HAL
open science

Caractérisation par PIV de la couche limite d'un jet chaud impactant une paroi plane.

Eliot Schuhler, Bertrand Lecordier, Jérome Yon, Carole Gobin, Alexis Coppalle

To cite this version:

Eliot Schuhler, Bertrand Lecordier, Jérome Yon, Carole Gobin, Alexis Coppalle. Caractérisation par PIV de la couche limite d'un jet chaud impactant une paroi plane.. 16ème Congrès Francophone de Techniques Laser pour la mécanique des fluides, CNRS, CentraleSupélec, Université Paris Saclay, IRSN, Sep 2018, Dourdan, France. hal-02097657

HAL Id: hal-02097657

https://hal.science/hal-02097657

Submitted on 12 Apr 2019

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.

Caractérisation par PIV de la couche limite d'un jet chaud impactant une paroi plane

Eliot SCHUHLER, Bertrand LECORDIER, Jérôme YON, Carole GOBIN et Alexis COPPALLE

Normandie Univ., UNIROUEN, INSA Rouen, CNRS, CORIA, 76000 Rouen, France

Email auteur correspondant : eliot.schuhler@coria.fr

Les matériaux composites tendent à être largement utilisés dans le secteur de l'aéronautique et doivent répondre à des exigences strictes en termes de sécurité incendie. En effet, en situation d'incendie, ces matériaux constitués de matrice polymère et de fibres de carbone peuvent se dégrader sous l'effet d'une flamme. Le travail présenté a pour objectif d'étudier les transferts de chaleur entre une flamme et un matériau composite. Les phénomènes de convection jouent un rôle clef et nécessitent une description fine des champs de vitesse. La Vélocimétrie par Image de Particules (PIV) a donc été utilisée pour mesurer les champs de vitesses en proche paroi. Cependant, la nature de l'écoulement engendre des difficultés pour la mesure de vitesse par PIV. En particulier, la paroi en composite génère une forte réflexion et se déforme sous l'effet de la dégradation thermique. Ainsi les mesures de vitesses ont été effectuées dans plusieurs configurations : avec paroi en acier (inerte) et avec paroi en composite (réactive). Les mesures effectuées montrent que les profils de vitesses sont les même dans les deux cas, indiquant que la perturbation de l'écoulement par la paroi réactive est donc négligeable. Dans les deux configurations, les champs de vitesses obtenus vérifient la théorie pour les jets impactants avec une croissance linéaire des composantes parallèle et perpendiculaire de vitesse dans leurs directions respectives. Comme le prévoie la théorie, une couche limite visqueuse d'épaisseur constante se forme le long de la paroi. En revanche, un écart à la solution analytique est observé pour le rapport entre les composantes parallèle et perpendiculaire de la vitesse. La température élevée du jet et le taux de turbulence de l'ordre de 20% pourraient expliquer cette différence.

1 Introduction

Les matériaux composites fabriqués par assemblage de fibre de carbone et de résine polymère sont de plus en plus utilisés dans l'aéronautique pour leur bonne résistance mécanique spécifique. Cependant, lorsqu'ils sont soumis à une flamme, ils se dégradent, peuvent perdre leur tenue mécanique et produire des fumées toxiques [1]. Afin d'étudier la dégradation de ces matériaux, un dispositif permettant d'impacter un échantillon de composite avec une flamme a été développé. Ce travail a pour objectif d'analyser les transferts de chaleur entre une flamme et un matériau ainsi que l'effet du dégagement de gaz de pyrolyse. Dans une première phase de l'analyse, la caractérisation de la vitesse au voisinage de la paroi est essentielle pour comprendre les transferts à la paroi. Plusieurs travaux récents ont montré que l'application de la technique de Vélocimétrie par Image de Particules (PIV) est adaptée aux configurations de type jets impactants [2, 3]. Cependant ces travaux ont été réalisés avec des jets d'air de faibles températures ne pouvant pas conduire à la dégradation des matériaux. Dans cette étude, nous présenterons les résultats obtenus avec les gaz chauds produits par une flamme. Les premiers essais ont consisté à effectuer des mesures de vitesse dans la zone de stagnation et dans la couche limite à la paroi, constituée initialement d'un matériau inerte (plaque d'acier) puis d'un échantillon composite.

2 Dispositifs expérimentaux

2.1 Description du brûleur

Le brûleur utilisé pour ce travail est présenté Figure 1. Il est constitué en partie basse d'une chambre de combustion surmontée d'un tube de 500 mm de long et 45 mm de diamètre interne (le tube de flamme). Dans cette zone, les gaz chauds sont dilués par une entrée d'air secondaire. La paroi impactée est placée 17 mm au-dessus de la sortie du brûleur. Les débits de combustible et d'air sont régulés par débitmètres massiques (Tableau 1) afin de garantir en sortie de brûleur une température moyenne de 1100°C et un flux thermique total de 116 kW.m^{-2}.

	Propane	Air primaire	Air secondaire	Flux (kW.m^{-2})
Débit (g.s^{-1})	0,1115	1,5	0,4	116

Table 1: Débit de gaz pour l'alimentation du brûleur.

2.2 Montage optique

La nappe de lumière utilisée pour les mesures de vitesses par PIV est issue d'un laser impulsionnel. Le model utilisé est un LASER Nd YAG double tête (Quantel Ultra BSL) de longueur d'onde 532 nm et de fréquence 10 Hz. La puissance mesurée en sortie de LASER est de 145 mJ. Cette puissance permettant d'avoir un signal suffisant de diffusion de Mie sur les particules d'ensemencements est donc appropriée à la mesure de PIV. La nappe est formée par un montage optique comprenant une lentille sphérique (f = 100 mm) et une lentille cylindrique (f = 30 mm). Elle est dirigée perpendiculairement à la paroi impactée. L'acquisition est faite par une caméra CCD (Imager Pro X) avec une résolution de 2048 x 2048 pixel équipée d'un objectif Nikkor de 85 mm. La résolution spatiale est de 18,7 µm/px pour un champ de mesure de 38.3 x 18.7 mm^2. Afin d'atténuer les signaux parasites dus au rayonnement des particules de suie et de la paroi chaude, un filtre interférentiel centré à 532 nm est placé devant l'objectif. L'intervalle entre deux impulsions LASER a été optimisé en fonction de l'écoulement pour garantir une mesure de vitesse précise dans la zone de proche paroi. Ainsi le temps entre l'ouverture des deux portes de la caméra est fixé à 10 µs. La durée d'ouverture est de 4 µs pour première image et de 60 ms pour la seconde image. Des particules d'oxyde de zirconium sont injectées dans l'air primaire de la chambre de combustion afin de garantir une bonne homogénéité de l'ensemencement à la sortie du bruleur et dans la zone d'étude. Le montage utilisé permet des conditions de fonctionnement stables avec un ensemencement de l'écoulement régulier et homogène et cela jusqu'à la paroi.

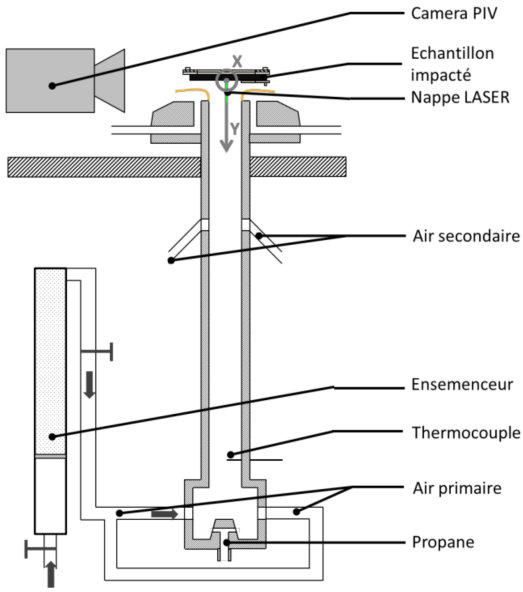

Figure 1: Schéma du montage de la flamme impactante et du dispositif PIV.

2.3 Conditions de fonctionnement

Les premières mesures de vitesses sont effectuées avec une paroi inerte constituée d'une plaque d'acier d'épaisseur 2 cm recouverte d'une peinture matte noire résistant aux hautes températures. Cette configuration permet de répéter des mesures à la paroi en s'affranchissant des difficultés techniques apportées par une paroi en matériau composite qui se dégrade. L'épaisseur de la plaque utilisée permet de limiter la dilatation thermique et la peinture noire réduit la réflexion de la nappe laser sur la surface.

Des mesures de vitesse par PIV sont ensuite effectuées avec deux configurations dites « paroi réactive ». Deux matériaux composites de natures différentes sont placés dans un porte échantillon à la même distance du brûleur (17 mm) comme illustrée Figure 1. Avec ces configurations, la dégradation de la paroi durant la mesure de vitesse entraîne un déplacement de l'interface par gonflement du matériau et une dégradation de la surface impactée générant des réflexions parasites fortes. Les gaz de combustions sont peu lumineux et contiennent peu de suie, cependant un certain nombre de difficultés spécifiques à l'application de la PIV ont été rencontrées : réflexion à la paroi, gonflement de la paroi réactive, gradient d'indice, faibles dimensions des zones d'étude, fort gradient de vitesse. Ces points seront discutés dans les paragraphes suivants.

3 Traitement des images PIV et calcul du champ de vitesse

L'objectif principal de ce travail est de décrire finement l'écoulement dans la zone de proche paroi. L'écoulement horizontal dans cette zone est caractérisé par un fort gradient de vitesse selon l'axe y (voir Figure 1). Le calcul analytique de la couche limite pour un jet laminaire proposé par Schlichting [4] conduit à une estimation de l'épaisseur de l'ordre de 2 mm. De plus, le jet chaud induit de forts gradients de température, pouvant induire une distorsion significative de l'image en particulier lorsque l'objectif de la caméra est positionné proche de l'écoulement. Enfin la surface impactée est peinte en noir mat et nettoyée avant chaque essai. Cependant, au cours de l'expérience, des particules d'oxyde de zirconium adhèrent à la paroi et polluent les images PIV dans la zone d'intérêt avec des particules « fixes ». Afin de résoudre les difficultés décrites ci-dessus, un prétraitement des images instantanées a été développé. Dans un premier temps, le niveau de fond à grande échelle est corrigé. Ce traitement est réalisé en plusieurs étapes. La première consiste à calculer une image de fond en éliminant le signal des particules par un filtrage gaussien passe-bas (Figure 2b). Cette image est ensuite soustraite à l'image instantanée. Lors des essais sur matériaux composites, ce prétraitement des images permet d'éliminer les variations du niveau de fond mais également l'image du porte échantillon qui se trouve dans le champ de la caméra. La dernière étape du traitement consiste à appliquer un masquage des zones de paroi évitant ainsi de biaiser la mesure de vitesse dans ces régions (Figure 2c).

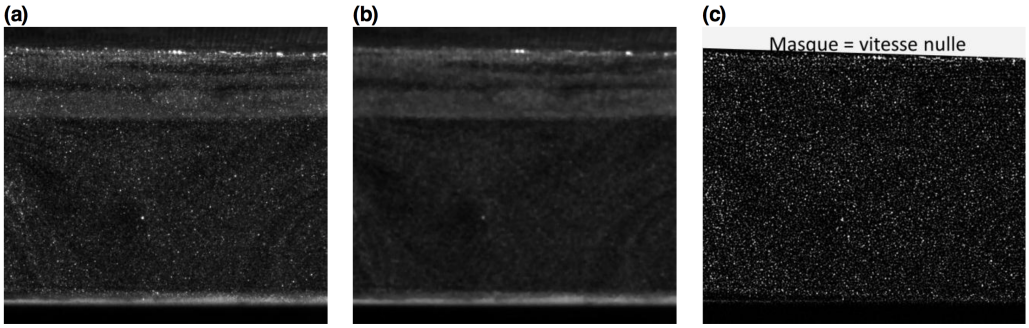

Figure 2: (a) Image brute, (b) Image traitée par filtrage 'passe bas', (c) image obtenue par soustraction de l'image filtrée.

Le positionnement de ce masque nécessite une précaution particulière. Les gradients de température décrits ci-dessus induisent un déplacement apparent de l'interface fluide paroi. Ce mouvement a été estimé sur un ensemble de 50 images à environ 3 pixels (54 µm). Le masque est alors placé à la position moyenne de la paroi. La vitesse est considérée comme nulle dans la zone couverte par ce masque. Le calcul de vitesse est fait à l'aide du logiciel « DynamicStudio » de Dantec avec l'algorithme nommé « AdaptivePIV ». Les vecteurs vitesses sont validés selon les trois critères suivant : hauteur du pic de corrélation (Pk.H. > 0,7), ratio entre le pic le plus haut et le second pic de la fenêtre (Pk.R. > 1,2), ratio signal sur bruit (SNR > 7). Des fenêtres d'interrogation (FI) de 12x12 pixels (224,4x224,4 µm) sont utilisées pour le calcul des champs de vitesses globaux. En zone de proche paroi, les dimensions des

Position radiale, x (mm)	Température du jet, y=0mm(°C)	Température sous la plaque, y = 1 mm (°C)
-14	940	1105
-7	1074	1081
0	1110	1053
7	1078	1027
14	950	1047
Ecart type	2,82	4,16

Table 2: Température mesurée par thermocouple dans la phase gazeuse à différentes positions.

fenêtres d'interrogation sont optimisées en fonction de l'écoulement. Cette optimisation est présentée paragraphe 5.2. Des zones de flou induites par des gradients de température entre le plan laser et le système d'imagerie ont été observées dans les images. Elles ne sont pas systématiques, se déplacent spatialement d'une image à l'autre et touchent environ 80% des images. Dans ces cas particuliers la zone perturbée ne représente que 7% du champ. Aucune solution satisfaisante n'a permis de supprimer complètement ces zones. Cependant, l'observation des champs de vitesses instantanés et moyens n'a pas fait apparaitre d'effet particulier sur les mesures.

4 Caractérisation du jet

Le Tableau 2 présente les mesures de températures effectuées en plusieurs points de la flamme au moyen de thermocouples de type K de diamètre 1 mm. Ces mesures sont des données brutes, sans correction en rayonnement, dans le but de se rapprocher des conditions d'essais préconisés par la norme FAA AC-20-130 pour la validation des matériaux utilisés dans l'aéronautique [5]. Un calcul de combustion 1D à l'aide du programme CEArun 5 nous permet d'obtenir une estimation des propriétés thermodynamiques du gaz en sortie du tube pour une température de 1100°C. Ces propriétés sont exploitées paragraphe 5 afin de caractériser la couche limite. De plus, l'étude de la stabilité temporelle du jet est effectuée au préalable sur un ensemble de 3000 images. Les résultats présentés Figure 3 montrent les profils de vitesse moyenne à la sortie du bruleur (2 mm au-dessus du tube de flamme). La vitesse axiale (suivant y) est notée U et la vitesse radiale (suivant x) est notée V. Les vitesse fluctuantes U' et V' sont normalisées par la vitesse débitante U_b. En sortie du tube de flamme, la vitesse des gaz chauds est de l'ordre de Ub = 8 m.s^{-1} correspondant à un nombre de Reynolds de 1500. Selon la classification faite par Polat [7], le jet étudié est semi-turbulent.

5 Caractérisation de la couche limite

5.1 Description du jet impactant

La faible distance entre la sortie du jet et la zone d'impact influence fortement l'écoulement en aval. Pour l'analyse, l'écoulement est subdivisé en trois sous-domaines (Figure 4) :

- La zone d'écoulement libre, dans laquelle la vitesse de l'écoulement est principalement axiale et où la vitesse radiale augmente progressivement en s'approchant de la paroi.
- La zone d'impact, notée zone de stagnation, est caractérisée par la réorientation du jet dans la direction radiale. La vitesse axiale devient alors très faible alors que la vitesse radiale croit linéairement.
- La zone de couche limite est définie par une vitesse radiale élevée. Une couche limite d'épaisseur constante se développe alors le long de la paroi.

5.2 Dimensions des fenêtres d'interrogation

Dans le but de caractériser finement la couche limite dans la zone proche paroi où la vitesse axiale est faible et le gradient de vitesse radiale élevé, une optimisation de la dimension des fenêtres

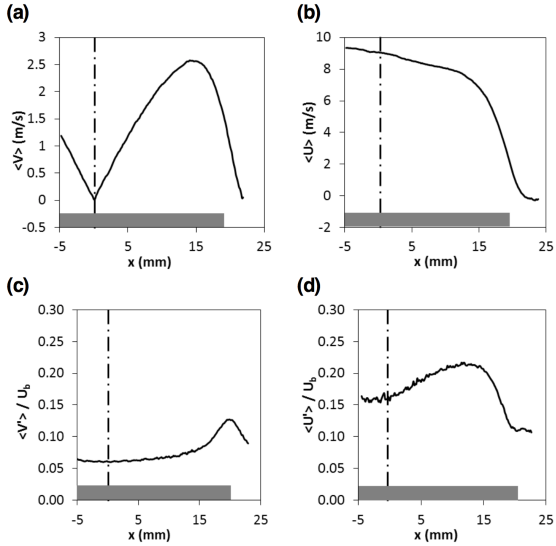

Figure 3: Vitesses en sortie du brûleur (2 mm au-dessus du tube de flamme) : (a) vitesse radiale <V>, (b) vitesse axiale <U>, (c) fluctuation de vitesse radiale <V'>/ U_b, (d) fluctuation de vitesse axiale <U'>/ U_b.

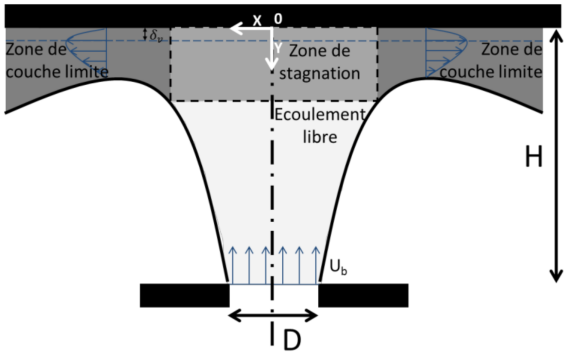

Figure 4: Description du jet impactant.

d'interrogation a été réalisée. Pour cela les résultats obtenus avec des fenêtres carrées (12x12 px) et des fenêtres de forme rectangulaire orientées selon la direction radiale x (8x24 px) ont été comparés (Figure 5). Les deux types de FI, carrées et rectangulaires, permettent de déterminer l'épaisseur de couche limite visqueuse. Une différence de l'ordre de 5% est observée dans la détermination de la vitesse maximale. On remarque également que le gradient de vitesse près de la paroi est plus faible avec l'utilisation des FI carrées. Les FI rectangulaires sont adaptées aux calculs de vitesses proche de la paroi où la composante radiale de la vitesse est très grande devant la composante axiale. En revanche, ces fenêtres ne sont pas optimisées pour le calcul de vitesses en zone d'écoulement libre où la vitesse axiale est grande. L'ensemble des résultats présentés par la suite ont été obtenus avec les FI carrées de 12x12 px.

5.3 Résultats et discussion

La Figure 7 représente les profils de vitesses axiale et radiale pour différents tests effectués avec une paroi en acier et deux matériaux composites de natures différentes. Les vitesses U et V ont été adimensionnées par la vitesse débitante U_b, car il a été remarqué que la vitesse de sortie des gaz chauds pouvait très légèrement varier d'un essai à l'autre (variation de l'ordre de 2%). Un bon accord est observé entre les mesures de vitesses faites avec une paroi en acier et une paroi réactive suggérant un impact négligeable des gaz de pyrolyse émanant du matériau composite sur l'écoulement proche de la paroi réactive. L'épaisseur de couche limite δ est définie comme la position en y du maximum de vitesse radiale, cette

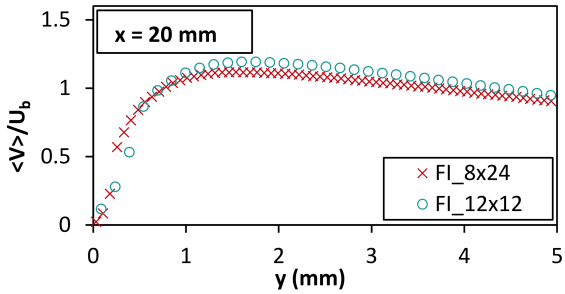

Figure 5: Vitesses radiales pour x = 200mm . o avec des fenêtres d'interrogations de 12x12 px2, x avec des fenêtres d'interrogations de 8x24 px2.

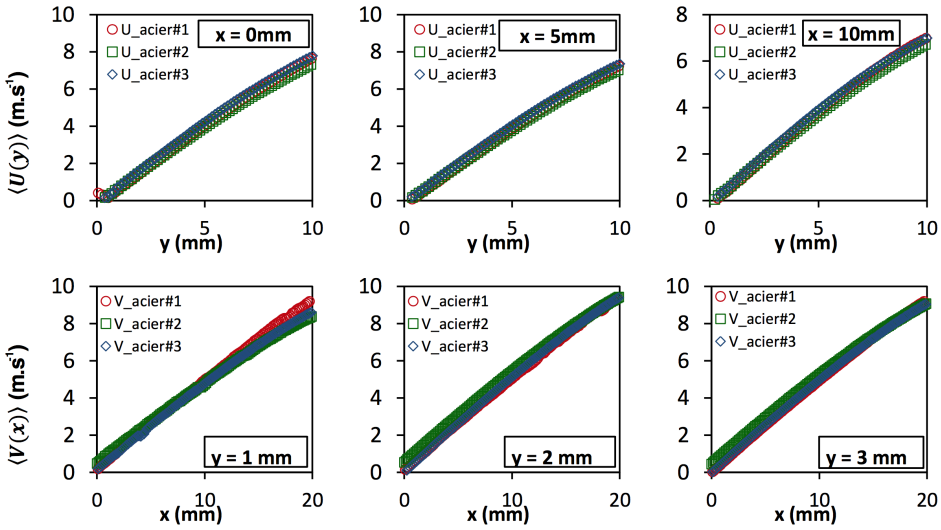

Figure 6: Evolution des vitesses axiale perpendiculairement à la paroi et radiale parallèlement à la paroi.

épaisseur de couche limite est constante le long de l'axe x et est de l'ordre de 1,6 mm (Tableau 2). D'autre part, le profil de vitesse axiale est quasi constant dans la zone de stagnation (x allant de 0 à 15 mm) et en proche paroi (y inférieur à 5 mm). La Figure 6 présente l'évolution de la vitesse axiale U perpendiculairement à la paroi et l'évolution de la vitesse radiale V parallèlement à la paroi. Cette représentation met en évidence la nature linéaire des variations U(y) et V(x) en proche paroi. Les profils de vitesses observés dans la figure 6 et l'épaisseur de couche limite constante le long de la paroi sont en accord avec l'approche analytique d'un jet impactant. Une solution analytique des équations de Navier-Stokes dans le cas d'un jet axisymétrique, laminaire impactant une paroi pour un écoulement incompressible, isotherme et à l'équilibre est proposée par Schlichting [3]. Cela permet de calculer l'épaisseur de couche limite en fonction des gradients de vitesses (eq 1, eq 2).

$$V = ax; U = -2 \tag{1}$$

$$\delta_v^{theo} = 2,8\sqrt{\frac{v}{a}} \tag{2}$$

En reprenant les calculs analytiques faits par Schlichting [3] avec les propriétés du fluide à une température de 1100°C, l'épaisseur de couche limite est estimée à 1,7 mm (Tableau 2). Les mesures de vitesses faites par PIV vérifient bien la théorie analytique de Schlichting. La croissance de la vitesse V selon l'axe x est bien linéaire comme la croissance de la vitesse U selon l'axe y. Les valeurs expérimentales de couche limite sont proches de la théorie. En revanche, la variation de vitesses selon y est inférieure à deux fois la variation selon x. Cet écart avec la théorie peut s'expliquer par la nature du jet. La caractérisation du jet en sortie montre que l'écoulement n'est pas laminaire puisque le rapport <U'>/U_b est

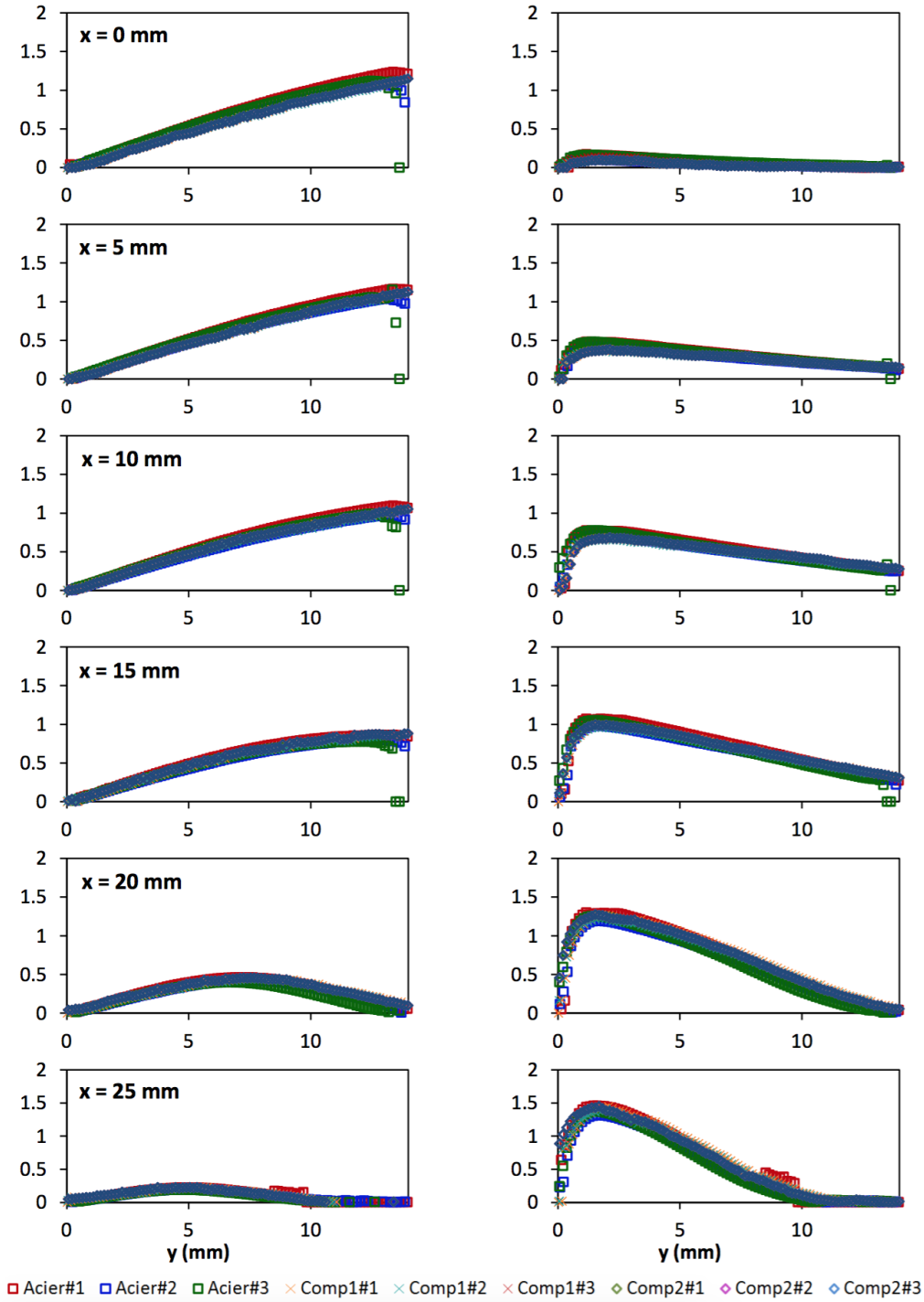

Figure 7: Profils de vitesse moyenne axiale et radiale pour différentes positions radiales, (a) Vitesse axiale, (b) Vitesse radiale. (Acier : 3000 images, composite : 50 images).

de l'ordre de 0,2, de plus le jet et la paroi ne sont pas parfaitement adiabatiques. En termes d'échanges thermiques, si l'on s'intéresse à la zone d'impact (x<D), l'augmentation de V en fonction de la distance radiale x devrait induire une augmentation du nombre de Nusselt et donc de l'échange thermique à la paroi. La littérature [8, 9] montre que la connaissance des profils de vitesses moyennes et turbulentes

	dU(y)/dy (s^{-1})	δ_U^{theo} (mm)	dV(x)/dx (s^{-1})	δ_V^{theo} (mm)	δ^{exp} (mm)
Acier #1	746	1,53	470	1,94	1,59
Acier #2	724	1,56	480	1,92	1,70
Acier #3	773	1,51	470	1,94	1,53

Table 3: Comparaison des résultats expérimentaux et semi-analytique pour trois essais sur matériaux inerte (acier).

permet, par l'utilisation de formules semi-analytique, de calculer le nombre de Nusselt local. Ces lois ne prédisent pas une forte variation du Nusselt en fonction de la distance radiale dans la zone d'impact. Toutefois, l'originalité du montage expérimentale (Re inférieur à 5000 et H/D < 1) ne permet pas une utilisation directe des formules proposées. La validité des relations proposées reste donc à montrer dans cette configuration. Pour répondre à cette question, il faut connaitre les profils de températures proches de la paroi. Cela sera fait ultérieurement afin de vérifier si, comme cela est supposé dans certaines études [5], le nombre de Nusselt est proportionnel à la racine carrée du nombre de Reynolds.

6 Conclusion

Des mesures de champs de vitesses en proche paroi d'un jet chaud impactant ont été réalisées sur pièces inertes en acier et sur des matériaux composites. Les difficultés liées à la mesure en proche paroi et à la température de jet élevée ont pu être résolues pour fournir des mesures de vitesse avec des fenêtres d'interrogation de dimension 224,4x224,4 µm. Ces mesures ont permis d'évaluer l'effet des gaz de pyrolyse sur l'écoulement proche de deux types de paroi réactive. La comparaison avec une paroi inerte appuie l'hypothèse selon laquelle les gaz de pyrolyse n'affectent pas l'écoulement. La précision des mesures de vitesse permet également de définir l'épaisseur de couche limite. L'étude des variations de vitesse axiale perpendiculairement à la paroi et de vitesse radiale parallèlement à la paroi montre des profils linéaires en accord avec la théorie. Bien que les profils de vitesse ne vérifient pas exactement le modèle de Schlichting et al. (équation 1), plusieurs relations semi-analytiques permettent de prendre en compte les écarts au modèle analytique. Ces relations seront utilisées pour le calcul du coefficient d'échange thermique prenant en compte la turbulence du jet, l'entrainement d'air et les gradients de température.

References

[1] Mouritz AP and Gibson AG, Fire Properties of Polymer Composite Materials2007: Springer Netherlands.

[2] Tummers MJ, Jacobse Jand Voorbrood SGJ, Turbulent flow in the near field of a round impinging jet. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2011. 54(23): p. 4939-4948.

[3] Grenson P, Léon O, Reulet P and Aupoix B, Investigation of an impinging heated jet for a small nozzle-to-plate distance and high Reynolds number: An extensive experimental approach. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2016. 102(Supplement C): p. 801-815.

[4] Schlichting H, Boundary layer theory, ed. McGrew-Hill1979: Springer.

[5] FAA, Powerplant Installation and Propulsion System Component Fire Protection Test Methods, Standards and Criteria, 1990. p. 3-6.

[6] Snyder C. `https://cearun.grc.nasa.gov/`. 19/06/2018].

[7] S. Polat BH, A. S. Mujumdar, W. J. M. Douglas, Numerical flow and heat transfer under impinging jets: a review. Annual review of heat transfer, 1989. 2(6): p. 157-197.

[8] Viskanta R, Heat transfer to impinging isothermal gas and flame jets. Experimental Thermal and Fluid Science, 1993. 6(2): p.111-134.

[9] Modak M, Garg K, Srinivasan S and Sahu SK, Theoretical and experimental study on heat transfer characteristics of normally impinging two dimensional jets on a hot surface. International Journal of Thermal Sciences, 2017. 112: p. 174-187.