

Etude numérique de la thermique par une approche globale multiphysique.

Bénédicte BAQUE¹, Marc-Paul ERRERA^{2,*}, Arjen ROOS¹, Frédéric FEYEL¹

¹Département Matériaux et Structures Métalliques (DMSM)

²Département Simulation Numérique des Écoulements et Aéroacoustique (DSNA)

ONERA, BP 72 - 29 Avenue de la Division Leclerc, 92322 Châtillon Cedex, France

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

Résumé - Cet article présente l'approche numérique basée sur un couplage externe de codes de calcul pour appréhender la complexité multi-physique des phénomènes centrés sur la thermique. Après une présentation générale de ces études mises en œuvre à l'ONERA dans le cadre de Programmes de Recherche Fédérateurs, les méthodologies employées en aéro-thermique stationnaire et transitoire puis en aéro-thermo-mécanique sont brièvement décrites. Quelques exemples récents de calculs couplés sont présentés à la fin cet article.

Nomenclature

h	coefficient d'échange physique, $W.m^{-2}.K^{-1}$	θ	température fluide, K
k	conductivité thermique, $W.m^{-1}.K^{-1}$	<i>Indices et exposants</i>	
N_f	nombre de facettes de la paroi	amb	ambient
q	densité de flux de chaleur, $W.m^{-2}$	f	paroi fluide
s	abscisse curviligne adimensionnée	i	centre de cellule fluide
T	température, K	n	indice incrémental de couplage
<i>Symboles grecs</i>		s	paroi solide
α	coefficient d'échange numérique, $W.m^{-2}.K^{-1}$	v	indice itératif de couplage
ε	paramètre numérique		

1. Introduction

De par les besoins de plus en plus importants exprimés par les industriels en matière d'études pluridisciplinaires, le calcul scientifique se doit désormais d'utiliser des modèles de plus en plus réalistes et de prendre en compte la complexité multiphysique des phénomènes. Par exemple, l'étude des flux de chaleur sur une paroi d'une chambre de combustion fait intervenir simultanément la mécanique des fluides, la mécanique des solides et le rayonnement. Or, il existe actuellement de nombreux codes de calcul spécialisés très performants, développés en utilisant les méthodes et les modèles les plus appropriés. Une des stratégies d'élaboration d'un outil de simulation multiphysique consiste donc à coupler ces logiciels propres à chaque discipline, tout en respectant leur architecture, leur organisation et leur plan de développement. La voie retenue ici consiste ainsi à mettre directement à profit les codes existants via un coupleur généraliste. Elle est souvent appelée *couplage externe*.

Dans le domaine de l'énergétique, l'ONERA s'intéresse aux phénomènes impliquant simultanément l'aérodynamique, la thermique et la mécanique. Cet article présente tout d'abord la stratégie développée par l'Office, en concertation avec des industriels, pour la mise en place d'outils numériques de couplage externe en aéro-thermo-mécanique, dit « atelier de couplage », autour de codes de calcul développés en interne. La méthodologie mise en place, dans le cadre de précédents travaux, sera ensuite présentée, tant pour la résolution de problèmes aéro-thermique stationnaire et instationnaire, que dans des cas de couplage aéro-thermo-mécanique. Cette partie constituera donc un état de l'art des récentes avancées de

l'ONERA concernant les activités multiphysiques. Enfin, différents cas de confrontations expérimentales seront exposés, concernant des applications de couplage aéro-thermique (cas académiques de plaques planes placées dans un écoulement, applications industrielles) actuelles, mais surtout aéro-thermo-mécanique (flamme impactant une plaque plane) à venir.

2. Stratégie de couplage externe à l'ONERA

2.1. Contexte à l'ONERA

L'ONERA a mis en place deux Programmes de Recherche Fédérateur (PRF « Couplage » de 2002 à 2005 et PRF COCOMAT de 2006 à 2009). Les PRF se positionnent souvent à un niveau pré-applicatif et expriment la richesse pluridisciplinaire de l'ONERA à travers des projets impliquant et fédérant les départements et les branches. Le PRF COCOMAT a ainsi pour objectif l'étude des approches logicielles et des méthodes numériques les mieux adaptées à la simulation numérique des phénomènes physiques couplés.

2.2. Types de couplage

Le couplage entre échelles ou entre physiques peut être de deux natures différentes, du point de vue informatique et numérique. Il est qualifié de *faible* lorsque les résultats d'un code fournissent simplement les seconds membres ou les conditions aux limites de l'autre. C'est le cas par exemple du couplage *aéro-thermique stationnaire* (Cf. §3.2.). Le couplage est *fort* lorsqu'il y a interaction forte entre deux phénomènes et convergence des valeurs à l'interface pour chaque couplage. Les codes s'échangent alors mutuellement des informations, éventuellement plusieurs fois par pas de temps (procédure itérative). C'est le cas par exemple du couplage *aéro-thermique transitoire* (Cf. §3.3.). C'est ainsi l'objectif recherché qui pilote la stratégie à définir. Il est à noter que l'on parle aussi de *chaînage* lorsque l'échange de données s'effectue à la fin de l'exécution d'un code. Le modèle numérique est alors simplifié. Ce type d'échanges n'est pas traité ici.

2.3. Mise en œuvre

La conception puis la réalisation d'un couplage nécessitent des compétences en physique, en numérique et en informatique. La physique du couplage revient à écrire les équations dans chaque milieu et à l'interface séparant ces milieux. On aboutit à un système faisant interagir les physiques impliqués via des *termes de couplage*. Le numérique discrétise le système précédent ce qui amène à mettre l'accent sur les disparités spatiales et temporelles des physiques impliquées. L'aspect informatique doit fournir un cadre général facilitant la mise en œuvre du couplage grâce à une approche non intrusive dans les codes et permettre l'utilisation de codes commerciaux. Pour des raisons d'efficacité, la bibliothèque MpCCI, qui contient des modules d'interpolation de champs sur des maillages non-conformes, a été retenue. Elle a été utilisée pour les travaux présentés dans cet article.

2.4. Codes utilisés

Le code « solide » ZéBuLoN 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.

Il est à noter que le couplage externe constitue une plate-forme dynamique qui ne doit pas dépendre des codes.

2.5. Atelier de couplage

Dans le cadre de la thèse de J-D Garaud à l'ONERA [1], une supervision élaborée des codes a été mise en œuvre. Elle est souvent appelée *atelier de couplage*. Il s'agit d'une plateforme regroupant un assemblage de briques élémentaires, appelées stratégies en langage objet. Il existe une infinité de stratégies et un certain nombre ont déjà été programmées : conditions de raccord, méthodes de transfert sur maillages non coïncidents, méthode de découplage temporel, prédicteurs, critères de convergence, méthodes de point fixe. La mise en œuvre d'un algorithme particulier consiste à faire dialoguer ces briques élémentaires. Passer d'un algorithme à un autre n'est qu'une question de mise en données. Cet atelier est appelé à s'enrichir sans en remettre en cause la structure générale. La conception objet du code ZéBuLoN a facilité l'implantation de cet atelier.

3. Méthodologies retenues en aéro-thermique

3.1. Disparité des temps caractéristiques

Le système global fluide/solide possède l'inertie thermique du milieu le plus lent, c'est-à-dire et de très loin celle du solide. Une évolution significative de la température dans le solide s'effectue ainsi sur une échelle de temps extrêmement longue pour le fluide. Une approche instationnaire couplée qui suivrait les fréquences temporelles liées au fluide s'avèrerait donc très pénalisante du point de vue temps de calcul. Une stratégie particulière doit ainsi être mise en œuvre à chaque cas traité. Elle dépend directement de l'objectif recherché. Ainsi par exemple rechercher une solution stationnaire ou transitoire conduit à deux algorithmes opposés bien que les conditions d'interface et les codes soient les mêmes (Cf. §3.2. et §3.3.).

3.2. Couplage stationnaire « faible »

A l'interface, côté fluide, une condition explicite de Dirichlet est imposée. Côté solide, des conditions semi-implicites de Fourier sont employées au couplage n [1,2].

$$T_f^n = T_s^n \quad (1)$$

$$q_s^{n+1} = -q_f^n - \alpha^n (T_s^{n+1} - T_s^n) \quad (2)$$

La stratégie la plus performante (temps de calcul et stabilité) consiste à coupler le fluide avec un état stationnaire du solide. Un *couplage faible* est employé ici car les solutions intermédiaires calculées pour atteindre la convergence n'ont pas d'intérêt. Le procédé reste stable quelle que soit l'évolution des physiques en parallèle et en particulier dans la situation délicate du changement de signe du flux de chaleur. Il suffit en effet d'imposer un coefficient α adéquat [2] et le couplage est a priori toujours réalisable. La stabilité du processus de couplage dépend de trois facteurs : le coefficient α , la rapidité d'évolution de la solution dans le fluide (CFL) et la fréquence d'échange. Ce dernier critère peut être déterminé dynamiquement en fonction de l'évolution du calcul. Par exemple, le couplage peut être déclenché lorsque la variation moyenne de la température du fluide en proche paroi a évolué de façon significative, ce qui s'écrit :

$$\frac{1}{N_f} \sum_{i=1}^{N_f} |T_i - \theta_i| > \varepsilon \frac{1}{N_f} \sum_{i=1}^{N_f} |\theta_i - T_{f,i}| \quad (3)$$

où T_i représente la température du fluide au centre de la cellule i adjacente à la paroi lors du dernier couplage et θ_i la température du fluide à chaque instant dans cette même cellule.

Différents essais montrent qu'une valeur de ε autour de 0,2 conduit à de bonnes performances. Le sensor (3) est très utile en début de calcul lorsque les conditions initiales fluide/solide sont assez éloignées. A l'approche d'un état stationnaire, il devient inactif.

3.3. Couplage transitoire « fort »

L'évolution temporelle du champ de température à l'intérieur du solide soumis à un flux convectif est ici étudiée. Les conditions d'interface fluide-solide sont les mêmes que (1) et (2), mais un coefficient d'échange physique h est à présent utilisé.

$$T_f^v = T_s^v \quad (4)$$

$$q_s^{v+1} = -q_f^v - h^v (T_s^{v+1} - T_s^v) \quad (5)$$

La contrainte que doit satisfaire la méthode numérique est d'aboutir à une convergence des températures ($T_s^v = T_s^{v+1} = T_s^\infty$) et donc des flux de chaleur ($q_f^v = -q_s^{v+1} = q_f^\infty$) entre les milieux fluide et solide à tous les instants de couplage, d'où l'emploi d'une méthode itérative (v itérations) de point fixe pour obtenir un unique état stabilisé à l'interface fluide-solide. L'algorithme est constitué par des couplages à des fréquences caractéristiques du milieu solide transitoire. Cette description du système couplé basée sur la physique la plus lente conduit à représenter l'état fluide par une suite d'états stationnaires.

4. Méthodologies retenues en aéro-thermo-mécanique

Dans le cas d'un problème couplé aéro-thermo-mécanique pour lequel on s'intéresse à l'évolution de la thermique et de la mécanique du solide au cours du temps, à l'équilibre des flux et des températures tel qu'il doit être vérifié pour un couplage aéro-thermique transitoire, vient se rajouter celui des déplacements et des pressions à l'interface entre les milieux fluide et solide, ce à chaque instant de couplage. Les échanges effectués entre les différents codes sont schématisés sur la Figure 1. Il est important de noter que les modules thermique et mécanique du code 'éléments finis' ZéBuLoN sont ici considérés comme indépendants.

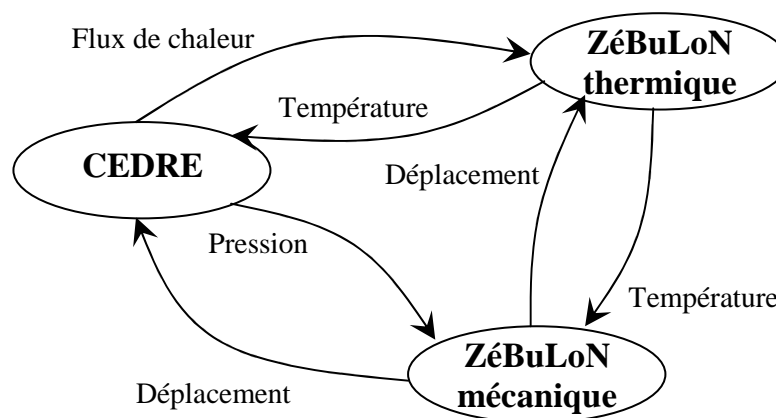


Figure 1 : Quantités échangées pour le couplage aéro-thermo-mécanique

5. Quelques résultats

5.1. Couplage aéro-thermique stationnaire « faible »

Le cas de validation étudié par S. Chemin dans sa thèse [2] décrit le refroidissement par écoulement d'air d'une aube de turbine haute pression. Le couplage entre la conduction dans l'aube et la convection dans les gaz chauds permet d'évaluer l'efficacité du refroidissement à l'état stationnaire thermique de la structure. Les échanges thermiques quantifiés au niveau de l'aube sont comparés aux mesures de températures expérimentales, effectuées sur un banc d'essai de la NASA. Comme le montre la Figure 2, le calcul couplé restitue globalement le comportement thermique du système.

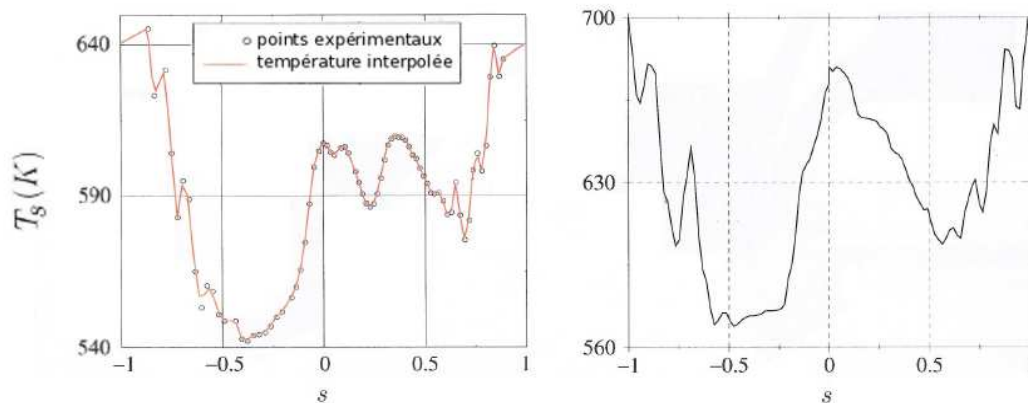


Figure 2 : Profils de température le long d'une section d'aube, expérimental (à g.) et calculé (à d.)

5.2. Couplage aéro-thermique transitoire « fort »

L'expérience menée par le Laboratoire de Thermo-Mécanique de l'Université de Reims Champagne-Ardenne sur une plaque plane, placée dans un écoulement laminaire et soumise à deux échelons successifs de flux de chaleur (Cf. schéma en Figure 3), a permis de valider la méthode de couplage aéro-thermique en régime transitoire, grâce à une comparaison entre les résultats expérimentaux et numériques [2,3]. Les profils de températures au point milieu de la surface avant de la plaque (M) sont présentés en Figure 4. L'enveloppe des résultats obtenus par calcul couplé prend en compte les incertitudes sur les valeurs expérimentales de la vitesse de l'écoulement et des flux appliqués.

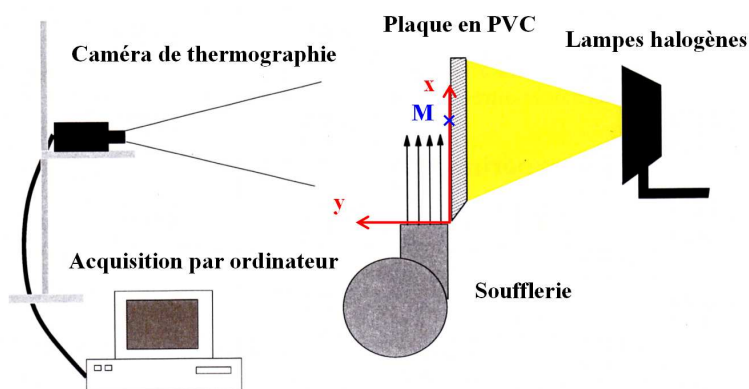


Figure 3 : Dispositif expérimental de convection forcée

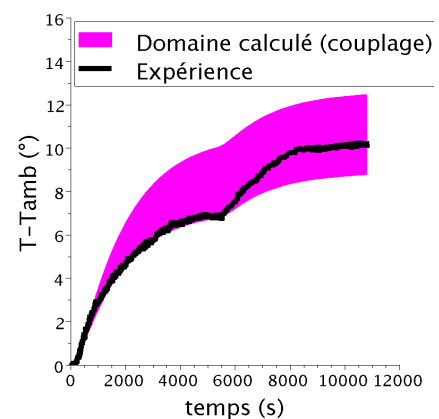


Figure 4 : Profils de température

La procédure numérique avec recherche de point fixe produit une bonne corrélation entre le calcul et l'expérience. C'est une méthode performante pour décrire le champ de température d'une structure en régime transitoire, sur une période de temps non négligeable. D'autres calculs, plus complexes, ont d'ores et déjà été menés en utilisant cet algorithme [4], comme par exemple la configuration étudiée dans le cadre d'une étude contractuelle avec SPS, sur la géométrie d'un divergent composite sur le moteur HM7.

5.3. Couplage aéro-thermo-mécanique

Lors de ses travaux de thèse précurseurs sur l'étude de la déformation des tubes de circuit de refroidissement de la tuyère du moteur Vulcain 2, J.-D. Garaud [1] a pu effectuer des calculs couplés avec les trois codes présentés en Figure 1. Divers calculs préalables des physiques découplées ou couplées deux à deux ayant permis de dresser la priorité des phénomènes à prendre en compte, ce schéma de couplage a pu être simplifié. En effet, la thermique est prépondérante en tant que paramètre de la loi de comportement du solide, alors que les déformations de la structure n'ont que de faibles conséquences sur la mécanique des fluides et la thermique du solide. L'échange de ces dernières a donc été négligé.

Le travail de validation de cet *atelier de couplage* se poursuit dans le cadre de la thèse de B. Baqué, avec un nouveau cas d'étude, de géométrie plus simple mais faisant intervenir un phénomène physique complexe, puisqu'il s'agit de l'interaction flamme-paroi, dont le banc d'essai a été élaboré à l'ONERA [5]. Un calcul découplé de mécanique des fluides, simulant le comportement de la flamme en présence d'une paroi, est actuellement à l'étude.

6. Conclusion

On fait aujourd'hui appel de plus en plus souvent à la simulation numérique multiphysique car les puissants moyens de calcul actuels ouvrent la voie à l'étude de l'intégralité d'un système plutôt qu'à une partie isolée. La stratégie de couplage externe mise en place à l'ONERA a abouti à une plateforme dynamique, indépendante de la physique et indépendante des codes. Elle a permis d'obtenir des résultats en bon accord avec l'expérience. Elle doit s'enrichir de différentes fonctionnalités informatique et numérique et cela se fera très probablement dans le cadre d'un programme national ambitieux en collaboration avec le CERFACS pour l'élaboration d'un coupleur de nouvelle génération destiné à la recherche et à l'industrie aérospatiale.

Références

- [1] J.-D. Garaud, *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 (2008).
- [2] S. Chemin, *Étude des interactions fluide-structure par un couplage de codes de calcul*, Thèse de l'Université de Reims Champagne-Ardenne (2006).
- [3] B. Baqué, M.-P. Errera, M. Rebay, A numerical and experimental study of transient Conjugate Heat Transfer in a flat plate, *International Symposium on Convective Heat and Mass Transfer in Sustainable Energy* (Hammamet, Tunisie, 26 avril – 1^{er} mai 2009).
- [4] M.-P. Errera, G. Chaineray, M. Lachi, Analysis of the transient thermal response of a solid via a conjugate heat transfer method, *International Symposium on Advances in Computational Heat Transfer* (Marrakech, Maroc, 11-16 May 2008).
- [5] H. Roinard, F. Micheli, P. Reulet, P. Millan, Transferts thermiques lors de l'interaction flamme paroi, *Actes de congrès Société Française de Thermique* (Les Embiez, 29 mai - 1^{er} juin 2007).