

Etude du transitoire thermique dans un matériau via un couplage convection-conduction

Marc-Paul ERRERA^{1*}, Gilles CHAINERAY¹, Sébastien CHEMIN²

¹Département de Simulation Numérique des Ecoulements et Aéroacoustique (DSNA/ONERA)

²Département du Traitement de l'Information et Modélisation (DTIM/ONERA)

ONERA – 29, Avenue de la Division Leclerc – 92322 Châtillon Cedex - France

*(auteur correspondant : marc.errera@onera.fr)

Résumé - Les travaux que nous présentons dans cet article s'intéressent à la description du transitoire thermique dans un solide soumis à un flux convectif, à l'aide d'une simulation numérique couplée fluide-solide. L'algorithme de couplage consiste à faire interagir un milieu solide instationnaire avec un milieu fluide constitué d'une suite d'états permanents. Il assure l'égalité des flux et des températures sur l'interface commune entre les 2 milieux, à chaque instant de couplage. La validité de cette approche est confirmée par un calcul turbulent sur une plaque plane soumise à des contraintes thermiques extrêmes.

Nomenclature

h	coefficient d'échange, $W.m^{-2}.K^{-1}$	<i>Symboles grecs</i>	
k	conductivité thermique, $W.m^{-1}.K^{-1}$	ϕ	densité de flux de chaleur, $W.m^{-2}$
L	longueur de la plaque, m	<i>Indices et exposants</i>	
Re	nombre de Reynolds	f	fluide
Δt	pas de temps solide, s	i	indice temporel
T	température, K	p	paroi
U	vitesse moyenne, $m.s^{-1}$	s	solide

1. Introduction

Le dimensionnement thermique d'un certain nombre de pièces de systèmes soumis à des contraintes extrêmes requiert la connaissance précise de la réponse thermique des matériaux exposés à de nombreuses sollicitations externes qui évoluent dans le temps (convection, rayonnement, ablation, érosion, ...). Il existe une forte interaction entre cette réponse thermique au cours du temps et les sollicitations qui en sont à l'origine. Ces phénomènes peuvent être appréhendés sur le plan numérique à l'aide d'un couplage de codes de calcul dédiés. Nous allons nous intéresser dans cet article au couplage aéro-thermique instationnaire. Le couplage permet de mettre directement à profit des codes existants, mais nécessite toutefois le développement de méthodologies performantes, principalement aux interfaces séparant les différents milieux, pour la résolution précise et robuste de problèmes multi-physiques.

Le couplage aéro-thermique stationnaire a été traité à de nombreuses reprises. Il consiste, en couplant un solveur Navier-Stokes à un solveur de conduction, à rechercher un état stationnaire dans les milieux fluide et solide. Nous avons d'ailleurs déjà participé au développement de méthodes numériques de ce type [1,2]. Bien que s'appuyant sur les mêmes outils, les travaux que nous présentons ici sont d'une autre nature. Nous nous intéressons à présent au couplage instationnaire et plus précisément à la description détaillée du transitoire thermique dans un solide soumis à un flux convectif.

2. Présentation du problème

2.1. Contexte et objectifs

Dans un grand nombre d'applications, la description du transitoire thermique d'une structure soumise aux sollicitations d'un fluide est capitale. Le dimensionnement thermique des propulseurs à propergol solide ou des systèmes propulsifs en général illustrent parfaitement cet enjeu. Notre objectif dans cet article est d'élaborer une méthode de couplage instationnaire pouvant répondre à ce besoin.

Il existe différentes approches pour aborder ce problème. La principale difficulté provient de la disparité des fréquences caractéristiques mises en jeu, une évolution significative de l'état thermique de la structure correspondant, dans la plupart des cas, à un temps extrêmement long du point de vue du fluide. Ainsi, en adoptant comme échelle de temps commune un temps lié au milieu fluide, on aboutit à des simulations numériques très coûteuses. En revanche, en choisissant un temps lié à la conduction dans le solide, il est alors légitime de considérer que le fluide se met instantanément à l'équilibre compte tenu de la différence des fréquences caractéristiques des deux milieux, hypothèse qui permet une économie de temps considérable. D'autre part, il est important de souligner que les conditions aérodynamiques ne sont généralement pas connues sur la durée d'une mission ou d'un vol, soit plusieurs minutes voire plusieurs heures. Nous devons donc également tenir compte de cette contrainte avant d'élaborer un algorithme de couplage. A notre connaissance, ce sujet n'a été que très peu abordé dans la littérature.

2.2. Brève présentation des logiciels utilisés

Pour effectuer un calcul couplé, on fait communiquer deux codes de calcul à travers une surface commune appelée interface de couplage. Dans le cadre du couplage fluide-structure, on met en relation le code de mécanique des fluides MSD [3] avec le code de mécanique des structures ZeBuLoN [4]. Ces deux logiciels ont été développés à l'ONERA. Le code MSD résout les équations de Navier-Stokes moyennées au sens de Reynolds pour un mélange de gaz parfaits. Il emploie des maillages structurés multidomaines et des schémas décentrés d'ordre deux. Un modèle de turbulence classique à 2 équations (modèle *K-L*) a été utilisé dans cette étude. En ce qui concerne ZeBuLoN, seul le solveur de conduction a été mis en œuvre ici. Le principe du couplage réside en un calcul simultané de ces codes avec des échanges réguliers d'informations (flux de chaleur, température, pression, ...). Chaque code évolue indépendamment l'un de l'autre et effectue des échanges conduisant à une réactualisation de ses conditions aux limites. Nous avons utilisé la bibliothèque de couplage *MpCCI (Mesh-based Code Coupling Interface)* [5] pour faire communiquer les codes. Il s'agit d'un outil qui gère les interfaces couplées entre deux ou plusieurs logiciels, sans se préoccuper de la nature du problème traité.

3. Algorithme de couplage en transitoire

3.1. Couplage de référence

La différence de temps caractéristique entre le solide et le fluide nous oblige à mettre en œuvre un algorithme de couplage très particulier filtrant les hautes fréquences de manière à obtenir une solution assez précise en un temps de calcul raisonnable. Cette approximation nous conduit à définir un algorithme de référence caractérisé par des couplages à chaque pas

de temps solide. Dans ce processus, représenté sur la figure 1, les points noirs du haut correspondent à une suite d'états stationnaires 'fluides' \mathcal{F} , chacun de ces états étant associé à une condition dans le solide. Cet algorithme, constitué de couplages systématiques, peut encore conduire à des temps de calcul importants, surtout si l'on s'intéresse au transitoire thermique sur une longue période dans une configuration réaliste qui peut par ailleurs évoluer au cours du temps. Enfin, comme nous l'avons déjà précisé, on ne dispose parfois que des conditions aérodynamiques à des temps prédéterminés grâce à des relevés expérimentaux durant une mission. On va donc présenter un algorithme « dégradé » pouvant s'adapter aux contraintes que l'on vient de mentionner puis comparer ses performances, en termes de précision et de rapidité, sur le cas d'école de la plaque plane.

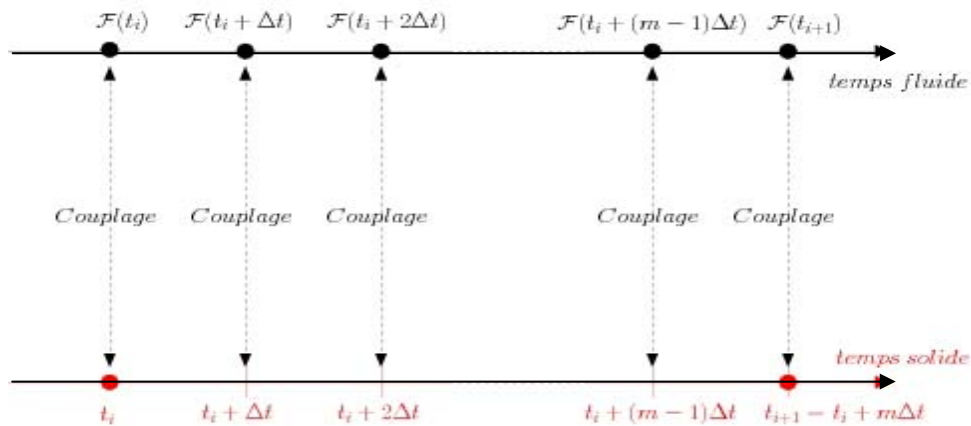


Figure 1 : Couplage de référence

3.2. Couplage dégradé

Dans cette approche, on laisse le solide évoluer, sans réactualiser systématiquement ses conditions aux limites par un couplage avec le fluide. Cette réactualisation intervient à des instants choisis soit par l'utilisateur, soit au moyen d'un critère physique adapté. L'objectif est de faire évoluer un état connu du système couplé, en l'occurrence au temps t_i et de déterminer l'évolution transitoire de la structure entre t_i et t_{i+1} . La contrainte que doit satisfaire la méthode de couplage est d'aboutir à l'égalité des températures et des flux de chaleur entre les milieux fluide et solide à tous les instants t_i .

L'algorithme mis en place pour satisfaire ces contraintes et conditions est présenté sur la figure 2 pour un cycle entre t_i et t_{i+1} . Ce cycle peut se décomposer en 4 étapes :

- ① *Calcul instationnaire dans la structure* entre t_i et t_{i+1} .
- ② *Transfert des données pariétales du solide* $\mathcal{G}_s(t_{i+1})$ vers le fluide.
- ③ *Détermination de l'état stationnaire* $\mathcal{F}(t_{i+1})$ dans le fluide via un calcul Navier-Stokes.
- ④ *Retour à l'instant* t_i *en transférant les quantités pariétales* $\mathcal{G}_f(t_{i+1})$ *du fluide obtenues à l'étape précédente. On effectue alors un nouveau calcul de conduction transitoire entre* t_i *et* t_{i+1} .

Les 4 étapes précédentes constituent un cycle de couplage entre les instants t_i et t_{i+1} . On répète ce cycle jusqu'à obtenir l'égalité des flux et des températures sur l'interface commune fluide-solide à l'instant t_{i+1} .

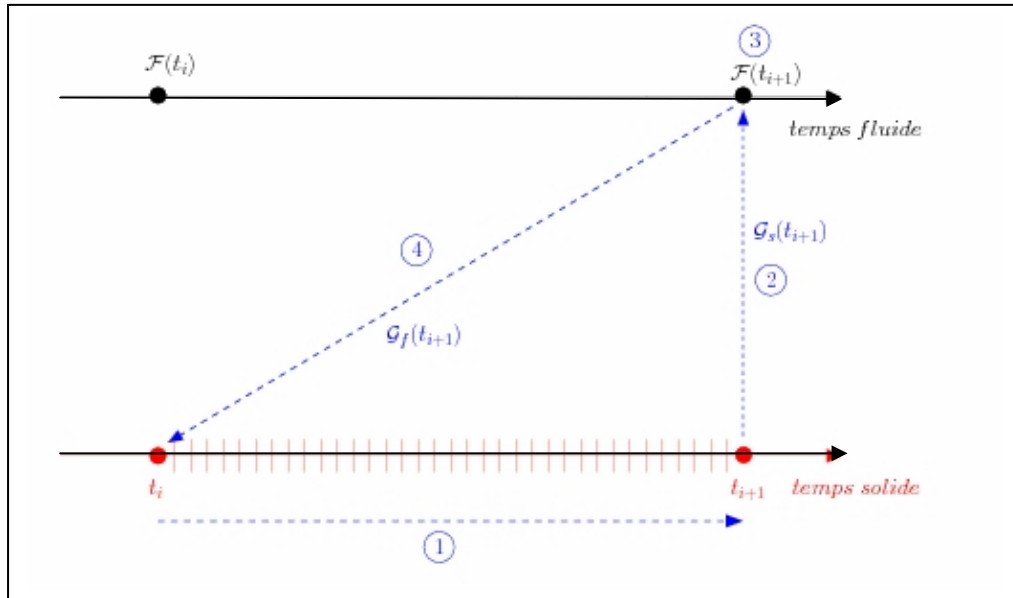


Figure 2 : Cycle de couplage entre 2 instants fluide

A ce stade, quelques précisions peuvent être nécessaires. En premier lieu, soulignons le fait que l'on doit effectuer un certain nombre d'allers-retours ou cycles jusqu'à obtenir les conditions d'interface désirées. Ce nombre est d'autant plus élevé que les couplages sont peu fréquents. D'autre part, notons que les conditions aux limites dans le solide sont obtenues par extrapolation temporelle lors du premier passage puis par interpolation lors des passages suivants. Précisons enfin que l'on ne passe pas continûment de t_i à t_{i+1} , côté fluide. Il n'est en effet pas exclu que la géométrie évolue entre ces instants. Les états 'fluides' sont ainsi le plus souvent constitués par une suite d'états prédéterminés, indépendants les uns des autres.

L'algorithme de couplage dont la caractéristique principale est qu'il s'appuie sur un processus d'allers-retours jusqu'à l'obtention de la convergence des quantités pariétales s'applique aussi bien au couplage dégradé ne comportant que peu d'états fluides qu'au couplage de référence. En effet, dans ce dernier cas, même si les échanges sont systématiques, ils ne peuvent assurer en une fois l'égalité des flux et températures.

Les quantités pariétales transmises par le milieu solide et fluide, notées respectivement \mathcal{G}_s et \mathcal{G}_f , contiennent la température T_p , le flux de chaleur ϕ_p et le coefficient d'échange h_f . Les relations d'interface sont constituées par une condition de Dirichlet côté fluide et une condition de Neumann côté solide :

$$T_p^f(t_{i+1}) = T_p^s(t_{i+1})$$

$$\text{avec } t_i < t \leq t_{i+1}$$

$$\phi_p^s(t) = h_f(t)(T_{ad}(t) - T_p^s(t))$$

La condition de Dirichlet, appliquée au fluide à chaque couplage, permet d'obtenir un état convergé dans ce milieu. La condition de Neumann nécessite des interpolations entre les 2 instants de couplage. Ces interpolations sont effectuées sur le coefficient d'échange h_f transmis par le fluide, sur la température pariétale T_p calculée par le solide ainsi que sur la température adiabatique de frottement T_{ad} .

4. Application à la plaque plane turbulente

4.1. Caractéristiques du calcul

On désire étudier le comportement du couplage dégradé présenté dans la section précédente par rapport à un couplage de référence. On adopte pour cela la géométrie simplifiée de la plaque plane ($k_s = 35 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$) soumise à des échanges thermiques violents, la plaque initialement à 300K interagissant avec un fluide à 3000K . Les principales caractéristiques de ce calcul sont résumées sur la figure 3. On trouvera dans [6], les détails complets de cette simulation numérique couplée.

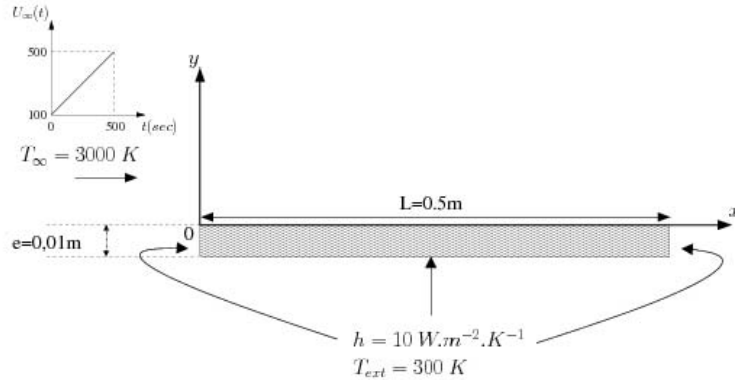


Figure 3 : Principales caractéristiques du calcul couplé

On note la présence d'une montée en régime de l'écoulement dont la vitesse en amont varie linéairement de 100 à 500 m/s au cours des 500 s que dure cette simulation ($Re_L \approx 10^5$ à $t=500 \text{ s}$). Les conditions génératrices sont placées en $x=0$, ce qui implique l'existence d'une zone de transition. Les données de ce calcul, fournies par Snecma Propulsion Solide, sont proches de celles que l'on rencontre dans les propulseurs à propergol solide où l'étude des interactions entre les produits de combustion et les matériaux composites du propulseur est un enjeu majeur. Il est facile de montrer qu'en adoptant une taille de maille en proche paroi égale à 1 mm , le temps caractéristique de la diffusion dans le solide est alors de $\Delta t = 0,5 \text{ s}$. Pour le calcul dégradé, on a imposé arbitrairement un nombre de couplages égal à 10 . Ce qui donne :

- calcul de référence* : période de couplage = $0,5 \text{ s}$ - nombre de couplages = 1000
- calcul dégradé* : période de couplage = 50 s - nombre de couplages = 10

4.2. Résultats

La figure 4 présente l'évolution de la température pariétale, en différentes abscisses par rapport au bord d'attaque, sur les 300 premières secondes de simulation. Elle permet d'appré-

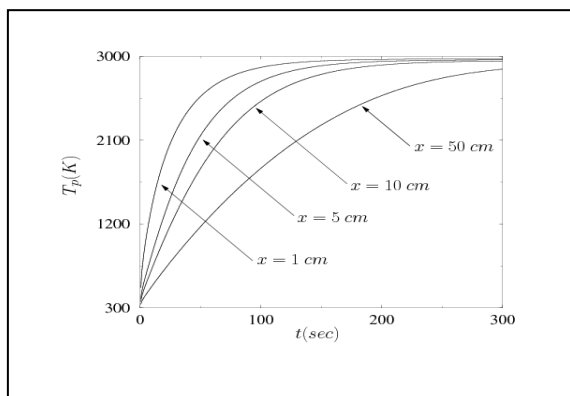


Figure 4 : Température par le calcul de référence

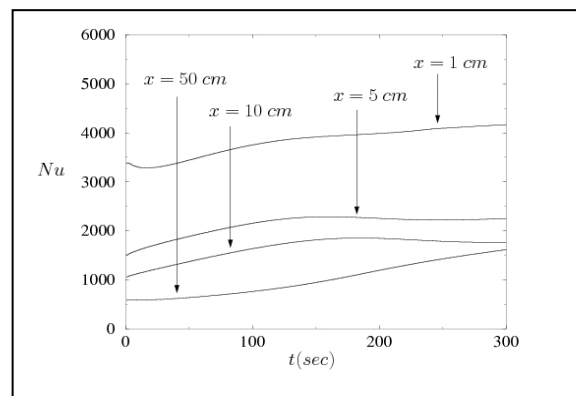


Figure 5 : Nusselt par le calcul de référence

cier le réchauffement de la plaque au cours du temps. Les évolutions du nombre de Nusselt (figure 5) montrent une augmentation de la convection dans les premiers instants, puis un équilibre avec la diffusion. Les températures du calcul dégradé (figure 6) sont très proches des résultats obtenus par le calcul de référence comme le confirme le tracé des écarts relatifs de la figure 7, ces écarts étant toujours inférieurs à 2%. On peut en déduire que les interpolations utilisées dans le calcul dégradé n'affectent quasiment pas la réponse en température de la structure et ceci est probablement dû à la faible variation temporelle du Nusselt (figure 5).

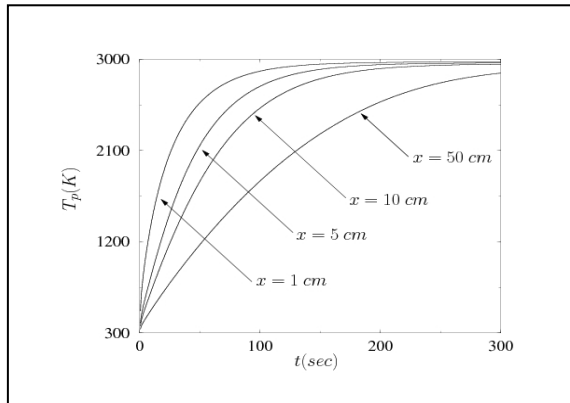


Figure 6 : Température par le calcul dégradé

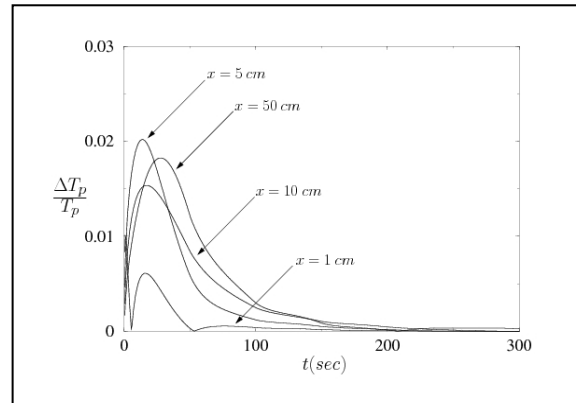


Figure 7 : Ecart relatif de température

Nous avons effectué 1000 couplages et 2877 cycles dans le calcul de référence, 10 couplages et 81 cycles dans le calcul dégradé. Le coût a ainsi été divisé par un facteur 35 pour une perte de précision toujours inférieure à 2%. Ces chiffres mettent en évidence tout l'intérêt d'un calcul dégradé et ces résultats très prometteurs nous permettent d'aborder dans d'excellentes conditions l'étude du transitoire thermique dans des matériaux de systèmes industriels complexes (propulseurs à propergol solide, aubes de turbine, ...) sur une période couvrant l'ensemble d'une mission.

5. Conclusion

La méthode de couplage que nous avons présentée permet d'analyser le transitoire thermique durant des temps très longs à l'aide d'un couplage fluide-structure. Nous avons vu qu'un algorithme dégradé ne pénalise pas trop la qualité de la solution, ce qui est encourageant dans la mesure où les calculs de mécanique des fluides sont généralement coûteux. L'algorithme semble ainsi bien adapté aux besoins industriels. Il sera cependant nécessaire d'effectuer d'autres essais numériques à l'aide de conditions génératrices variées avant de conclure définitivement.

Références

- [1] M-P. Errera, S. Chemin, A fluid-solid thermal coupling applied to an effusion cooling system . 34th AIAA Fluid Dynamics Conference and Exhibit AIAA Paper 2004-2140, (Portland,2004).
- [2] M-P. Errera, S.Chemin, M.Lachi, Calculs couplés optimisés appliqués à la multiperforation, SFT 2006 , (Ile de Ré 11-19 mai 2006).
- [3] D. Dutoya, M-P. Errera, Une décomposition formelle du Jacobien des équations d'Euler. Application à des schémas numériques décentrés. *La Recherche Aérospatiale* n°1992-1, (1992).
- [4] <http://www.nwnumerics.com/>
- [5] M.G. Hackenberg, P.Post, R.Redler, B.Steckel, MpCCI, Multidisciplinary applications and multigrid, Proceedings ECCOMAS 2000, CIMNE, (Barcelona 11-14 sept. 2000).
- [6] S. Chemin Etude des interactions fluide-structure par un couplage de codes de calcul. *Thèse de l'Université de Reims Champagne-Ardenne*, soutenue le 18 déc. 2006.