

# Étude expérimentale de transfert de chaleur conjugué sur un cas de convection forcée sur plaque plane.

Vincent GALOUL\*, Philippe REULET, Pierre MILLAN

ONERA, Département Modèles pour l'Aérodynamique et l'Énergétique  
2 avenue Edouard Belin – BP 4025 – 31055 Toulouse Cedex 4

\*(auteur correspondant : vincent.galoul@onera.fr)

**Résumé** - Cette étude porte sur la mise en place et l'exploitation d'une expérience permettant la validation des méthodologies de couplages de codes en aérothermique instationnaire. L'expérience consiste en un écoulement d'air venant refroidir une plaque plane chauffée en face arrière. La vitesse de l'écoulement dans la veine est contrôlée par un système de perte de charge variable, ce qui génère un transitoire dynamique et thermique. Les mesures sont menées durant plusieurs cycles afin de procéder à une moyenne de phase et de vérifier la reproductibilité de l'expérience.

## Nomenclature

$T$	température, °C	$R_\theta$	Nombre de Reynolds basé sur $\theta$
$\varphi$	densité de flux de chaleur, $W.m^{-2}$	<i>Indices et exposants</i>	
$h$	coefficient de transfert convectif, $W.m^{-2}.K^{-1}$	$s$	solide
$\theta$	épaisseur de quantité de mouvement, $m$	$f$	fluide

## 1. Introduction

Les transferts de chaleur conjugués interviennent lors de processus tels que le refroidissement ou le réchauffement d'un solide par convection. L'étude de ces problèmes, largement rencontrés dans l'industrie, peut nécessiter l'utilisation d'un outil numérique capable de prédire l'évolution temporelle du champ de température avec une certaine précision. Dans l'aéronautique par exemple, la réduction des marges d'erreurs pour la conception des moteurs d'avions engendre une amélioration des performances. Les principales difficultés liées aux méthodes de couplage résident dans les disparités des temps caractéristiques entre le fluide et le solide ainsi que le traitement spécial que nécessitent leurs interfaces.

De nombreuses méthodes de couplage ont été effectuées au cours des dix dernières années. Les premières étaient dédiées aux simulations du refroidissement des aubes de turbine, problème qui est toujours d'actualité. Si les codes sont systématiquement vérifiés avec des cas simples, dont la solution analytique est connue, assez peu sont confrontés avec des résultats expérimentaux. Le but de cette étude est de constituer une base de données expérimentales afin de pouvoir valider une méthode numérique de couplage instationnaire thermique. Cette méthode est implémentée dans la plateforme de calcul CEDRE de l'ONERA et est décrite par [1].

Dans un premier temps, les besoins particuliers de l'expérience sont exprimés puis la configuration choisie est présentée. Ensuite, le dispositif expérimental ainsi que les moyens de mesures sont décrits. Finalement, les résultats sont discutés pour le régime stationnaire et instationnaire.

## 2. Dispositif expérimental

### 2.1. Configuration expérimentale

#### 2.1.1. Les différents besoins

La configuration du problème est déterminée selon plusieurs besoins. Tout d'abord, les transferts conjugués doivent être prédominants. La présence d'autres phénomènes physiques pouvant ajouter de la difficulté aux simulations numériques tels que les jets, sillages ou encore les transitions laminaire-turbulent, est à éviter. Le problème doit modéliser un couplage entre conduction et convection en régime instationnaire et donc être parfaitement reproductible. Enfin, les quantités comparées entre résultats numériques et expérimentaux doivent être directement mesurables.

#### 2.1.2. Description

L'expérience concerne un cas de convection forcée sur plaque plane de dimensions finies comme le schématise la figure 1. Une plaque plane est chauffée en face arrière avec une température uniforme et constante, ses côtés sont adiabatiques. Un écoulement d'air vient refroidir sa face avant, la couche limite est turbulente sur toute la longueur de la plaque. L'instationnarité du problème réside dans l'écoulement d'air qui est accéléré en quelques secondes entre deux valeurs paliers. Ce problème implique donc la mise en place d'un matériau chauffé dans une soufflerie comportant un système de contrôle de vitesse.

### 2.2. Choix du matériau

Le matériau constituant la plaque a été sélectionné en fonction de différents critères. Premièrement, le temps caractéristique thermique doit être relativement faible. En effet, les mesures se faisant durant plusieurs cycles, la durée nécessaire pour atteindre un état stationnaire ne doit pas être trop longue. Cela impose certaines contraintes sur les propriétés thermiques ainsi que sur l'épaisseur. Ensuite, le matériau doit posséder une grande sensibilité thermique aux variations de vitesse d'écoulement. Le maximum de la fonction  $\partial T_s / \partial h$  est atteint pour un nombre de Biot valant 1. Enfin, il doit avoir une bonne tenue thermique (faible dilatation, faible changement des propriétés avec la température). Le matériau choisi est une vitrocéramique appelée Macor. Il possède une masse volumique de  $2520 \text{ kg.m}^{-3}$ , une conductivité thermique de  $1,46 \text{ W.m}^{-1}.K^{-1}$  et une capacité thermique de  $790 \text{ J.kg}^{-1}.K^{-1}$ . La plaque a une épaisseur de 1 cm, le temps caractéristique correspondant est alors de 136 secondes.

La température en face arrière du Macor est maintenue à l'aide d'un panneau chauffant en silicone. L'uniformité est pour sa part garantie par une plaque de cuivre positionnée entre la plaque chauffante et le Macor. Une pâte thermique est utilisée pour assurer le meilleur contact entre Macor et cuivre. La régulation est effectuée par un système d'asservissement et la température de référence est donnée par un thermocouple positionné dans le cuivre. Afin d'éviter des effets de bord prononcés, une isolation est placée autour du système assemblé (figure 2). Le système est ensuite intégré dans un profil à bord d'attaque elliptique et monté en milieu de veine d'une soufflerie de type Eiffel.

### 2.3. Moyens et méthodes de mesure

Les mesures de vitesse de l'air sont réalisées à l'aide d'un vélocimètre Laser à effet Doppler (VLF) configuré en diffusion avant. Dans un premier temps, l'écoulement moyen est mesuré en différentes abscisses afin d'ajuster les parois de la soufflerie et ainsi obtenir un gradient de pression longitudinal négligeable. Puis des mesures en régime instationnaire sont accomplies pour vérifier la reproductibilité de l'accélération de l'écoulement. Finalement, des mesures de couche limite sont effectuées dans le but de sélectionner un dispositif optimal de déclenchement pour la transition laminaire-turbulent.

La température surfacique du Macor est estimée à l'aide d'une caméra infrarouge CEDIP MWIR (3-5  $\mu\text{m}$ ) placée verticalement au dessus de la veine d'essai. La caméra vise le Macor au travers d'un hublot en Sélénite de Zinc (ZnSe) de transmission supérieure à 99% pour la gamme spectrale de la caméra, ce qui implique une correction sur les mesures. La face du Macor est recouverte d'une peinture dont l'émissivité est élevée et relativement homogène dans la gamme de longueur d'onde de la caméra. La caméra est étalonnée à l'aide d'un corps noir dont la température de surface est réglable dans l'intervalle des températures mesurées à la surface du Macor. Les images instantanées sont acquises à 50 Hz. Il est cependant possible de procéder à une moyenne temporelle sur  $N$  images lors de l'acquisition, la caméra fournit alors  $50/N$  images moyennées par seconde.

## 3. Vitesse d'écoulement

### 3.1. Contrôle de l'écoulement

La variation de vitesse est produite au moyen d'un système provoquant des pertes de charge locales variables dans une cavité située en aval de la veine d'essai. Le choix du système s'est porté sur la simplicité et la fiabilité du mécanisme ainsi que sur sa capacité à être motorisé. Le système réalisé est un dispositif du type «guillotine», constitué de lattes mobiles se déplaçant par rapport à des lattes fixes et modifiant ainsi la section de passage de l'air. Une acquisition continue est effectuée sur 150 cycles avec une ouverture et une fermeture maximale des lattes coulissantes. En faisant correspondre les rampes montantes par rapport à un signal de référence et en procédant à une moyenne de phase. La reproductibilité est garantie par la correspondance satisfaisante entre les cycles ainsi que par la présence d'écart types à la moyenne entre les différents cycles relativement faibles ( $0.25 \text{ m.s}^{-1}$ ). La linéarité est aussi vérifiée sur une partie de la rampe, ce qui a entraîné le choix des valeurs des vitesses paliers pour les cycles :  $5 \text{ m.s}^{-1}$  (bas régime) et  $10 \text{ m.s}^{-1}$  (haut régime).

### 3.2. Couche limite

La couche limite est artificiellement déclenchée pour être turbulente avant la plaque de Macor. Cela permet d'obtenir des conditions dynamiques bien connues et reproductibles lors des simulations numériques. De plus, la présence d'une couche limite turbulente engendre une différence de transfert de chaleur plus importante entre les deux écoulements paliers, et donc un écart de température surfacique plus conséquent.

Le déclencheur est un fil cylindrique placé sur le bord d'attaque et perpendiculairement à l'écoulement. La position est déterminée à 260 mm du bord d'attaque, endroit où l'on obtient  $R_\theta = 200$ . Des fils de tailles différentes sont ensuite testés à cet endroit. Le diamètre minimal provoquant un déclenchement convenable est alors choisi (1,9 mm).

## 4. Résultats

### 4.1. Mesures en régime stationnaire

L'état stationnaire est atteint lorsque la température ambiante, la température du cuivre et celle du Macor se sont stabilisées. La figure 3 présente le champ de température mesuré à la surface du Macor pour un écoulement à bas régime. On constate des effets de bords dus à la difficulté de reproduire une condition adiabatique idéale. Une dissymétrie est visible entre les cotés droit et gauche de la plaque. Ceci n'est pas pénalisant car on se focalise en particulier sur l'évolution longitudinale de la température dans la partie centrale de la plaque. Une moyenne spatiale est donc calculée suivant l'envergure sur une petite bande au centre de la plaque (figure 4). La figure 4 révèle l'évolution longitudinale de la température moyennée ainsi que le nombre de Biot pour les deux régimes. Il est intéressant de noter que la température est plus faible en amont de la plaque. La température de l'air étant plus froide, les transferts de chaleur y sont plus importants. La température de la plaque augmente ensuite avec la température locale de l'air et l'épaississement de la couche limite. On aperçoit aussi les effets de bords sur les extrémités des courbes.

### 4.2. Mesures en régime instationnaire

Les cycles sont réalisés avec des rampes de 10 secondes et des paliers de 700 secondes, ce qui représente plus de 5 fois le temps caractéristique thermique du Macor. L'évolution temporelle en un point de la surface est confrontée avec l'évolution de la température ambiante figure 5. Le régime de vitesse a une incidence sur la température ambiante qui était supposée constante dans le modèle théorique. Sa moyenne sur plusieurs cycles et l'écart type résultant sont tracés figure 6.a et 6.b. Le phénomène semble reproductible et pourra donc être pris en compte dans les simulations numériques. La température à la surface du solide est superposée sur 5 cycles figure 7.a et 7.b. L'intervalle de confiance à 95% de la moyenne de phase résultante est faible et permet de certifier la bonne reproductibilité de l'expérience. Les figures 8.a et 8.b comparent l'évolution temporelle de la température et de la densité de flux de surface à trois points distincts de la surface du solide. La densité de flux est déduite des mesures de température par une méthode inverse utilisée par [2]. La variation temporelle du flux se produit en grande partie lors de la modification de la vitesse d'écoulement. On entre ensuite dans une phase dite d'établissement thermique du matériau, dont la durée est supérieure à deux fois le temps caractéristique thermique du matériau.

## 5. Conclusion

Cette étude traite de la mise en place et de l'exploitation d'une expérience de transfert de chaleur conjugué en régime instationnaire. La reproductibilité des essais est vérifiée sur plusieurs cycles. L'étude porte sur les variations temporelles de la température et de la densité de flux à la surface du solide. Cette base de donnée donnera suite à une étude de validation de codes numériques et à l'établissement d'une norme de validation.

### Références

- [1] E. Radenac, Développement et validation d'une méthode numérique pour le couplage fluide/structure en aérothermique instationnaire, *Thèse ONERA* (2006).
- [2] P. Reulet, D. Donjat, E. Divouron, E. Radenac et P. Millan, Infrared thermography analysis of the transient aerothermal evolution in a turbofan core compartment model, *QIRT Journal*, 6 (2009), 225-248.

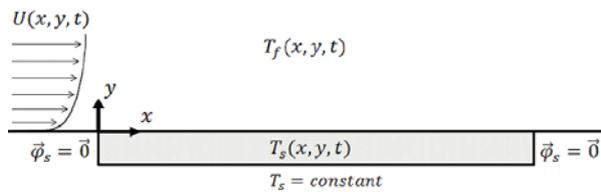


Figure 1 : Schéma de la configuration

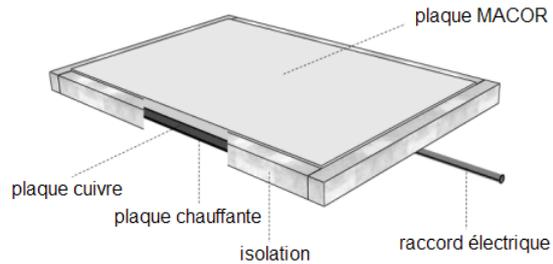


Figure 2 : Assemblage des plaques

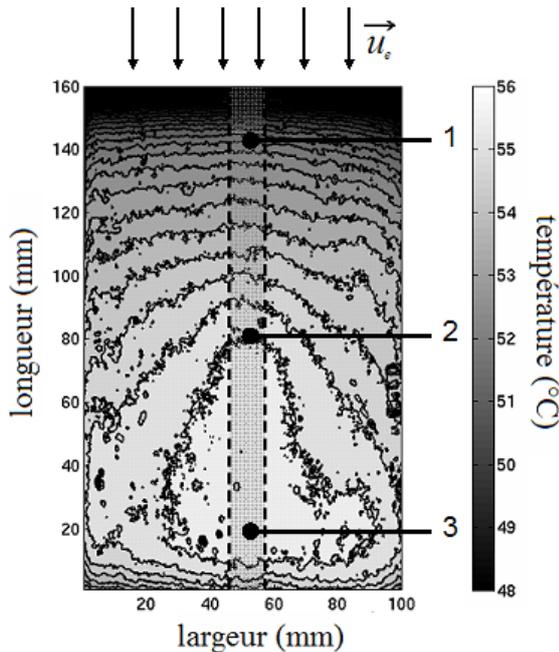


Figure 3 : Température à la surface du Macor. La moyenne sur l'envergure est faite dans la zone pointillée. Les points 1,2 et 3 sont les positions choisies pour l'étude de l'évolution temporelle des grandeurs thermiques.

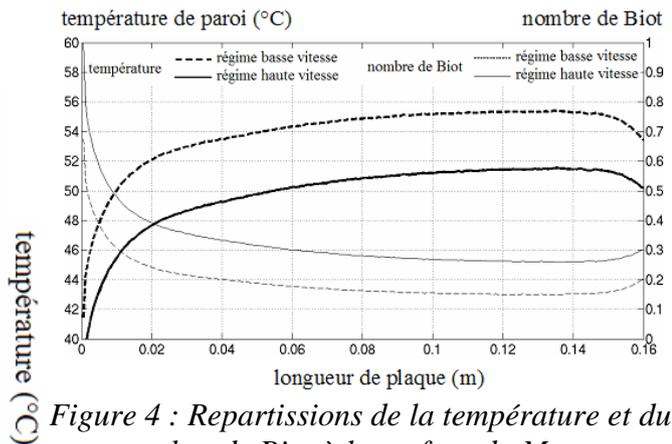


Figure 4 : Répartitions de la température et du nombre de Biot à la surface du Macor

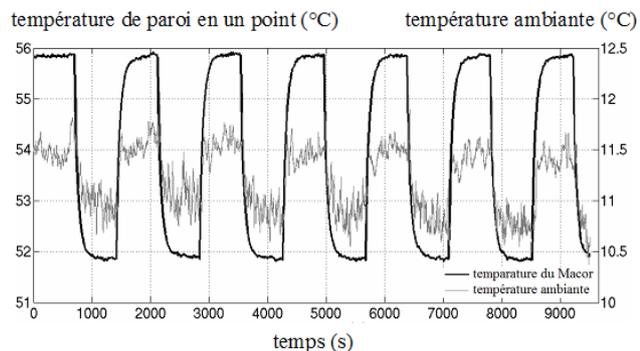


Figure 5 : Évolution de la température (point 3) du Macor et de la température ambiante

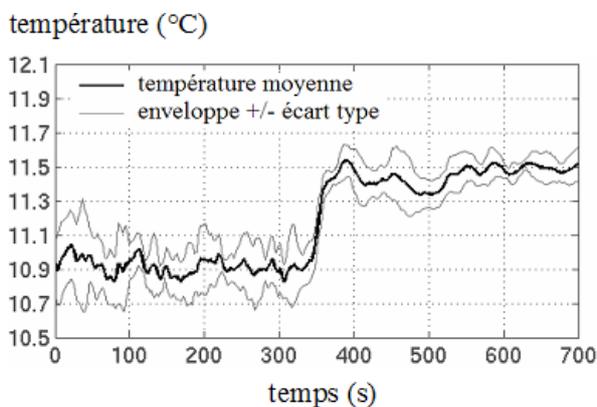


Figure 6.a : Évolution moyenne de la température ambiante enveloppée de l'écart type (accélération)

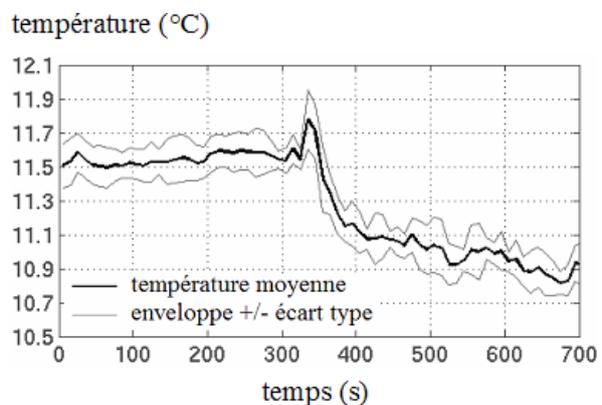


Figure 6.b : Évolution moyenne de la température ambiante enveloppée de l'écart type (décélération)

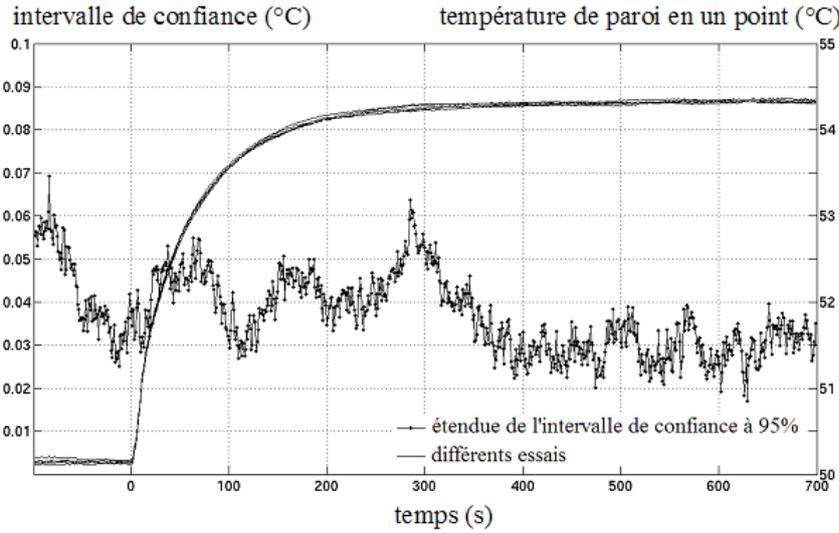


Figure 7.a :  
Évolution temporelle de la température au point 3 du Macor (cf. figure 4) pour différents cycles durant la décélération de l'écoulement. Évolution temporelle de l'étendue de l'intervalle de confiance à 95 % concernant la moyenne de phase.

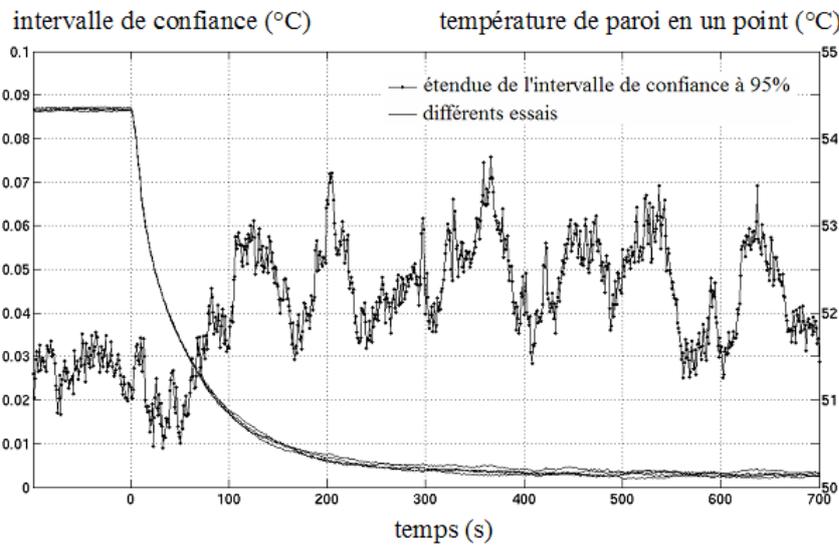


Figure 7.b :  
Évolution temporelle de la température au point 3 du Macor (cf. figure 4) pour différents cycles durant l'accélération de l'écoulement. Évolution temporelle de l'étendue de l'intervalle de confiance à 95 % concernant la moyenne de phase.

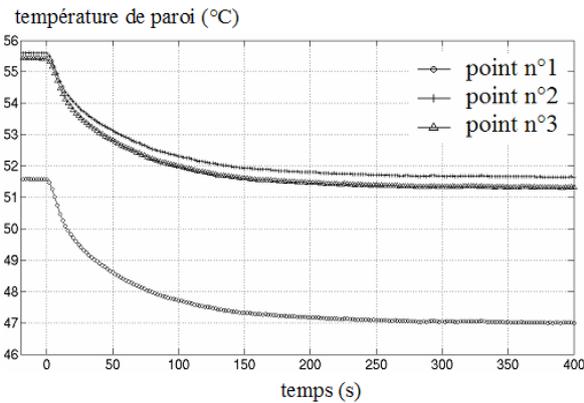


Figure 8.a : Évolution temporelle de la température en trois points à la surface du Macor (cf. figure 4) durant l'accélération.

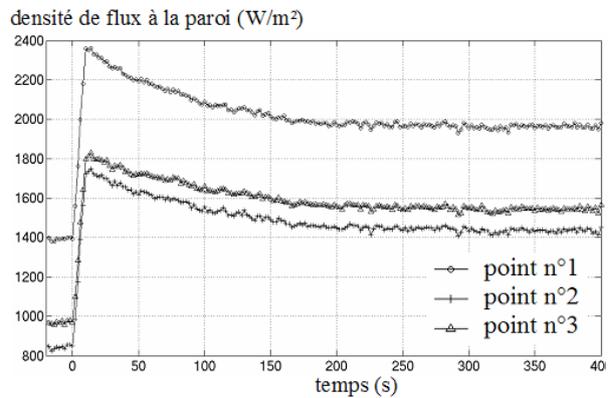


Figure 8.b : Évolution temporelle de la densité de flux à la paroi (W/m<sup>2</sup>) en trois points à la surface du Macor (cf. figure 4) durant l'accélération.

