

Simulation numérique d'une montgolfière infrarouge

Emmanuel LAROCHE^{1*}, Romain BRUCE², Philippe REULET³, Pierre MILLAN⁴

^{1,3,4} ONERA, ² ONERA/CNES, Département Modèles pour l'Aérodynamique et l'Energétique
2, Avenue Edouard Belin – BP 74025, 31055 Toulouse Cedex 4

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

Résumé - L'activité proposée consiste en l'étude par simulation numérique du champ aérothermique autour d'une maquette représentative d'un ballon scientifique stratosphérique de type Montgolfière InfraRouge (MIR). L'étude numérique présentée comprend différents niveaux de modélisation allant d'approches RANS (Reynolds Averaged Navier-Stokes) à viscosité isotrope, à un modèle instationnaire 3D de type DDES (Delayed Detached Eddy Simulation). Ces résultats sont comparés à des mesures de champ de vitesse par PIV et à des transferts thermiques pariétaux basés sur des mesures par thermocouples. Si les transferts thermiques sont correctement prédits par les approches RANS, seule l'approche instationnaire restitue une évolution satisfaisante du panache thermique.

Nomenclature

Ra_D Nombre de Rayleigh, $Ra_D = \frac{g\beta\Delta T D^3}{\nu^2} Pr$

Nu_D Nombre de Nusselt, $Nu_D = \frac{h_{conv} D}{\lambda}$

Pr Nombre de Prandtl

D Diamètre du ballon, m

g Constante gravitationnelle, $m.s^{-2}$

Symboles grecs

β Coefficient de dilatation, K^{-1}

ΔT Écart de température paroi-gaz, K

λ Conductivité thermique, $W.m^{-1}.K^{-1}$

ν Viscosité cinématique, $m^2.s^{-1}$

1. Contexte

Le CNES (Centre National d'Etudes Spatiales) développe des Montgolfières Infrarouges (MIR) pour des vols longs à très hautes altitudes, qui captent les flux radiatifs pour réchauffer l'air compris à l'intérieur de celles-ci. Ces MIR peuvent atteindre la stratosphère et le principal problème reste de prédire leur trajectoire précise. Des études ont été réalisées pour prévoir l'altitude du ballon lors de son vol en calculant le bilan thermique sur ses parois. Cependant, la convection reste encore un phénomène qui n'a pas été étudié dans de telles conditions et pour ce type de géométrie. Actuellement, seules des corrélations de nombre de Nusselt réalisées sur des sphères isothermes sont utilisées dans le calcul global du bilan thermique aux parois.

La MIR est un ballon de 40 mètres de diamètre qui vole à une altitude comprise entre 28 et 30 km le jour et entre 18 et 22 km la nuit. En considérant les altitudes de vol, les caractéristiques de l'air à ces altitudes et la taille de la MIR, les conditions de l'écoulement de convection naturelle correspondent à des nombres de Rayleigh Ra_D compris entre 10^{10} et 10^{12} . Une maquette a donc été réalisée avec pour objectif de reproduire le phénomène de convection naturelle autour de la MIR lors de son vol (très grand nombre de Rayleigh et chauffage non isotherme) en laboratoire. Le chauffage est assuré par des films chauffants en kapton. Le champ de vitesse y est caractérisé par la technique de Vélométrie par Images de Particules (PIV), et des thermocouples placés sur la maquette mesurent la température de surface. Le nombre de Rayleigh Ra_D est compris entre 2.10^8 et 10^9 , ce qui correspond à un régime turbulent [1].

Le problème étudié relève de la modélisation de la convection naturelle autour d'une source chaude. Une bibliographie sur le sujet est par exemple présentée dans [2]. Parmi les études numériques adressant des configurations proches de celle de la MIR, Attoui et Daube ont montré en 2000 [3] que pour une cavité rectangulaire de rapport d'aspect 4, la présence d'une source de chaleur induit un panache thermique fortement oscillant, avec des périodes de battement de l'ordre de 30 temps convectifs. Ce type d'instabilité, avec battements lents de panache, présente une difficulté de traitement particulière vis-à-vis de l'approche Navier-Stokes moyennée de la turbulence.

L'étude présentée ici a été précédée par une première modélisation de type 2D axisymétrique [4]. Elle a montré que le champ de vitesse obtenu par utilisation d'un modèle RANS $k-\omega$ SST différait considérablement du champ de vitesse mesuré, et ce même si les transferts thermiques pariétaux présentaient un accord satisfaisant. Les difficultés rencontrées étaient imputées à la fois à la modélisation 2D axisymétrique, mais également à l'incapacité du modèle à restituer des battements du panache à faible fréquence. Ces conclusions ont conduit à bâtir un modèle 3D, autorisant l'apparition éventuelle d'instabilités.

2. Présentation du montage

La maquette de 40 cm de diamètre peut être visualisée sur la *Figure 1*. Elle possède une structure en liège expansé recouverte par 17 films chauffants en kapton. Chaque film est connecté à un potentiomètre qui permet de choisir la tension envoyée et ainsi la température de chaque film. Des thermocouples placés sous chaque film chauffant mesurent la température de paroi. Afin de contrôler les conditions d'environnement thermique, et de pouvoir mettre en œuvre la PIV, le ballon est immergé dans une cuve de dimensions 1x1x2 m. Un circuit d'eau permet de maintenir le plafond à une température de 20°C durant l'expérience. La description détaillée du montage, ainsi que les résultats obtenus ont fait l'objet d'autres communications et ne sont pas ici détaillés. Le lecteur est invité à trouver plus de détails dans [1].



Figure 1: Schéma de la maquette et de la cuve

3. Modélisation numérique

3.1. Présentation du solveur utilisé

Cette étude est basée sur l'utilisation de la plateforme multiphysique CEDRE de l'ONERA, et en particulier de son solveur Navier-Stokes CHARME. Ce dernier s'appuie sur une méthode des volumes finis pour résoudre les équations de Navier-Stokes pour des écoulements laminaires ou turbulents. La résolution peut s'effectuer sur la base d'une solution stationnaire représentative de la turbulence moyenne statistique (approche dite RANS pour Reynolds Averaged Navier-Stokes), ou d'une solution faisant apparaître un contenu instationnaire, les échelles de turbulence étant plus ou moins filtrées. Le code CEDRE a été validé à l'ONERA/DMAE sur des applications de type convection naturelle ou mixte

(naturelle/forcée) depuis plusieurs années [2]. L'approche employée est une approche de type compressible avec utilisation d'un schéma dit bas-Mach dérivé de celui proposé par Turkel [5] et permettant d'utiliser un décentrement spatial adapté sur toute la plage de Mach. Le modèle de turbulence employé est le $k-\omega$ SST décrit dans [6]. Une approche explicite anisotrope pour la dynamique et la thermique dite EAHFM (Explicit Algebraic Heat Flux Model) est disponible et est basée sur les travaux d'Hellsten [7]. Elle permet de prendre partiellement en compte l'anisotropie de la turbulence. L'approche DDES utilisée est basée sur les travaux de Fan [8]. Cette approche combine un traitement RANS de la zone proche paroi à un traitement instationnaire de type LES en dehors des couches limites.

3.2. Modèle numérique

Le maillage 3D est pleinement non-structuré de type tétraèdres/prismes (*Figure 2*). La convergence en maillage est postulée sur la base du respect d'un $y^+ < 1$ à la paroi et d'un nombre de mailles au moins égal à 50 dans la couche de mélange entre le panache thermique et la couche limite sur les parois de l'enceinte. Le maillage comprend $4,2 \times 10^6$ cellules. Concernant les conditions aux limites, une température de 130°C est imposée à la paroi du ballon. La température du plafond est imposée à 20°C . Ces valeurs correspondent aux températures régulées de l'expérience. Les parois latérales sont supposées être à une température uniforme de 28°C , cette valeur étant issue de mesures par thermocouples à la paroi. Le plancher est supposé adiabatique. Le calcul est effectué sur le supercalculateur Stelvio de l'ONERA sur 128 processeurs (Nehalem), le maillage étant découpé en 128 domaines. Concernant le choix du pas de temps, le critère adopté pour les calculs DDES est d'avoir un nombre de CFL convectif n'excédant pas 1, et surtout dans le cas présent un CFL acoustique inférieur à 10, du fait de raccordements multidomaines de type explicite, l'intégration en temps étant implicite d'ordre 1 dans chaque domaine.

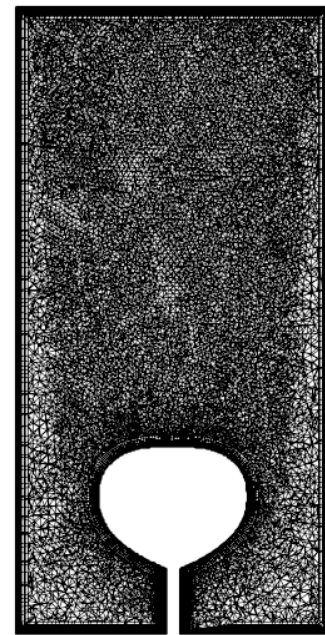


Figure 2: Allure du maillage (coupe plan médian)

La résolution des équations RANS instationnaires conduisant à une solution stationnaire, la contrainte sur le pas de temps peut être relâchée. Le pas de temps imposé est de 0,2 ms pour les calculs DDES, et de 2 ms pour les calculs RANS. L'état stationnaire est obtenu en 50000 itérations pour les calculs RANS. Un temps physique de 30 s a été simulé en DDES, garantissant une convergence des moments d'ordre 1. Les moments d'ordre 2 seront fournis à titre qualitatif, la convergence restant à compléter.

4. Résultats et analyse

4.1. Champ dynamique

L'allure de l'écoulement dans le plan étudié par PIV est présentée sur la Figure 3. Le chauffage par la paroi du ballon est à l'origine sur sa partie haute de 2 couches limites de part et d'autre de l'axe de symétrie. Ces couches limites sont convergentes et génèrent une zone d'écoulement ascendant au centre de la cavité. Cet écoulement ascendant, qui correspond au panache thermique généré par le ballon, vient impacter le plafond de la cavité et se scinde en

deux couches pariétales qui vont suivre le plafond puis descendre le long des parois verticales de la cavité. Ces zones descendantes vont alors réalimenter l'écoulement ascendant. L'écoulement est donc caractérisé par deux recirculations d'ensemble, les mesures PIV confirmant la faible valeur de la vitesse au sein de ces recirculations. Les résultats obtenus avec les différentes approches sont qualitativement en accord avec les mesures, en faisant ressortir la même topologie d'ensemble. La zone ascendante est prédite par tous les modèles, avec un écart par rapport aux mesures de l'ordre de 10 à 20% sur la vitesse maximale (Figure 4). La valeur ainsi que la position du maximum de vitesse verticale sont les mieux prédites avec le modèle $k-\omega$ SST+EAHFM. Le modèle $k-\omega$ SST prévoit un maximum de vitesse situé 20 cm plus bas que les mesures. Par rapport aux mesures, le modèle $k-\omega$ SST conduit également à une décroissance de la vitesse à partir de ce maximum qui est surestimée. Ce phénomène est amplifié par l'utilisation du modèle de Hellsten, qui se révèle moins performant dans cette zone. Cette décroissance du maximum de vitesse est directement liée à la description du mélange s'opérant entre la zone de vitesse ascendante et la zone contiguë. Un niveau de turbulence plus important dans le calcul étant observé dans cette zone, le mélange s'opère de manière plus marquée, conduisant à une atténuation plus rapide dans le calcul que dans l'expérience. L'utilisation du modèle EAHFM de Hellsten conduit à une amplification du phénomène, même si la première partie du panache est correctement appréhendée. La simulation DDES présente une allure qualitativement satisfaisante, même si elle sous-estime la vitesse verticale de l'ordre de $0,2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$.

L'analyse de la vitesse verticale sur l'axe de symétrie se doit d'être complétée par celle de profils de vitesse à différentes hauteurs dans la cavité. La Figure 5 présente un profil de vitesse verticale et de fluctuation rms associée à une hauteur de 1,2 m. Seule la simulation DDES prévoit un plateau de vitesse faible au cœur des recirculations, entre $x=0,2 \text{ m}$ et $x=0,4 \text{ m}$. Les modèles RANS utilisés, même avec une extension anisotrope explicite, conduisent à un niveau de turbulence trop important dans cette région, avec en corollaire une diffusion du champ de vitesse qui n'est pas observée dans les mesures PIV. D'autre part l'utilisation du modèle $k-\omega$ SST se traduit par un niveau de rms uniforme sur la plus grande partie de la cavité, alors que deux zones principales apparaissent très clairement dans la réalité.

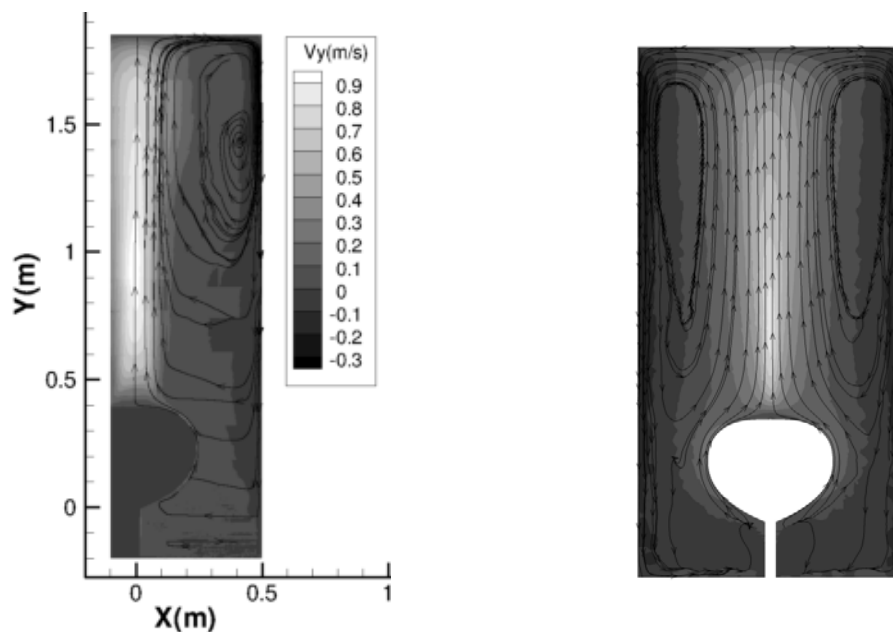


Figure 3: Champ de vitesse verticale - Comparaison Mesures PIV(gauche)/Simulation CEDRE SST (solution stationnaire, droite)(échelle de vitesse identique)

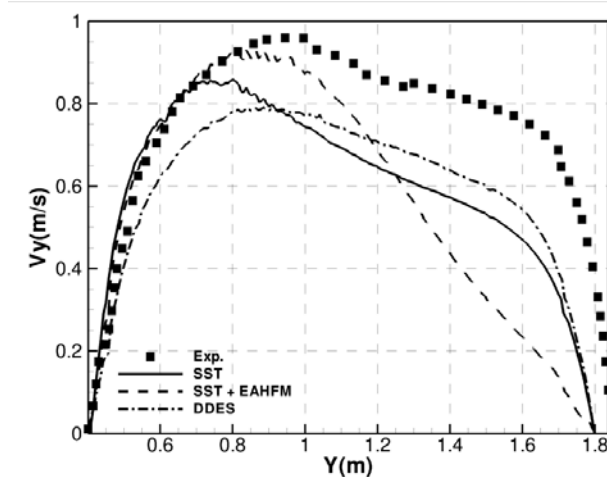


Figure 4: Vitesse verticale sur l'axe de symétrie

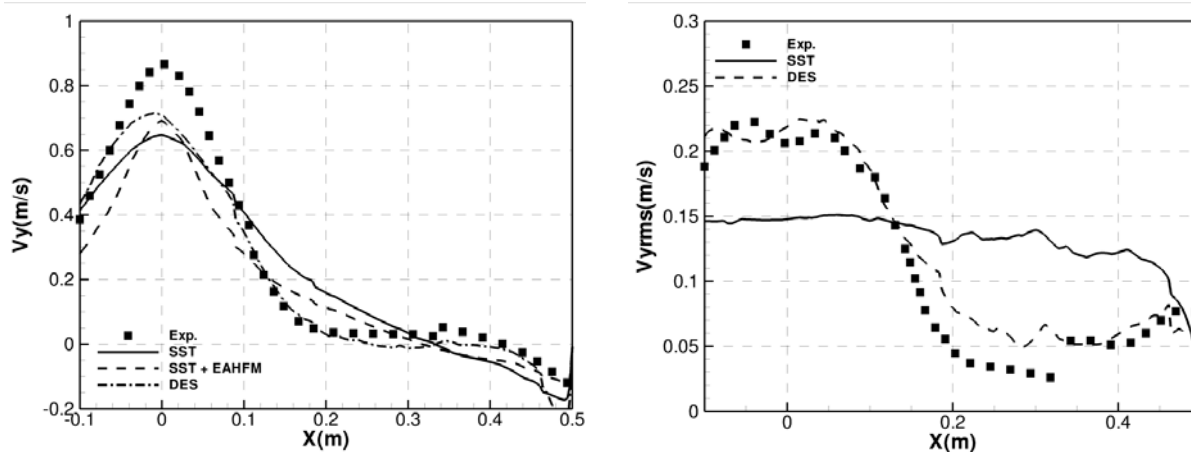


Figure 5: Profils de vitesse moyenne (gauche) et rms (droite) à $y=1.2$ m

4.2. Transferts thermiques pariétaux

Seuls sont présentés ici les résultats issus du calcul avec le modèle $k-\omega$ SST (Figure 6). Les échanges thermiques sont encore en cours d'évaluation avec l'approche DDES. Les flux de chaleur prévus par la simulation CEDRE sont globalement en bon accord avec les transferts thermiques mesurés. Ils se caractérisent pour cette configuration à chauffage uniforme (130°C) par un nombre de Nusselt diminuant de bas en haut du ballon. Ce nombre de Nusselt est maximum au bas du ballon, ce qui correspond à un effet de démarrage de la couche limite thermique. Il décroît alors rapidement jusqu'à une abscisse curviligne de 0,1 m, et se stabilise alors à une valeur comprise entre 90 et 100, jusqu'à une abscisse curviligne de 0,4 m. Un artéfact de mesure, lié à un problème de conduction entre bandes de chauffage, explique le décalage des points situés entre 0,3 et 0,4 m par rapport à cette allure générale. Les flux de chaleur obtenus en 3D sont supérieurs de 10% environ à ceux obtenus par une modélisation 2D axisymétrique. L'écart entre calcul 3D et mesures reste toutefois sur cette partie du ballon à la limite de l'incertitude expérimentale affichée, soit 20%. Dans la partie haute, le nombre de Nusselt obtenu avec CEDRE continue de diminuer, alors qu'il augmente notablement dans les mesures. Ceci est attribué à un phénomène de transition sur la partie haute du ballon, qui n'est pas reproduit par le calcul, les modèles de type RANS ne décrivant habituellement pas correctement les zones transitionnelles. Le nombre de Nusselt obtenu par calcul connaît bien une remontée, mais elle se situe beaucoup plus en aval.

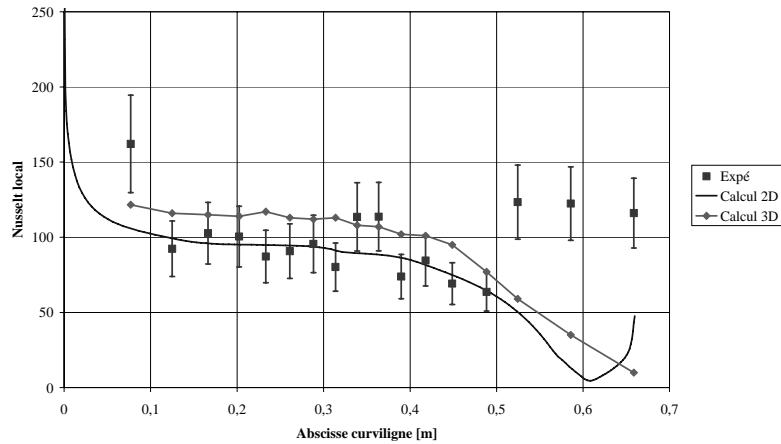


Figure 6: Transferts thermiques pariétaux

5. Conclusion

Cette étude compare différentes approches permettant de modéliser la convection naturelle turbulente au sein d'une cavité avec maquette chauffante reproduisant l'écoulement autour d'une MIR. Seule une approche instationnaire de type DDES rend compte avec une bonne précision du développement du panache thermique, les modèles RANS utilisés surestimant le niveau de turbulence généré dans les zones voisines du panache. En revanche, les transferts thermiques à la surface de la maquette sont correctement décrits par une approche RANS, à l'exception de la partie haute du ballon. Cette étude sera poursuivie en investiguant la convergence en maillage de la solution DDES, et par l'analyse détaillée des caractéristiques instationnaires obtenues sur des capteurs positionnés au sein de la cavité.

Références

- [1] R. Bruce, P. Reulet, P. Millan, G. Parot, G. Letrenne, AIAA Paper 2010-465, 110th AIAA/ASME Joint Thermophysics and Heat Transfer Conference, 28 June - 1 July 2010, Chicago, Illinois,
- [2] L. Perrin, Analyse expérimentale d'écoulements de convection naturelle et mixte en espace confiné, Thèse de l'Ecole Nationale de L'Aéronautique et de l'Espace, 2006
- [3] F. Attoui, O. Daube, Convection Naturelle à grand écart de température dans une cavité fermée avec obstacle. Congrès Français de Thermique, SFT 2000, pp 199-204, Mai 2000
- [4] P. Reulet, R. Bruce, E. Laroche, Étude expérimentale des échanges thermiques convectifs en paroi d'un ballon scientifique stratosphérique de type Montgolfière Infrarouge (MIR), Rapport technique ONERA RF 4/15108 DMAE, 2010
- [5] E. Turkel, A review of preconditioning methods for fluid dynamics, *Applied Numerical Mathematics*, 12, 1993, pp. 257-284
- [6] F.R. Menter, Two-Equation Eddy-Viscosity Turbulence Models for Engineering Applications, *AIAA Journal*, 32(8), 1994, pp. 1598-1605
- [7] A. Hellsten New Advanced $k-\omega$ Turbulence Model for High Lift Aerodynamics, *AIAA Journal*, 43(9), 2005, pp. 1857-1869
- [8] T. C. Fan, X. Xiao, J. R. Edwards, and H. A. Hassan. Blending functions in hybrid large-eddy/Reynolds averaged Navier-Stokes simulations. *AIAA Journal*, 42(12), 2004, pp. 897-906

Remerciements :

Les auteurs tiennent à remercier le CNES pour son support sur l'étude MIR.