

Couplage aérothermique et simulation de refroidissement par jet.

Emmanuel RADENAC^{1*}, Jérémie GRESSIER², Emmanuel LAROCHE², David DONJAT², Pierre MILLAN²

¹ONERA

Chemin de la Hunière – FR-91761 – PALAISEAU CEDEX

²ONERA

2, av. Edouard Belin – BP 4025 – 31055 Toulouse Cedex 4

* (auteur correspondant : emmanuel.radenac@onera.fr)

Résumé - Une méthode de couplage aérothermique développée pour des applications instationnaires est implémentée dans CEDRE, la plateforme de calcul de l'ONERA dédiée aux simulations multiphysiques d'écoulement en énergétique. Un premier cas de calcul d'intérêt industriel est présenté : une configuration de refroidissement de matériau par jet dédié, représentative de ventilations pouvant être utilisées notamment dans les cavités nacelles des moteurs d'avion. La comparaison avec l'expérience est tout à fait satisfaisante et met en évidence l'importance de la précision des calculs effectués avec les deux solveurs couplés.

Nomenclature

| | | | |
|-----------------------|---|-----------------------------|-----------------------------|
| d | distance, m | Φ | flux de chaleur, $W.m^{-2}$ |
| E | énergie, J | <i>Indices et exposants</i> | |
| h | conductance, $W.m^{-2}.K^{-1}$ | c | correction |
| T | température, K | f | fluide |
| y^+ | coordonnée de paroi réduite | i | interface |
| <i>Symboles grecs</i> | | s | solide |
| λ | conductivité thermique, $W.m^{-1}.K^{-1}$ | | |

1. Introduction

Pour un certain nombre d'applications aérospatiales, il devient nécessaire de développer des techniques de simulations multiphysiques apportant une meilleure connaissance des champs aérothermiques instationnaires. Cela peut être lié à l'usage de plus en plus répandu de matériaux composites, dont les qualités structurelles se dégradent au-dessus d'une température critique. L'industrie attend donc des méthodes de prédiction de l'évolution de la température et des flux thermiques au cours d'un transitoire (tel que la période de décollage) afin d'optimiser la conception de systèmes soumis à de fortes contraintes thermiques.

Les simulations indépendantes des zones fluide et solide d'un système avec des conditions aux limites classiques mais approchées ne sont donc plus suffisantes. Des méthodes de simulations couplées se sont donc développées (un état de l'art a été dressé par Sondak et al [1]), où les zones fluide et solide sont calculées par des solveurs dédiés, qui échangent régulièrement des données, sous forme de conditions aux limites aux interfaces. Suite à la mise en place de techniques stationnaires, la généralisation à l'instationnaire a été faite notamment, à l'ONERA, dans [2], mais aussi par Sondak et al [1] ou Rahaim et al [4]. L'adaptation de la technique à la plateforme de calcul CEDRE et un cas de validation sont l'objet de cet article.

2. Méthodologie de couplage aérothermique

Le couplage prend la forme décrite sur la figure 1 : l'intégration d'un système fluide / solide est effectuée par deux codes de dynamique des fluides et de thermique indépendants (CHARME et ACACIA respectivement dans le cas de CEDRE). Le couplage est opéré régulièrement (selon des périodes nommées cycles par la suite) par calcul de conditions aux limites de couplage (à l'interface fluide / solide) permettant instantanément la conservation du flux de chaleur et l'équilibre des températures à l'interface, et approchant au mieux la réalité physique. Le « coupleur » calcule les conditions aux limites de couplage à partir de données issues des modules fluide et solide. Ces conditions sont ensuite imposées aux deux solveurs pour l'intégration du cycle suivant.

2.1. En entrée du coupleur

La méthode, particulièrement adaptée à l'approche Volumes Finis qui est celle de CEDRE, est présentée de façon plus exhaustive dans [2] et [3]. Dans ces articles, les données d'entrée du coupleur (voir la figure 1) sont les températures des cellules limitrophes¹ des deux domaines fluide et solide (T_f et T_s), les flux (Φ_{if} et Φ_{is}) et gradients de température ($\vec{\nabla}T_{if}$ et $\vec{\nabla}T_{is}$) à l'interface pour les deux domaines, et des données géométriques : les distances entre cellule limitrophe et interface (\vec{FI} et \vec{SI}), les vecteurs normaux aux interfaces (\vec{n}_f et \vec{n}_s).

De ces données, le « coupleur » déduit alors, pour chaque face à l'interface, une température et un flux d'interface :

$$T_i = \frac{\frac{\lambda_f}{d_f} T_f + \frac{\lambda_s}{d_s} T_s}{\frac{\lambda_f}{d_f} + \frac{\lambda_s}{d_s}} \quad \text{et} \quad \Phi_i = -\lambda_i \vec{\nabla}T_i \cdot \vec{n} = -\frac{\frac{\lambda_f}{d_f} \lambda_s}{\frac{\lambda_f}{d_f} + \frac{\lambda_s}{d_s}} (T_s - T_f) \quad (1)$$

où les conductivités auront été recalculées par : $\lambda_f = \left| \frac{\Phi_{if}}{\vec{\nabla}T_{if} \cdot \vec{n}_f} \right|$ et $\lambda_s = \left| \frac{\Phi_{is}}{\vec{\nabla}T_{is} \cdot \vec{n}_s} \right|$, et avec les

distances : $d_f = \left| \frac{\vec{FI} \cdot \vec{FI}}{\vec{FI} \cdot \vec{n}_f} \right|$ et $d_s = \left| \frac{\vec{SI} \cdot \vec{SI}}{\vec{SI} \cdot \vec{n}_s} \right|$.

Par ailleurs, les études présentées dans [2],[3] montrent l'importance, notamment pour la précision, de la conservativité² de l'intégration couplée. L'évaluation de l'énergie E traversant l'interface fluide / solide pendant un cycle est faite des deux côtés de celle-ci, par les deux solveurs. Le « coupleur » déduit un flux correctif Φ_c de ces informations (figure 1).

2.2. En sortie du coupleur

Pour des raisons de stabilité numérique [3], les données de sortie du « coupleur », c'est-à-dire les conditions aux limites actualisées pour les deux codes couplés, sont (figure 1) :

- des températures d'interface pour une condition de Dirichlet pour le fluide ;

¹ Est nommée cellule limitrophe une cellule à proximité immédiate de l'interface fluide / solide.

² Il s'agit d'assurer la précision machine sur la conservation globale de l'énergie dans le système.

- des coefficients et températures de convection pour une condition de Fourier ($h = \frac{\Phi_i}{T_i - T_f}$ et $T=T_f$), et le flux correctif Φ_c , pour le solide.

3. Adaptation au formalisme de CEDRE

L'implémentation dans la plateforme CEDRE, donc le couplage entre CHARME et ACACIA, nécessite l'adaptation aux données disponibles. Les données d'entrée du « coupleur » sont donc légèrement modifiées. Il s'agit désormais :

- des températures d'interface pour les deux domaines fluide et solide (T_{if} et T_{is}),
- les flux à l'interface (sortants) pour les deux domaines (Φ_{if} et Φ_{is}),
- des conductances fluide et solide (h_f et h_s). Idéalement, $h_f = \frac{\lambda_f}{d_f}$ et $h_s = \frac{\lambda_s}{d_s}$ avec les mêmes définitions qu'en 2.1, formulations particulièrement adaptées à la méthode des volumes finis avec évaluation centrée des flux de chaleur.

Les température et flux d'interface (défini ici par rapport au solide) calculés par le « coupleur » sont dès lors :

$$T_i = \frac{h_f T_{if} + h_s T_{is} + \phi_{if} + \phi_{is}}{h_f + h_s} \text{ et } \Phi_i = \frac{h_f h_s}{h_f + h_s} (T_{if} - T_{is}) + \frac{h_f h_s}{h_f + h_s} \left(\frac{\phi_{if}}{h_f} - \frac{\phi_{is}}{h_s} \right) \quad (2)$$

L'adaptation au formalisme de CEDRE permet donc une généralisation de la formulation des grandeurs calculées par le « coupleur » à partir de données issues de l'interface uniquement, et avec l'utilisation de conductances donnant un caractère plus général au mode d'interpolation. Notons que l'aspect conservativité représente la partie la plus intrusive de la méthode dans les solveurs couplés : chaque solveur doit cumuler les flux d'interface au cours du cycle. Le problème n'est pas abordé dans cet article.

4. Cas de validation

Une étude expérimentale a été menée à l'ONERA dans le but de réaliser un cas de validation pour la méthodologie de couplage instationnaire. Cette expérience, décrite plus en détails dans [5] et [6] modélise le refroidissement par ventilation dédiée instationnaire d'un équipement dans la cavité nacelle d'un réacteur d'avion.

Une plaque plane épaisse est chauffée à température constante en face arrière et refroidie en face avant par un écoulement de jet en écoulement transverse (figure 2). L'instationnarité est obtenue grâce à l'évolution du débit de jet selon une rampe entre deux débits extrêmes. Des mesures de vitesse ont été faites par PIV et LDV au cours de la phase instationnaire (par moyenne de phase) ainsi qu'aux débits extrêmes, pour obtenir les conditions d'entrée et des vitesses en certains points ou plans du champ, comme le plan de symétrie. La température a aussi été mesurée, par thermographie infrarouge, à la surface de la plaque. La comparaison entre résultats numériques et expérimentaux repose essentiellement sur cette mesure.

5. Comparaison entre résultats numériques et expérimentaux

5.1. Résultats stationnaires

Le jet est modélisé par un injecteur en entrée duquel le débit est imposé (figure 3). La condition d'entrée de l'écoulement transverse est quant à elle une condition de vitesse non uniforme issue des mesures. Un maillage hybride de 1534202 mailles est utilisé. La région de développement du jet est particulièrement raffinée afin d'obtenir une modélisation correcte du jet en écoulement transverse. C'est aussi le cas de la zone à proximité de la plaque, avec des premiers points en $y^+ < 0,5$.

L'écoulement d'un jet en écoulement transverse est particulièrement turbulent et la modélisation de la turbulence est ici effectuée par un schéma $k-\omega$ SST. Une stratégie de calcul bas Reynolds est adoptée pour une bonne estimation des flux pariétaux. Notons également l'utilisation d'un schéma de Roe bas Mach, d'un limiteur de Van Leer, et d'un schéma implicite à un pas associé à une méthode de résolution GMRES. Une méthode de pas de temps local est utilisée, associée à un préconditionnement bas Mach. Avec un pas de temps de 0,1 s, 6000 itérations sont nécessaires pour atteindre la convergence. Le couplage se fait par imposition du flux de chaleur fluide au solide et de la température du solide au fluide ($h_f < h_s$).

Pour cet article, l'exemple de l'injection du débit le plus faible est choisi. La comparaison entre résultats numériques et expérimentaux s'avère très bonne. Sur la figure 4, les champs expérimentaux et numériques de température à la surface du matériau sont tracés. Au point d'impact, la température calculée est de 314,8 K, alors que la mesure est de 317 K. Compte tenu d'une incertitude expérimentale de 0,9 K, l'écart relevé, 2,2K, est tout à fait raisonnable.

L'étude stationnaire a donné lieu à une étude paramétrique poussée, sur les maillages (entièrement hexaédriques, avec un jet modélisé par une condition aux limites affleurante ou par un injecteur, avec des raffinements différents), sur les modèles de turbulence ($k-l$, $k-\varepsilon$ ou $k-\omega$, avec des variations sur les traitements de parois : approches haut Reynolds avec loi de paroi, ou bien bas Reynolds). Cela a mis en évidence l'importance cruciale pour ce type d'études de la qualité de la simulation du champ fluide. Un écart allant jusque 6 K a ainsi pu être observé entre simulations et expérience. Les aspects de turbulence étaient alors mal modélisés. C'est principalement la modélisation des flux pariétaux par approche bas Reynolds qui a ainsi permis de réduire les erreurs.

5.2. Résultats instationnaires

Une première approche de simulations instationnaires permet de juger de l'efficacité de la méthode de couplage, sur un maillage un peu moins fin, de 1001121 cellules, pour lequel la zone de mélange du jet est un peu moins bien décrite, mais sans incidence fondamentale sur le résultat. Un rapport raisonnable entre précision et temps de calcul est visé. La simulation est donc effectuée en deux temps. Le transitoire aérothermique ($t=0$ à 20 s) est simulé avec un pas de temps assez élevé $\Delta t=0,01$ s et une résolution précise (40 directions de recherche et 40 itérations pour la méthode GMRES). Puis le transitoire thermique ($t=20$ à 270 s) est calculé moins précisément avec $\Delta t=0,05$ s (et 20 directions de recherche, 20 itérations).

Les résultats de la simulation sont présentés sur la figure 5. Le comportement est globalement satisfaisant : un écart entre résultats numérique et expérimental de 1K au maximum est relevé sur $dT=T(t)-T(t=0s)$. En début de calcul, la paroi répond moins vite dans la simulation, ce qui est dû en partie à la modélisation simplifiée du couplage. L'écart en fin

de simulation est lié à la différence stationnaire. Il est enfin intéressant de noter que le calcul a pu être effectué en une journée sur 32 processeurs Itanium.

6. Conclusion

L'adaptation d'une méthode de couplage thermique instationnaire au formalisme de CEDRE est présentée dans cet article. Elle fait communiquer les deux solveurs CHARME (fluide) et ACACIA (solide) par le biais exclusif de données de la limite : des conditions aux limites sont déduites des températures et flux issus des faces limites des domaines fluide et solide, et imposées jusqu'à l'occurrence suivante de la procédure de couplage.

Un cas de validation de refroidissement par jet en écoulement transverse d'une plaque plane chauffée en face arrière est utilisé. Des résultats satisfaisants sont déjà obtenus, avec une méthode de couplage simplifiée – sans aspect de conservativité et avec un calcul réduit des conditions limites de couplage (la pondération par conductance entre les contributions fluide et solide est déséquilibrée de façon à ce que le fluide impose simplement son flux de chaleur à l'interface et le solide sa température). Il s'agit d'un point d'autant plus positif que la turbulence de l'écoulement complique la simulation. Les paramètres numériques principaux sont réglés sur une simulation stationnaire. Une première approche instationnaire encore perfectible est aussi présentée afin de mettre en évidence l'efficacité de la méthode.

Références

- [1] D. L. Sondak, D. J. Dorney, Simulation of coupled unsteady flow and heat conduction in turbine stage, *Journal of Propulsion and Power*, 16-6 (2000), 1141-1148.
- [2] E. Radenac, J. Gressier, P. Millan, A. Giovannini, Une méthode conservative de couplage instationnaire de codes en aérothermique, *SFT 2005*, 337-342.
- [3] E. Radenac, J. Gressier, P. Millan, A. Giovannini, A conservative coupling numerical method for transient conjugate heat transfer, *Int. Conf. on computational methods for coupled problems in science and engineering* (Santorini Island. 25-28 mai 2005).
- [4] C. P. Rahaim, A. J. Kassab, R. J. Cavalleri, Coupled dual reciprocity boundary element / finite volume method for transient conjugate heat transfer, *Journal of Thermophysics and Heat Transfer*, 14-1 (2000), 27-38.
- [5] E. Radenac, P. Millan, J. Gressier, P. Reulet, Experimental validation of a coupling method for transient conjugate heat transfer, *IHTC 2006*.
- [6] E. Radenac, D. Donjat, P. Reulet, J. Gressier, P. Millan, Etude de l'aérothermique transitoire d'un impact de jet dans un écoulement transverse confiné, *SFT 2007*, 601-606.

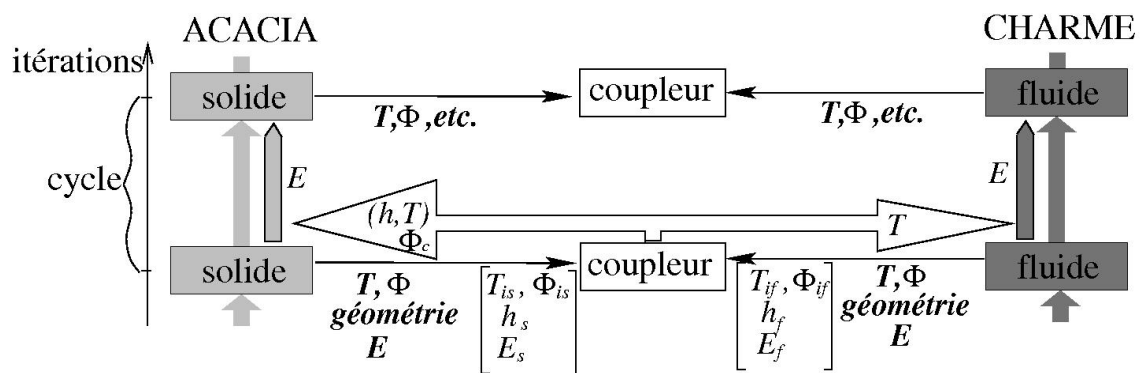


Figure 1 : Méthodologie de couplage, données CEDRE entre crochets

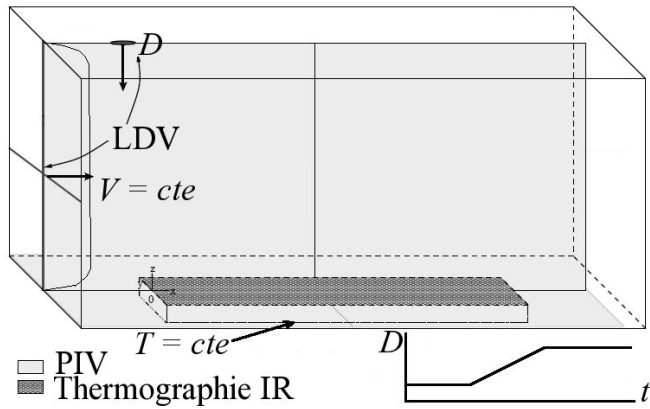


Figure 2 : Schéma de l'expérience

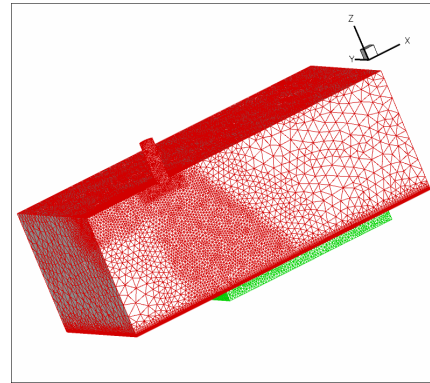


Figure 3 : Maillage utilisé pour la simulation

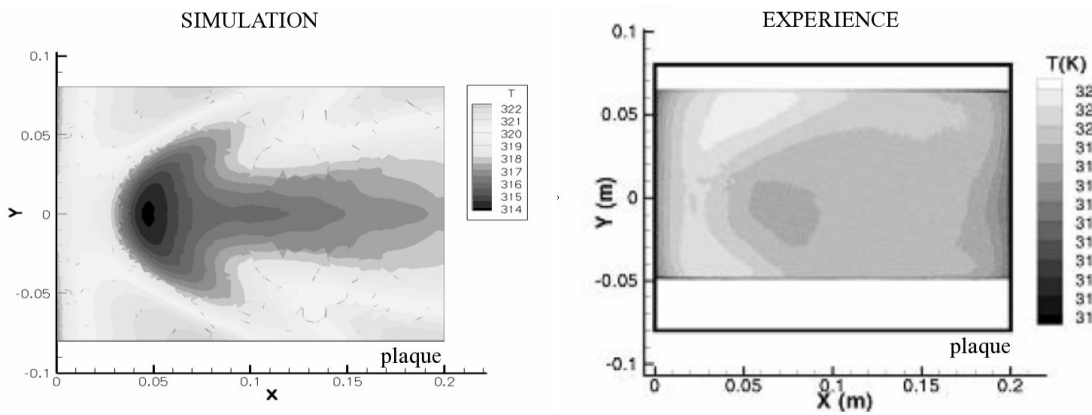


Figure 4 : Champ de température sur la plaque : résultats numériques et expérimentaux

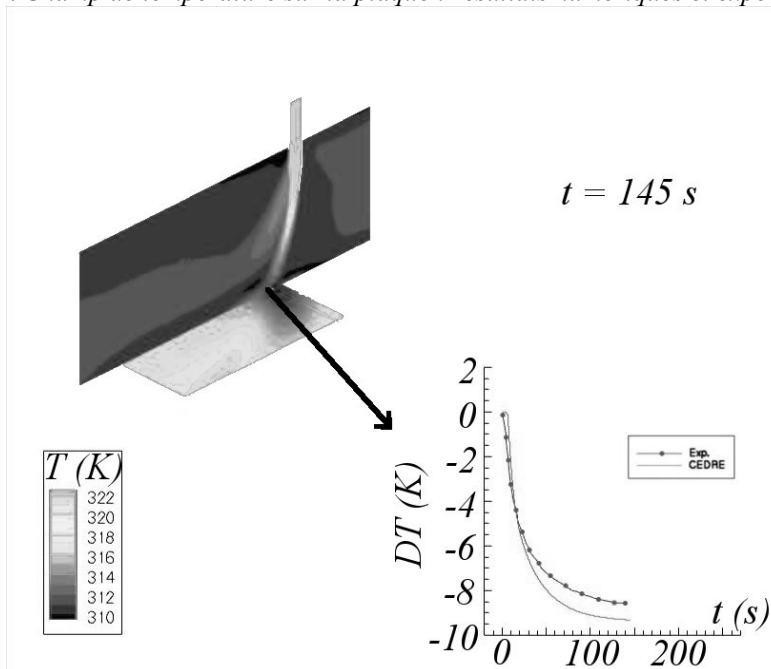


Figure 5 : Champ de température à l'instant final et comparaison de l'évolution de $dT = T(t) - T(t=0s)$, simulée et mesurée