



**HAL**  
open science

## Couplage aéro-thermo-mécanique pour l'interaction flamme-paroi

Bénédicte Baqué, Frédéric Feyel, Arjen Roos, Marc-Paul Errera, Emmanuel  
Laroche, David Donjat

► **To cite this version:**

Bénédicte Baqué, Frédéric Feyel, Arjen Roos, Marc-Paul Errera, Emmanuel Laroche, et al.. Couplage aéro-thermo-mécanique pour l'interaction flamme-paroi. 10e colloque national en calcul des structures, May 2011, Giens, France. pp.Clé USB. hal-00592928

**HAL Id: hal-00592928**

**<https://hal.science/hal-00592928>**

Submitted on 3 May 2011

**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.

## Couplage aéro-thermo-mécanique pour l'interaction flamme-paroi

B. Baqué<sup>1</sup>, F. Feyel<sup>1</sup>, A. Roos<sup>1</sup>, M.-P. Errera<sup>2</sup>, E. Laroche<sup>3</sup>, D. Donjat<sup>3</sup>

<sup>1</sup> DMSM, ONERA, France, {benedicte.baque,frederic.feyel,arjen.roos}@onera.fr

<sup>2</sup> DSNA, ONERA, France, marc.errera@onera.fr

<sup>3</sup> DMAE, ONERA, France, {emmanuel.laroche,david.donjat}@onera.fr

**Résumé** — Dans cet article, l'interaction flamme-paroi consiste à faire impacter une flamme de prémélange sur une plaque métallique placée à une certaine distance de la buse d'éjection des gaz. Le flux thermique généré par la flamme provoque un échauffement du matériau qui engendre la déformation de la plaque, modifiant ainsi la topologie de l'écoulement réactif. L'objectif de cette étude est de simuler ce système complexe par un couplage aéro-thermo-mécanique entre les codes de calcul CEDRE (mécanique des fluides, écoulements réactifs) et Z-SeT (mécanique non-linéaire, thermique du solide).

**Mots clés** — couplage fluide-structure, aéro-thermo-mécanique, combustion, déformation.

### 1 Introduction

Dans un moteur d'avion, un incendie peut se déclarer hors de la chambre de combustion, engendrant une flamme qualifiée de « standard » dans les documents de certification. Afin de reproduire en laboratoire une flamme de caractéristiques équivalentes (température de  $1100^{\circ}\text{C} \pm 10\%$ , flux total de  $116 \text{ kW/m}^2$ ), une flamme de type prémélange propane-air vient impacter une plaque plane, placée à une certaine distance de la buse d'éjection du gaz (photographie en Fig. 1).

L'interaction flamme-paroi est un problème complet de couplage aéro-thermo-mécanique puisque l'écoulement réactif que constitue la flamme provoque un échauffement du matériau auquel vient se rajouter une déformation significative de la plaque, modifiant ainsi la forme même de la flamme.

D'un point de vue thermique, c'est la convection forcée qui domine les modes de transferts (Milson & Chigier [14]). De nombreuses études expérimentales (revue de Chander & Ray [2]) et numériques (Fernandes & Leandro [9], Owston *et al.* [16], Remie *et al.* [18], Chander & Ray [3]) analysant la structure et la thermique de la flamme en impact ont été menées. Zhao *et al.* ont quant à eux cherché à déterminer expérimentalement [21] et numériquement [22] quelle pouvait être l'influence des caractéristiques thermo-mécaniques sur le transfert de chaleur, pour différents matériaux métalliques. Les seules investigations sur la relation entre les conditions de chauffe et la courbure résultante d'une plaque ont été menées dans le domaine de la production des coques de bateau (Clausen [5], Shin & Lee [20], Hemmati & Shin [12]).



FIG. 1 – Photographie du banc Interaction flamme-paroi (ONERA Toulouse).

La stratégie de couplage multi-physique retenue à l'ONERA, à savoir le « couplage externe », est adoptée pour la simulation de l'interaction flamme-paroi. Il s'agit donc de coupler les codes de recherche spécialisés, qui utilisent les méthodes et les modèles les plus appropriés pour résoudre chaque physique séparément.

L'adaptation du couplage aéro-thermo-mécanique à la résolution du problème de l'interaction flamme-paroi utilise les outils de l'« atelier de couplage » existant, développés successivement par Chemin [4] et Garaud [11], sur la base des travaux sur le couplage partitionné de Piperno *et al.* [17], Felippa *et al.* [8], Le Tallec & Mouro [13] et Farhat *et al.* [7]. Les échanges d'information entre codes sont effectués via la bibliothèque de couplage MpCCI [15].

Dans une première partie, ce papier présente l'expérience de l'interaction flamme-paroi et le classement des influences mutuelles des physiques en présence, en fonction de leur importance relative. Puis le processus de mise en place du couplage aéro-thermo-mécanique entre le code de mécanique des fluides CEDRE et le code de mécanique des structures Z-SeT (dont les modules thermique et mécanique sont considérés comme indépendants) est détaillé dans une deuxième partie. Les résultats numériques sont discutés dans une troisième et dernière partie.

## 2 Interaction flamme-paroi

### 2.1 Dispositif expérimental

Cette expérience a été élaborée à l'ONERA Toulouse, dans le cadre d'une étude de caractérisation et simulation du comportement thermique d'un élément rentrant en compte dans le processus de certification de la résistance au feu avion (Roinard *et al.* [19]).

Le banc d'essais est constitué autour d'un brûleur de type bec Bunsen, générant une flamme de prémélange propane-air, de richesse  $r = 1,2$  (excès de carburant) et de vitesse à l'éjection  $U_0 = 2,4$  m/s pour cette expérience. Ce niveau de vitesse correspond à un nombre de Reynolds  $Re$  à l'éjection de 9000 : la flamme est donc turbulente. La température maximale de la flamme est d'environ 1700°C. Deux distances flamme-paroi  $H$  (mesurées entre la paroi impactée et la sortie de buse du brûleur) sont testées successivement : 54 puis 108 mm, pour un diamètre de buse  $D = 41$  mm.

La paroi servant d'échantillon est une plaque métallique de dimensions  $400 \times 400$  mm. Pour cette expérience, des tôles de 3 mm d'épaisseur constituées de deux alliages aéronautiques différents (TA6V et INCO600) sont soumises à la flamme.

L'expérience durant 300 s, l'évolution transitoire du système est quantifiée à partir de la mesure simultanée des températures (thermographie infrarouge), de la position de la plaque (photogrammétrie stéréoscopique) et de celle du front de flamme (caméra UV pour visualisation des radicaux OH par fluorescence). Des exemples de visualisation pour chacune de ces méthodes de mesure sont donnés respectivement en Fig. 2, Fig. 4 et Fig. 3. Sur cette dernière, on remarque que la flamme est du type « enveloppe fermée » : des gaz brûlés (chauds) sont emprisonnés entre la zone de réaction chimique et la paroi, ce qui induit la présence d'un transfert de chaleur important au centre de la plaque.

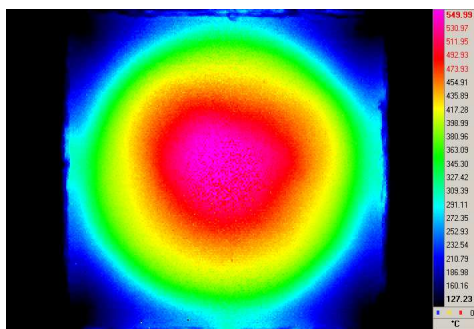


FIG. 2 – Carte de température à l'arrière de la plaque, par thermographie infrarouge ( $H/D = 1,3$ ,  $t = 150$  s).

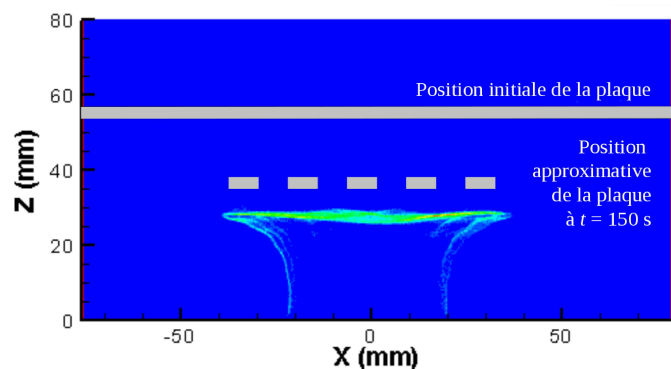


FIG. 3 – Position du front de flamme, par caméra UV ( $H/D = 1,3$ ,  $t = 150$  s).

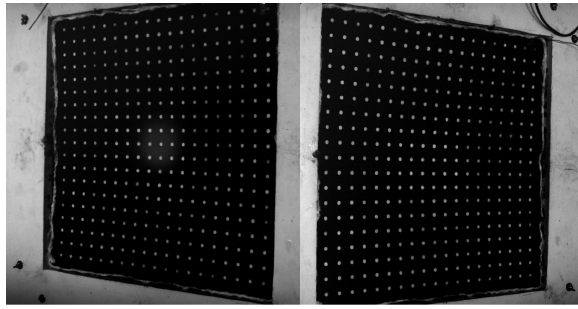


FIG. 4 – Position de la plaque, par photogrammétrie stéréoscopique ( $H/D = 1,3$ ,  $t = 150$  s).

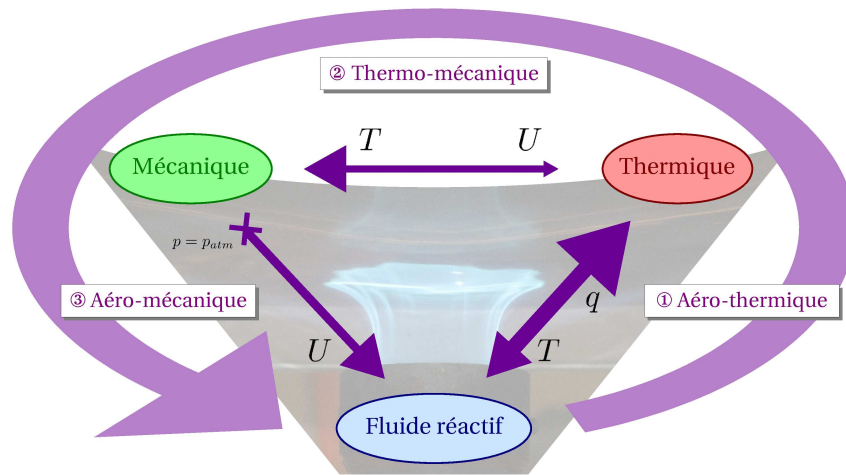


FIG. 5 – Influence mutuelle des physiques de l'interaction flamme-paroi.

## 2.2 Influence mutuelle des physiques en présence

Les influences mutuelles de chacune des physiques en présence, ainsi que leur importance relative, sont schématisées en Fig. 5. C'est l'action de la flamme, à travers le flux de chaleur  $q$  qu'elle transmet à la plaque, qui stimule le système couplé. Le couplage aéro-thermique est donc prépondérant. En retour, la température  $T$  de la plaque augmente. Sous l'effet de la dilatation et du fluage (couplage thermo-mécanique), la plaque se déforme de manière élasto-visco-plastique. La nouvelle position  $U$  de la plaque induit un changement de topologie de la flamme (couplage aéro-mécanique), modifiant ainsi le profil de flux thermique.

Tout au long de l'expérience, la pression  $p$  induite par la flamme est équivalente à la pression atmosphérique. La variation de pression est donc négligeable, ce qui permet de simplifier la résolution du système, en n'échangeant qu'un seul des deux champs requis pour le couplage aéro-mécanique.

## 3 Couplage aéro-thermo-mécanique

La mise en place de la totalité de cette chaîne de couplage est réalisée brique par brique, par ordre d'importance des interactions.

### 3.1 Couplage aéro-thermique

Dans le cas de l'utilisation du couplage aéro-thermique pour l'étude de l'évolution des températures à l'intérieur d'un solide en régime transitoire, la grande disparité des temps caractéristiques entre les milieux fluide et solide amène à utiliser un algorithme simplifié (« quasi-stationnaire »), schématisé en Fig. 6, basé sur la méthode de couplage convection-conduction (*Conjugate Heat Transfer*) (Chemin [4], Baqué [1]) : la description du système couplé est basée sur la physique la plus lente, à savoir le régime

transitoire thermique au sein du solide, ce qui conduit à représenter le fluide par une succession d'états stationnaires. Les conditions d'équilibre (égalité des températures et des flux) à l'interface sont assurées à chaque instant de couplage, grâce à une recherche de point fixe.

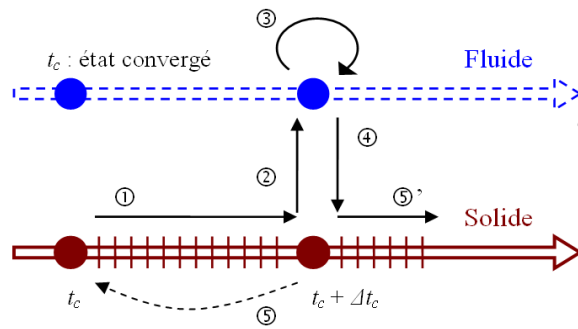


FIG. 6 – Algorithme de couplage aéro-thermique.

A l'instant  $t_c$ , l'état global fluide-solide est convergé : chacun des deux codes a atteint un état convergé suivant ses propres critères et les équilibres de température et de flux à l'interface sont respectés. La première étape (①) consiste à réaliser le calcul thermique transitoire dans le solide pour se rendre à l'instant de couplage suivant ( $t_c + \Delta t_c$ ). La température en paroi du solide est alors envoyée au code fluide (②), qui remet à jour son état stationnaire avec cette nouvelle condition limite (③). Puis le flux thermique à la paroi est envoyé au solide (④). Un test de convergence est alors effectué. Tant que le critère de convergence fixé (sur les flux ou les températures) n'est pas respecté, ce cycle est répété (⑤) : il s'agit d'une itération de couplage (Piperno *et al.* [17]). Une fois le critère de convergence atteint, le calcul passe au pas de temps de couplage suivant (⑤').

La performance de la méthode à décrire le champ de température d'une structure en régime transitoire, sur une période de temps non négligeable, a été démontrée à l'aide de la comparaison entre les profils de température calculés à la surface d'une plaque plane placée dans un écoulement d'air laminaire et soumise à des échelons de flux de chaleur, avec les données d'une expérience (Errera *et al.* [6]).

### 3.2 Couplage thermo-mécanique

Comme pour le sous-couplage précédent, la première étape du couplage thermo-mécanique consiste à effectuer un calcul de conduction dans le solide. La température  $T$  au premier instant de couplage est ensuite envoyée au module mécanique du code Z-SeT, qui calcule la nouvelle position  $U$  de la plaque associée à ce champ, au même instant.

En fonction du pas de temps de couplage choisi - c'est-à-dire si le pas de temps thermique est proche ou non du temps caractéristique de diffusion à l'intérieur de la plaque - un processus itératif peut être conseillé, afin de respecter les équilibres de température et de position à chaque pas de temps du couplage thermo-mécanique.

### 3.3 Couplage aéro-mécanique

Avec le couplage aéro-mécanique, viennent se rajouter l'équilibre des pressions et des positions, ce qui induit l'utilisation d'un maillage déformable côté fluide.

### 3.4 Couplage complet

Le calcul fluide dimensionne le coût de calcul total, notamment à cause de la résolution des équations de combustion. L'objectif de la mise en algorithme est donc de minimiser ce temps cumulé de calcul fluide. Ainsi, l'algorithme schématisé en Fig. 7 présente un nombre optimal d'appels à la remise à jour de l'état stationnaire fluide. En effet, bien que le couplage aéro-thermique soit dominant dans l'interaction flamme-paroi, il semble moins coûteux de remettre à jour l'écoulement en ayant la meilleure prédiction possible de la position de la plaque à un instant de couplage, afin de limiter le nombre d'itérations pour la remise à jour du maillage fluide.

Pour ce faire, la première étape consiste à effectuer un calcul de couplage thermo-mécanique. Une fois le couple  $(T, U)$  fixé à l’instant de couplage  $t_c + \Delta t_c$ , ces deux champs sont envoyés simultanément au fluide, dont la topologie du domaine de calcul est ainsi réactualisée avant de remettre à jour l’écoulement, au sein du couplage aéro-thermique. Une fois l’état stationnaire atteint, le code fluide renvoie un flux thermique  $q$  au module de conduction et une pression  $p$  au module mécanique, à  $t_c + \Delta t_c$ . Par simplification, cette dernière est considérée par Z-SeT comme étant constante et équivalente à la pression atmosphérique  $p_{atm}$ . Le couplage aéro-mécanique se limite donc à la simple remise à jour de la position de la plaque.

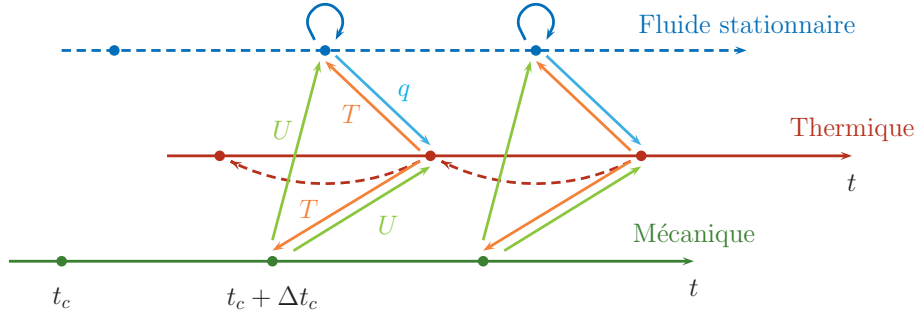


FIG. 7 – Algorithme de couplage aéro-thermo-mécanique.

## 4 Résultats numériques

### 4.1 Conditions initiales

Le temps de calcul de l’écoulement d’un fluide réactif étant très long, la solution stationnaire à l’état initial (température de plaque homogène et égale à la température ambiante  $T_{amb} = 300$  K) est déterminée à l’aide d’un calcul fluide découplé. Le modèle RANS (*Reynolds Average Navier-Stokes*) est associé aux équations de fermeture en  $k-\omega$  pour pouvoir prendre en compte la turbulence de la flamme.

La Fig. 8 présente les champs de température pour les domaines axisymétriques fluide et solide (coupe verticale le long de la demi-diagonale de la plaque) au temps  $t = 0$  s. On constate ici que la flamme calculée est du type « à coeur central froid », puisque le front de flamme vient lécher la paroi, sans se refermer avant l’impact avec la plaque. Cela signifie que les gaz froids non brûlés, en contact direct avec le matériau de la plaque en son centre, ne transmettent pas de flux de chaleur à ce niveau. Ainsi, le profil de flux à  $t = 0$  s, présenté sur la Fig. 9, montre bien un palier à flux nul entre le centre de la plaque et le point d’impact du front de flamme avec la paroi (aux alentours de  $x = 5$  cm), où se produit un pic de flux thermique.

Foat *et al.* [10] ont montré par l’expérience que la transition entre une flamme enveloppe et un coeur central froid est un processus instantané. Ces deux types de flamme peuvent être rencontrés pour un mélange de même richesse (obligatoirement riche en carburant, d’après Zhang & Bray [23]), en fonction de l’augmentation ou de la diminution du débit de carburant. En effet, dès que le coeur central froid s’est formé, il devient difficile pour l’air ambiant de diffuser à travers la zone chaude des gaz brûlés, puisque la direction prédominante de l’écoulement fait s’éloigner les gaz de la zone de stagnation.

### 4.2 Couplage aéro-thermique

Côté solide, les conditions aux limites thermiques à l’arrière de la plaque sont les suivantes :

- Flux radiatif :  $\varepsilon = 0,9$  (coefficient d’émissivité de la peinture) et  $T_e = 300$  K,
- Flux convectif (naturel) :  $h = 5$  W/m<sup>2</sup>/K et  $T_e = 300$  K.

La déformation de la plaque soumise à l’échauffement dû à la flamme n’est pas prise en compte dans ce calcul couplé aéro-thermique.

Le pas de temps fluide est de  $10^{-4}$  s, alors que le pas de temps thermique est pris égal au pas de temps de couplage, à savoir  $\Delta t_c = 30$  s. En effet, dans le but de minimiser le temps total de calcul, seule une dizaine de couplages est effectuée.



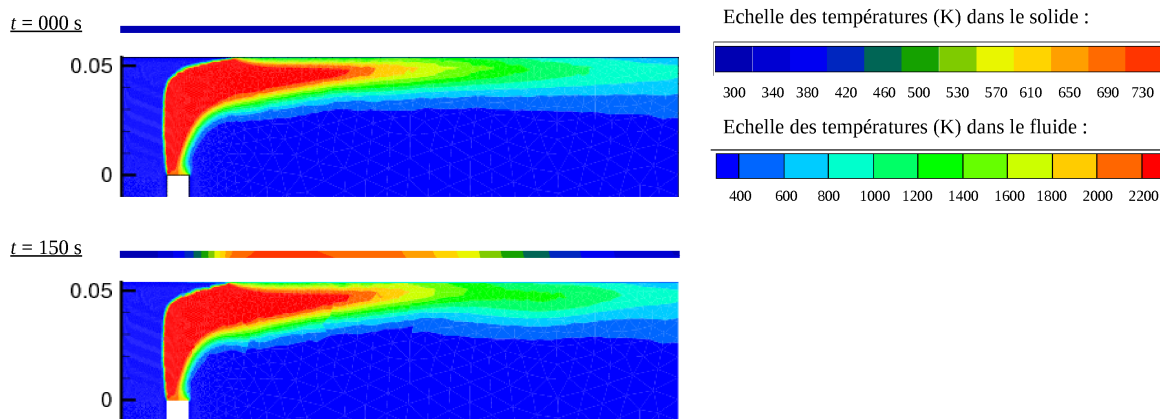


FIG. 8 – Champs de température aux instants de couplage  $t = 0$  s et  $t = 150$  s, rendus par les codes CEDRE (flamme) et Z-SeT (plaque).

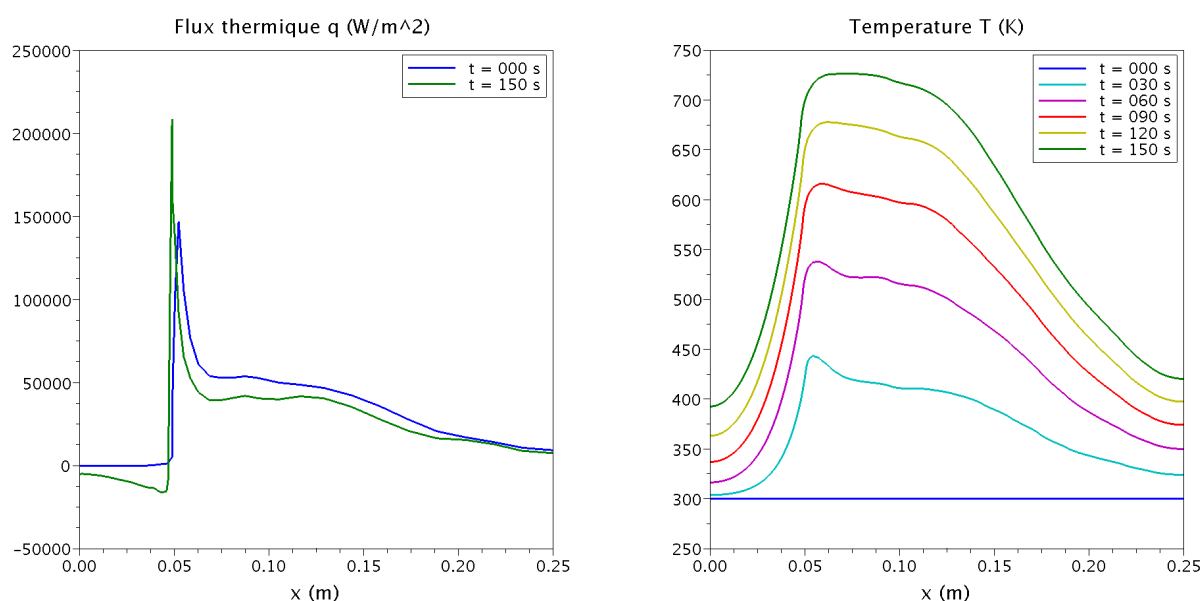


FIG. 9 – Profils de flux (code CEDRE) et de température (code Z-SeT) à la paroi.

Les résultats présentés en Fig. 8 et 9 sont ceux obtenus avec une plaque d'INCO600. Le calcul a été mené jusqu'au pas de temps  $t = 150$  s, avant d'être confronté à une instabilité de la flamme.

Au fur et à mesure de la simulation, l'effet du transfert de chaleur par conduction dans la plaque se fait ressentir. En effet, la température au centre de la plaque (qui ne reçoit aucun flux de la flamme) augmente, provoquant un transfert de chaleur qui vient réchauffer l'écoulement, comme en témoigne le flux thermique négatif au niveau du coeur central froid de la flamme.

De plus, il est important de signaler que le point d'impact avec la plaque a tendance à se rapprocher lentement de l'axe de la flamme. Ce phénomène, conjugué au réchauffement progressif de la couche limite de paroi dans le coeur froid de la flamme pourrait amener à un changement de topologie de la flamme en enveloppe fermée (d'où l'instabilité du calcul à partir de  $t = 150$  s), ce qui permettrait de retrouver les mesures de l'expérience.

### 4.3 Couplage thermo-mécanique

Les conditions aux limites thermiques sont identiques à celles énoncées pour le couplage précédent. Pour pouvoir prendre en compte l'influence du fluide réactif sur le système couplé thermo-mécanique, la distribution de flux déterminée lors du premier calcul fluide découplé (à  $t = 0$  s) est imposée à l'avant de

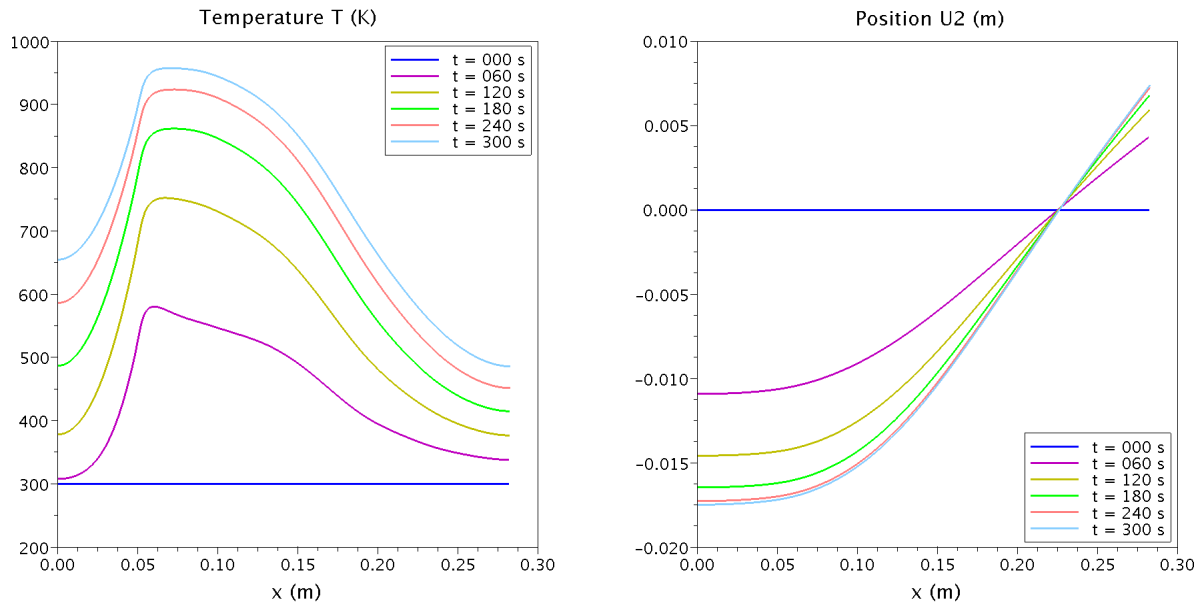


FIG. 10 – Profils de température à l’avant de la plaque et position verticale.

la plaque.

Côté mécanique, un point d’appui est placé à 22,5 cm du centre de la plaque, afin de modéliser l’effet des quatre cales en céramique sur lesquelles repose la plaque dans l’expérience.

Les pas de temps utilisés sont en accord avec le temps caractéristique de diffusion à travers une cellule du maillage. Le calcul a été mené à son terme ( $t = 300$  s).

En imposant un profil de flux constant tout au long du calcul, les champs de température en paroi, présentés en Fig. 10, se révèlent être surestimés par rapport au calcul aéro-thermique. Ceci est dû au fait que la plaque ne peut pas interagir avec le fluide dans ce couplage, pour lui transmettre de la chaleur et ainsi diminuer les niveaux de flux thermiques transmis par la flamme. Par conséquent, on s’attend également à trouver une déformation de plaque légèrement surestimée par rapport à la réalité de l’expérience.

En fait, ce raisonnement n’est pas valable ici, puisque la flamme du type « enveloppe fermée » de l’expérience produit un profil de flux de chaleur en « cloche », atteignant son maximum au centre de la plaque. Malgré cette différence, les positions calculées sont de l’ordre de grandeur de celles mesurées. A titre d’exemple, la flèche maximale pour la plaque d’INCO600 en configuration  $H/D = 1,3$  est d’environ 20 mm au centre, à partir de  $t = 150$  s.

Enfin, la température pour laquelle le phénomène de fluage n’est plus négligeable est atteinte ( $T > 828$  K, soit  $555^{\circ}\text{C}$ ), engendrant la plastification de certaines zones de la plaque. Ceci est confirmé du point de vue expérimental par l’existence d’une déformation permanente de la plaque après extinction de la flamme.

## 5 Conclusion

Le problème d’interaction flamme-paroi a été modélisé de manière axisymétrique et des résultats encourageants de couplage aéro-thermique et thermo-mécanique sont d’ores et déjà disponibles. Il reste maintenant à étudier le couplage aéro-mécanique (puis le couplage complet), ce qui induit l’utilisation d’un maillage déformable côté fluide.

Les similitudes entre jets non réactifs et réactifs (de type flamme) dans le cas de l’impact ayant été mises en évidence par Milson & Chigier [14], l’algorithme de couplage aéro-thermo-mécanique proposé sera d’abord validé sur un cas équivalent de jet chaud 2D plan, produisant un profil de flux thermique en « cloche », proche de celui de l’expérience, afin de s’affranchir de la résolution des équations de combustion et limiter ainsi le temps de calcul fluide, dimensionnant le temps total du calcul couplé.

Le calcul de couplage aéro-thermo-mécanique complet pour la résolution de l’interaction flamme-paroi sera ensuite mené, sur des domaines fluide et solide en forme de secteurs 3D.



## Références

- [1] B. Baqué, M.-P. Errera, A. Roos, *Coupling procedure for modelling transient Conjugate Heat Transfer*, Proceedings of Coupled Problems, 2009.
- [2] S. Chander, A. Ray, *Flame impingement heat transfer : A review*, Energy Conversion and Management 46, pp. 2803-2837, 2005.
- [3] S. Chander, A. Ray, *An experimental and numerical study of stagnation point heat transfer for methane/air laminar flame impinging on a flat surface*, Int. Journal of Heat and Mass Transfer 51, pp. 3595-3607, 2008.
- [4] S. Chemin, *Études des interactions thermiques fluide-structure par un couplage de codes de calcul*, PhD thesis, Université de Reims / ONERA, 2006.
- [5] H.B. Clausen, *Plate Forming by Line Heating*, PhD Thesis, Technical University of Denmark / Department of Naval Architecture and Offshore Engineering, 2000.
- [6] M.-P. Errera, B. Baqué, M. Rebay, *A numerical and experimental study of transient Conjugate Heat Transfer in a flat plate*, Proceedings of Int. Symp. on Convective Heat and Mass Transfer in Sustainable Energy, 2009.
- [7] C. Farhat, Z.G. van der Zee, P. Geuzaine, *Provably second-order time-accurate loosely-coupled solution algorithms for transient nonlinear computational aeroelasticity*, Comput. Methods Appl. Mech. Engrg. 195, pp. 1973-2001, 2006.
- [8] C.A. Felippa, K.C. Park, C. Farhat, *Partitioned analysis of coupled mechanical systems*, Comput. Methods Appl. Mech. Engrg. 190, pp. 3247-3270, 2001.
- [9] E.C. Fernandes, R.E. Leandro, *Modeling and experimental validation of unsteady impinging flames*, Combustion and Flame 146, pp. 674-686, 2006.
- [10] T. Foat, K.P. Yap, Y. Zhang, *The Visualization and Mapping of Turbulent Premixed Impinging Flames*, Combustion and Flame 125, pp. 839-851, 2001.
- [11] J.-D. Garaud, *Développement de méthodes de couplage aéro-thermo-mécanique pour la prédiction d'instabilités dans les structures spatiales chaudes*, PhD thesis, Université Pierre et Marie Curie / ONERA 2008.
- [12] S.J. Hemmati, J.G. Shin, *Estimation of flame parameters for flame bending process*, International Journal of Machine Tools & Manufacture 47, pp. 799-804, 2007.
- [13] P. Le Tallec, J. Mouro, *Fluid structure interaction with large structural displacement*, Comput. Methods Appl. Mech. Engrg. 190, pp. 3039-3067, 2001.
- [14] A. Milson, N.A. Chigier, *Studies of Methane and Methane-Air Flames Impinging on a Cold Plate*, Combustion and Flame 21, pp. 295-305, 1973.
- [15] MpCCI, *Mesh-based Parallel Code Coupling Interface*, <http://www.scai.fraunhofer.de/mpcci.html>.
- [16] R. Owston, V. Magi, J. Abraham, *Interactions of hydrogen flames with walls : Influence of wall temperature, pressure, equivalence ratio, and diluents*, International Journal of Hydrogen Energy 32, pp. 2094-2104, 2007.
- [17] S. Piperno, C. Farhat, B. Larroutourou, *Partitioned procedures for the transient solution of coupled aeroelastic problems - part I*, Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering 124, pp. 79-112, 1995.
- [18] M.J. Remie, M.F.G. Cremers, K.R.A.M. Schreel, L.P.H. de Goey, *Analysis of the heat transfer of an impinging laminar flame jet*, International Journal of Heat and Mass Transfer 50, pp. 2816-2827, 2007.
- [19] H. Roinard, F. Micheli, P. Reulet, P. Millan, *Transferts thermiques lors de l'interaction flamme paroi*, Actes de congrès Société Française de Thermique, 2007.
- [20] J.G. Shin, J.H. Lee, *Nondimensionalized Relationship Between Heating Conditions and Residual Deformations in the Line Heating Process*, Journal of Ship Research 46 4, pp. 229-238, 2002.
- [21] Z. Zhao, T.T. Wong, C.W. Leung, *Impinging premixed butane/air circular laminar flame jet - influence of impingement plate on heat transfer characteristics*, International Journal of Heat and Mass Transfer 47, pp. 5021-5031, 2004.
- [22] Z. Zhao, T.T. Wong, C.W. Leung, *Influences of material properties on thermal design of impinging flame jets*, Material and Design 29, pp. 28-33, 2008.
- [23] Y. Zhang, K.N.C. Bray, *Characterization of Impinging Jet Flames*, Comb. and Flame 116, pp. 671-674, 1999.