

# Exploitation d'une méthode de couplage de codes en aérothermique sur un cas de convection forcée instationnaire.

Vincent GALOUL\*, Pierre MILLAN

ONERA /DMAE

2 avenue Edouard Belin – BP 4025 – 31055 Toulouse Cedex 4

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

**Résumé** - Une méthode de couplage de solveur en aérothermique est exploitée pour un cas de convection forcée d'air sur une plaque plane d'épaisseur finie. L'instationnarité du problème réside dans la dynamique de l'air qui est accéléré. Ce travail a pour but de présenter une méthode de résolution d'un problème mettant en jeu deux physiques ayant des temps caractéristiques différents. Les résultats concernant la couche limite dynamique et l'évolution de la température à la surface du matériau sont présentés et différents choix de paramètres liés à la méthode de couplage sont comparés.

## Nomenclature

|            |  |                             |
|------------|--|-----------------------------|
| $\phi$     | densité de flux de chaleur, $W.m^{-2}$ | <i>Indices et exposants</i> |
| $h$        | paramètre numérique, $W.m^{-2}.K^{-1}$ | $f,s$ fluide, solide        |
| $\tau$     | temps caractéristique, $s$             | $a$ solveur Acacia          |
| $\Delta t$ | pas de temps numérique, $s$            | $c$ solveur Charme          |
| $T_i/a$    | température imposée/ambiante, $K$      | $N$ indice d'itération      |

## 1. Introduction

Le dimensionnement des moteurs d'avion nécessite une connaissance précise des champs de températures afin de limiter les marges de conception et ainsi optimiser leurs performances. Les températures les plus importantes sont atteintes au décollage, phase de vol particulièrement instationnaire, et le développement d'un outil numérique prenant en charge des phénomènes aérothermiques instationnaires est très sollicité. L'élaboration d'une méthode numérique couplant convection et conduction est d'autant plus demandée que les études théoriques sont peu appropriées aux problèmes rencontrés, que ce soit dans l'aéronautique ou dans l'industrie. Les études des transferts de chaleur conjugués sur plaques planes ont principalement concernées les cas d'écoulements laminaires en régimes stationnaires [1] ou en régimes instationnaires sur plaque semi infinie [2] et infinie [3] mise instantanément en mouvement à vitesse supersonique constante.

Une partie des travaux effectués sur les méthodes de couplages numériques ont concerné des applications bien particulières comme le refroidissement sur les configurations des turbines [4]. Ces méthodes sont malheureusement destinées à une géométrie unique bien définie. D'autres méthodes [5], dont celle utilisée dans cette étude, ont été élaborées pour appréhender des géométries quelconques. Les travaux présentés ont pour objectif l'exploitation de la méthode de couplage existante sur un cas de convection forcée instationnaire dont les temps caractéristiques entre la dynamique du fluide et la thermique du solide sont différents. La géométrie simple du problème étudié permettra par la suite une analogie expérimentale pour mener une validation de la méthode numérique de couplage.

## 2. Présentation des simulations

### 2.1. Méthode de couplage

La méthode de couplage est intégrée dans la plateforme de calcul CEDRE de l'ONERA et concerne les solveurs Navier Stokes (Charme) pour les écoulements fluides et de diffusion thermique (Acacia) pour les solides (figure (1.a)). La particularité du coupleur est qu'il n'interagit pas directement avec les deux codes, il sert en effet de relais d'informations entre les deux permettant l'équilibre des températures et l'égalité des flux de chaleur aux interfaces fluides/structures à l'instant d'échange. Ce modèle est entièrement indépendant des hypothèses de discrétisation temporelle relative à chacun des solveurs (figure (1.b)) et s'adapte donc à des types de problèmes différents. En introduisant deux paramètres purement numériques, positifs et homogènes à des coefficients d'échange, il est possible d'écrire un modèle exactement équivalent aux deux équations de conservation de flux et de température aux interfaces. Pour les instants compris entre deux itérations CEDRE  $N$  et  $N+1$  et à chaque cellule de l'interface, le système suivant est appliqué :

$$\begin{cases} \Phi_{n,f}(x,t) = -\Phi_{n,s}(x,t^N) + h_f [T_f(x,t) - T_s(x,t^N)] \\ \Phi_{n,s}(x,t) = -\Phi_{n,f}(x,t^N) + h_s [T_s(x,t) - T_f(x,t^N)] \end{cases} \quad (1)$$

Les flux et températures sont constants entre deux itérations CEDRE et imposés en tant que conditions aux limites. Les coefficients  $h$  sont utilisés comme pondération entre une condition de Neumann ( $h$  petit) et une condition de Dirichlet ( $h$  grand).

### 2.2. Géométrie et conditions aux limites

La géométrie 2D considérée et présentée figure (2) est celle d'une plaque plane dont la température en face arrière est imposée à 323 K de manière uniforme et constante, et refroidie en face avant par un écoulement d'air à 298 K. L'air est à vitesse et température uniforme en entrée de domaine. Une longueur d'entrée est dédiée au développement d'une couche limite turbulente. L'instationnarité du problème réside dans la dynamique de l'écoulement, la vitesse de l'air évolue linéairement en 10 secondes entre deux valeurs paliers fixées à  $5 \text{ m.s}^{-1}$  et  $10 \text{ m.s}^{-1}$ . Le choix du matériau est établi en fonction de ses propriétés d'émissivité thermique afin de faciliter les mesures avec une caméra infrarouge et de sa sensibilité thermique aux variations de vitesse de l'air se traduisant par un nombre de Biot proche de l'unité. Un matériau PEEK (Poly-Ether-Ether-Cétone) est choisi. Il possède une émissivité de 0.9, une masse volumique de  $1309 \text{ kg.m}^{-3}$ , une conductivité de  $0,265 \text{ W.m}^{-1}.K^{-1}$  et une capacité calorifique de  $1082 \text{ J.K}^{-1}$ . Le temps caractéristique thermique du matériau est de 342 secondes pour une épaisseur de 8 mm.

## 3. Calcul stationnaire

Les résultats de la simulation stationnaire sont présentés dans ce paragraphe. Ils jouent un rôle important car ils constituent l'état initial de la simulation instationnaire. Dans un premier temps, seul le problème de l'écoulement d'air est résolu puis, une fois le calcul convergé, le couplage thermique est effectué.

### 3.1. Écoulement fluide

Une vitesse uniforme et constante de  $5 \text{ m.s}^{-1}$  est imposée en entrée de domaine. Le schéma temporel est implicite avec une méthode de résolution de type GMRES, le modèle de

turbulence utilisé est  $k-l$  avec un modèle bas Reynolds. Aucun modèle de paroi n'est nécessaire car le maillage est suffisamment raffiné à la paroi et une centaines de cellules composent la couche limite. Après 10000 itérations effectuées avec  $\Delta t_c = 10^{-4} s$ , les résidus perdent trois ordres de grandeur. Les résultats sont cohérents avec la théorie, le coefficient de frottement est comparé à la loi de Blasius figure (3.a), le facteur de forme et l'évolution spatiale de la couche limite en variables de paroi sont présentés figures (3.b) et (3.c).

### 3.2. Couplage thermique

Le temps caractéristique du solide étant élevé, les pas de temps sont pris à  $\Delta t_{a,c} = 1 s$ . Cela a cependant pour effet la dégénération de la solution du fluide. Un pas de temps local est donc utilisé dans le domaine fluide et une limitation de 1% des états entre deux itérations est imposée. La température initiale du solide est la moyenne arithmétique des températures imposées et ambiante afin d'approcher l'état initial et d'accélérer la convergence. La solution souhaitée étant stationnaire, plusieurs méthodes aboutissant à l'état final sont envisageables, et seule la vitesse de convergence importe pourvue que la solution finale soit correcte. Deux simulations présentant le même nombre d'itérations et un coefficient  $h_f$  différent sont montrées figure (4) à l'aide des variable adimensionnées suivantes, où  $L$  et  $x_0$  représentent la longueur de la plaque et l'abscisse de sa position :

$$\bar{T} = \frac{T(x,t) - T_a}{T_i - T_a} \quad \text{et} \quad \bar{x} = \frac{x - x_0}{L} \quad (2)$$

Le coefficient relatif au solide est tel que  $h_s = 20 W.m^{-2}.K^{-1}$  et n'a pas une grande influence sur la vitesse de convergence. On remarque néanmoins que le coefficient  $h_f$  est prépondérant sur la convergence et que l'état stationnaire est atteint plus rapidement avec un  $h$  de l'ordre du coefficient de convection physique. En utilisant un très grand  $h_f$ , ce qui revient à une condition de Dirichlet avec le solide imposant sa température au fluide. La solution s'éloigne de l'état stationnaire lors des premiers instants. La convergence est ensuite relativement lente.

## 4. Calcul instationnaire

Le calcul est initialisé avec les résultats issus de la simulation stationnaire. Les conditions aux limites imposées à l'interface sont une condition de Neumann pour le solide et une condition de Dirichlet pour le fluide. Une condition homogène variant temporellement est imposée en entrée de domaine comme le schématise la figure (2). La durée nécessaire pour aboutir à un état final stabilisé est imposée par le solide, le temps de calcul doit en effet aller au delà de  $2\tau_s$  soit 700s, ce qui implique un compromis entre coût de calcul et précision des résultats. La durée de calcul est décomposée en deux phases distinctes. Une phase transitoire à la fois dynamique et thermique correspondant à l'accélération de l'air, exigeante en terme de coût de calcul du point de vue du pas de temps, et une phase d'établissement thermique qui nécessite un temps de calcul important. Le pas de temps est donc ajusté en fonction de la phase simulée. La figure (5) présente quatre simulations faites avec des pas de temps différents durant la première phase transitoire. Les résultats sont reportés toutes les 2 secondes durant les 10 secondes d'accélération. On remarque un écart grandissant entre les deux simulations les plus précises, atteignant un maximum de 0.02% une fois l'accélération terminée. Un grand pas de temps donne une solution fautive avec une allure instable alors que la solution paraît stable lors de la deuxième phase, comme le montre la figure (6). Un pas de

temps de  $\Delta t_{a,c} = 10^{-3} s$  est approprié pour obtenir une solution relativement précise durant la première phase. Un pas de temps de  $\Delta t_{a,c} = 10^{-2} s$  permet d'obtenir des résultats satisfaisants en ce qui concerne la deuxième phase.

## 5. Conclusion

Les simulations présentées ont permis l'exploitation d'une méthode de couplage implantée dans CEDRE pour un cas de convection forcée instationnaire mettant en jeu des temps caractéristiques différents. La décomposition en étapes successives et l'ajustement des pas de temps ont permis un compromis entre coût de calcul et précision des résultats. Des résultats expérimentaux sont souhaités afin de mener une étude comparative. Une expérience mettant en jeu moyenne de phase de mesures de couche limite et températures de surface sont actuellement à l'étude.

### Références

- [1] A.V. Luikov, Conjugate convective heat transfer problems, *Int. J. Heat and Mass Transfer*, 17 (1974), 257-265.
- [2] A. Pozzi et R. Tognaccini, Time singularities in conjugated thermo-fluid-dynamic phenomena, *J Fluid Mech.*, 538 (2005), 361-376.
- [3] A. Pozzi, A self-similar unsteady flow with conjugated heat transfer, *Int. J. Heat and Mass Transfer*, (2008), 257-265.
- [4] D.L. Sondak et D.J. Dornay, Simulation of coupled unsteady flow and heat conduction in turbine stage, *J. of Prop. and power*, (2000).
- [5] M-P. Errera, G. Chaineray et S. Chemin, Etude du transitoire thermique dans un matériau via un couplage convection-conduction, *SFT 2007*, Les Embiez, 29mai -1<sup>er</sup> juin.

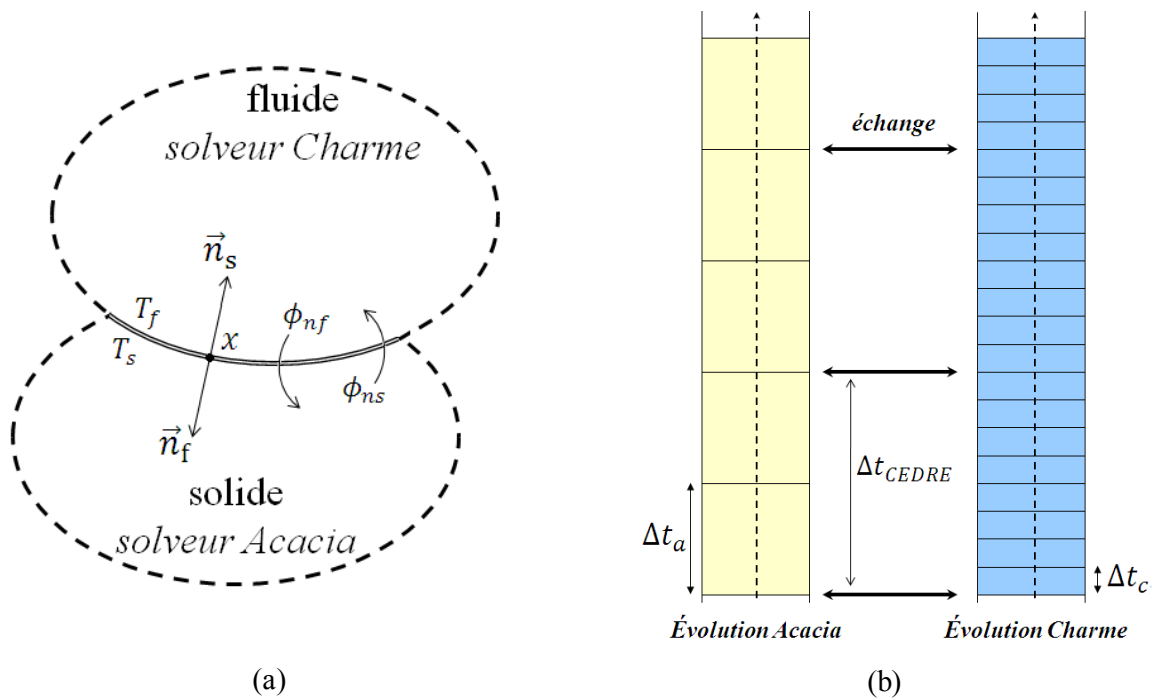


Figure 1 : (a) Interaction fluide/structure aux interfaces, (b) Intégration temporelle du couplage

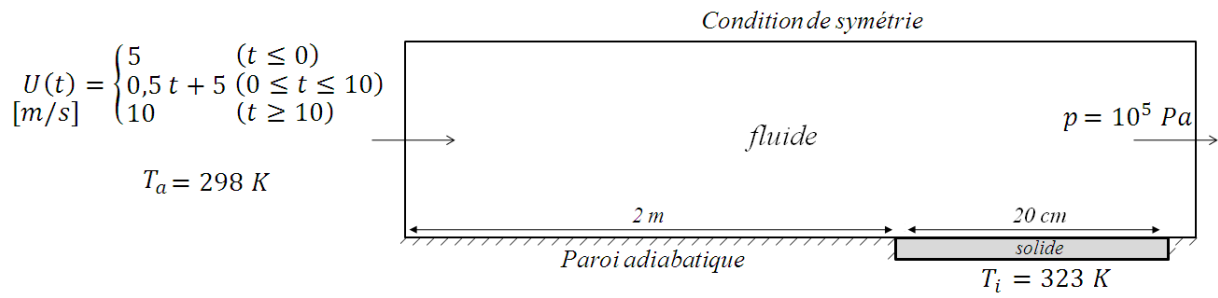


Figure 2 : Géométrie et conditions aux limites

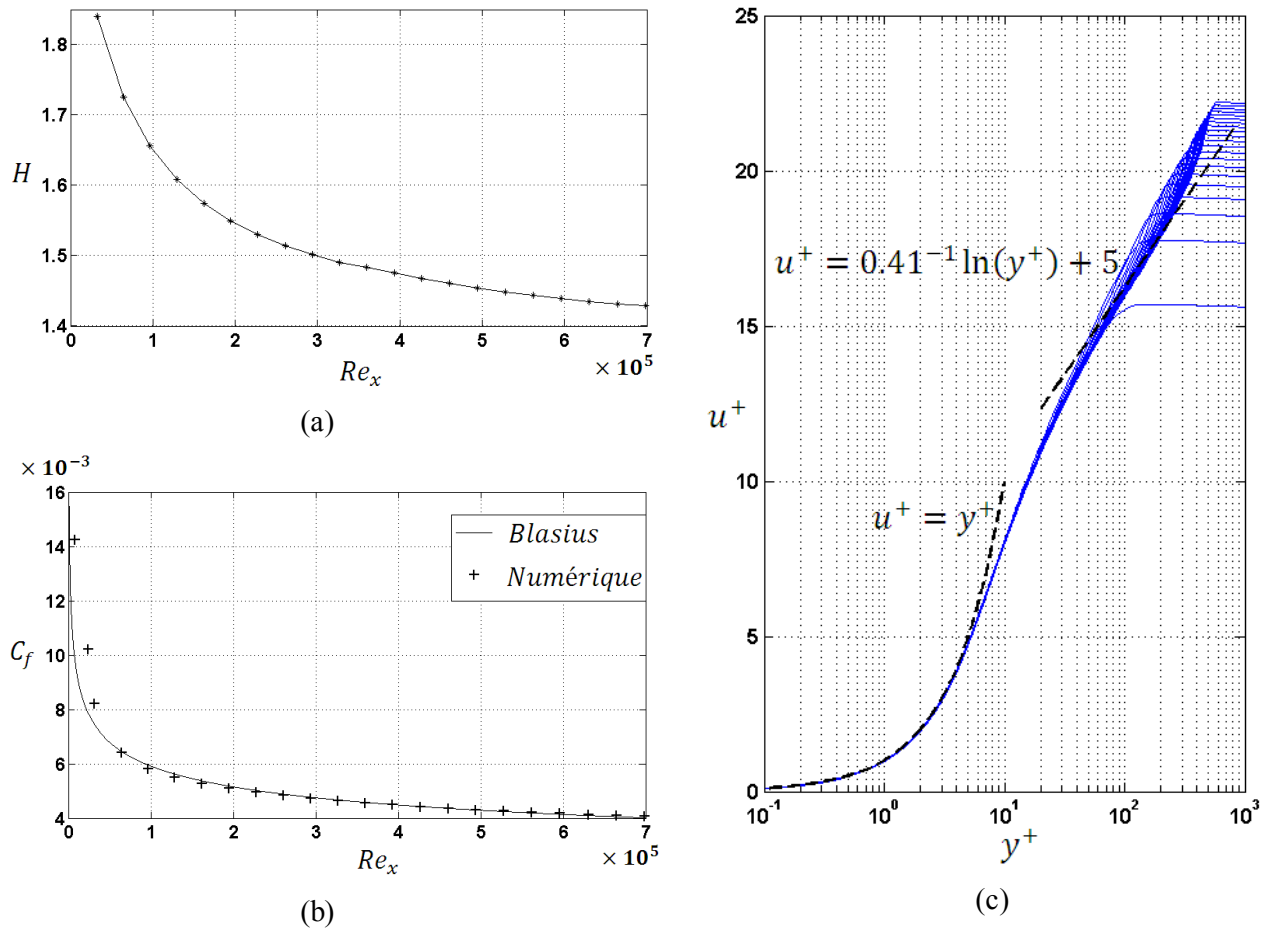


Figure 3 : Évolution spatiale de couche limite

- (a) Évolution du facteur de forme en fonction du nombre de Reynolds
- (b) Comparaison de l'évolution du coefficient de friction avec la loi de Blasius
- (c) Évolution de la couche limite en variables de paroi tout les 10 cm

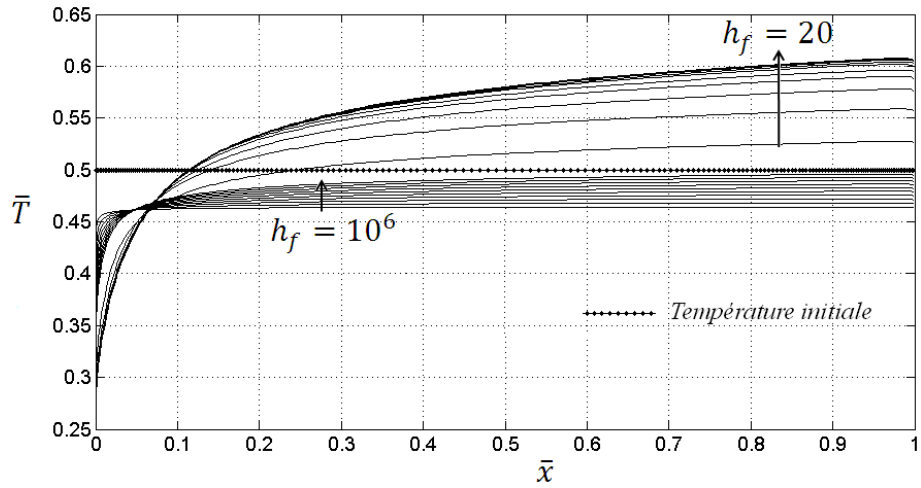


Figure 4 : Comparaison de l'évolution de la température à la surface du solide toutes les 1000 itérations pour deux simulations

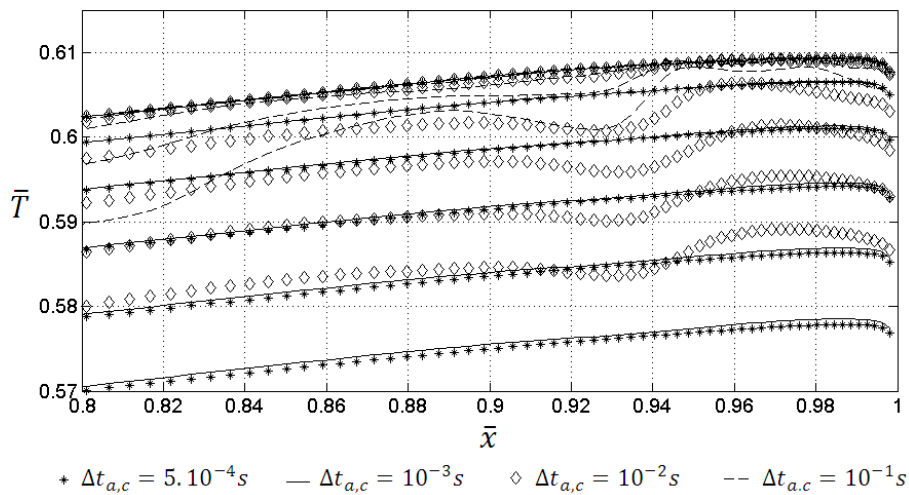


Figure 5 : Comparaison de différentes simulations instationnaires durant les dix premières secondes

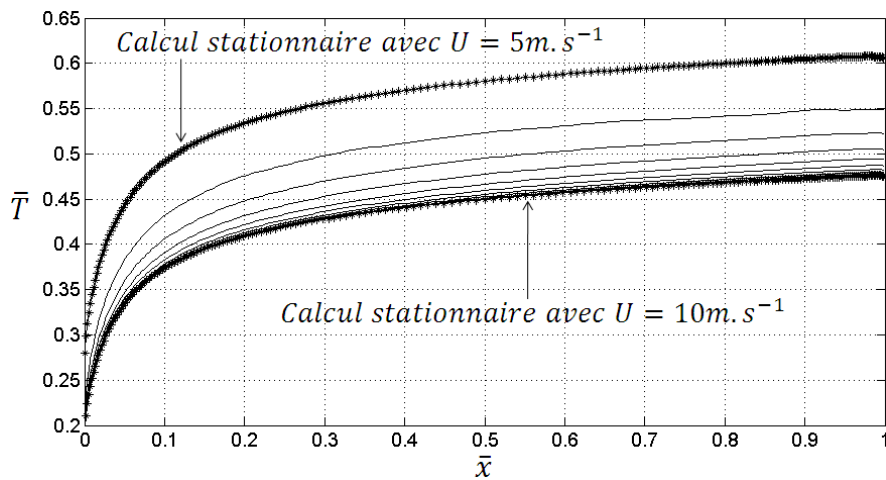


Figure 6 : Résultats d'un calcul instationnaire avec  $\Delta t_{a,c} = 10^{-1} s$  rapportés toutes les 100 secondes