

# Étude aérothermomécanique de l'impact d'une flamme sur une paroi

David DONJAT<sup>1\*</sup>, Philippe REULET<sup>1</sup>, Francis MICHELI<sup>1</sup>, Bénédicte BAQUE<sup>2</sup>, Pierre MILLAN<sup>1</sup>

<sup>1</sup>ONERA, Centre de Toulouse, Département pour la Modélisation de l'Aérodynamique et de l'Energétique

2, Avenue Edouard Belin – 31400 Toulouse

<sup>2</sup>ONERA, Centre de Châtillon, Département des Matériaux et Structures Métalliques

BP 72 - 29, avenue de la Division Leclerc – 92322 Châtillon Cedex

\*(auteur correspondant : [david.donjat@onera.fr](mailto:david.donjat@onera.fr))

**Résumé** - Dans le cadre de l'analyse numérique du couplage aérothermomécanique, une expérience de déformation d'une plaque métallique soumise à une flamme est présentée. Elle a pour objectif de suivre simultanément l'élévation de la température de l'échantillon métallique et la déformation ainsi générée en utilisant différentes techniques de mesures optiques telles que la photogrammétrie stéréoscopique et la thermographie infrarouge. Une analyse optique du front de flamme complète cette investigation en suivant l'évolution au cours de l'expérience de la position du front de flamme.

## Nomenclature

$D$	diamètre de la buse, $m$	$\alpha$	dilatation thermique, $\mu m.m^{-1}.K^{-1}$
$H$	distance buse - paroi, $m$	$C_p$	capacité calorifique, $J.kg^{-1}.K^{-1}$
$U_0$	vitesse d'éjection des gaz frais, $m.s^{-1}$	$\lambda$	conductivité thermique, $W.m^{-1}.K^{-1}$
$r$	richesse de prémélange	$\rho$	masse volumique, $kg.m^{-3}$
$T$	température, $K$		

## 1. Introduction

Le banc d'impact de flamme est constitué autour d'un brûleur générant une flamme de prémélange propane-air. Ce banc permet de tester différents types de matériaux en faisant varier soit les caractéristiques de la flamme à partir du contrôle de sa richesse et du débit de prémélange, soit la distance flamme/paroi (mesurée entre la paroi impactée et la sortie de buse du brûleur en considérant la paroi perpendiculaire à l'axe de la buse). La paroi servant d'échantillon est une plaque métallique. L'impact de la flamme au centre de la plaque induit une élévation de la température du matériau. Les gradients thermiques générés conduisent à une dilatation locale de la plaque qui se traduit par une déformation en creux de l'échantillon. Pour cette expérience, deux alliages aéronautiques différents sont soumis à une flamme unique définie par sa richesse et le débit de gaz frais pour deux distances différentes. La première étape consistant à caractériser la flamme libre a été réalisée dans de précédents travaux [1]. Dans la présente étude, nous décrivons la méthodologie permettant de suivre l'évolution transitoire de l'aérothermomécanique pour un échantillon soumis à cette flamme. Ce phénomène est quantifié à partir de la mesure simultanée de l'évolution temporelle de la déformation de la plaque (par photogrammétrie stéréoscopique), de la température de l'échantillon (par thermographie infrarouge en face arrière dont le post-traitement par méthode inverse conduit à une estimation de la cartographie du flux de chaleur en face avant) et de la position de la flamme contrainte (par suivi de l'émission du radical OH).

## 2. Description du banc expérimental

### 2.1. Le banc Flamme

#### 2.1.1. Le brûleur

La figure 1 donne une description du banc. Celui-ci est composé d'un brûleur type bec Bunsen ayant un diamètre d'éjection  $D=41$  mm, alimenté par un prémélange réglé de propane et d'air via deux débitmètres/régulateurs massiques. L'admission des gaz frais s'effectue à la base du brûleur via deux entrées. Ces gaz traversent alors un lit de billes de verre puis un nid d'abeille qui assurent l'homogénéisation de l'écoulement (figure 2). Il est alors tranquilisé sur une longueur de 450 mm avant d'être canalisé dans un convergent de rapport de contraction égal à 4. Un dépôt de platine et de nickel assure l'accrochage de la flamme au niveau du bord de fuite du convergent. Les premières études ont permis de décrire le domaine d'existence de la flamme en fonction des paramètres aérothermochimiques (voir figure 3) [1].

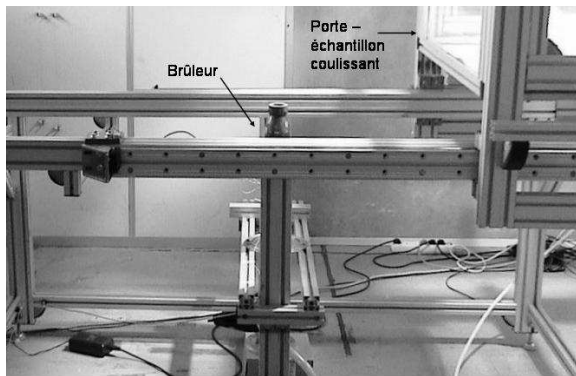


Figure 1 : Banc Flamme – ONERA Toulouse

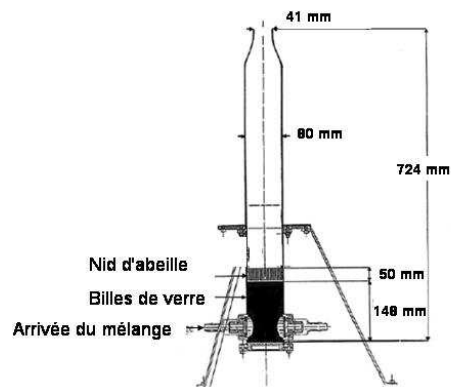


Figure 2 : Brûleur

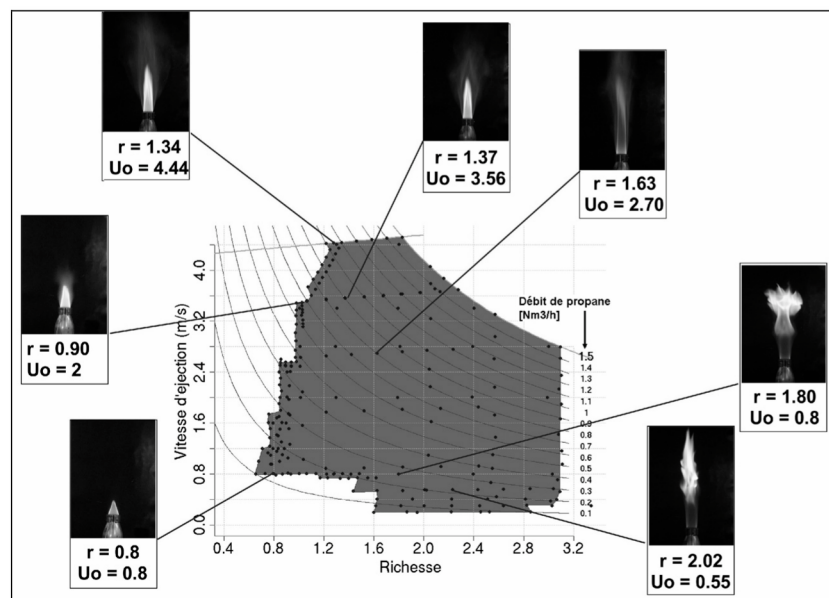


Figure 3 : Domaine de fonctionnement du brûleur

### 2.1.2. Impact flamme-paroi

Ce brûleur est inséré dans un banc comprenant un porte-échantillon mobile et un système d'aspiration. Les échantillons sont des plaques de dimensions 400\*400 mm<sup>2</sup> pour une épaisseur de 3 mm. Ils sont insérés dans un porte-échantillon constitué d'un plancher en céramique ( $\lambda=0.44 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$ ) intégré dans une ossature métallique montée sur rail. Cette ossature permet de créer une zone de confinement pour les mesures en face arrière permettant ainsi d'accroître le contrôle des conditions aux limites (aucune pollution due aux fumées, suivi d'une température ambiante). Enfin, la distance entre la buse d'éjection et l'échantillon peut être précisément contrôlée afin d'assurer la distance adimensionnée H/D choisie.

### 2.2. Conditions opératoires

Les mesures simultanées du transitoire aérothermomécanique de la plaque métallique sont réalisées à partir de différentes techniques optiques de visualisation (figure 4):

- Les mesures thermiques sont effectuées à partir d'un suivi par caméra infrarouge de la température en face arrière de la paroi. Le matériel utilisé est une caméra CEDIP Jade LWIR. Un post-traitement par méthode inverse permet d'obtenir une estimation du flux de chaleur sur la face impactée. Ces données sont complétées par des mesures ponctuelles par thermocouples permettant de contrôler l'évolution de la température au niveau du brûleur ainsi que la température ambiante dans la zone de mesure.
- Une caméra UV intensifiée est utilisée afin de suivre l'évolution du front de flamme par la mesure de l'émission spontanée du radical OH.
- La déformation de la plaque tout au long de l'impact flamme/paroi est suivie à partir de deux caméras visibles X-Stream5 regardant la face libre de la paroi préalablement marquée avec un motif structuré (figure 5). Il faut noter que les deux peintures utilisées ont strictement la même émissivité. Un logiciel conçu à l'ONERA-DAFE reconstruisant la déformation de la plaque complète ce système de photogrammétrie.
- La synchronisation de l'ensemble du banc est réalisée à partir d'un générateur Armexel qui pilote le déclenchement des différentes caméras. Les fréquences d'acquisition sont de 3 Hz et permettent ainsi un suivi du phénomène sur 300s.

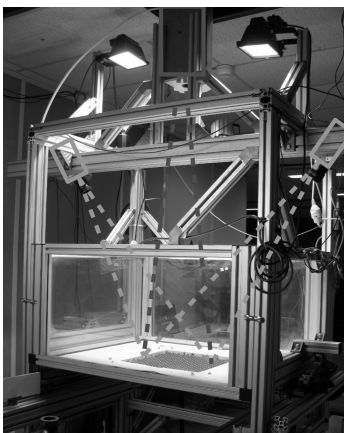


Figure 4 : Banc expérimental

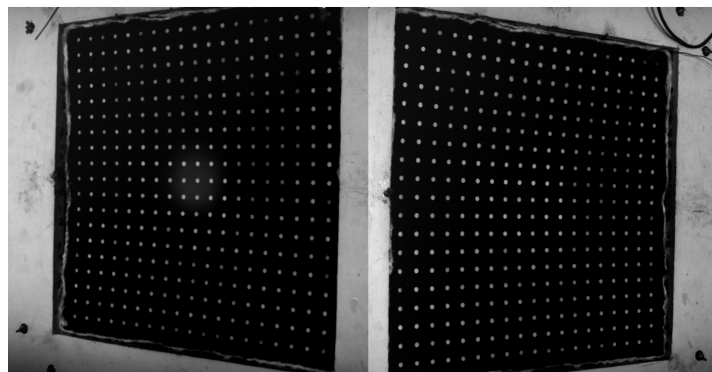


Figure 5 : Face arrière de l'échantillon - Déformation

### 3. Résultats

#### 3.1. Les différentes configurations

Une seule flamme est considérée dans cette étude et ses caractéristiques sont définies par une richesse  $r$  égale à 1.2 et une vitesse d'éjection en sortie de buse  $U_0=2.4$  m/s. La figure 6 donne une estimation de la position du front de flamme moyen pour la flamme libre cartographié à partir d'images de l'émission du radical OH. La hauteur de flamme ainsi mesurée est de l'ordre de 80mm. Les différents échantillons testés ont tous la même dimension et deux alliages aéronautiques (TA6V et INCO600) sont testés (voir tableau 1).

Deux distances d'impact sont considérées permettant de définir :

- une configuration pour laquelle l'échantillon est placé dans la flamme ( $H/D=1.3$ ). Le flux thermique est alors important et la présence de l'échantillon modifie la forme de la flamme, l'évolution spatiale de la plaque due à la dilatation accentuant cette déformation du front.
- une configuration pour laquelle l'échantillon est placé au dessus de la flamme ( $H/D=2.6$ ) et où la totalité des gaz frais est brûlée avant d'atteindre l'obstacle. La flamme est alors peu affectée par la présence de l'échantillon et le flux reçu est réduit.

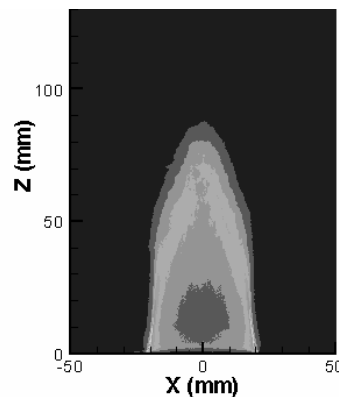


Figure 6 : Image UV moyennée du front de flamme libre

	$\rho$ $kg.m^{-3}$	$\lambda$ $W.m^{-1}.K^{-1}$	$C_p$ $J.kg^{-1}.K^{-1}$	$\alpha$ $\mu m.m^{-1}.K^{-1}$
INCO600	8470	14.9	444	10.4
TA6V	4400	6.7	524	9

Tableau 1 : Données thermophysiques des matériaux utilisés (300K)

#### 3.2. Cas $H/D=1.3$

Pour le cas  $H/D=1.3$ , la structure de la flamme est modifiée et elle prend une forme dite en "enveloppe fermée" caractéristique pour des mélanges proches de la stoechiométrie et à faible nombre de Reynolds (figure 7) [2]. La flamme forme alors un large plateau refermé. Comme le suggère la figure 8, il existe alors un espace de gaz brûlés entre le front aplati et l'obstacle. La figure 10 donne l'évolution de la déformation maximale de la plaque en fonction du matériau dont elle est composée. Ces déformations sont très importantes (plusieurs dizaines de mm) et un instantané tridimensionnel est reconstruit en figure 11. Il apparaît ainsi que

l'INCO600 réagit beaucoup plus que l'alliage de titane (écart d'environ 5 mm lorsque la déformation maximale est atteinte) même si l'écart sur le coefficient de dilatation (à 300K) est faible (voir tableau 1). Par contre, l'alliage de titane atteint son maximum de déformation plus rapidement (environ  $t=140$  s).



Figure 7 : Impact de la flamme sur l'échantillon – Cas  $H/D=1.3$

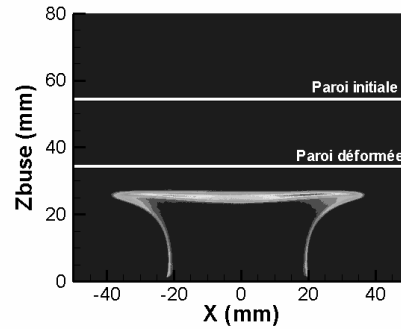


Figure 8 : Front de flamme moyen pour le cas  $H/D=1.3$  en fin d'expérience (INCO 600)

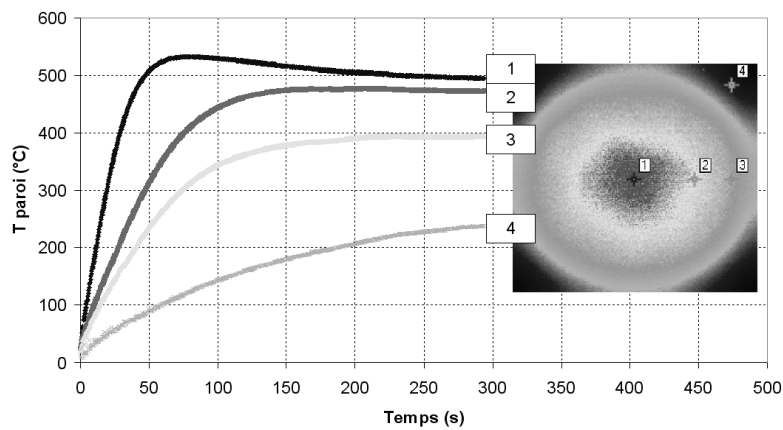


Figure 9 : Evolution de la température en différents points de la surface – Cas  $H/D=1.3$  – TA6V – Le point 1 est au centre de la plaque

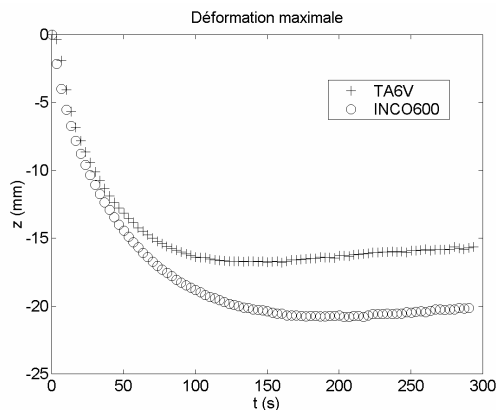


Figure 10 : Evolution de la déformation maximale – Cas  $H/D=1.3$

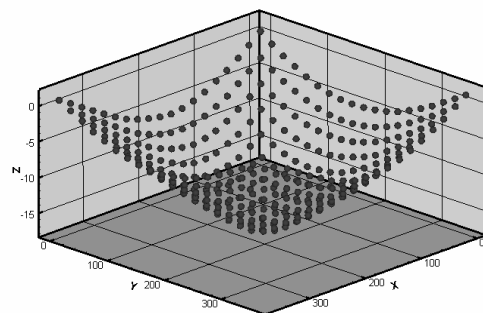


Figure 11 : Déformation tridimensionnelle pour le TA6V à  $t=150s$  – Cas  $H/D=1.3$

Il est intéressant de noter que les plaques continuent leur évolution spatiale et tendent à se rétracter très lentement comme l'illustre l'évolution de la plaque de TA6V sur la figure 10 après 150s. Cette rétractation est associée à l'évolution des gradients thermiques dans l'ensemble de la plaque comme le souligne le suivi de la température en différents points de la face arrière présenté en figure 9.

### 3.3. Cas $H/D=2.6$

Dans le cas  $H/D=2.6$ , les images moyennées du front de flamme montrent que la structure de la flamme est très peu perturbée par la présence de l'obstacle. La hauteur de flamme moyenne est comparable à celle obtenue en flamme libre. L'évolution transitoire de la température au niveau de la surface est beaucoup plus lente dans ce cas de convection et les niveaux de température maximum sont comparables au cas précédent (voir figure 12). A noter que le flux de chaleur prend une forme particulière de croix en début d'expérience. Cette particularité est associée à la présence de la flamme en proche paroi. L'analyse des déformations observées sur les différents échantillons soumis à cette flamme montre qu'elles sont beaucoup moins marquées. Ainsi, pour un échantillon de TA6V, la déformation maximale atteinte est de 6.7 mm, soit deux fois moins importante que dans le cas  $H/D=1.3$ . Cet écart de comportement est le résultat d'une grande différence d'évolution des gradients de température au sein de la plaque dans les premiers instants de chauffe qui conditionne l'amplitude de la déformation solide.

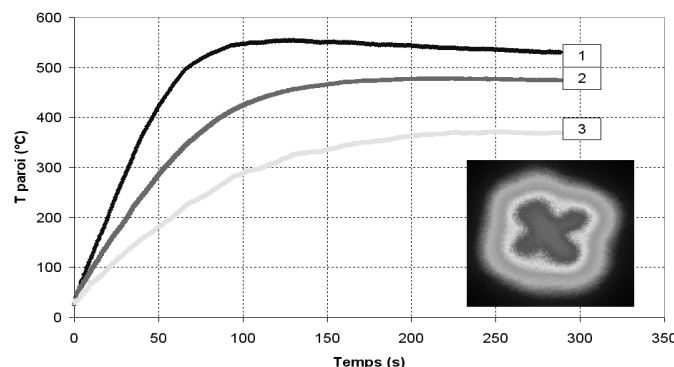


Figure 12 : Evolution de la température en différents points de la surface – Cas  $H/D=2.6$  – TA6V –

## 4. Conclusion

Une expérience pour la caractérisation de l'évolution transitoire de l'aérothermomécanique d'une plaque métallique soumise à une flamme est présentée. Différentes techniques de visualisation ont été utilisées de façon simultanée afin de caractériser les déformations, la température et la forme du front de flamme. Pour une flamme donnée, les deux conditions spatiales testées ont montré des évolutions thermomécaniques différentes. Ces données ont pour but à terme de permettre la validation de simulations numériques multiphysiques couplées.

### Références

- [1] H. Roinard, F. Micheli, P. Reulet et P. Millan, Etude expérimentale d'une flamme de prémélange propane air en impact sur une plaque plane, *Congrès SFT 2008*, 15-20.
- [2] Y. Zhang et K.N.C. Bray, Characterisation of impinging reacting jet flows, *Combustion and Flame*, Vol. 116, 4, pp.671-674, 1999