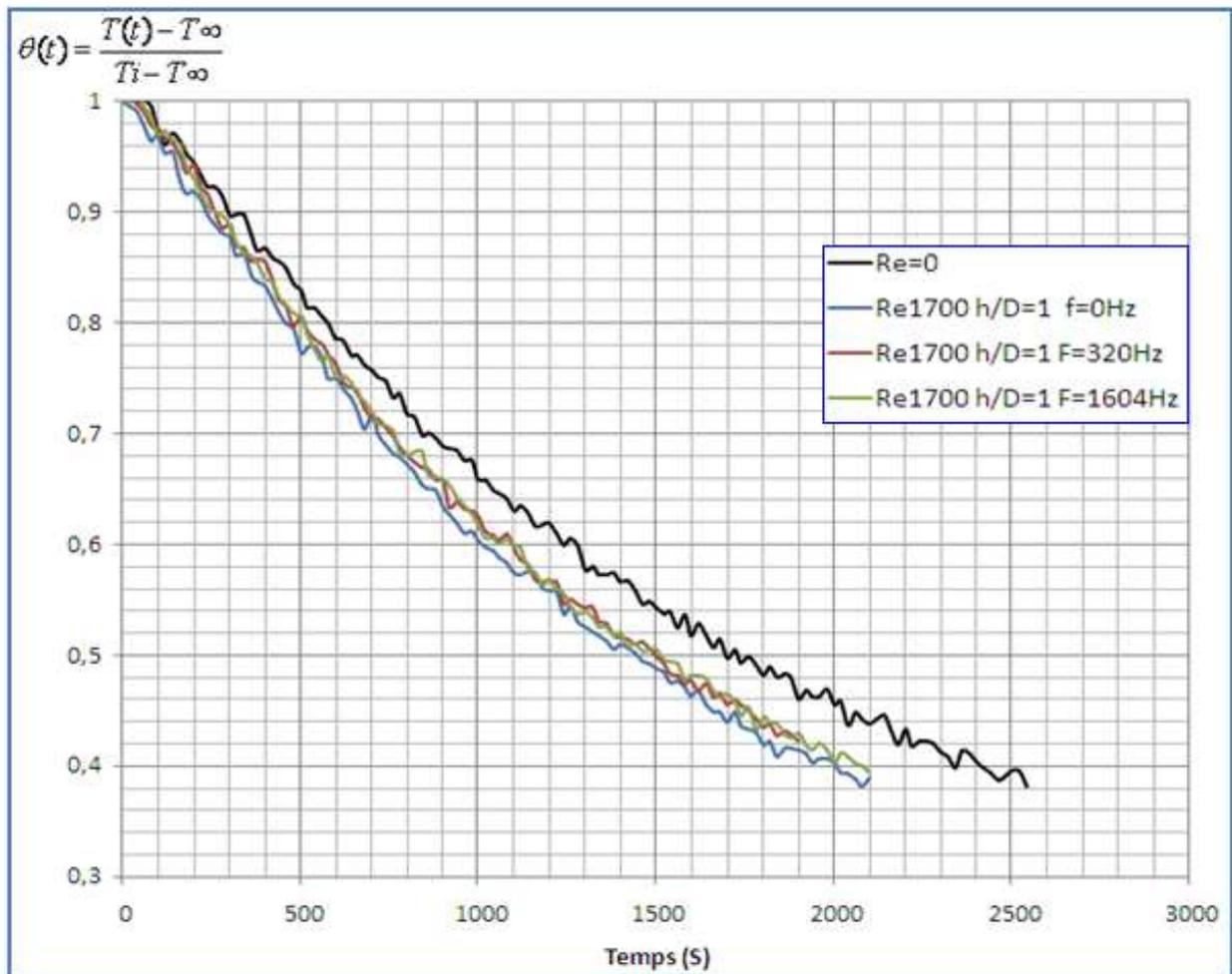


Figure IV-22 Courbes de refroidissement ($Re=1700$)

Nous remarquons que l'excitation ne rajoute rien à l'écoulement en termes de vitesse de refroidissement car les courbes sont confondues. Ceci vient du fait que la présence de la pulsation et notamment celle de Helmholtz incite l'écoulement à se détacher car le fluide s'échauffe rapidement. La quantité de chaleur importée par le fluide est améliorée mais au détriment de la surface impactée par le jet (figure IV-6, IV-12), ce qui crée une compensation et rend toutes les courbes confondues.

IV.6.4. Effet de l'excitation dans le cas turbulent

Nous avons de même pour le cas turbulent à l'exception que nous avons aussi fait une mesure pour une excitation $F=1000\text{Hz}$ pour confirmer ce que nous avons dit dans le chapitre concernant l'étude acoustique.

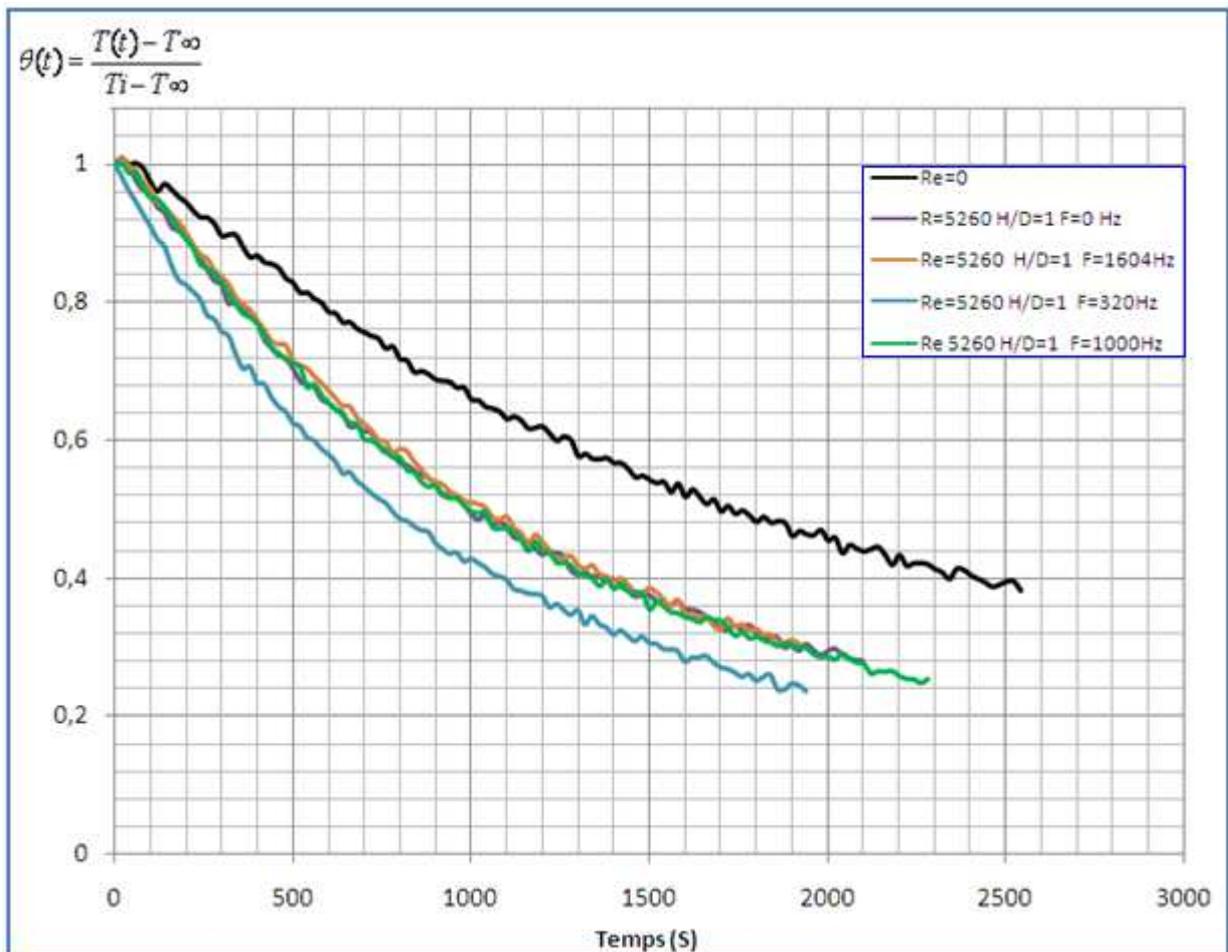


Figure IV-23 Courbes de refroidissement (Re=5260)

Nous observons qu'il y a que la fréquence de résonance de Helmholtz qui apporte une amélioration remarquable dans la vitesse de refroidissement. Nous avons déjà montré à travers les visualisations et les mesures de vitesse et de turbulence que la pulsation provoque une augmentation de l'inertie du jet ainsi que dans sa turbulence.

Nous concluons que pour un jet turbulent la pulsation favorise la turbulence et améliore l'épanouissement du jet, ceci augmente le transfert de chaleur entre le fluide et la plaque.

IV.6.5. Autres cas de régime d'écoulement

Le but de ces expériences est d'étudier l'évolution de la vitesse de refroidissement avec la variation de nombre de Reynolds. Pour cela nous avons fait des mesures pour des régimes d'écoulement intermédiaires ($Re=3500$, $Re=7000$).

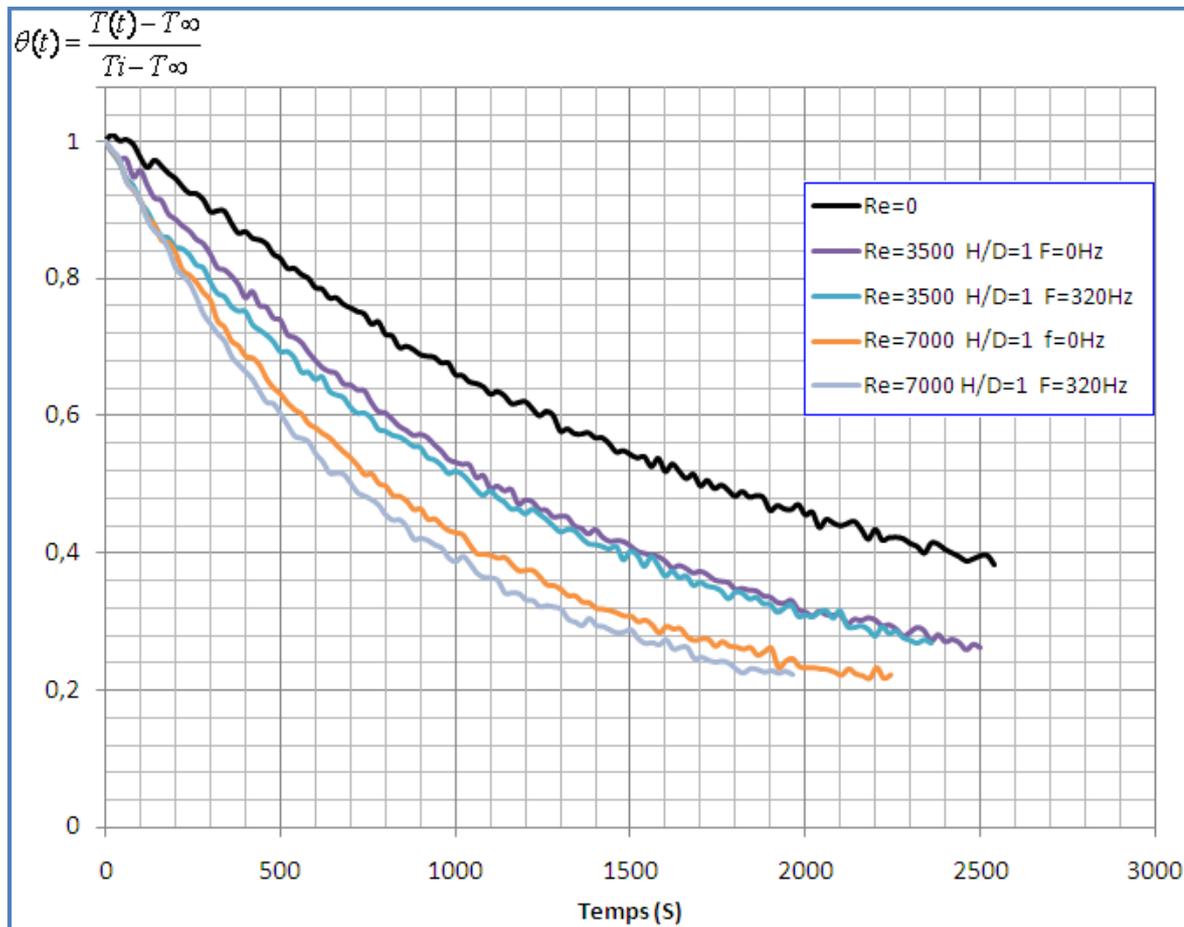


Figure IV-24 Courbes de refroidissement ($Re=3500, Re=7000$)

La figure IV-24, nous constatons que pour les deux régimes d'écoulement, la pulsation conduit à une amélioration dans le refroidissement de la plaque néanmoins pour $Re=7000$ le taux d'amélioration est inférieur à celui de $Re=5260$ et ceci se voit clairement dans la figure IV-25.

Nous remarquons aussi que la vitesse de refroidissement pour le cas du jet excité de $Re=5260$, est égale à celle du jet non excité de $Re=7000$, ceci représente un gain en terme de débit d'air consommé.

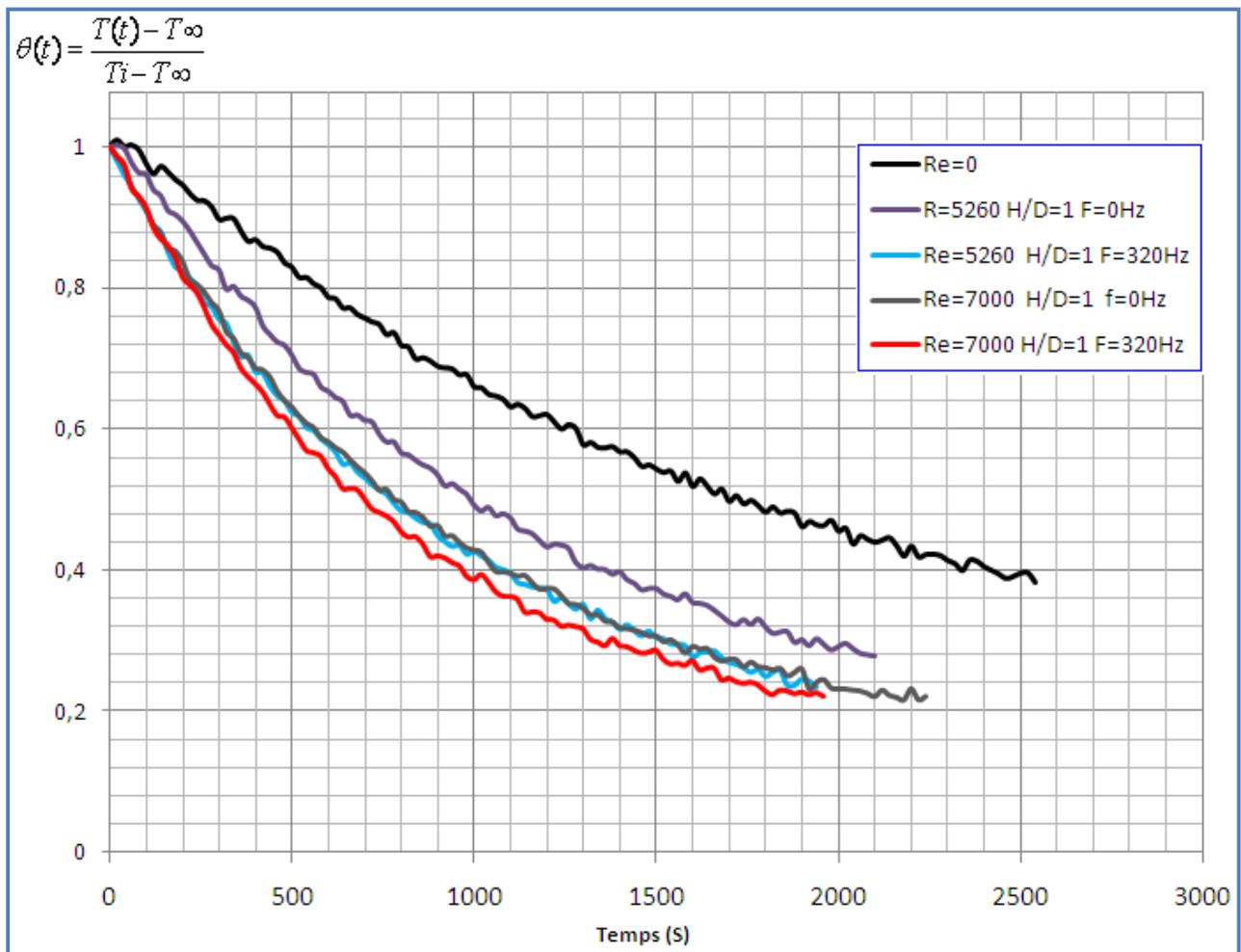


Figure IV-25 Comparaison des courbes de refroidissement (Re=5260, Re=7000)

Nous concluons donc, que la pulsation acoustique améliore le transfert thermique convectif entre la plaque et l'air injecté, qui provoque une augmentation dans la vitesse de refroidissement. L'effet de cette excitation dépend du régime d'écoulement, pour un jet laminaire (Re=1700), cette pulsation n'affecte pas le refroidissement de la plaque. En augmentant le régime d'écoulement (Re=3000, Re=5260, Re=7000), la vitesse de refroidissement augmente jusqu'à atteindre un maximum pour Re=5260 puis elle diminue.

Par ailleurs, cette conclusion reste restreinte, car les dimensions de la plaque peut empêcher de voir l'effet réel de la pulsation pour des régimes d'écoulement plus grand, qui est impossible de le vérifier avec notre plaque car déjà à Re=5080 on atteint le bord de la plaque.

IV.7. Approche d'évaluation du coefficient global de transfert de chaleur

Le but de cette section est de présenter une approche pour déterminer le coefficient d'échange globale, afin de quantifier l'amélioration provoquée par la perturbation.

IV.7.1. Isolation de la plaque

Pour simplifier notre bilan thermique, nous avons procédé à l'isolation thermique de notre plaque chauffée, à noter que cette isolation a été faite en utilisant la laine de roche, qui est un bon isolant thermique. Toutes les mesures de température et les courbes de refroidissement ont été réalisées après avoir fait l'isolation.

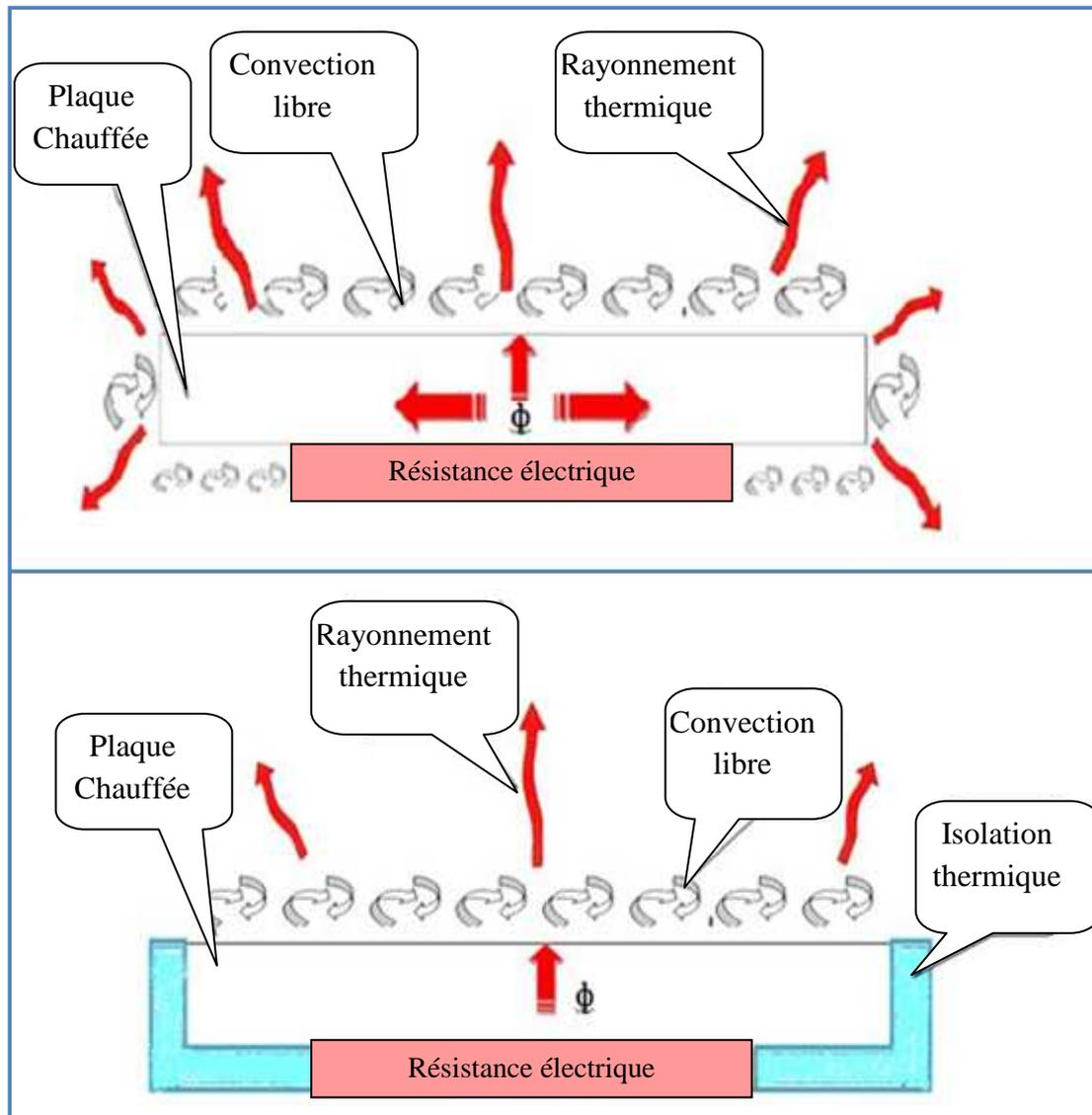


Figure IV-26 Flux de chaleur dans la plaque avant et après l'isolation

Puisque il s'agit de faire des bilans donc on passe forcément par des mesures de température et comme la plaque est parallélépipédique, on doit trouver la température moyenne de chaque surface (latérales, supérieure, inférieure), ce qui implique plusieurs points de mesure par surface, mais l'utilisation de l'isolation permet de faciliter la tâche et on aura juste la température de la surface supérieure à évaluer.

IV.7.2. Bilan thermique

Dans une première étape nous avons broché la plaque à un potentiomètre, voltmètre et un ampèremètre (figure IV-25) afin de mesurer la tension et le courant nécessaire pour assurer une température de surface constant $T=80^{\circ}\text{C}$ ce qui permet par de calculer la puissance électrique consommée par la résistance.

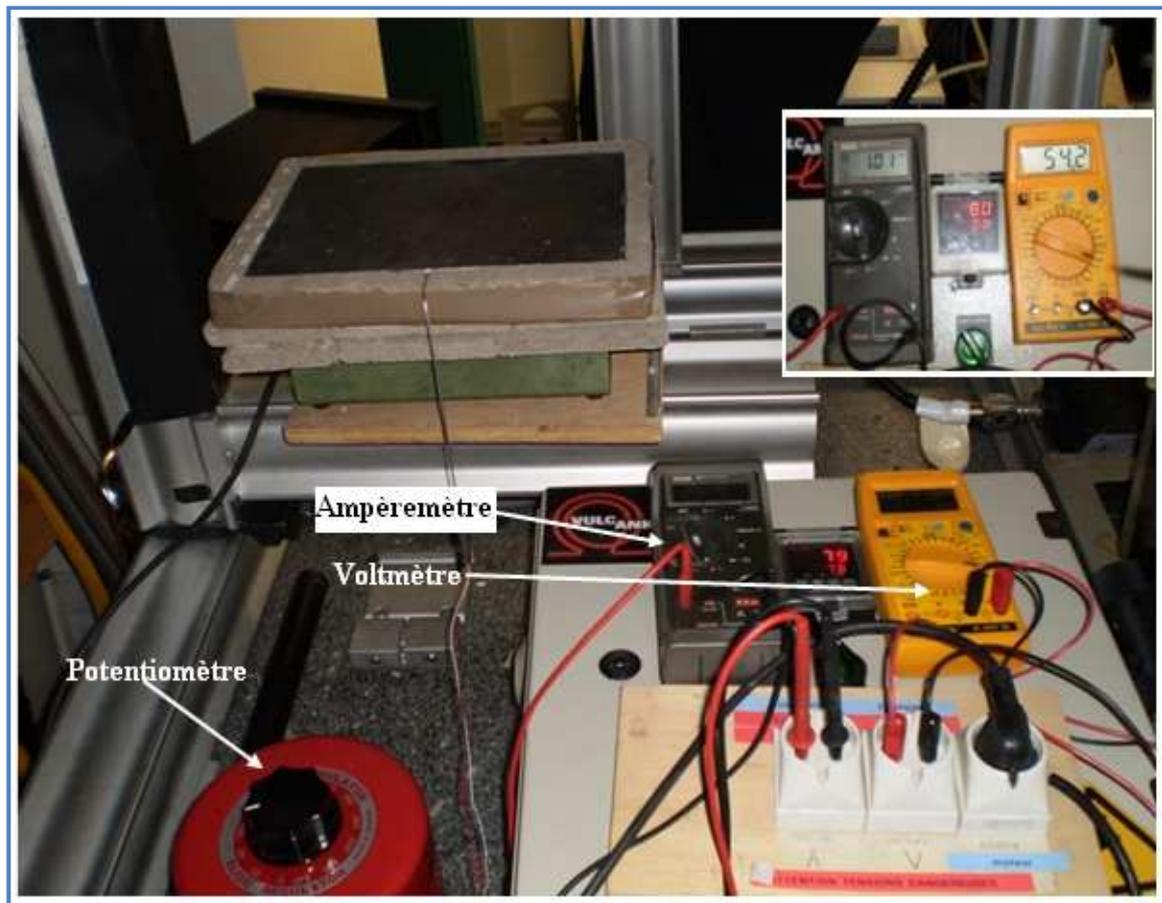


Figure IV-27 Mesure de la puissance électrique consommée dans la résistance

Après avoir calculé cette puissance, nous avons la puissance échangée par rayonnement en utilisant l'équation (I-4) et celle échangée par convection libre à l'aide des corrélations ce qui nous a permis d'évaluer le pourcentage des pertes.

Tableau IV-3 Bilan thermique

	T ambiante	T1(surf)	Tm	K(w.m-1.K-1)*10^-3	v(m2.s-1)*10-6	Pr	RaL	Nu	h(w.m-2.k-1)	q(W)	(%)
Puissance électrique Consommée										54,70	100,00
Rayonnement surf up	295,75	353,15								25,09	45,88
Convection Naturelle surf up	295,75	353,15	324,45	28,11	18,35	0,70	7,19E+05	15,72	7,58	24,37	44,55
TOTAL											90,42
Pertes											9,5779

Dans ce cas nous pouvons écrire :

$$\dot{E}_g = \dot{E}_{conv} + \dot{E}_{Ray} + 0,1 \dot{E}_g$$

Avec :

E_g : la puissance générée par la résistance

Pour pouvoir évaluer le coefficient d'échange global h, il suffit de mettre l'écoulement (avec ou sans excitation) et ajuster le potentiomètre jusqu'à atteindre la température de surface $T_s=80^\circ\text{C}$, et dans ce cas la il suffit de remplacer la puissance générée par sa nouvelle valeur pour trouver le h pour chaque cas à partir de l'équation suivante :

$$0,9 \dot{E}_g = h \cdot S \cdot (T_s - T_\infty) + \varepsilon \cdot \sigma \cdot S \cdot (T_s^4 - T_\infty^4)$$

Avec : $\varepsilon=0,95$

Conclusion générale

Les applications diverses des jets dans leurs différentes configurations, restent un domaine d'étude très large.

Dans ce travail, nous avons étudié un jet impactant excité par une fréquence acoustique afin de contribuer à la compréhension de l'effet de l'excitation sur ce type d'écoulement, très présent dans de nombreuses applications industrielles. L'éjecteur est constitué d'une chambre de tranquillisation et un tube d'éjection (résonateur d'Helmholtz), l'excitation acoustique est générée par un haut-parleur placé dans l'enceinte de tranquillisation.

Une étude bibliographique nous a permis de nous familiariser et d'acquérir une idée globale sur les caractéristiques du jet libre et impactant. Cette bibliographie a été consacrée essentiellement au jet plan impactant excité pour comprendre ce type d'écoulement.

Dans la section suivante, nous avons présenté le dispositif expérimental et l'instrumentation utilisée, telles que la tomographie laser pour visualiser l'écoulement, la Vélocimétrie Laser à effet Doppler (LDV), ainsi que la pyrométrie et thermométrie conventionnelle.

Nous sommes passés ensuite à l'étude expérimentale du système d'excitation utilisé, où nous avons montré que notre système présente deux fréquences de résonance, la première qui correspond à la résonance de Helmholtz, qui est propre aux paramètres géométriques du système, telles que, la longueur de la buse, le volume de l'enceinte, la deuxième est purement électrique du haut-parleur. Nous avons constaté à l'aide de la tomographie laser que seules ces deux fréquences de résonance ont une influence sur le jet libre et particulièrement la fréquence de Helmholtz ($F=320\text{Hz}$).

Les visualisations de l'écoulement ont permis d'identifier les aspects qualitatifs de l'écoulement de type jet impactant. Ils nous ont permis aussi de confirmer les résultats trouvés auparavant par d'autres auteurs concernant l'influence du nombre de Reynolds, de la température de la plaque et de la hauteur de la buse sur le point de décollement.

Notre étude sur l'effet de la pulsation a montré que seule la fréquence de résonance de Helmholtz a un grand effet sur le jet impactant, cette influence varie selon le type

d'écoulement. Le rapport X/D (point de décollement) diminue quand il y a l'excitation acoustique pour le cas laminaire et c'est l'inverse pour le cas turbulent.

Nous avons procédé dans l'étape suivante à la mesure de vitesse par la LDV. Cette dernière a montré que la présence de la pulsation acoustique de Helmholtz rend le profil de vitesse à la sortie de la buse aplati, qui confirme que l'excitation acoustique favorise la turbulence. D'autre part, les mesures de l'évolution de la vitesse axiale pour le cas turbulent excité et non excité ont montré que la présence de la pulsation provoque une augmentation de cette dernière.

Nous sommes passés ensuite aux mesures de température qui nous ont permis d'étudier l'effet de la perturbation acoustique sur la vitesse de refroidissement. Il a été remarqué que seule la fréquence de Helmholtz améliore le refroidissement de la plaque, et ceci seulement pour le cas du jet turbulent.

Dans la dernière étape, nous avons essayé de donner une approche pour déterminer le coefficient global d'échange convectif, afin de quantifier l'amélioration apportée par la présence de la perturbation acoustique introduite dans l'écoulement.

En perspective de ce travail, et ayant remarqué que la perturbation acoustique améliore le refroidissement seulement dans le cas du jet turbulent, il serait intéressant d'étudier la relation entre le nombre de Reynolds et le taux d'amélioration dans la vitesse de refroidissement. Ceci en balayant une large plage de Re et en utilisant une plaque avec des dimensions plus grandes, afin d'éliminer les effets de bord.

Bibliographie & Webographie

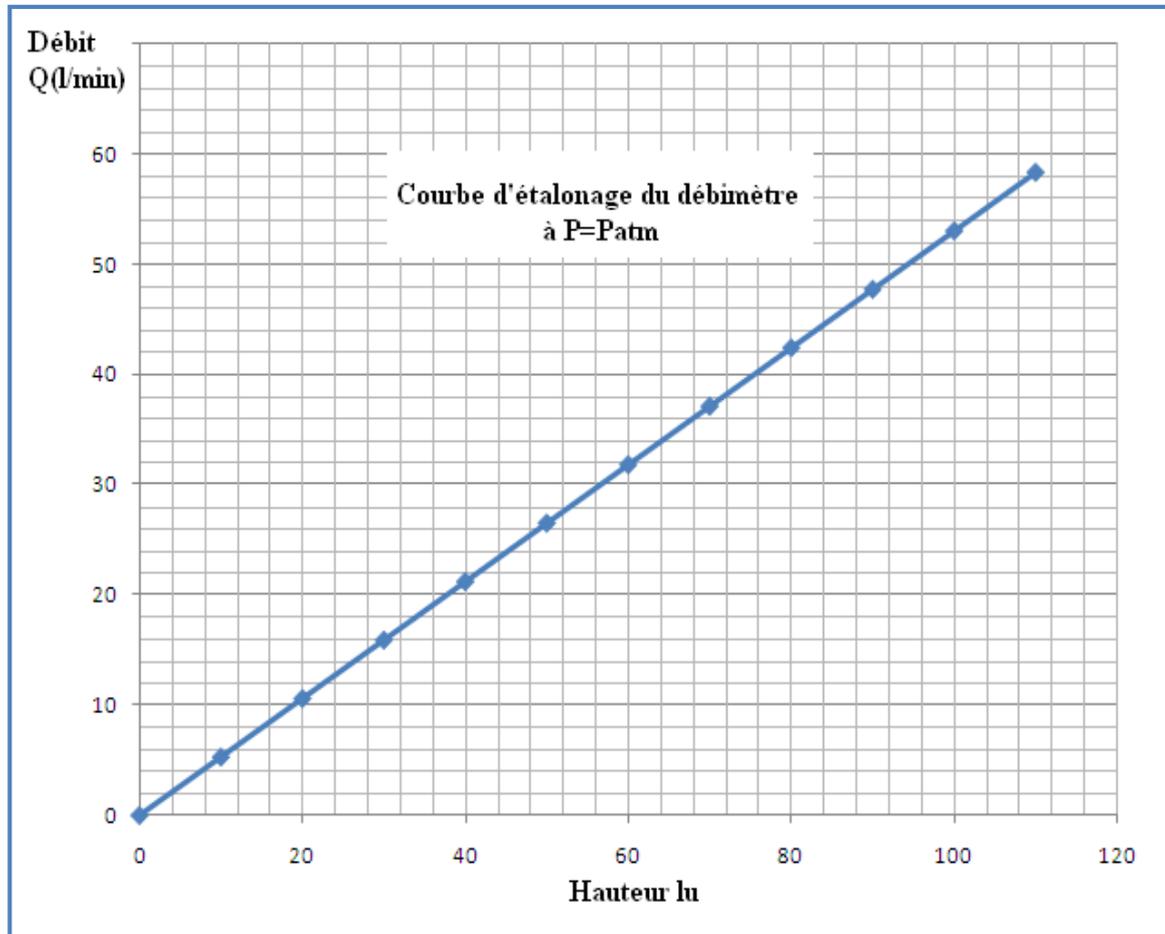
- [1] F.KHERIS. Etude expérimentale et numérique d'un jet d'air impactant une plaque plane chauffée : Projet de fin d'études à l'Ecole Nationale Polytechnique. Septembre 2007.
- [2] S. MARZOUK Simulation numérique d'un écoulement de type jet plan pulsé : Thèse de doctorat de l'Ecole Nationale d'Ingénieurs de MONASTIR et de l'université de la Méditerranée AIX-MARSEILLE II. Décembre 2002.
- [3] C. BAILLY et G. COMTE-BELLOT. Turbulence : CNRS Editions, Collection : Sciences et Techniques de l'ingénieur. Février 2003. P89-108.
- [4] L.MEDANI , étude numérique d'un jet impactant excité par une fréquence acoustique, Projet de Fin d'Etudes à ENIT & UNIMECA, pp 13-14, (2009).
- [5] <http://fr.wikipedia.org/wiki/Convection>
- [6] Quinn B., Compact Ejector Thrust Augmentation, Journal of Aircraft, Vol. 10, N° 8, pp. 481-486. (1973).
- [7] Quinn B., A simple estimate of the effect of ejector length on thrust augmentation, Journal of Aircraft, Vol. 10, N° 5, pp. 313-314, Aug. (1973).
- [8] Hill W. G., and Greene P. R., Increased Turbulent Jet Mixing Rates Obtained by Self-Excited Acoustic Oscillations, ASME Journal of Fluids Engineering. Vol. 99, N° 3, pp. 520-525, (1977).
- [9] Bradbury L. J. S., and Khadem A. H., The Distortion of a Jet by Tabs, Journal of Fluid Mechanics, Vol. 70, Part 4, pp. 801-813, (1975).
- [10] Binder G., and Favre-Marinet M., Flapping Jets, IUTAM-IAHR, Symposium Karlsruhe, Aug. 14-16, 1972.
- [11] Husain H. S. and Hussain A. K. M. F., Controlled excitation of elliptic jets, letters of phys. Fluid Vol. 26, N° 10, pp. 2763-2766, Octobre (1983).
- [12] Brown G. B., On Vortex Motion in Gaseous Jets and the Origin Or their Sensitivity to Sound, Phys. Soc. of London Proc., 47, pp. 904-915, (1999).
- [13] Sato H., The Stability and Transition of Two-Dimensional Jet, J. Fluid Mech., Vol. 7, N° 1, pp. 53-80, (1960).
- [14] Sato H. and Sakao F., An Experimental Investigation of the Instability of Two-Dimensional Jet at Low Reynolds Numbers, 1. Fluid Mech., Vol. 20, N° 2, pp. 337-352, (1964).

- [15] Becker H. A., and Massaro T. A., Vortex Evolution in a Round Jet, *J. Fluid Mech.*, Vol. 13, N° 3, pp. 435-448, (1968).
- [16] Goldschmidt V. W., and Kaiser K. F., Interaction of an Acoustic Field and a Turbulent Plane Jet: Mean Flow Measurements, *AICHE, Chem. Eng. Prog. Symp. Series*, Vol. 67, N° 109, pp. 91-98, (1971).
- [17] Chambers P. W., Acoustic Interaction with a Turbulent Plane Jet, Ph. D. thesis, Purdue University, (1977).
- [18] Crow S. C., and Champagne F. H., Orderly Structure in Jet Turbulence, *J. Fluid Mech.*, Vol. 48, N° 3, pp. 547-591, (1971).
- [19] Hussain A. K. M. F. and Rayclark A., Upstream influence on the near field of plane turbulent jet, *Phys. Of Fluid*, Vol. 20, N°9, pp. 1416-1426, (1977).
- [20] Kelmanson D. A., Resultats sur la structure d'un jet turbulent, *Khaborshy-Vest n. Akademii Nauk Kaz-S.S.R.*, Vol. 3, pp. 51-58 (1968). [7] J.COUSTEIX : Aérodynamique : « Turbulence et couche limite ». CEPAD 1989.
- [21] Hussain A.K.M.F. and Thompson C.A., Controlled Symmetric Perturbation of the Plane Jet an Experimental Study in Initial Region, *J. Fluid Mech.*, Vol. 100, Part 2, pp. 397-431, (1980).
- [22] Zaman K. B. M. Q., and Hussain A. K. M. F., Vortex Pairing in a Circular Jet Under Controlled Excitation. Part 1. General Jet Response, *J. Fluid Mech.*, Vol. 101, N° 3, pp. 449-491, (1980).
- [33] Farrington R. B. and Claunch S. D., Infrarad Imaging of large-amplitude, low frequency disturbances on a planar jet, *AIAA Journal*, Vol. 32, pp. 317-323, (1975).
- [24] Baccar S. ; Projet de fin d'études : « Mise au point et exploitation d'un système d'imagerie rapide dans le cadre de l'étude du refroidissement d'une plaque plane chauffée impactée par un jet d'air laminaire », 2008. IM²/UNIMECA. (INSAT/Tunisie).
- [24] <http://fr.wikipedia.org/wiki/Thermocouple> (paragraphe 3).
- [25] Cours d'acoustique (page 11) « Notions générales d'acoustique », Coriandre Vilain le INPG, Grenoble.
- [26] A. Ghio, S. Pinto : Résonance sonore et cavités supralaryngées, Laboratoire Parole et Langage, CNRS UMR 6057 Université de Provence, (2000).

Annexes

Annexe A

Correction de la lecture de débit



$$Q_{\text{réel}} = Q_{\text{lu}} * (P_{\text{réelle}} / P_{\text{atm}})^{0,5}$$

Avec $P_{\text{atm}} = 1,013 \text{ bar}$

Et $P_{\text{réelle}} = P_{\text{lue}} + 1,013$

Q_{lu} : le débit trouvé à partir de la courbe d'étalonnage en utilisant la hauteur lue sur le débitmètre.

P_{lue} : Pression lue sur le manomètre du détendeur.

Annexe B

Pour calculer la puissance échangée par convection naturelle est donnée par :

$$\dot{Q}_{\text{conv}} = hA_s(T_s - T_\infty) \quad (\text{W}) \quad (1)$$

Donc le problème revient à déterminer le h , pour une plaque horizontale à une température fixe T_s , on suit les étapes suivantes :

$$T_m = \frac{T_s + T_\infty}{2}$$

On tire les propriétés de l'air (k , ν et Pr) à partir du tableau des propriétés de l'air

On calcule le nombre de **Rayleigh**, Basé sur la longueur caractéristique L_c définie par la surface divisé par le périmètre

$$L_c = \frac{As}{p}$$

$$\text{Ra}_L = \text{Gr}_L \text{Pr} = \frac{g\beta(T_s - T_\infty)L_c^3}{\nu^2} \text{Pr} \quad (2)$$

$$\text{Si } 10^4 < \text{Ra} < 10^7 \quad \text{Nu} = 0.54\text{Ra}_L^{1/4}$$

$$\text{Si } 10^7 < \text{Ra} < 10^{11} \quad \text{Nu} = 0.15\text{Ra}_L^{1/3}$$

Après avoir calculé le nombre de **Nusselt**, nous tirons h à partir de la relation et applique l'équation (1) pour calculer la puissance

$$\text{Nu} = \frac{hL}{k} \quad (3)$$