

Etude de l'aérothermique transitoire d'un impact de jet dans un écoulement transverse confiné.

Emmanuel RADENAC, David DONJAT*, Philippe REULET, Jérémie GRESSIER et Pierre MILLAN

ONERA – Centre de Toulouse
2, Avenue Edouard Belin – 31400 Toulouse

*(auteur correspondant : david.donjat@oncert.fr)

Résumé - Une modélisation expérimentale du refroidissement par ventilation dédié d'un carter moteur chauffé en face arrière est présentée. La réponse transitoire de l'aérothermique du système fluide-solide à un changement de débit de ventilation est en particulier étudiée. L'expérience consiste en une plaque plane de vitrocéramique dont la face arrière est à température constante, et qui est refroidie en face avant par un jet impactant en écoulement transverse confiné. L'instationnarité est alors réalisée en faisant varier linéairement dans le temps le débit du jet entre deux valeurs extrêmes afin de suivre par thermographie infrarouge et en moyenne de phase l'évolution des variations de température à l'interface fluide/solide.

Nomenclature

d	diamètre du jet, m	x,y,z	coordonnées, m
h	hauteur de la veine, m	u,v,w	composantes de vitesse, m/s
e	épaisseur du matériau, m	t	temps, s
R	taux d'injection	<i>Symboles grecs</i>	
T	température, K	τ	temps caractéristique, s

1. Introduction

Cette étude s'inscrit dans le cadre du projet ATRAN (Aérothermique TRANsitoire) qui vise à obtenir des outils numériques de couplage prédictifs, validés par une base de données expérimentale appliquée. Ces outils sont actuellement développés dans la plateforme de calcul CEDRE de l'ONERA pour le problème du transfert de chaleur conjugué entre fluide et matériau en transitoire rencontré dans le carter moteur d'un turboréacteur [1]. Parallèlement, plusieurs expériences ont été définies puis réalisées suivant des protocoles identiques en vue de modéliser l'aérothermique transitoire de configurations de ventilation types. Nous présentons ici les résultats obtenus pour l'une d'entre elles.

2. Définition de l'expérience

2.1. Présentation

Cette expérience modélise le refroidissement d'un carter moteur par ventilation dédié. Schématiquement, elle consiste en une plaque plane épaisse en Macor, chauffée en face arrière à température constante (325 K), et refroidie en face avant par un jet transitoire en écoulement transverse confiné. Cette étude est réalisée en soufflerie où l'écoulement de la veine, de vitesse constante et égale à 4.2 m/s, joue le rôle de l'écoulement transverse. Un jet souffle alors orthogonalement à cet écoulement et vient impacter directement la plaque chauffée. Le diamètre de ce jet ainsi que sa position sont définis afin de respecter les critères de similitude imposés par les conditions de vol. L'étude aérothermique transitoire est alors

réalisée en faisant varier linéairement dans le temps le débit du jet entre deux valeurs extrêmes définies préalablement (figure 1) ($D1= 5 \text{ g/s}$ et $D2= 6 \text{ g/s}$) et qui permettent toutes deux une trace thermique sur la plaque. De plus, le matériau constituant la plaque est une vitrocéramique homogène dont la conductivité permet une grande amplitude de variations de températures à l'interface pour la gamme de débit de jet considérée. L'évolution en débit est bien maîtrisée et peut être réitérée un grand nombre de fois. Ceci rend possible une étude du transitoire en moyenne de phase. La durée de cette rampe d'évolution est définie égale à $t_{\text{rampe}}=10\text{s}$ (ce qui est une durée classique pour des régimes transitoires moteur). Les temps de palier sont alors réduits au temps de stabilisation dans le matériau qui est d'environ 600s, suivant une estimation du temps caractéristique τ de couplage fluide/solide. Au final, la durée totale de chaque cycle est de l'ordre de 21 minutes.

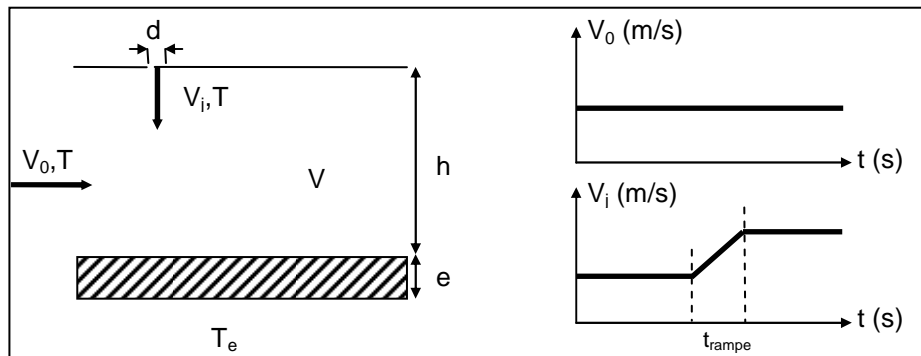


Figure 1 : Configuration de l'expérience "Refroidissement moteur"

2.2. Moyens de mesure mis en œuvre

Différents moyens de mesure (PIV, LDA, thermocouples et thermographie infrarouge) sont utilisés. Les mesures effectuées permettent tout d'abord de caractériser l'aérothermique du système dans des conditions stationnaires qui correspondent aux deux débits de jet extrêmes. Les mesures sont ensuite réalisées en moyenne de phase sur un grand nombre de cycles complets afin de quantifier les effets transitoires induits sur la dynamique de l'écoulement (LDA et PIV) ainsi que sur l'impact thermique au niveau de la plaque chauffée (thermographie infrarouge).

Les mesures LDA sont destinées en premier lieu à la caractérisation des conditions d'entrée des écoulements (profils de vitesse et quantification de la turbulence pour l'écoulement transverse et le jet) qui seront par la suite utilisées comme conditions aux limites pour des simulations numériques. Le système utilisé est un vélocimètre laser TSI bi-composantes. La structure du banc impose des mesures en diffusion arrière. L'acquisition du signal est effectuée via un ordinateur IFA655. L'ensemencement de la veine d'essai est réalisé avec un aérosol de DEHS généré par un atomiseur de type Laskin.

Le système PIV utilisé est constitué d'un laser de type YAG à double cavité donnant des doubles impulsions avec une fréquence de 10 Hz et d'une caméra d'acquisition IDT X-StreamVISION XS-5 coordonnés par un boîtier de synchronisation IDT. Le traitement des images est réalisé à partir du logiciel proVISION. Les résultats donnent alors l'allure générale de l'écoulement pour plusieurs plans pris suivant la symétrie de la veine mais aussi parallèlement au matériau d'étude. Les champs obtenus sont le résultat d'une moyenne effectuée sur plusieurs centaines de doublets d'images. Pour les acquisitions instationnaires, les résultats obtenus sont des moyennes de phase sur des répétitions de cycles de 30s (toutes les mesures de la dynamique par moyenne de phase sont effectuées à froid (plaque non chauffée) ce qui permet de diminuer la durée de la séquence).

Les mesures de températures à la surface du matériau chauffé sont le principal point de comparaison entre expériences et simulations numériques. Elles sont réalisées par thermographie infrarouge avec une caméra matricielle CEDIP JADE III LW de résolution 320*240 et de largeur spectrale 7.7-9.3 μm . Cet instrument est tout à fait adapté pour les acquisitions de températures proches de l'ambiante en régime transitoire. Dans notre cas, les mesures sont effectuées à 1 Hz et la moyenne de phase est réalisée sur 60 cycles. Parallèlement, plusieurs thermocouples sont utilisés afin de suivre la température des écoulements d'air, la température en face arrière du Macor ainsi que la température des parois de la veine, ces dernières permettant une évaluation de l'erreur de multireflexion (0.2 K).

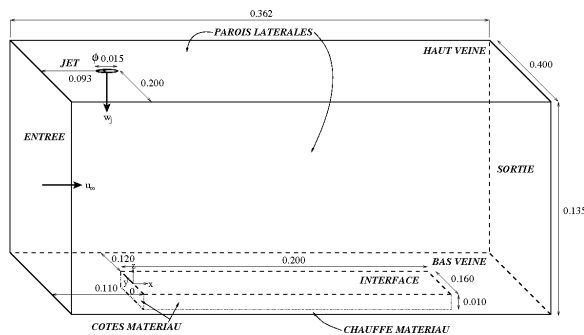


Figure 2 : Géométrie de l'expérience

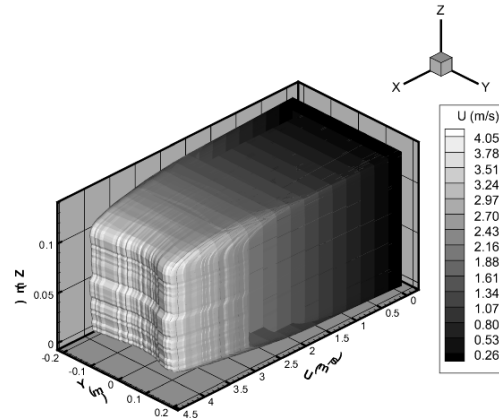


Figure 3 : Profil de vitesse de l'écoulement transverse obtenu à partir des données LDA

3. Résultats

3.1. Mesure des conditions aux limites

Une connaissance précise des conditions aux limites tant aérodynamiques que thermiques se justifie d'une part, par la vérification de la qualité des écoulements en amont et de la chauffe du matériau de test, mais aussi par l'exploitation numérique du problème. Des mesures LDA sont effectuées dans l'écoulement transverse en amont de la sortie du jet (plan "entrée" de la figure 2) suivant deux lignes ($y=0$ et $z=1/2$ hauteur veine). Aucune influence de la présence du jet ou d'une modification du débit de celui-ci n'est détectée. Les profils complets finaux de vitesse et d'énergie turbulente extrapolés à partir des données LDA (figure 3) restent donc stationnaires au cours du transitoire et peuvent être directement exploités dans le modèle numérique. Pour le jet, des difficultés d'accès optique nous ont contraints à réaliser les mesures LDA à 3 mm en aval du plan de sortie de buse. Le maillage exploratoire est constitué de 378 points et il déborde les limites du jet d'un rayon. La vitesse w de soufflage est assez uniforme même si à cette distance le jet est déjà affecté par la présence de l'écoulement transverse : la symétrie cylindrique est perdue même si la composante de cisaillement u est faible.

3.2. Analyse de l'écoulement

Les mesures de champs de vitesses moyennes et fluctuantes sont réalisées par PIV. Elles permettent la caractérisation de l'écoulement stationnaire pour chaque palier de débit du jet

mais aussi de son évolution instationnaire au cours du transitoire à partir de mesures en moyenne de phase.

3.2.1. Mesures aux deux débits extrêmes

La figure 4 donne les mesures de la vitesse moyenne suivant le plan de symétrie aux deux débits extrêmes. Dans les deux cas, il y a bien impact du jet sur la paroi vitrocéramique avec naturellement un impact plus en amont dans le cas du débit D2. Une comparaison de trajectoire du jet donnée par les maximum de vitesse est réalisée et montre un bon accord avec la corrélation de Bradbury (1)[2] (celle-ci est considérée comme trajectoire de référence depuis la définition du cas expérimental). Les mesures de vitesse fluctuante indiquent une concentration logique de la turbulence au niveau du jet.

$$\frac{x}{d} = 1.08 \left(\frac{1}{R} \right)^{2.7} \left(\frac{z}{d} \right)^3 \quad (1)$$

La figure 5 montre la structure du jet selon une coupe transversale. Le tracé de la vitesse moyenne permet de constater l'effet de contournement de l'écoulement induit par la présence du jet : la composante longitudinale indique un ralentissement de l'écoulement transverse à l'arrivée du jet puis une accélération pour le contourner. La composante transversale traduit un écartement dû à la présence du jet. Au niveau du plan $z=0.01\text{m}$, tous les effets sont atténués : le jet interagit avec la couche limite.

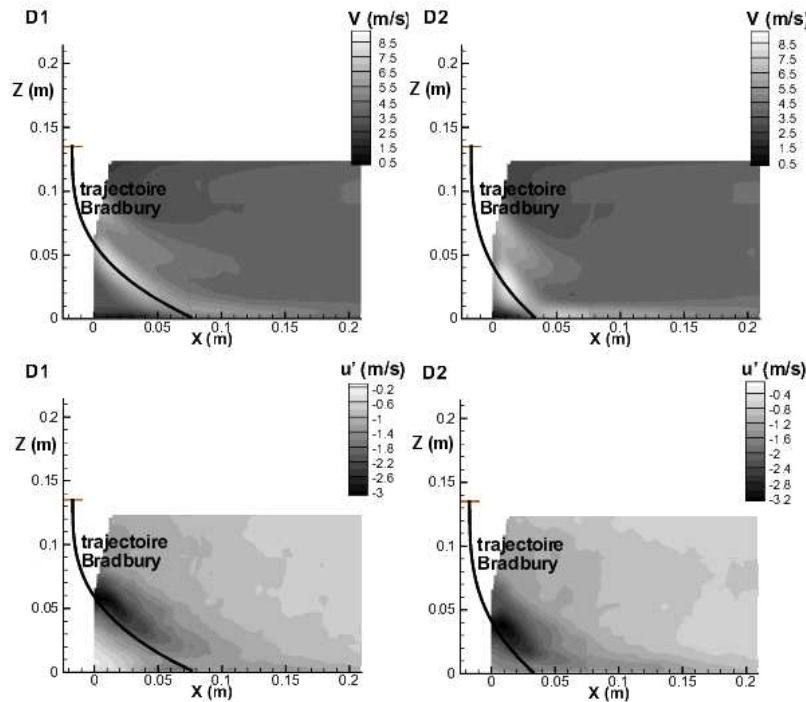


Figure 4 : Champ de vitesse par PIV suivant le plan de symétrie de la veine – Comparaison de trajectoire de jet avec la corrélation de Bradbury

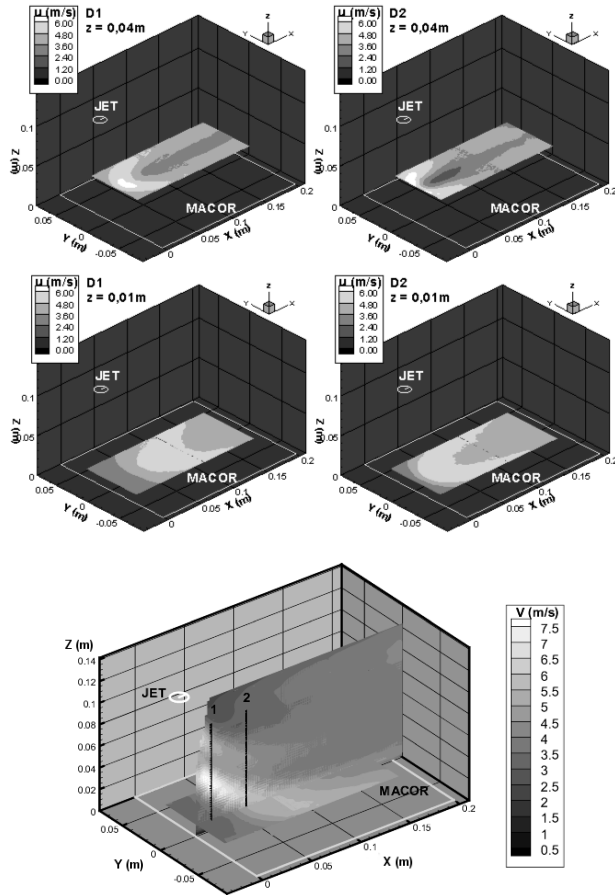


Figure 5 : Vitesse longitudinales pour deux plans horizontaux (haut) – Trace du jet reconstruite à partir des données PIV (bas)

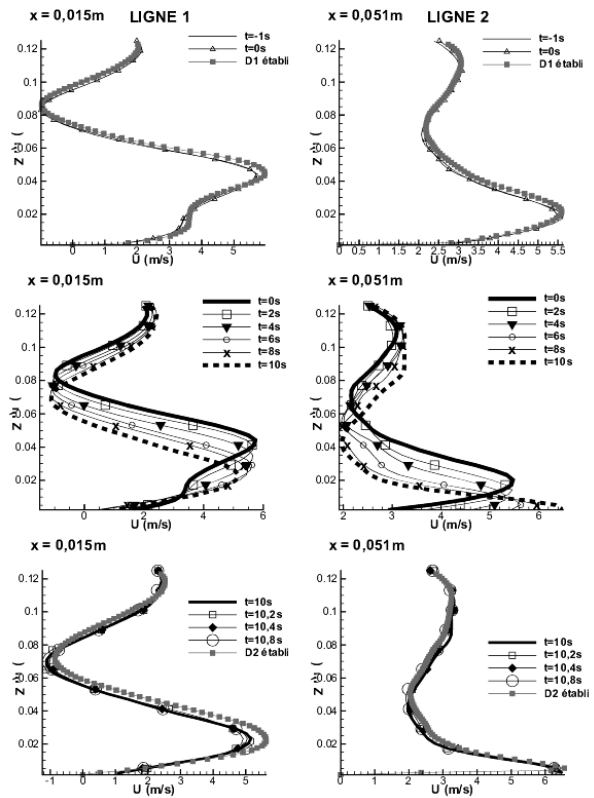


Figure 6 : Evolution de la vitesse longitudinale suivant les lignes 1 et 2 (voir figure 5) au cours de la montée en débit du jet

3.2.2. Evolution instationnaire

L'évolution de la vitesse au cours de la période instationnaire de -1 à 12s est donnée en figure 6 suivant les lignes issues du plan vertical de symétrie visibles figure 5. En premier lieu, les profils de vitesse longitudinale moyenne u en début ($t = -1$ à $0s$) et fin de rampe ($t = 10$ à $10.8s$) sont comparés avec les profils stationnaires. L'accord est bon et l'erreur relative maximale est de 8%. Le temps d'établissement peut être donc considéré comme immédiat. Pendant la période instationnaire ($t = 0$ à $10s$), les profils obtenus sont tracés toutes les 2s. Ils marquent bien la sur vitesse induite par le jet, qui augmente et glisse vers le matériau avec l'évolution du débit.

3.3. Champ thermique par mesure IR

3.3.1. Mesures aux deux débits extrêmes

Les champs de température de paroi mesurés aux deux débits extrêmes sont présentés en figure 7. Ils montrent une très bonne cohérence avec les champs de vitesse obtenus par PIV à partir de la comparaison de la position de l'impact du jet. La différence maximale de température entre les deux débits est localisée au niveau de la zone d'impact et atteint 8.8K (point 1 sur figure 8). L'incertitude statistique de la mesure est de 0.07 K.

3.3.2. Evolution instationnaire

La figure 8 montre l'évolution de la température en deux points distincts. L'influence du changement de régime est quasi immédiat : la dynamique se met en place et modifie la condition de convection très rapidement. Le retour à l'état thermique stationnaire passe par une période strictement instationnaire durant le changement de régime du jet. Sa durée est négligeable devant la période transitoire pendant laquelle la température de surface continue à varier alors que l'écoulement est établi. Ce retour se réalise en 230s (temps de descente à 99%).

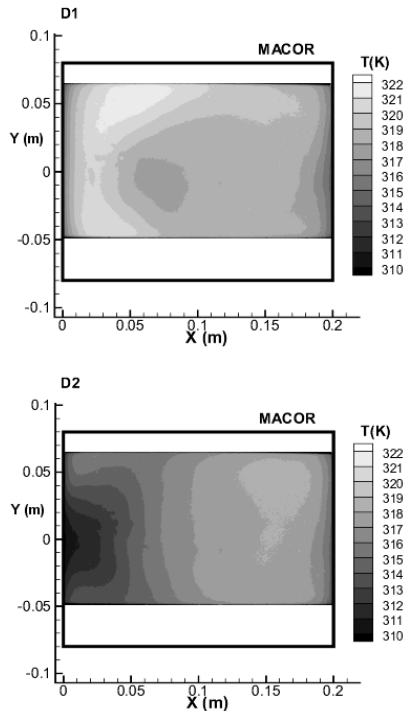


Figure 7 : Champ stationnaire : température de paroi aux débits extrêmes

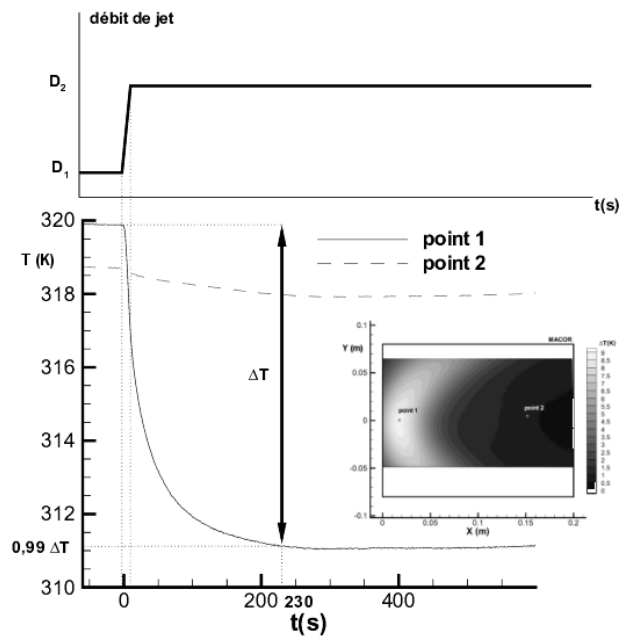


Figure 8 : Evolution de la température de paroi en deux points en fonction du temps

4. Conclusion et perspectives

L'objectif du projet ATRAN est la validation d'une méthode de couplage fluide/solide efficace pour des simulations instationnaires. Une expérience modélisant le refroidissement d'une paroi chaude par ventilation dédiée est ainsi réalisée. Elle est définie à partir d'une configuration avion. Différents moyens optiques sont mis en œuvre afin de caractériser en moyenne de phase l'aérothermique transitoire de ce système soumis à une variation du débit de ventilation. Une grande attention est apportée à la caractérisation des conditions aux limites et à l'évaluation des différentes incertitudes de mesure. Au final, la base de données produite doit servir d'élément de comparaison avec les simulations actuellement en cours.

Références

- [1]E.Radenac, J.Gressier, P.Millan, A.Giovannini, A conservative coupling numerical method for transient conjugate heat transfer, Int. Conf. On Computational Methods for Coupled Problems in Science and Engineering COUPLED 2005, Ile de Santorin, Grèce
- [2]L.J.S.Bradbury, Some aspects of jet dynamics and their implications for vtol research, In "Proc. NATO AGARD Conf.", volume CP-308, pages 1.1-1.2, 1981