



CARACTERISATION AERAUQUE DE JETS D'HELIUM ET DE SOUFLAGES D'AIR DANS UNE ENCEINTE VENTILEE PAR TECHNIQUE PIV

Corinne Prévost*, Nadia Liatimi, Emmanuel Porcheron

Institut de Radioprotection et de Sûreté Nucléaire (IRSN), BP 68, 91192 Gif-sur-Yvette, France

*Correspondant: corinne.prevost@irsn.fr

Résumé : Pour évaluer la pertinence de l'hypothèse de dilution homogène instantanée de l'hydrogène, retenue par certains exploitants du nucléaire, l'IRSN a mené une étude numérique à l'aide de codes de calcul CFD pour différentes configurations de rejet ou de ventilation dans des locaux représentatifs de ceux identifiés sur des installations nucléaires. Cette analyse critique de l'hypothèse de dilution homogène instantanée a permis d'identifier certains cas dans lesquels elle ne peut être retenue, sous peine de sous-estimer le risque de formation d'un volume significatif de gaz explosif à proximité de la brèche, dans le local concerné. Ainsi, afin de conforter les résultats obtenus numériquement, des campagnes expérimentales de caractérisation aéraulique des écoulements d'air, associées à des visualisations qualitatives de jets d'hélium simulant l'hydrogène, ont été réalisées dans une enceinte ventilée dédiée, CARDAMOME, située sur le site de l'IRSN à Saclay. Ces campagnes expérimentales s'articulent notamment autour de la caractérisation des écoulements d'air au sein du local, en particulier au niveau des bouches de soufflage de l'enceinte, pour les différentes configurations de ventilation testées. La technique de Visualisation des écoulements par Imagerie de Particules (PIV) est mise en œuvre sur de larges champs d'investigation (environ 1 m x 1 m) sur l'axe du jet de soufflage, afin de reconstituer les profils de vitesse longitudinaux et transversaux à l'intérieur de l'enceinte, lesquels doivent être soumis ensuite à l'exercice de comparaison avec les résultats numériques issus des différents codes CFD testés. L'analyse, initialement qualitative des jets d'hélium ensemencés par des particules d'alumine, apporte des éléments supplémentaires de compréhension de leur comportement au sein de l'enceinte ventilée. Finalement, une synthèse de l'ensemble des résultats acquis lors de cette campagne expérimentale sur l'installation CARDAMOME est présentée au sein de cette communication.

1 Introduction

L'utilisation de l'hydrogène, notamment dans la réfrigération des turbo-alternateurs au sein d'installations nucléaires, requiert des dispositions particulières de sécurité afin de limiter les risques ou les conséquences d'un rejet incontrôlé de ce gaz, comme par exemple dans le cas d'une fuite produite au niveau d'une brèche sur un conduit ou sur une capacité d'hydrogène au sein d'un local ventilé. Ainsi, une des solutions pour ne pas atteindre les conditions d'explosivité du gaz consisterait à assurer une dilution homogène et instantanée de la fuite d'hydrogène dans le local. Pour évaluer la pertinence de l'hypothèse de dilution homogène instantanée de l'hydrogène, retenue par certains exploitants du nucléaire, l'IRSN a mené une étude numérique à l'aide de codes de calcul CFD pour différentes configurations de rejet à forte vitesse ou de ventilation dans des locaux représentatifs de ceux identifiés sur des installations nucléaires. Les résultats de cette étude ont montré qu'il existe des configurations où l'hypothèse de dilution homogène ne peut pas être retenue et pour lesquelles il se produit une accumulation de gaz susceptible de

conduire à une explosion. Aussi, afin de confronter les résultats obtenus numériquement, des campagnes expérimentales ont été menées dans une enceinte ventilée baptisée CARDAMOME et spécifiquement dimensionnée pour l'étude. L'hélium, du fait de sa faible densité par rapport à l'air, proche de celle de l'hydrogène, a été choisi dans cette étude comme simulant de ce gaz susceptible de s'accumuler au sein de locaux présents dans certaines installations nucléaires.

Les principales configurations de ventilation des locaux et d'injection de l'hélium, retenues pour la simulation par les codes, sont issues de l'interprétation de plusieurs scénarios réalistes de fuite d'hydrogène sur des installations. La comparaison entre les résultats issus des codes et ceux issus des expériences repose essentiellement sur la confrontation des courbes d'évolution spatio-temporelles des concentrations en gaz traceur à l'intérieur de l'enceinte. L'interprétation des premiers résultats d'intercomparaison a montré que des expérimentations complémentaires s'avéraient nécessaires pour affiner davantage les données d'entrée des codes telles que, en particulier, la caractérisation des champs de vitesse moyens au

soufflage. De plus, l'acquisition expérimentale de données aérauliques permet d'asseoir l'exercice de comparaison code/expérience sur davantage d'éléments, articulés d'une part autour de la caractérisation des écoulements d'air au sein du local, notamment au niveau des bouches de soufflage de l'enceinte, d'autre part autour de la caractérisation des jets d'hélium à forte vitesse (proche de 100 m/s) dans les différentes configurations d'injection testées.

Finalement, une campagne expérimentale entièrement dédiée à la caractérisation des écoulements d'air au sein de l'installation CARDAMOME est décrite dans cette communication ; elle est menée sur la base de l'adaptation, sur cette enceinte ventilée, des techniques de traçage gazeux et particulaire ainsi que de la technique de visualisation laser que constitue la PIV (Particle Imaging Visualization), technique très largement employée pour la description des écoulements d'air sur des champs d'échelle variable [1], [2] et [3].

2 Description du dispositif expérimental

2.1 L'enceinte ventilée CARDAMOME

L'enceinte CARDAMOME, présentée sur la Figure 1, est une enceinte ventilée expérimentale aux dimensions égales à 5 m x 6 m x 3,5 m, soit un volume égal à 105 m³. Elle est dédiée principalement aux essais menés dans le cadre des études de dispersion de gaz sous conditions d'injection et de ventilation contrôlées. Elle est constituée d'une armature métallique autour de laquelle sont agencés des panneaux de PMMA. Certains panneaux sont transparents afin de faciliter la mise en œuvre de techniques de vélocimétrie non intrusives (PIV, LDV) qui nécessitent un accès optique aux volumes ou plans sondés.

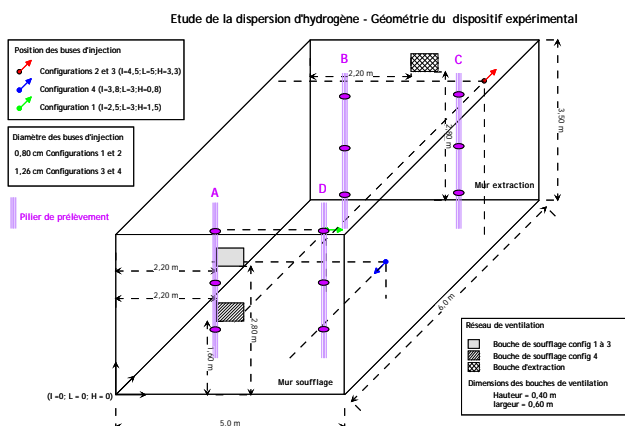


Figure 1 Schéma de la maquette ventilée CARDAMOME

La ventilation du local est assurée par l'une ou l'autre des deux bouches de soufflage et d'une bouche d'extraction, laquelle est reliée aux ventilateurs permettant d'assurer les débits d'extraction requis.

Les dimensions des bouches sont toutes identiques et égales à 0,4 m x 0,6 m. Elles sont placées sur l'axe de symétrie du local, dans le sens de la longueur, à des hauteurs variables dans le cas des bouches de soufflage.

Par ailleurs, les caractéristiques de la ventilation sont modulées en fonction de la position du soufflage (Soufflage Haut, SH ou Soufflage Bas, SB), l'extraction étant fixe, position haute (EH).

2.2 Caractérisation de la ventilation et technique de mesure associée

La caractérisation des débits d'extraction et des taux de renouvellement en air dans l'enceinte est assurée par la mise en œuvre du traçage gazeux à l'hexafluorure de soufre, technique basée sur l'injection et la détection de ce gaz dans des conditions contrôlées ; elle permet d'ajuster les débits d'extraction requis pour chaque configuration testée et d'en vérifier la stabilité lors des essais ainsi que d'accéder à la courbe caractéristique de la distribution de temps de séjour dans l'enceinte.

2.3 Caractérisation aéraulique du jet de soufflage

La caractérisation aéraulique du jet de soufflage à l'entrée du local a été entreprise pour chaque configuration, en mettant en œuvre la technique PIV ; celle-ci est basée sur l'emploi d'un laser Nd:YAG pulsé (Litron, 2x135 mJ), d'une caméra placée perpendiculairement à l'axe d'émission du faisceau laser et d'un fumigène d'ensemencement des écoulements d'air, de type gouttelettes d'huile. Une mesure instantanée des vecteurs de vitesse à deux composantes est restituée dans une section transversale d'un écoulement. Les données acquises peuvent être de nature simplement qualitatives (tomographie laser) ou bien quantitatives, par le biais de caméras numériques associées à des dispositifs informatiques de post-traitement des données (dispositif intégré DANTEC).

2.3.1 Mise en œuvre de la PIV sur CARDAMOME

Des plans verticaux et horizontaux ont été scrutés localement à l'aide du dispositif PIV au niveau des bouches de soufflage à l'intérieur de l'enceinte, passant notamment par les axes de symétrie verticaux et horizontaux des bouches ; ils ont permis d'accéder à des cartographies vectorielles moyennes de vitesse et des profils de vitesse radiaux et longitudinaux au-delà de la bouche de soufflage, sur l'axe du jet de soufflage. La Figure 2 permet d'illustrer l'instrumentation de CARDAMOME mise en œuvre pour la caractérisation aéraulique du jet d'air de soufflage provenant, dans la configuration testée sur cette figure, de la bouche de soufflage haute (SH) ; le même type de montage est adapté au cas du soufflage bas (SB).

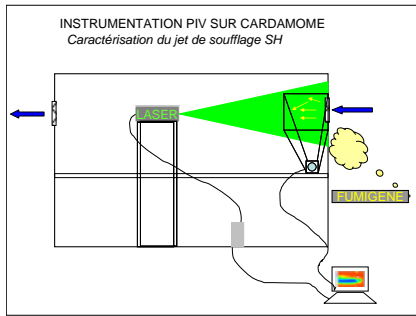


Figure 2 La technique PIV implantée sur CARDAMOME

Observons que, dans cette application, les dispositifs laser et caméra sont disposés sur des rails situés à l’intérieur même de l’enceinte, réorientés pour chaque nouvelle cartographie ; ils sont reliés au poste de traitement informatique disposé à l’extérieur de l’enceinte. Le générateur de fumigène est installé quant à lui, à proximité des bouches de soufflage, à l’extérieur de l’enceinte, de manière à ensemenner l’écoulement d’air à l’entrée, sans lui apporter toutefois une vitesse d’air additionnelle.

2.3.2 Description des plans de scrutation PIV

Au niveau de la bouche de soufflage, qu’elle soit en position haute (SH) ou basse (SB), trois plans verticaux et trois plans horizontaux ont été sondés (dont l’un passant chaque fois par le centre O de la bouche) ; ils sont illustrés sur les Figures 3 et 4.

Les Figures 3 et 4 permettent de préciser la position des plans sondés respectivement sur l’axe horizontal et sur l’axe vertical ainsi que leur repère par rapport à chacune des bouches de soufflage testées successivement. Notons que l’origine O de l’ensemble des cartographies vectorielles de vitesse est située au centre des bouches.

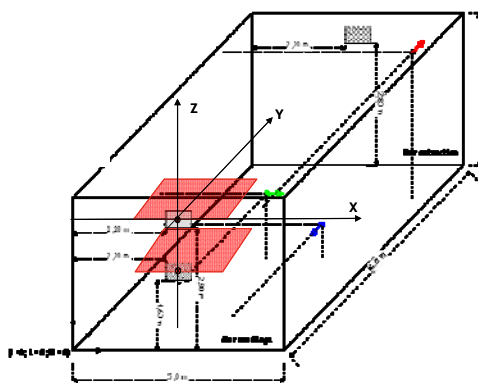


Figure 3 Plans horizontaux passant par les points centraux O des bouches, scrutés par la PIV

La Figure 4 permet de préciser la position des plans sondés verticalement et leur repère par rapport à chacune des bouches de soufflage testées successivement. L’origine O de l’ensemble des

cartographies vectorielles de vitesse est maintenue au centre des bouches.

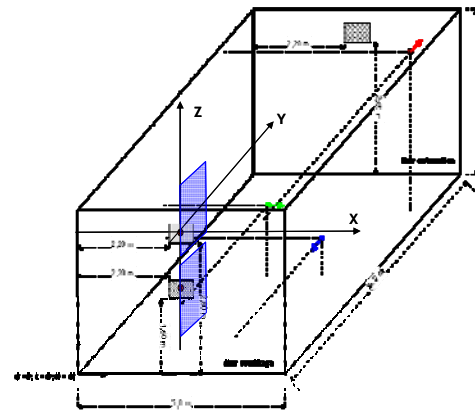


Figure 4 Plans verticaux scrutés par la PIV passant par les points centraux O des bouches

Les zones capturées par la caméra, compte tenu de ses caractéristiques, présentent des surfaces carrées définies par $\Delta X = \Delta Y = 1\text{ m}$ dans le cas des plans horizontaux, et $\Delta Z = \Delta Y = 1\text{ m}$ dans le cas des plans verticaux. Elles sont présentées sur les schémas de la Figure 5. Finalement, les cartographies obtenues expérimentalement présentent des surfaces proches de 1 m^2 .

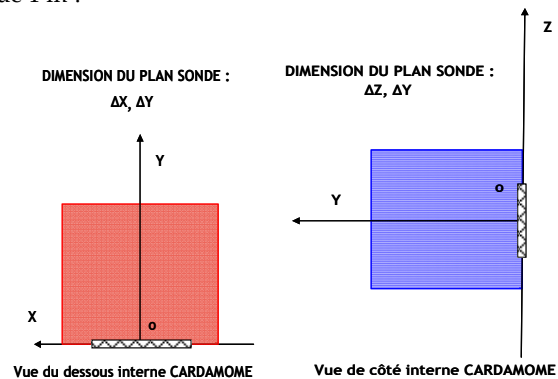


Figure 5 Zones scrutées par la PIV au niveau des bouches de soufflage

3 Grilles expérimentales

Trois types d’essais ont été menés :

- l’étude des champs de vitesse moyens d’air localisés autour de la bouche du soufflage à l’intérieur de l’enceinte,
- l’étude de l’évolution des champs de vitesse moyens sur l’axe longitudinal au centre de la bouche,
- la visualisation d’un jet d’hélium injecté au centre du local (correspondant à la configuration 4 dans le Tableau 1).

3.1 Description des cartographies PIV centrées sur les bouches de soufflage

L'ensemble des plans sondés (horizontaux et verticaux) pour chacune des configurations de ventilation testées est notamment caractérisé par la position de la bouche de soufflage (haute ou basse) et par le taux de renouvellement en air du local (R, exprimé en h⁻¹). L'une des caractéristiques principales des plans, outre leur désignation, est leur repérage par rapport à la bouche de soufflage (cf. Tableau 1), notamment par rapport au point désigné pour origine O, correspondant au centre de symétrie de la bouche.

Le Tableau 1 permet de décrire l'ensemble des plans testés.

Tableau 1 Plans de mesure au niveau des bouches

CONFIGURATION	Orientation du plan	Désignation du plan	Caractéristiques géométriques
Configuration 4 SB, R = 10 h ⁻¹	Verticale	Plan 1V (sur l'axe)	X = 0 mm
		Plan 1Vg	X = -160 mm
		Plan 1Vd	X = +160 mm
	Horizontale	Plan 2H (sur l'axe)	Z = 0 mm
		Plan 2Hb	Z = -110 mm
		Plan 2Hh	Z = +100 mm
Configurations 1&2 SH, R = 5 h ⁻¹	Verticale	Plan 3V (sur l'axe)	X = 0 mm
	Horizontale	Plan 3H	Z* = -20 mm
Configuration 3 SH, R = 10 h ⁻¹	Verticale	Plan 4V (sur l'axe)	X = 0 mm
	Horizontale	Plan 4H	Z* = -20 mm

La Figure 6 illustre la position des plans horizontaux et verticaux par rapport aux coordonnées décrites dans le Tableau 1.

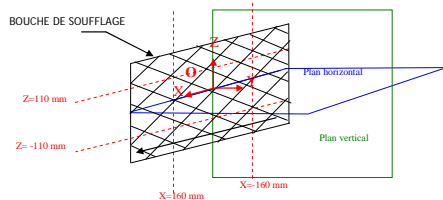


Figure 6 Repères et système de coordonnées de la bouche

3.2 Description des plans PIV réalisés sur l'axe longitudinal du jet de soufflage

La scrutation par la technique PIV des plans successifs le long de l'axe central de chacune des bouches, haute et basse, a permis d'étudier les écoulements d'air internes liés au jet de soufflage. Seuls les plans verticaux ont été scrutés lors de cette campagne d'essais. Notons que chacun des plans successifs obtenus possède une zone de recouvrement avec le plan précédent afin de conserver le même repère sur toutes les cartographies (cf. Figure 7).

Le Tableau 2 renseigne les caractéristiques géométriques des plans PIV obtenus pour chacune des quatre configurations de ventilation de l'enceinte.

Tableau 2 Plans de mesure sur l'axe longitudinal des bouches

CONFIGURATION	Orientation du plan	Désignation du plan	Caractéristiques géométriques X = 0 mm (plan centré sur l'axe)
Configurations 1&2 SH, R = 5 h ⁻¹	Verticale	Plan 3V	Y = 0 à Y = 1300 mm
		Plan 5Vbis	Y = 1100 à Y = 2500 mm
		Plan 7V	Y = 2240 à Y = 3600 mm
Configuration 3 SH, R = 10 h ⁻¹	Verticale	Plan 4V	Y = 0 à Y = 1300 mm
		Plan 6Vbis	Y = 1100 à Y = 2500 mm
		Plan 8V	Y = 2240 à Y = 3600 mm
Configuration 4 SB, R = 10 h ⁻¹	Verticale	Plan 9V	Y = 0 à Y = 1300 mm
		Plan 10V	Y = 1300 à Y = 2500 mm
		Plan 11V	Y = 2240 à Y = 3600 mm

Précisons que le plan 9V testé en configuration 4 est équivalent au plan 1V testé précédemment (Tableau 1) : il est reproduit lors de cet essai afin de définir l'origine O des plans de mesure successifs mesurés sur l'axe central longitudinal de la bouche.

Le montage expérimental mis en œuvre pour l'acquisition de ces plans est illustré sur l'exemple du schéma de la Figure 7 (plans des configurations 1&2).

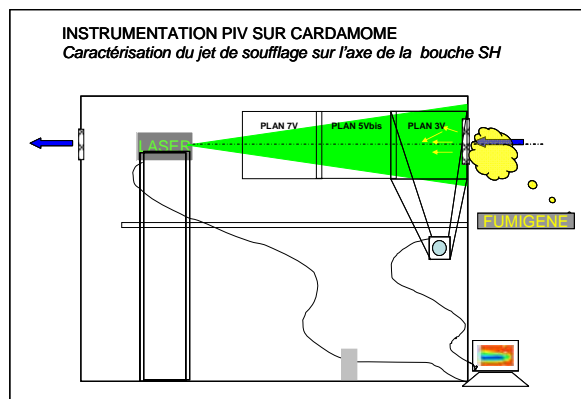


Figure 7 Caractérisation successive des plans 3V, 5Vbis et 7V

3.3 Description de l'essai de visualisation du jet d'hélium

L'objectif de cet essai réside dans la démonstration de la faisabilité du traçage d'un jet d'hélium par des particules d'alumine, en vue de caractériser sa trajectoire et son expansion. Ce jet d'hélium est émis au centre du local, en sortie d'une buse de diamètre égale à 12 mm, à une vitesse théorique de l'ordre de 100 m/s, en direction de la paroi de soufflage du local ; l'orientation du jet et son taux d'évasement constituent les premières données qualitatives attendues pour l'exercice d'intercomparaison.

Description de la technique de visualisation de l'hélium

Un ensemenceur spécialement dimensionné par l'ONERA pour le traçage d'un gaz par des particules d'alumine a été utilisé pendant nos essais de dispersion. De par leur excellente capacité à diffuser la lumière, les particules d'alumine injectées sous pression lors du passage du gaz dans le dispositif, permettent de suivre l'écoulement de l'hélium

lorsqu'il est injecté à forte vitesse dans l'installation CARDAMOME. Le diamètre aérodynamique des particules d'alumine dispersées reste inférieur à 1 μm , évitant ainsi toute inertie propre des particules dans l'écoulement du gaz.

4 Résultats

4.1 Etude quantitative des champs de vitesse sur l'axe du soufflage d'air

4.1.1 Cartographies centrées sur la bouche de soufflage

Les différents plans obtenus sont regroupés au sein de tableaux de synthèse tels que, par exemple, celui présenté sur la Figure 15 en fin d'article. Ils permettent de visualiser les cartographies des vecteurs de vitesse moyens (calculés sur la base de 300 images successives séparées de 100 ms), ainsi que les profils de vitesse moyenne longitudinaux et radiaux, extraits des cartographies de vecteurs, selon les exemples illustrés sur les Figures 8 et 9. Sur ces figures, sont indiquées les valeurs de Z (hauteur dans le plan) ou de X (largeur dans le plan) auxquelles sont scrutées les intensités de la vitesse V sur l'axe longitudinal (OY) de la bouche. Une image extraite parmi les 300 images acquises par la caméra est associée à la cartographie de chacune des Figures 8 et 9.

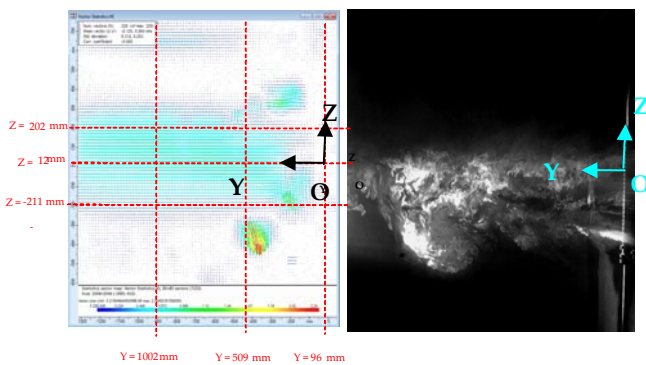


Figure 8 : illustration des cotes des profils de vitesse moyenne longitudinaux (sur l'axe OY) et radiaux (sur l'axe OZ) - Image du Plan Vg associé (SB, $R=10\text{ h}^{-1}$)

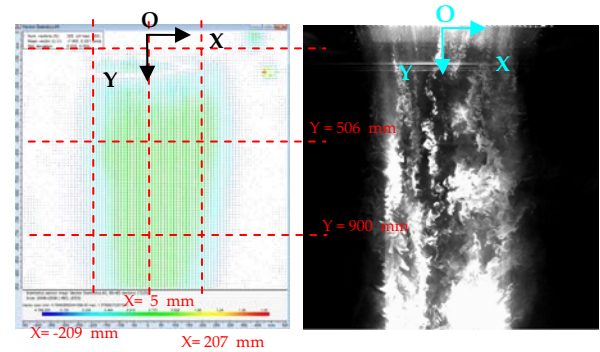


Figure 9 Illustration des cotes des profils de vitesse moyenne longitudinaux et radiaux - Image du plan 4H associée (SH, $R=10\text{ h}^{-1}$)

A l'instar de ces exemples, pour chacun des graphes relatifs à l'évolution des profils de vitesse, trois hauteurs distinctes sont scrutées sur la bouche de soufflage, dont l'une au plus près de l'axe de la bouche (proche de $Z = 0\text{ mm}$) et les deux autres réparties symétriquement par rapport à l'axe (OZ), soit $Z = \pm 200\text{ mm}$ environ.

4.1.2 Cartographies mesurées sur l'axe du jet de soufflage issu des bouches SB et SH

Dans ce cas, les profils radiaux de la composante de vitesse sont scrutés pour des profondeurs successives sur l'axe (OY) de la bouche, correspondant ainsi à différents plans obtenus en déplaçant la caméra parallèlement à l'axe du jet dans CARDAMOME. La longueur totale scrutée sur l'axe du jet par le biais des 3 plans successifs avoisine ainsi 3 m. Les différents plans obtenus sont regroupés au sein de tableaux de synthèse tels que, par exemple, celui présenté sur la Figure 16 en fin d'article.

A partir de ces profils de vitesse successifs sur l'axe longitudinal de la bouche de soufflage, il est intéressant de reconstituer les profils de la composante de vitesse V le long de l'axe longitudinal de la bouche de soufflage (sur 3 m à l'intérieur de CARDAMOME) dans les différentes configurations de ventilation fixées (Figures 10 à 12).

Nous faisons apparaître sur ces graphes des parties hachurées qui constituent des zones de forte incertitude de mesure dues par exemple à la présence de reflets ou d'ombre perturbant ainsi le post-traitement des données.

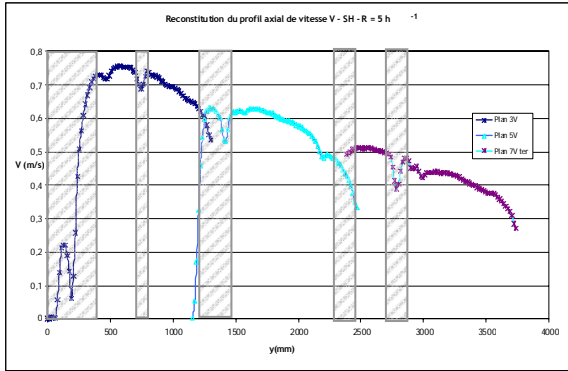


Figure 10 Reconstitution du profil de vitesse dans le cas des configurations 1&2- Soufflage Haut et $R = 5 \text{ h}^{-1}$

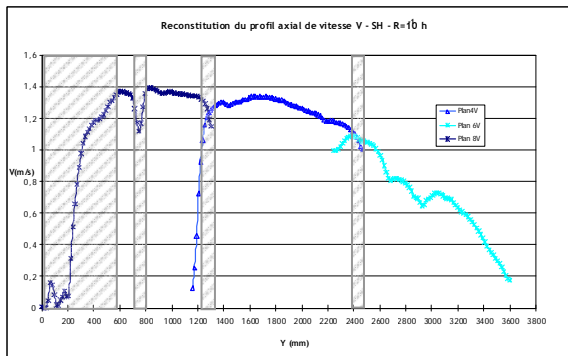


Figure 11 Reconstitution du profil de vitesse dans le cas de la configuration 3 - Soufflage Haut et $R = 10 \text{ h}^{-1}$

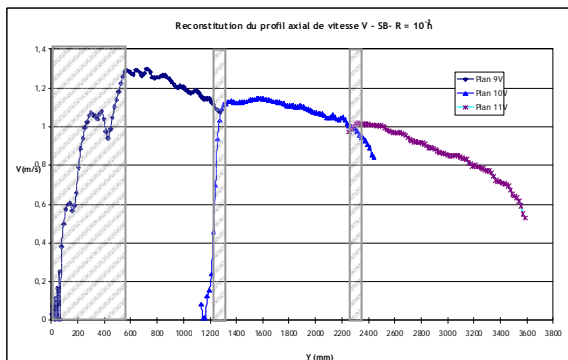


Figure 12 Reconstitution du profil de vitesse dans le cas de la configuration 4- Soufflage Bas et $R = 10 \text{ h}^{-1}$

4.2 Etude qualitative des écoulements d'hélium dans l'enceinte

La Figure 13 permet de rendre compte du montage expérimental nécessaire pour suivre l'écoulement d'hélium lors de son injection à partir de la buse : le débit d'hélium requis est contrôlé et injecté depuis une bouteille de gaz pur dans le dispositif de dispersion des particules d'alumine. Le gaz issu de la buse placée en sortie du disperseur devient alors « visualisable » par les dispositifs d'imagerie laser.

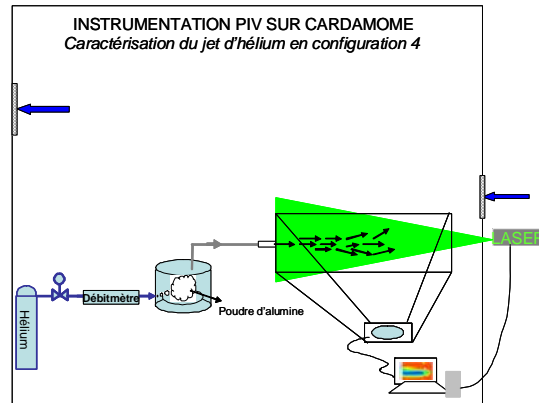


Figure 13 Schéma de principe de l'ensemencement du jet d'hélium en sortie de buse (configuration 4)

La Figure 14 illustre, par le biais des images capturées par la caméra, le jet d'hélium juste en sortie de buse. Les surfaces des plans sondés atteignent $1,2 \times 1,2 \text{ m}^2$.

Les images (photos et vidéos) capturées par la caméra du dispositif PIV permettent de qualifier l'orientation et l'expansion du jet d'hélium en sortie de buse, voire même de quantifier les vitesses.

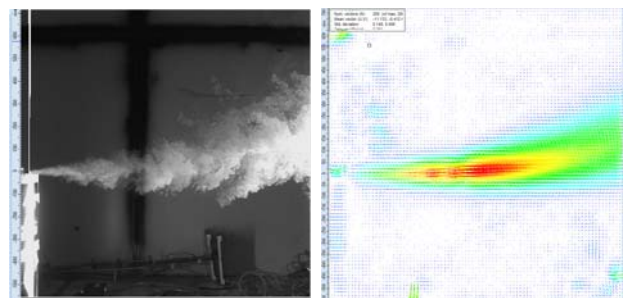


Figure 14 Image capturée du jet d'hélium en sortie de buse et cartographie PIV associée.

La difficulté qu'il reste à surmonter réside alors dans les réglages de la technique PIV pour accéder à des mesures de vitesses exactes, compte tenu des forts gradients de vitesses à l'intérieur du jet (de 100 à quelques m/s).

5 Conclusions et remerciements

L'implantation de la technique PIV dans l'enceinte CARDAMOME a permis l'acquisition de nombreuses cartographies des champs de vecteurs vitesse de l'écoulement du jet de soufflage, réalisées directement au niveau de la bouche, puis sur l'axe longitudinal de celle-ci. La surface des plans scrutés par cette technique, dans les conditions de mise en œuvre de la technique dans l'enceinte, est de l'ordre de 1 m^2 autour des bouches de soufflage testées. Pour chaque configuration étudiée, les profils de vitesse

radiaux et longitudinaux extraits de ces cartographies doivent permettre de comparer les résultats des simulations obtenus par les différents codes CFD, avec les résultats expérimentaux.

Enfin, des visualisations assorties de cartographies vectorielles ‘qualitatives’ ont été réalisées en sortie des buses d’injection de l’hélium ; pour ce faire, un dispositif de traçage de l’hélium par des particules d’alumine de faible taille a été mis en œuvre sur l’installation. Les résultats d’ordre qualitatif renseignent d’ores et déjà sur l’orientation du jet et sur sa portée dans l’enceinte en regard des résultats issus de la simulation.

Nous remercions vivement l’ONERA pour le prêt de leur dispositif de traçage de l’hélium pendant nos essais de visualisation laser.

6 References

[1] X. Cao, J. Liu, N. Jiang, Q. Chen, Particle Image Velocimetry measurement of indoor airflow field: A review of the technologies and applications, *Energy and building*, 69, 367-380

[2] R. Prasad Sahu, N. Biswas, A. Mukhopadhyay, S. Sen, Experimental investigation of horizontal buoyant jet using PIV and shadowgraphy technique, Conference on Fluid Mechanics and Fluid Power, December 16-18, 2010, IIT madras, Chennai, India

[3] A. Koched, H. Pretrel, L. Audouin, O. Vauquelin et F. Candelier, Application de la PIV sur un écoulement de fumée à un passage de porte induit par une source incendie, *13^{ème} Congrès de Techniques Laser, CFTL 2012*, 18-21 Septembre, Rouen, France

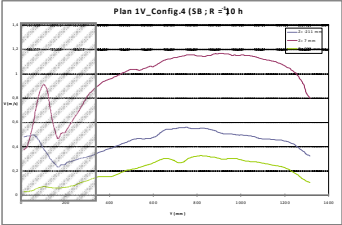
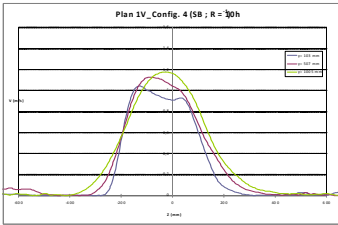
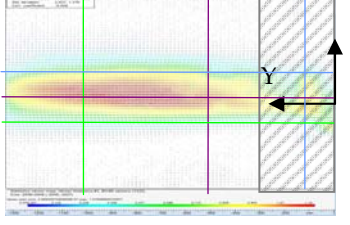
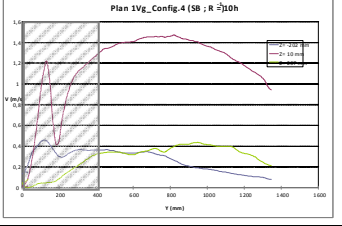
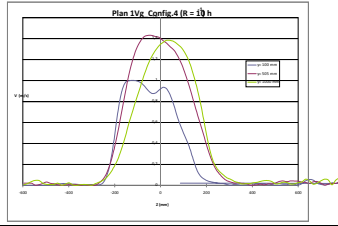
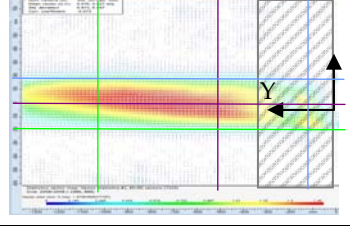
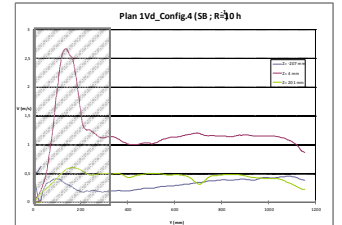
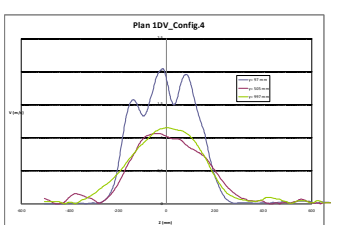
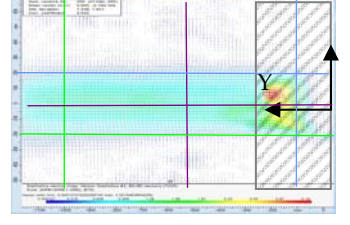
PLANS SONDES	PROFILS AXIAUX Pour différentes valeurs de z	PROFILS RADIAUX Pour différentes valeurs de y	CARTOGRAPHIES VECTORIELLES
PLAN 1V			
PLAN 1V _g			
PLAN 1V _d			

Figure 15 Exemple d’un tableau de synthèse relatif aux profils de vitesse moyens sur les plans verticaux de la bouche (1 V, 1V_g, et 1V_d respectivement le plan vertical central, un plan vertical gauche et un plan vertical droit tels que définis dans le tableau 1)

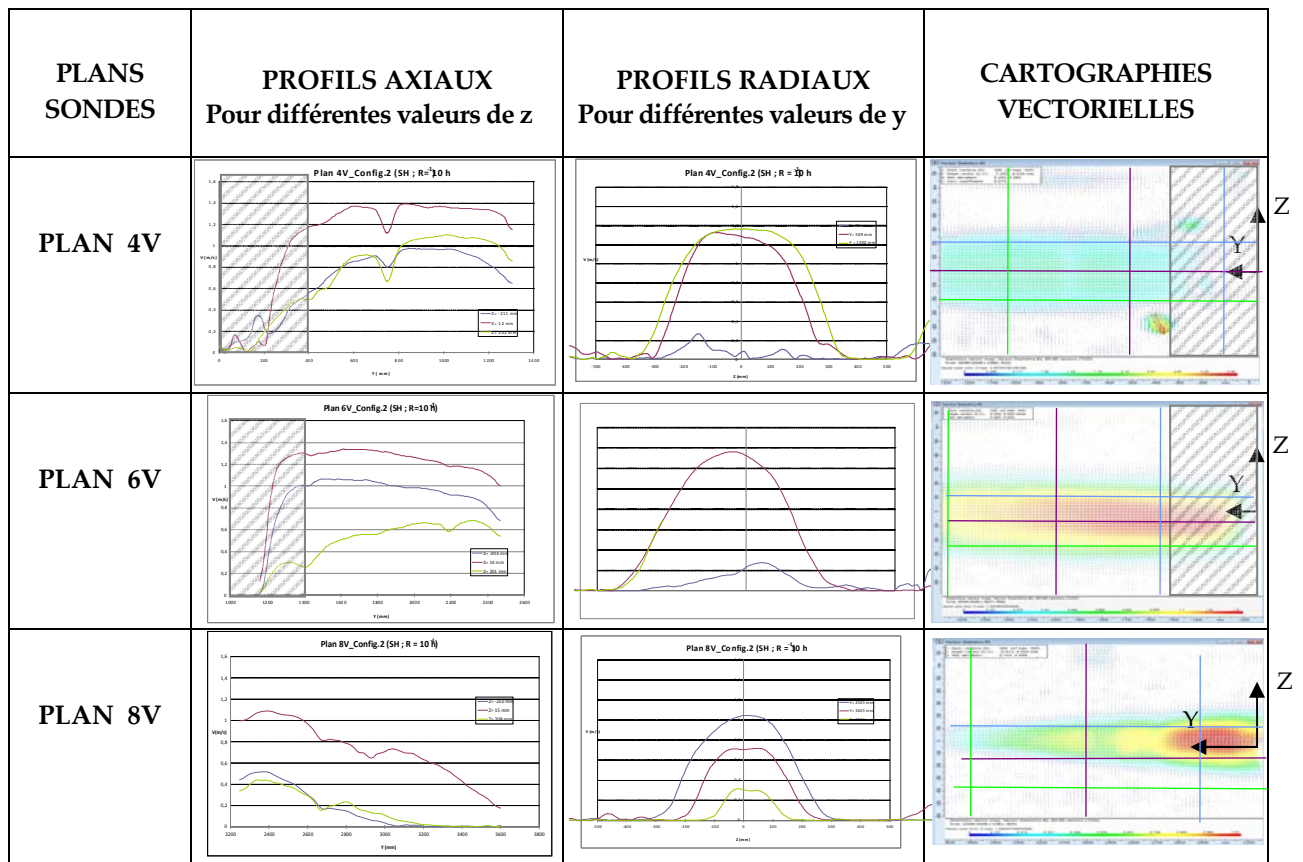


Figure 16 Exemple d'un tableau de synthèse relatif aux profils de vitesse moyens obtenus sur les plans verticaux successifs le long de l'axe longitudinal de la bouche (Plans 4V, 6V et 8V) - Configuration 2