

COUPLAGE AÉRO-THERMIQUE TRANSITOIRE : MÉTHODE NUMÉRIQUE ET APPLICATIONS

Marc-Paul Errera^{*§}, Jean-Didier Garaud^{**}, Frédéric Feyel^{**}, Arjen Roos^{**}
^{*}Département Simulation Numérique des Écoulements et Aéroacoustique (DSNA)
^{**}Département Matériaux et Structures Métalliques (DMSM)
ONERA, 29 Avenue de la Division Leclerc 92322 Châtillon Cedex - France
[§]Auteur correspondant : *Marc.Errera@onera.fr*

RÉSUMÉ

Cet article est consacré à l'étude du transitoire thermique dans un matériau soumis à un flux convectif. Ce couplage aéro-thermique fait apparaître des échelles de temps très diverses entre les milieux fluide et solide. Une approche simplifiée quasi-transitoire tirant profit de ces disparités est proposée. L'algorithme qui repose sur une approximation du fluide par une suite d'états stationnaires est décrit dans un premier temps. Trois applications récentes illustrent ensuite la faisabilité et la précision de l'approche numérique.

NOMENCLATURE

h	coefficient d'échange	(W.m ⁻² .K ⁻¹)	T	température	(K)
k	conductivité thermique	(W.m ⁻¹ .K ⁻¹)			
L	longueur de la plaque	(m)	Indices		
Re	nombre de Reynolds		f	fluide	
t	temps	(s)	s	solide	
q	flux de chaleur	(W.m ⁻²)	c	couplage	

1. INTRODUCTION

La plupart des phénomènes physiques, mais aussi chimiques ou biologiques, font intervenir simultanément des mécanismes relevant de descriptions mathématiques distinctes. Leur modélisation nécessite alors d'associer ces descriptions. C'est ce que l'on appelle le couplage de modèles. Cette situation se présente dès qu'interagissent plusieurs milieux ou disciplines, mettant en jeu différentes échelles de temps et d'espace. Par exemple, dans le domaine de l'énergétique, le comportement thermique et mécanique des systèmes propulsifs passe par l'étude simultanée de nombreux phénomènes en interaction (convection, conduction, rayonnement, ablation, érosion, structures, ...).

Nous allons nous intéresser dans cet article à l'analyse du transitoire thermique dans un matériau soumis à un flux convectif. Ce couplage fait apparaître des échelles de temps très diverses. En effet, une évolution significative de l'état thermique de la structure correspond le plus souvent à un temps extrêmement long du point de vue du fluide. En pratique, cela rend irréaliste l'étude du transitoire dans les deux milieux. Une méthodologie particulière a donc été élaborée et mise en place. Elle prend en compte et tire profit de la différence entre les fréquences caractéristiques de chaque milieu. Nous allons la présenter brièvement avant de l'illustrer à l'aide de quelques résultats récents obtenus dans des configurations académiques et industrielles.

2. LE COUPLAGE EXTERNE : DÉFINITION ET LOGICIELS UTILISÉS

Il existe actuellement de nombreux codes dédiés performants qui ont bénéficié de longues années de développement et de perfectionnement. Il paraît donc logique de chercher à élaborer un outil de simulation multidisciplinaire en encapsulant ou en couplant ces codes. Cette stratégie, appelée

couplage externe, permet de mettre directement à profit les logiciels propres à chaque discipline, développés en utilisant les méthodes et modèles les plus appropriés, tout en respectant l'architecture, l'organisation et le plan de développement des logiciels impliqués. L'essor des moyens axés sur le parallélisme rend cette approche d'autant plus attractive. Le principe du couplage réside en un calcul simultané de ces codes avec des échanges réguliers d'informations (flux de chaleur, température, pression, ...).

Nous ne présentons ici que très brièvement les logiciels utilisés dans cette étude. Le couplage externe constitue en effet une plate-forme dynamique qui ne dépend pas des codes. Ces derniers intègrent la plate-forme en fonction de l'objectif que l'on s'est fixé. Le code « solide » ZeBuLoN est un logiciel 'éléments finis' développé conjointement par l'ONERA, l'ENSMP et la société Américaine NW Numerics. Le code « fluide » CEDRE, est un logiciel 'volumes finis' adapté aux problèmes de l'énergétique et de la propulsion. Une de ses particularités est l'utilisation de maillages non structurés quelconques. Il résout les équations de Navier-Stokes moyennées au sens de Reynolds à l'aide de schémas décentrés.

3. COUPLAGE AÉRO-THERMIQUE TRANSITOIRE

3.1 Objectifs

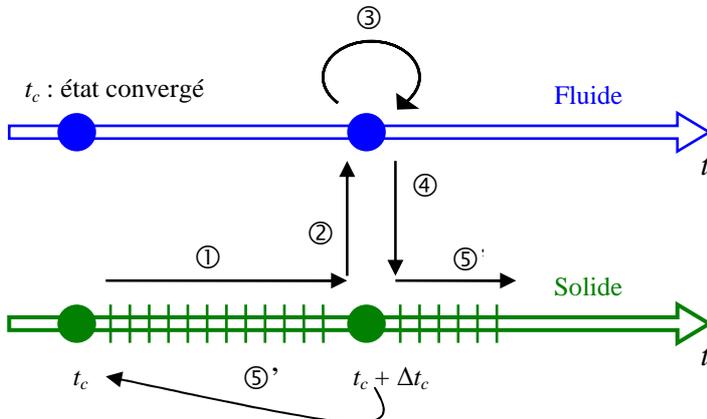
Notre objectif est d'élaborer une méthode peu coûteuse mais précise pour décrire le transitoire thermique dans un solide soumis à un flux convectif. Les approches dépendent de l'objectif que l'on s'est fixé, des caractéristiques intrinsèques du problème physique et aussi des contraintes initiales que l'on s'impose. Nous pouvons tenter d'en faire la liste :

1. *Étude du transitoire thermique dans le matériau.* L'aérodynamique ne constitue qu'un phénomène servant à réactualiser les sollicitations thermiques dans le solide. Il ne s'agit pas d'un objectif en soi.
2. *Disparité des fréquences caractéristiques mises en jeu.* Ainsi, en adoptant comme échelle de temps commune un temps lié au milieu fluide, on aboutirait à des simulations numériques extrêmement coûteuses.
3. *Conditions aérodynamiques non déterminées sur la durée de la simulation.* Ces conditions sont dans certaines applications complexes estimées expérimentalement à des instants privilégiés, d'où la nécessité d'aboutir à une méthode qui ne couple que rarement.
4. *Durée de la simulation.* Le temps physique correspond à la durée d'un vol ou d'une mission, soit plusieurs minutes, voire plusieurs heures.
5. *Caractéristiques de la mission.* La mission, du point de vue aérodynamique, est caractérisée par un nombre limité de plages de fonctionnement.

La différence de temps caractéristique entre le solide et le fluide nous oblige à mettre en œuvre une méthode de couplage particulière filtrant les hautes fréquences de manière à obtenir une solution en un temps de calcul acceptable. Cette approximation conduit à définir un algorithme constitué par des couplages à des fréquences caractéristiques du milieu solide avec un état fluide représenté alors par une suite d'états stationnaires. A chaque instant de couplage, l'état du fluide peut être calculé à partir de l'instant de couplage précédent ou indépendamment de celui-ci en cas de changement de topologie. Le solide quant à lui, évolue sans réactualiser systématiquement ses conditions aux limites par un échange avec le fluide. Cette réactualisation intervient à des instants de couplage choisis soit par l'utilisateur, soit au moyen d'un critère physique adapté. La contrainte que doit satisfaire la méthode numérique est d'aboutir à l'égalité des températures et des flux de chaleur entre les milieux fluide et solide à tous les instants de couplage, d'où l'emploi d'une méthode itérative de point fixe pour obtenir un unique état stabilisé à l'interface fluide-solide.

3.2 Algorithme numérique

L'algorithme répondant aux contraintes et conditions précédentes est présenté sur la figure 1 pour un cycle entre les instants de couplage t_c et $t_c + \Delta t_c$. Il comprend les étapes suivantes :



- ① : Calcul transitoire dans le solide.
 - ② : Le solide envoie T_s au fluide.
 - ③ : Calcul 'fluide' stationnaire.
 - ④ : Le fluide envoie (h_f, q_f) au solide.
- Test de convergence - Comparaison entre états solide et fluide à l'interface :
- ⑤ Non : Retour à t_c (étape ①) . Itération supplémentaire entre t_c et $t_c + \Delta t_c$ dans le solide, jusqu'à convergence fluide-solide.
 - ⑤' Oui : Premier calcul transitoire dans le solide entre $t_c + \Delta t_c$ et $t_c + 2\Delta t_c$.

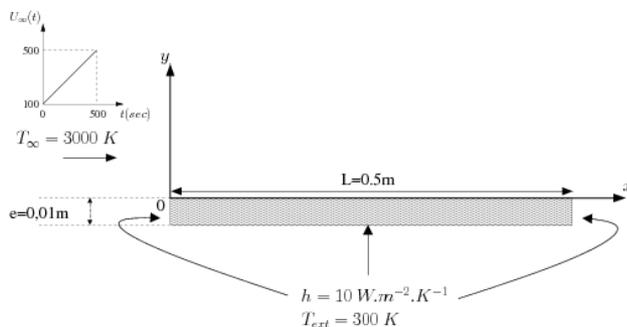
Figure 1. Algorithme Fluide-Solide de couplage transitoire

A l'interface, côté fluide, une condition de Dirichlet est imposée. Côté solide, des conditions de Fourier sont employées [1]. Elles sont interpolées linéairement entre deux instants de couplage.

4. APPLICATIONS

4.1 Plaque plane

La plaque plane constitue une géométrie simple, mais que nous avons soumise à des conditions thermiques extrêmes. Nous reproduisons ici ses principales caractéristiques.



La figure 2 présente les conditions de ce calcul couplé constitué par une plaque plane ($k_s = 35 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$) soumise à des échanges thermiques violents. En effet, la plaque initialement à 300 K interagit avec de l'air à 3000 K. La vitesse amont du fluide varie linéairement de 100 m/s à 500 m/s au cours des 500s de la simulation ($Re_L \sim 10^5$ à $t = 500\text{s}$).

Figure 2. Conditions du calcul couplé « plaque plane »

Les données de ce calcul sont proches de celles des propulseurs à propergol solide, où la compréhension des interactions entre les produits de combustion et les matériaux composites du propulseur est un enjeu majeur. Faute de place, il ne nous est pas possible de détailler les résultats, mais le lecteur intéressé pourra se reporter à [2,3]. Rappelons seulement ici qu'un calcul couplé dégradé, -couplage toutes les 50 secondes (soit 10 instants de couplage seulement)-, a été comparé à celui issu d'une approche plus fine avec 1000 instants de couplage ($\Delta t_c = 0.5\text{s}$). Ces simulations ont révélé que l'erreur relative maximale entre les deux, sur les températures et sur les flux de chaleur à l'interface, est de seulement 2%. Mais l'approche dégradée a nécessité 81 itérations alors que l'approche fine a eu recours à 2877 itérations. Le coût a ainsi été divisé par un facteur 35 pour une perte de précision minimale. Ces chiffres démontrent tout l'intérêt d'un algorithme transitoire itératif qui ne requiert qu'un faible nombre d'instant de couplage. Ces résultats prometteurs nous permettent d'aborder dans d'excellentes conditions l'étude du transitoire thermique dans des configurations plus complexes, mais toujours sur de longues périodes de temps.

4.2 Moteur HM7

Nous présentons ici une simulation couplée plus complexe sur la géométrie d'un essai d'un divergent composite sur le moteur HM7. La figure 3 montre le maillage « fluide » 2D axisymétrique utilisé par le code CEDRE sur le profil du convergent-divergent. Il est raffiné en paroi avec des quadrangles pour bien capter la couche limite thermique (maille de paroi de 100 μ m). La durée totale de la simulation est de 750 secondes. On a découpé ce temps en 10 périodes de

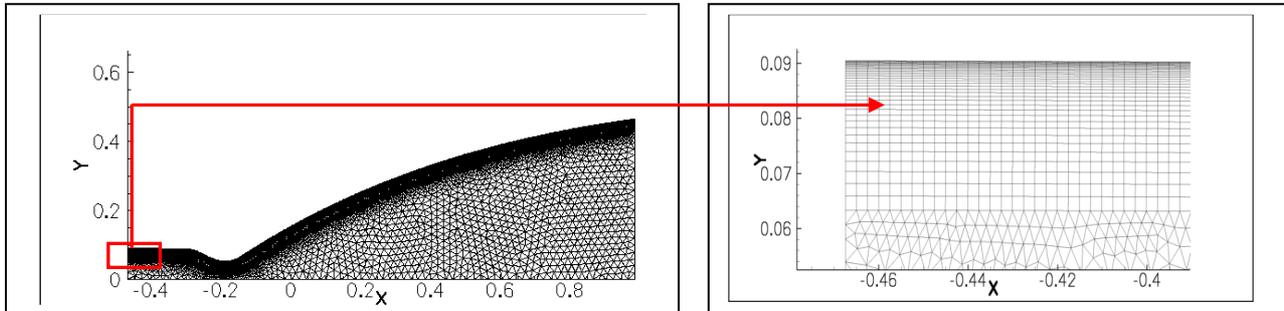


Figure 3. Maillage fluide « couche limite »

75s. Le couplage aéro-thermique s'effectue sur une zone étroite de la partie supérieure du divergent. La première convergence à 75s a été longue à obtenir (plus de 35 itérations), phénomène dû à de nombreuses oscillations locales. La figure 4 représente le champ de température fluide-solide à la fin du calcul. À cet instant, un état stationnaire est atteint. Ce cas a montré qu'il est essentiel de bien

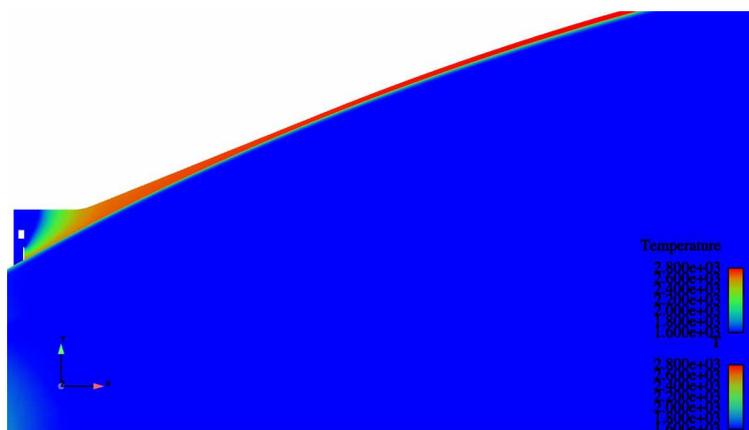


Figure 4. Champ de température Fluide-Solide

choisir la fréquence de couplage pour suivre avec précision les premiers instants du calcul en diminuant la période d'échange. Dans le cas contraire on peut rencontrer des difficultés de convergence du fait de la disparité temporelle des phénomènes en interaction. D'où la nécessité d'avoir recours à un temps adaptatif, comme dans l'étude suivante que nous allons présenter de façon un peu plus détaillée.

4.3 Circuit de refroidissement du moteur Vulcain 2

Le dernier exemple concerne l'étude de la déformation des tubes du circuit de refroidissement de la tuyère du moteur Vulcain 2. Ce calcul couplé a été mis en place à la suite de l'accident du vol 157 d'Ariane 5 le 11 décembre 2002, dans sa version « 10 tonnes ECA ». La commission d'enquête avait alors mis en évidence une possible défaillance du circuit de refroidissement. Ce circuit est soumis à de fortes contraintes mécaniques et thermiques, dues à la fois aux gaz chauds d'échappement dans la tuyère et aux gaz de refroidissement dans les tubes (Figure 5). Les calculs ont été menés à l'aide de conditions de fonctionnement approximées ou relevées dans des documents généraux publics. Les détails de cette simulation couplée se trouvent dans la thèse récente de J-D Garaud [4].

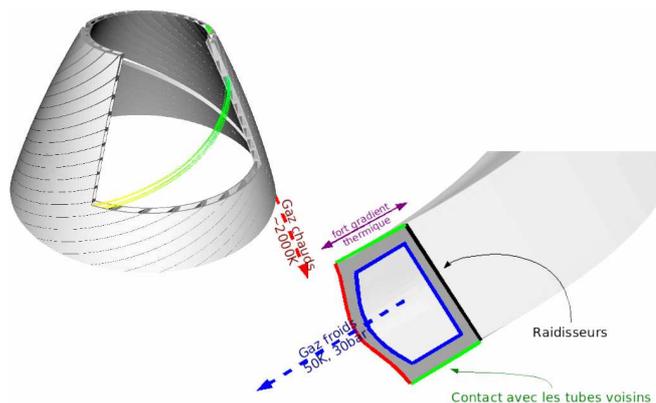


Figure 5. Tube du circuit de refroidissement autour de Vulcain 2

Les simulations couplées cherchent à représenter cette interaction forte entre les différentes physiques au cours de la durée totale du fonctionnement du moteur, soit 600 secondes. Un certain nombre de calculs préalables non couplés puis couplés en aéro-thermique puis aéro-mécanique ont permis de dresser la priorité des phénomènes à prendre en compte. Ainsi, la thermique est prépondérante en tant que paramètre de la loi de comportement du solide. En revanche, les déformations de la structure n'ont que de faibles conséquences sur la mécanique du fluide et sur la thermique. Ces considérations nous permettent de simplifier le scénario de couplage (Figure 6) entre le fluide, la thermique (Z-thermo) et la mécanique (Z-meca):

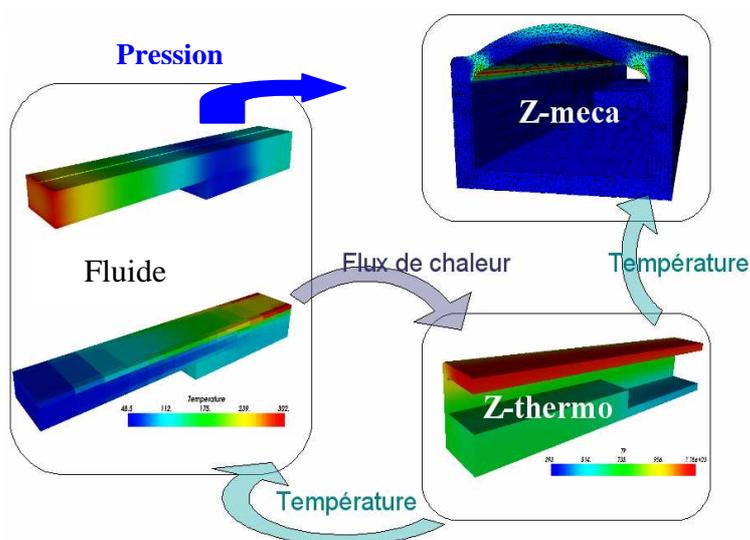


Figure 6. Couplage simplifié à 3 codes

Les déformations des tubes modifient les écoulements des gaz qui à leur tour agissent à la fois mécaniquement et thermiquement sur la structure, en lui imposant des champs de pression et de flux de chaleur à l'interface. Ces échanges conduisent souvent à des instabilités numériques qu'il faut traiter, tout en conservant des coûts de calcul raisonnables. Le calcul des déplacements par le solveur « mécanique » n'est renvoyé ni au fluide ni à la thermique. Le couplage aéro-thermique, quant à lui, demeure complet. Ce couplage à 3 codes a pu être mené à bien dans les premiers instants de vol. On a constaté que la thermique atteint un régime stabilisé dès la 7^{ème} seconde et présente le point le plus chaud autour de 1300 K. La figure 7 montre une représentation surfacique sur chacun des 3 codes mis en jeu à la 20^{ème} seconde de vol : les déplacements de la structure, le flux de chaleur et la température de la structure.

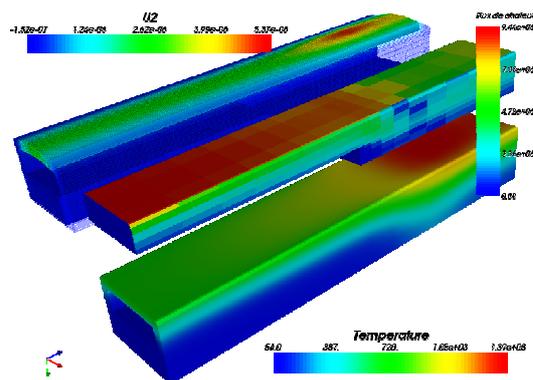


Figure 7. Solution du calcul couplé à 3 codes à la 20^{ème} seconde

À cet instant, la thermique est stabilisée au contraire de la mécanique qui commence vraiment à évoluer : la température étant élevée, le métal devient mou et les déplacements sont pilotés par la thermique au travers de la loi de comportement. Le couplage à 3 codes a mis en évidence une déformation 30 fois moins importante au sommet du tube, montrant ainsi toute l'importance que joue la thermique. Ainsi, si la partie haute du tube est peu sensible au fluage car le matériau est suffisamment froid, la partie inférieure, siège des températures les plus élevées, présente des déformations deux fois supérieures. En résumé, les déformations du matériau sont très liées à la thermique car les coefficients matériau de la loi de

comportement en dépendent fortement. Elles sont toujours causées par le fluage, mais celui-ci n'est important que dans les zones chaudes. Cette étude a permis de constater que l'algorithme transitoire proposé autorise des simulations multi-physiques complexes à des coûts réduits d'autant plus qu'un temps adaptatif a été utilisé, réduisant automatiquement la fréquence de couplage lorsque la physique se stabilise.

5. CONCLUSION

Le traitement des problèmes pluridisciplinaires revêt aujourd'hui un caractère prioritaire car les puissants moyens de calcul actuels ouvrent la voie à l'étude de l'intégralité d'un système plutôt qu'à une petite partie isolée. La méthode de couplage transitoire proposée ici a fourni des résultats fiables à des coûts raisonnables. Ce couplage est essentiel car il permet d'analyser la charge thermique au cours de longues périodes de temps dans des configurations complexes en tenant compte des autres physiques mises en jeu. L'étape suivante, incluse dans un programme de validation, consistera à confronter les résultats de calcul à des relevés expérimentaux sur une géométrie simplifiée.

REMERCIEMENTS

Les auteurs remercient vivement Guillaume Turpin de la société Andheo pour avoir réalisé les calculs délicats du moteur HM7 ainsi que Gilles Chaineray pour son soutien dans la mise en place de la structure informatique du couplage.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

1. M-P. Errera, S. Chemin, 2004, A fluid-solid thermal coupling applied to an effusion cooling system. *34th AIAA Fluid Dynamics Conference and Exhibit AIAA Paper 2004 - 2140, 28 June-1st July 2004, Portland.*
2. S. Chemin, 2006, Étude des interactions fluide-structure par un couplage de codes de calcul. *Thèse de l'Université de Reims Champagne-Ardenne, soutenue le 18 décembre 2006.*
3. M-P. Errera, G. Chaineray and M. Lachi, 2008, Analysis of the transient thermal response of a solid via a conjugate heat transfer method. *International Symposium on Advances in Computational Heat Transfer, 11-16 May 2008, Marrakech, Morocco, CHT-08-140.*
4. J-D. Garaud, 2008, Développement de méthodes de couplage aéro-thermo-mécanique pour la prédiction d'instabilités dans les structures aérospatiales chaudes. *Thèse de l'Université de Pierre et Marie Curie - Paris 6, soutenue 25 novembre 2008.*