HAL
open science

Etude aérodynamique et contrôle des instabilités de la zone initiale du jet annulaire de très grand rapport de diamètres par excitations acoustiques ou modification de l'obstacle central

Amélie Danlos, Gildas Lalizel, Béatrice Patte-Rouland

To cite this version:

Amélie Danlos, Gildas Lalizel, Béatrice Patte-Rouland. Etude aérodynamique et contrôle des instabilités de la zone initiale du jet annulaire de très grand rapport de diamètres par excitations acoustiques ou modification de l'obstacle central. Congrès Francophone de Technique Laser, CFTL2006, Sep 2006, Toulouse, France. pp.1-8. hal-00767833

HAL Id: hal-00767833

https://hal.science/hal-00767833

Submitted on 20 Dec 2012

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Etude aérodynamique et contrôle des instabilités de la zone initiale du jet annulaire de très grand rapport de diamètres par excitations acoustiques ou modification de l'obstacle central

A. DANLOS, G. LALIZEL, B. PATTE-ROULAND
CORIA UMR 6614, CNRS Université et INSA de Rouen
Avenue de l'Université, BP 1276801 Saint Etienne du Rouvray Cedex, France
e-mail : amelie.danlos@coria.fr , beatrice.patte@coria.fr

Le jet annulaire est un jet turbulent largement rencontré dans le domaine industriel (brûleur annulaire utilisé dans les procédés de fibrage, soupape d'admission d'un moteur…). Cet écoulement particulier présente de nombreux avantages : il permet d'améliorer la stabilité d'une flamme ou encore de réduire les émissions de polluants par recirculation des produits de combustion. Des études menées sur ces jets ont mis en évidence des instabilités au sein de l'écoulement, instabilités qui s'avèrent être un handicap dans les installations industrielles. Nous nous intéressons à la zone initiale, située à la sortie de la buse, des jets annulaires à grand rapport de diamètres. Dans cette partie de l'écoulement, une zone de recirculation se forme en aval de l'obstacle interne et soumet le jet à un phénomène d'oscillations périodiques autour de l'axe du jet.

L'étude que nous présentons comporte deux parties. La première concerne l'étude de l'influence de la géométrie de l'obstacle interne de la buse (formes conique, sphérique et disque) sur la morphologie du jet. L'autre partie porte sur l'influence des ondes acoustiques sur les instabilités d'un jet annulaire. Cet article présente les résultats obtenus pour ces deux contrôles par Vélocimétrie par Images de Particules (P.I.V.).

1 Introduction

1.1 Caractérisation des jets annulaires

Le jet annulaire est un jet axisymétrique turbulent formé d'une buse de diamètre extérieur D_o et d'un obstacle central de section transversale circulaire, de diamètre intérieur D_i. L'obstacle est appelé « bluff-body » et peut avoir différentes formes : un disque (dans ce cas le jet est appelé jet annulaire basique), un cylindre, un cône ou encore un sphéroïde. Le jet en sortie de buse est de la forme d'un anneau d'épaisseur e. Le paramètre important caractérisant les jets annulaires est le rapport de diamètres r défini selon la relation : $r = D_i / D_o$. La plupart des jets annulaires utilisés pour les applications industrielles présentent un grand rapport de diamètre ($0{,}8 \le r < 1$). Paradoxalement, ce sont ces jets qui sont les moins étudiés. L'étude des jets annulaires basiques débute en 1964 quand Chigier et Beer [1] considèrent un cas particulier d'un injecteur coaxial, où le jet interne est de vitesse nulle. Ko et Chan [2,3] en 1978, font une description détaillée de l'écoulement issu d'un jet annulaire de petit rapport de diamètres ($r = 0{,}45$). Cet écoulement est décomposé en trois zones (zone initiale, zone intermédiaire et zone de jet pleinement développé). Dans la zone initiale, il existe une zone de mélange interne engendrée par l'interaction entre le jet et l'air au repos situé en aval de l'obstacle. Derrière l'obstacle, une zone de recirculation se forme. Cette zone est délimitée en aval par le point de stagnation, situé sur l'axe du jet. Pour les jets annulaires de petit rapport de diamètres, la zone initiale s'étend de la sortie de la buse à la fin du cœur potentiel. En 2004, Lalizel [4] complète cette étude pour des jets annulaires basiques de grand rapport de diamètres ($r = 0{,}91$) et montre que le point de stagnation est soumis à un phénomène d'oscillations périodiques induites par la formation des tourbillons dans la zone de mélange externe, située sur les bords du jet. Le point de stagnation présente alors un mouvement de battement périodique autour de l'axe du jet.

Cette asymétrie de l'écoulement avait déjà été soulignée lors d'une étude numérique de Del Taglia [5] en 2002 dans laquelle une simulation tridimensionnelle d'un jet annulaire basique, de rapport de diamètres compris entre 0,55 et 0,99, avait été menée. Pour les jets de grand rapport de diamètres, la décomposition de l'écoulement est un peu différente de celle de Ko et Chan [2,3] :

la zone initiale est, cette fois-ci, limitée en aval par le point de stagnation et non plus par le cœur potentiel, comme on peut l'observer sur la figure 1.

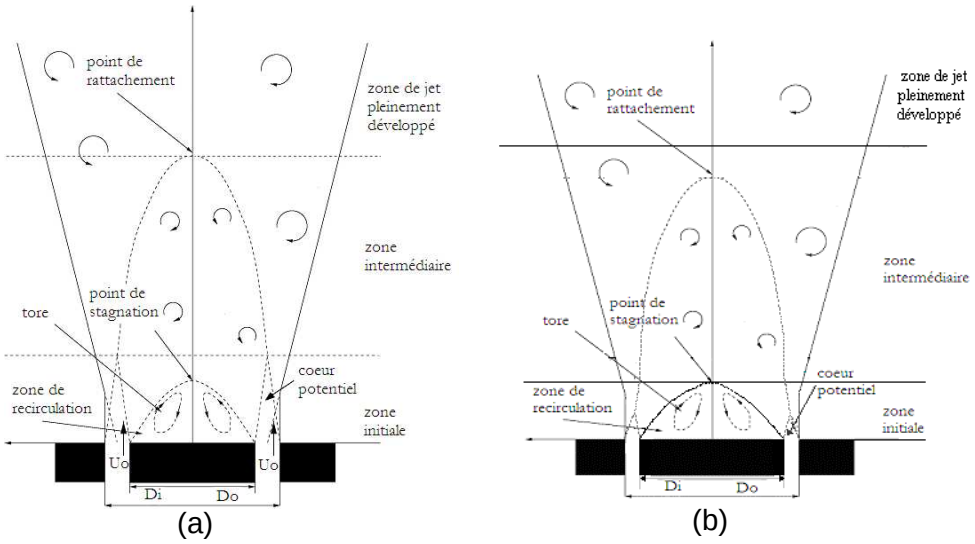


Figure 1 : Description de l'écoulement d'un jet annulaire basique pour (a) un petit rapport de diamètres ([2,3]) et pour (b) un grand rapport de diamètres.

1.2 Modification de l'obstacle central des jets annulaires

Il existe peu d'études sur l'influence de la géométrie de l'obstacle central d'un jet annulaire sur la morphologie de l'écoulement. La première étude est celle de Davies et Beer [6] en 1971 : en utilisant un cylindre et un cône à la place d'un disque, ils remarquent que la longueur de la zone de recirculation est modifiée. Cette longueur dépend à la fois du rapport de diamètres de la buse et de la valeur du demi-angle d'ouverture α de l'obstacle central (α=0° pour un cylindre et α=90° pour un disque). Ainsi, quand r augmente, la longueur de la zone de recirculation diminue. En revanche, elle augmente quand le demi-angle α augmente. En 1978 et 1979, Ko et Chan [2,3,7] étudient des jets annulaires présentant un disque, un cône et un ellipsoïde en leur centre. Ces obstacles sont choisis de longueur égale à la longueur de la zone de recirculation. Des mesures par fil chaud et des mesures de pression leur permettent de développer une nouvelle description des jets annulaires. Dans la zone initiale, ils remarquent la disparition de la zone de recirculation qui se trouve ainsi remplacée par une couche limite autour de chaque obstacle et une zone de sillage en aval de l'obstacle, dans la zone intermédiaire. Le point de rattachement semble être indépendant de la forme de l'obstacle. En revanche, la vitesse moyenne, dans leur cas, était légèrement plus élevée pour le jet utilisant un cône que pour le jet avec un ellipsoïde. L'intérêt de la modification de la géométrie de la buse, est de pouvoir obtenir un contrôle passif des instabilités du jet : en supprimant la zone de recirculation, il serait peut-être possible de supprimer le battement périodique du point de stagnation.

Une autre méthode de contrôle des jets souvent employée est le contrôle actif par excitations acoustiques.

1.3 Contrôle des jets turbulents

La majorité des travaux sur le contrôle actif par excitations concernent les jets ronds. En 1971, Crow et Champagne [8] introduisent la notion de mode préférentiel. Il s'agit d'un mode pour lequel la fréquence fondamentale de formation des tourbillons initiaux présente une amplification maximale. Leur étude montre qu'il est possible d'obtenir une augmentation de la turbulence lorsqu'une fréquence d'excitation proche de la fréquence de mode préférentiel est appliquée au jet. Cette fréquence correspond à un nombre de Strouhal St_D égale à 0,3 ($St_D = fD/U_0$ avec f la fréquence d'excitation, D le diamètre de la buse, U_0 la vitesse à la sortie de la buse).

En 1974, Vlasov et Ginevskiy [9] obtiennent une diminution de la turbulence lorsque le jet est soumis à une excitation acoustique de fréquence correspondante à un nombre de Strouhal St_D égale à 2,75.

La plupart des travaux concernant le contrôle actif des jets annulaires sont réalisés avec des mesures par anémométrie par fil chaud ou par des visualisations. Nakazano et al.[10] , en 1991 travaillent sur des jets annulaires basiques de rapport de diamètres compris entre 0,2 et 0,8. Ils découvrent que pour une fréquence d'excitation égale à la fréquence de formation des tourbillons de sillage, la zone de recirculation peut être influencée et la longueur de celle-ci peut même diminuer. Travnicek et Tesar [11] étudient en 2004 un jet annulaire de rapport de diamètres 0,95 et remarquent qu'ils peuvent influencer également la zone initiale en utilisant des excitations acoustiques de fréquences correspondant à des fréquences de formation des tourbillons mais aussi à des fréquences harmoniques : l'excitation harmonique et double harmonique provoquent l'augmentation ou la suppression de l'apparition des tourbillons. Les nombres de Strouhal St_{Do} pour cette étude sont compris entre 0,38 et 2,47.

Les études sur le contrôle passif et sur le contrôle actif des jets annulaires à grand rapport de diamètres sont rares. Leurs importances dans les utilisations industrielles font pourtant de ces jets un sujet de prédilection dans le domaine du contrôle. Notre étude porte donc sur une méthode de contrôle passif, qui consiste à modifier la géométrie de l'obstacle central, et une méthode de contrôle actif, qui utilise des excitations acoustiques pour influencer les oscillations transversales du point de stagnation. Ces deux méthodes ont été mises en place et étudiées par des mesures par Vélocimétrie par Images de Particules (P.I.V.).

2 Dispositif expérimental

2.1 Dispositif de mesure

Le dispositif de visualisation et de mesure est schématisé sur la figure 2. Toutes les mesures sont réalisées par P.I.V. La zone du jet étudiée est la zone initiale. Celle-ci s'étend jusqu'à une distance de 0,5Do de la buse pour un jet de grand rapport de diamètres (position du point de stagnation). Le jet est ensemencé par des particules d'huile d'olive de diamètre environ égale à 1 µm. Ces particules sont suffisamment petites pour suivre parfaitement toutes les accélérations de l'écoulement mais aussi pour suivre les vibrations engendrées par des ondes acoustiques dans le domaine de fréquences que nous utilisons pour étudier le contrôle actif.

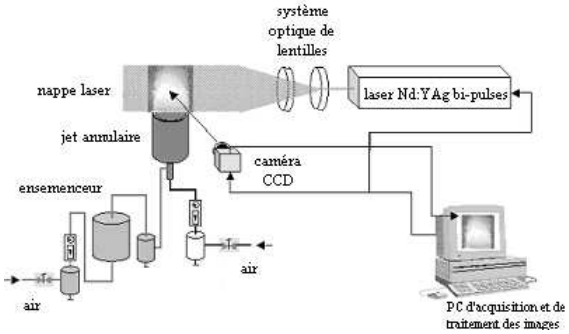


Figure 2 : Schéma du montage expérimental de mesure par P.I.V.

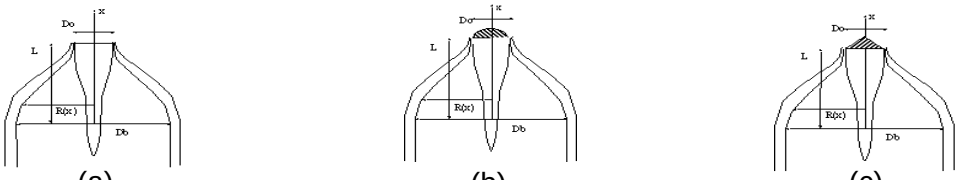
Un laser Nd-YAG à 532 nm est utilisé pour éclairer les particules du jet sur un plan longitudinal passant par le centre de la buse. La nappe laser est créée par une lentille cylindrique divergente qui étale le faisceau et une lentille sphérique dont le rôle est de réduire l'épaisseur de la nappe. Le laser génère deux impulsions de 5 ns et de 75 mJ. Ces deux impulsions sont séparées par 10 µs et délivrées avec une cadence de 8 Hz. Le signal de diffusion de Mie émis par les particules est recueilli par une caméra CCD 12 bits LaVision FlowMaster 3S, de résolution (1280x1024) pixels^2. La taille physique des pixels est de (6,7x6,7) µm^2. Les mailles de calculs utilisées sont de (32x32) pixels^2 avec un taux de recouvrement de 50%.

2.2 Manipulations pour l'étude de l'influence de la géométrie de l'obstacle central

La buse utilisée a été mise au point au laboratoire Coria par B. Patte-Rouland, G. Godard et A. Leblond. Elle présente un rapport de diamètres égal à 0,91. Les diamètres extérieurs et intérieurs sont, respectivement, de 53,88 mm et 48,75 mm. Le rapport de contraction de section de

la buse est de 102. Un lit fluidisé (composé de billes de verre de 2 mm de diamètre), des couches de filtres en soie et un nid d'abeille permettent de réduire les fluctuations de débit d'air à l'intérieur de la buse, de façon à ce que le profil des vitesses soit plat en sortie de buse.

Cette buse est ensuite utilisée pour plusieurs géométries d'obstacles différentes : un disque, un cône et un sphéroïde. Ces deux derniers obstacles ont une longueur égale à la longueur de la zone de recirculation, soit 0,5Do. Les profils utilisés sont schématisés sur la figure 3. Pour chacune des formes, les mesures sont effectuées pour trois valeurs de la vitesse U_0: 8 $m.s^{-1}$, 15 $m.s^{-1}$ et 30$m.s^{-1}$ (ce qui correspond aux nombres de Reynolds Re_{Do}, calculés en utilisant le diamètre extérieur Do : 28736, 53880 et 107760). Pour chaque vitesse, 1000 paires d'images du jet sont enregistrées. Les résultats présentés dans cet article sont ceux obtenus pour U_0=30$m.s^{-1}$.



(a) (b) (c)

Figure 3 : Profils internes des obstacles utilisés pour (a) le jet annulaire basique, (b) le jet annulaire sphéroïdal, (c) le jet annulaire conique.

2.3 Manipulations pour l'étude du contrôle actif par excitations acoustiques

Pour l'étude du contrôle actif, les mesures sont effectuées sur le jet annulaire basique précédemment présenté. Pour Re_{Do}= 107760 (soit U_0=30 $m.s^{-1}$), la fréquence associée au battement périodique du point de stagnation est de 150 Hz, ce qui correspond à un nombre de Strouhal St_{Do}, calculé en utilisant le diamètre extérieur égale à 0,27. Le jet annulaire basique soumis à des ondes acoustiques n'est étudié que pour un cas de vitesse : U_0=30 $m.s^{-1}$. Les fréquences d'excitation appliquées au jet sont 148 Hz (St_{Do}=0,27) et 298 Hz (St_{Do}=0,5).

Le haut-parleur utilisé pour ce montage est un boomer-médium de 130 mm (AUDAX HM130CO). La gamme de fréquences envisageables avec ce dispositif s'étend de 100 Hz à 10 kHz. Sa sensibilité est de 90 dB. Le haut-parleur est placé à l'extérieur de la buse, à 30 cm de celle-ci.

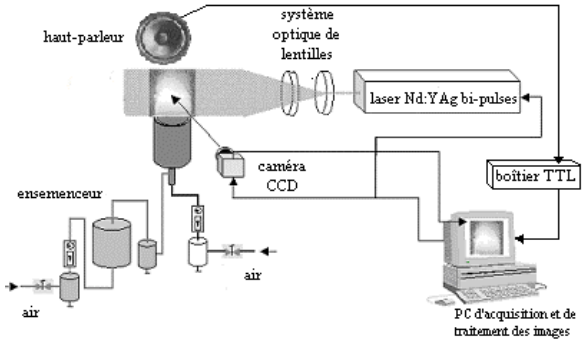


Figure 4 : Schéma du dispositif expérimental utilisé pour l'étude du contrôle actif.

Pour cette partie de l'étude, le dispositif de mesure est légèrement modifié. Classiquement, la fréquence d'acquisition des images est imposée par la fréquence de la caméra. On enregistre donc deux images séparées d'un intervalle de 10µs et chaque paire d'images est enregistrée à la fréquence de la caméra, c'est à dire 8 Hz. Nous n'avons donc pas accès à toutes les actions de l'onde acoustique sur le jet avec ce déclenchement. Comme les résultats sont analysés de façon statistique, avec des champs moyennés, même si le phénomène a été visualisé ponctuellement, les résultats ne permettent pas de l'observer. Pour l'étude du contrôle actif, nous avons réalisé des mesures en phase avec l'onde et donc utilisé un boîtier TTL pour contrôler le déclenchement de la caméra en fonction de l'onde acoustique. Lorsque l'onde acoustique passe un seuil d'amplitude fixé par les caractéristiques du boîtier (13 mV), le boîtier déclenche la caméra et le laser. Un retard peut-être ajouté entre la réception du signal issu du boîtier TTL et le déclenchement de l'acquisition. Nous avons balayé 16 phases de l'onde et pour chaque phase (phases de 0 à 15), 100 images ont été acquises.

3 Résultats expérimentaux

3.1 Influence de la géométrie de l'obstacle central

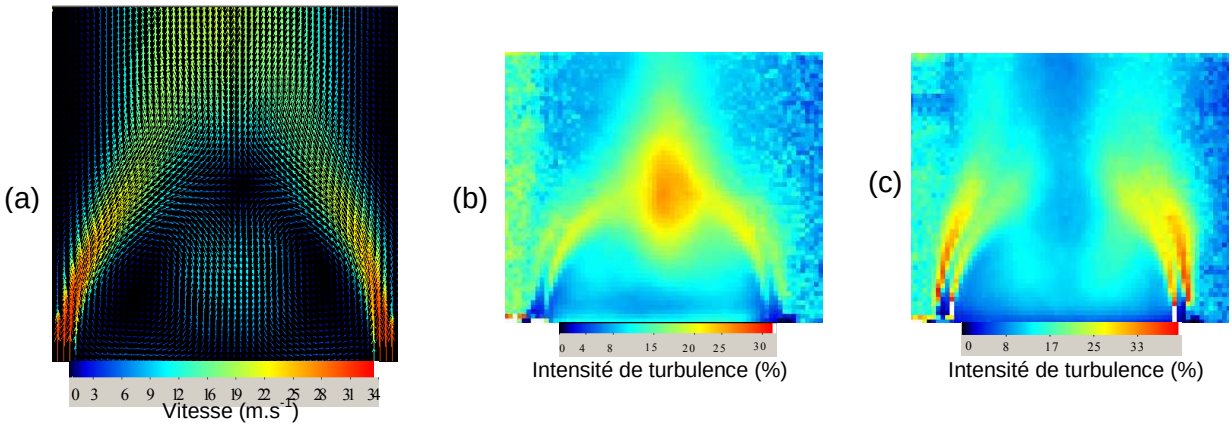


Figure 5 : Jet annulaire basique: (a) champ de vitesses moyennes, (b) champ des écarts types des vitesses transversales, (c) champ des écarts types des vitesses longitudinales.

Dans le cas du jet annulaire basique, le champ de vitesses moyennes, présenté sur la figure 5, nous permet de voir la zone de recirculation située en aval du disque central. A la fin de cette zone, on observe l'emplacement du point de stagnation. Les écarts types des vitesses transversales (figure 5(b)) montrent que les fluctuations transversales sont maximales au niveau du point de stagnation (écart de l'ordre de 30% par rapport à la vitesse U_0). En revanche, les fluctuations des vitesses longitudinales sont importantes sur les bords du jet, dans les zones de mélange externe et interne où il se produit un cisaillement entre le jet et l'air au repos. On note également la présence du cœur potentiel.

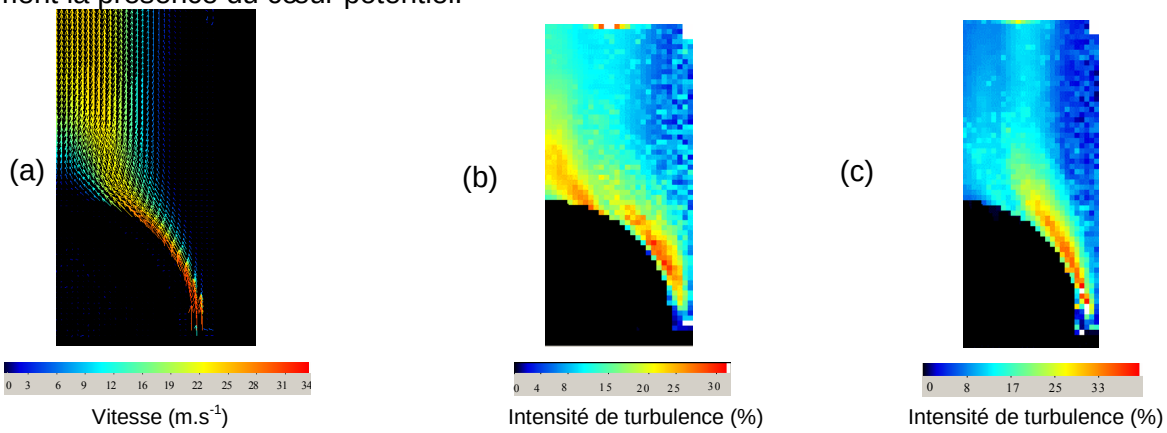


Figure 6: Jet annulaire sphéroïdal: (a) champ de vitesses moyennes, (b) champ des écarts types des vitesses transversales, (c) champ des écarts types des vitesses longitudinales.

La figure 6 présente les résultats obtenus pour le jet annulaire sphéroïdal. En observant le champ de vitesses moyennes, on note une disparition complète de la zone de recirculation dans la zone initiale. Les fluctuations transversales ne se trouvent plus au niveau du point de stagnation mais plutôt au niveau du point de décollement. On observe également une nouvelle zone de fluctuations transversales apparaître sur les bords du jet. Ces fluctuations sont engendrées par la formation des tourbillons de Kelvin-Helmholtz, dans la zone de mélange externe. Les écarts types des vitesses longitudinales montrent qu'il n'y a plus, dans le cas d'un obstacle sphéroïdal, qu'une seule zone de cisaillement. Ce résultat est une conséquence directe de la disparition de la zone de recirculation. L'air au repos situé en aval du disque pour le jet annulaire basique est, pour le jet annulaire sphéroïdal, remplacé par l'obstacle. Il ne peut donc plus y avoir d'air entraîné par le jet, donc aucune zone de recirculation ne se forme.

Les résultats sont un peu différents lorsque l'obstacle utilisé est un cône, comme le montre la figure 7. Le champ de vitesses moyennes montre une zone très réduite de recirculation à la sortie de la buse. Les écarts types des vitesses transversales montrent qu'il n'y a plus de fluctuations transversales au niveau du point de stagnation. Cette configuration semble donc

permettre un contrôle passif de cette région du jet. En revanche, ce jet annulaire induit également des fluctuations transversales sur les bords du jet. L'obstacle ne permet pas à la zone de recirculation de se déformer vers l'intérieur du jet, cette déformation se produit donc sur l'extérieur et les fluctuations transversales du point de stagnation se transfèrent sur les bords du jet. Les écarts types des vitesses longitudinales montrent la présence des deux zones de cisaillement, comme dans le cas du jet annulaire basique.

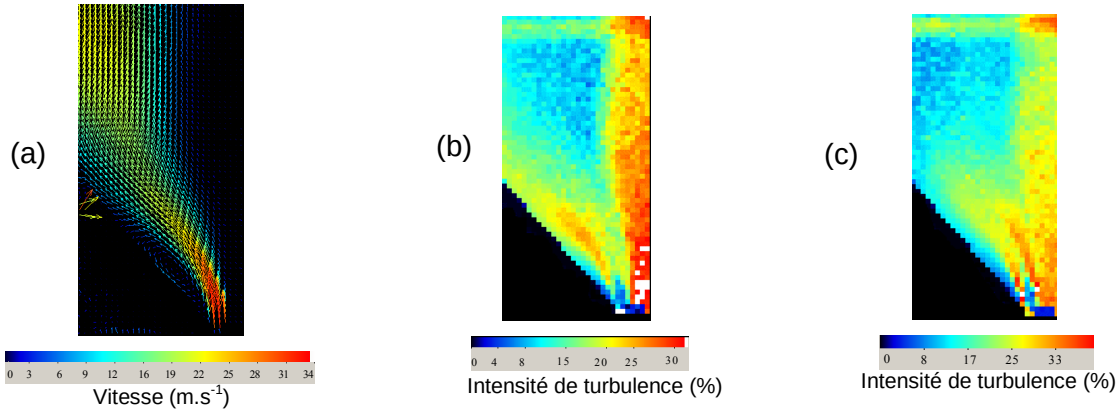


Figure 7: Jet annulaire conique: (a) champ de vitesses moyen, (b) champ des écarts types des vitesses transversales, (c) champ des écarts types des vitesses longitudinales.

Des profils de vitesses longitudinales adimensionnées, ont été tracés pour différentes positions dans l'écoulement (figure 8). Le graphique tracé en y=Do/4 (milieu de la zone de recirculation) souligne les remarques précédentes : on peut remarquer la présence d'une zone de recirculation (où les vitesses sont négatives) dans le cas des jets annulaires basique et conique. Pour le jet annulaire sphéroïdal, le maximum de vitesse est plus élevé que pour les deux autres configurations. En effet, l'obstacle sphéroïdal occupe plus d'espace que le cône à la position où nous nous plaçons. En réduisant l'espace libre pour le développement du jet, celui-ci aurait tendance à être accéléré.

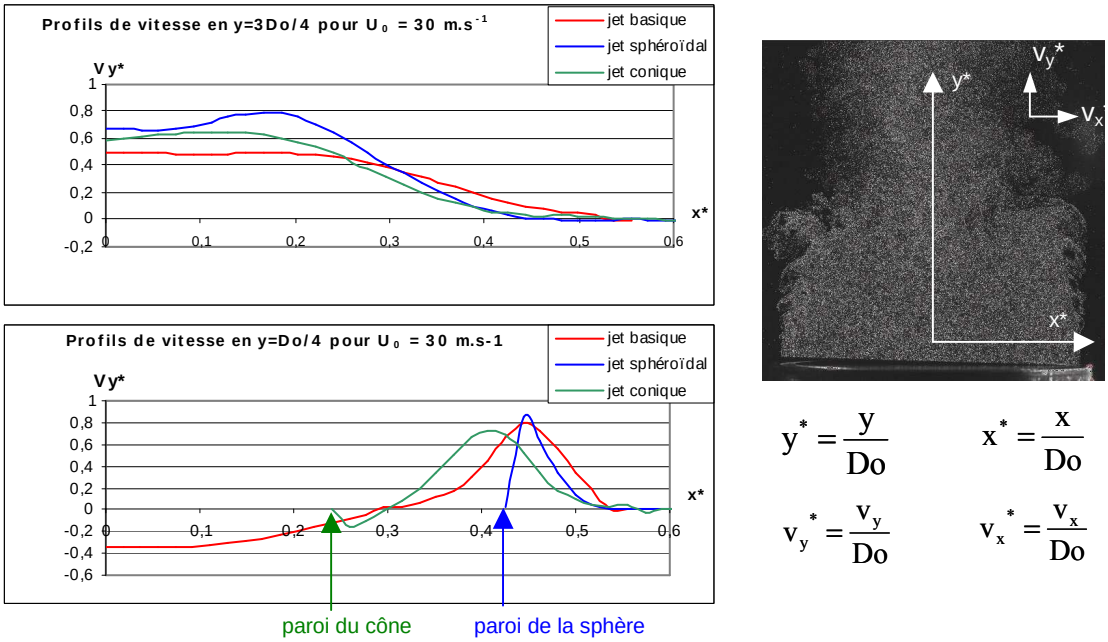


Figure 8: Profils de vitesse longitudinale en y=Do/4 (milieu de la zone de recirculation) et en y=3Do/4 (en aval du point de stagnation)

En y=3Do/4 (dans la zone intermédiaire, en aval du point de stagnation), cette même valeur plus élevée pour la sphéroïde se retrouve encore. On peut également noter que la vitesse maximale forme un palier à partir du centre de la buse jusqu'à x*=0, 25 environ pour le jet basique et x*=0,2 pour le jet conique. Ce rétrécissement de la zone des vitesses maximales montre que le changement de géométrie de l'obstacle central agit sur la largeur du jet. Avec le cône, celui-ci a

donc tendance à se resserrer vers l'axe central du jet. Ce même phénomène se produit également pour le jet sphéroïdal. Le jet sphéroïdal semble engendrer une recombinaison du jet plus tardive dans l'écoulement. Le point de rattachement, fixant la limite entre la zone intermédiaire et la zone de jet pleinement développé doit ainsi se situer plus loin en aval que pour le jet basique ou le jet conique. Le changement de géométrie de l'obstacle central influe donc sur toutes les zones du jet, et sur l'ensemble des caractéristiques de l'écoulement.

3.2 Contrôle actif par excitations acoustiques

Pour certaines applications industrielles, une modification de la géométrie de la buse est difficilement envisageable. La deuxième partie de cette étude a donc pour ambition d'établir une autre méthode de contrôle des instabilités d'un jet annulaire, en appliquant des ondes acoustiques créées par un haut-parleur placé à l'extérieur de la buse. Une première campagne de mesures par anémométrie par fil chaud a permis de réaliser une étude préliminaire de ce contrôle. Les paramètres du dispositif expérimental étaient les mêmes que ceux présentés précédemment (fréquence d'excitation de 150Hz, amplitude de l'onde de 1,89 V ou 7,29V). On a ainsi obtenu une suppression du pic de fréquence de 150 Hz, présent dans le jet non excité, au point de stagnation, en appliquant une fréquence d'excitation égale à cette fréquence inhérente au jet, comme le montre le graphique de la figure 9. Nous avons voulu approfondir ces résultats prometteurs pour un contrôle actif des instabilités.

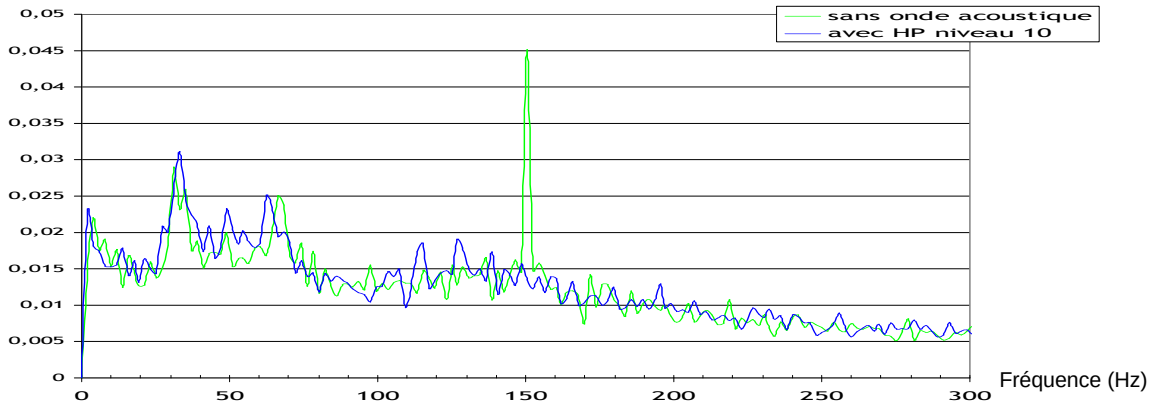


Figure 9: Spectre de fréquences obtenu par anémométrie par fil chaud, au point de stagnation, pour un jet soumis à une onde acoustique de 150 Hz, 7,29 V.

Les champs d'écarts types des vitesses transversales calculés pour les différentes phases à amplitude et fréquence fixées, ont montré des différences importantes : les fluctuations transversales du point de stagnation sont plus ou moins fortes suivant la phase étudiée.

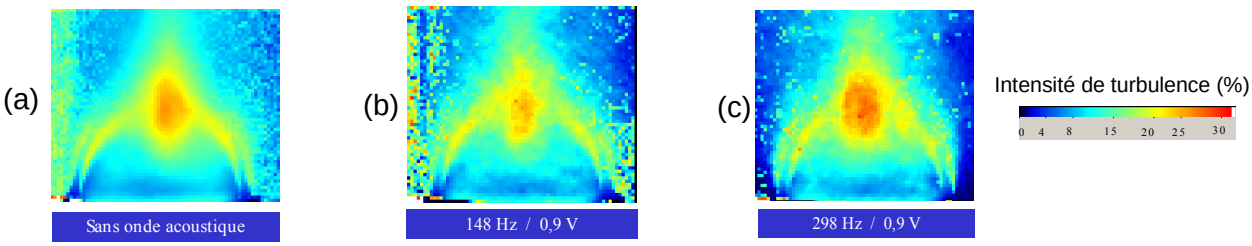


Figure 10: Champs des écarts types des vitesses transversales pour (a) le jet non excité, (b) et (c) le jet soumis à des excitations acoustiques et calculés pour la même phase (phase 3).

La comparaison des écarts types de vitesses transversales, pour une position donnée du haut-parleur, en faisant varier la fréquence d'excitation nous permet de voir que les fluctuations transversales du point de stagnation sont considérablement réduites lorsque la fréquence de l'onde acoustique est de 148 Hz et sont, en revanche, plus grandes pour une fréquence de 298 Hz. Un exemple de ces comparaisons est illustré sur la figure 10. Une excitation de fréquence égale à la fréquence de battement du jet, semble permettre d'établir une diminution de ces oscillations transversales du point de stagnation.

4 Conclusions et perspectives

Cette étude est orientée autour de deux axes principaux dont l'ambition commune est d'établir un moyen de contrôle, efficace et facile à mettre en place sur des dispositifs industriels, des instabilités des jets annulaires. Ceci nous a permis d'envisager des pistes privilégiées pour aboutir à cet objectif important. La modification de la géométrie de l'obstacle central a mis en évidence une possibilité de contrôle passif des fluctuations transversales du point de stagnation en utilisant par exemple un jet annulaire conique. Mais cette réduction du battement du jet est accompagnée par la naissance de nouvelles zones de fluctuations situées sur les bords du jet. Un prolongement de cette étude serait de modifier l'angle d'ouverture du jet annulaire conique dans le cas d'un grand rapport de diamètres pour obtenir une disparition de la zone de recirculation, comme dans les travaux de Ko et Chan [7]. Cette modification de géométrie de la buse implique non seulement des changements pour les instabilités du jet mais également pour la morphologie du jet. L'étude du contrôle actif par excitations acoustiques est délicate lorsqu'on utilise des mesures par P.I.V. : il faut, dans ce cas, trouver une relation entre la fréquence de battement du jet, la fréquence de l'onde acoustique et la fréquence d'acquisition des images afin de connaître la véritable influence de l'excitation sur l'écoulement. En phasant le système d'illumination et d'acquisition des images avec l'onde acoustique, on peut observer la réponse d'un jet annulaire basique soumis à des excitations de fréquence égale à la fréquence naturelle de battement du point de stagnation. Ces oscillations transversales sont réduites pour cette fréquence particulière d'excitation. La complexité de l'écoulement des configurations de jets annulaires étudiées ici et la difficulté à mettre en place certaines mesures par P.I.V., notamment pour un contrôle actif, rendent ces études difficiles et longues. Beaucoup de phénomènes restent à appréhender avant de pouvoir maîtriser une méthode de contrôle efficace qui puisse s'appliquer à la plupart des applications industrielles. Une campagne de mesures couplant les techniques de P.I.V. et de fil chaud est envisagée en balayant une large gamme de fréquences.

5 Références

[1] Chigier N.A ., Beer J.M.,"The flow region near the nozzle in double concentric jets", Journal of Basic Engineering, Décembre, pp. 797-804 (1964).

[2] Ko N.W.K., Chan W.T., "The inner regions of annular jets ", Journal of Fluid Mechanics, vol 93, partie 3, pp. 549-594 (1979).

[3] Ko N.W.K., Chan W.T., "Coherent structures in the outer region of annular jets", Journal of Fluid Mechanics, vol 89, partie 3, pp. 515-533 (1978).

[4] Lalizel G., "Caractérisation expérimentale de l'aérodynamique d'un jet annulaire à très grand rapport de diamètres », Thèse de Doctorat de l'Université de Rouen (2004).

[5] Del Taglia C., "Numerical investigation of the non-reacting unsteady flow behind a disk stabilized burner with large blockage", Thèse de Doctorat de l'Université de Rome "La Spienza" (2002).

[6] Davies T.W., Beer J.M., "Flow in the wake of bluff-body flame stabilizers", Thirteenth symposium on combustion, The Combustion Institute, pp. 631-638 (1971).

[7] K N.W.K. Ko, Chan W.T., "Similarity in the initial region of annular jets: three configurations", Journal of Fluid Mechanics, vol 84, partie 4, pp. 641-656 (1978)

[8] Crow S.C., Champagne F.H., « Orderly structure in jet turbulence », Journal of Fluid Mechanics, vol 48, partie 3, pp. 547-591 (1971).

[9] Vlasov E.V., Ginevskiy A.S., « Generation and suppression turbulence in an axisymmetric turbulent jet in the presence of an acoustic influence", NASA TT-F-15, 721 (1974).

[10] Nakazano Y., Kiyomoto K., Uryu Y., Ohmori J., "Structures of an acoustically excited annular jet", Theoretical and applied mechanics, pp. 191-195 (1991).

[11] Travnicek Z., Tesar V, "Annular impinging jet with recirculation zone expanded by acoustic excitation", International Journal of Heat and Mass Transfer, vol 47, pp.2329-2341 (2004).