

Simulation numérique de dispositifs de contrôle du buffeting culot (P.-E. Weiss/DAAP)

# 7<sup>èmes</sup> Journées Des Doctorants MFE/Nord (DAAP/DAFE/DEFA/DSNA)

Châtillon  
Salle Contensou  
14-15 janvier 2009

## Session 5 - Espace

Comité d'Organisation :

A. Boutier  
J.-M. Le Gouez

P. Champigny  
P. Millan

M. Habiballah  
J.-F. Bousuge (Cerfacs)

L. Jacquin  
L. Lopez (DGA)

L. Denat, F. Dupoirieux, F. Gand, Ph. Guillen, T.-H. Lê, G. Reboul, D. Sipp

G. Denis



## Étude des écoulements surdétendus dans les tuyères en milieu réactif.

**Bruno SAINTE-ROSE (DEFA)**

Directeur de thèse : Francis Dupoirieux (ONERA/DEFA rattaché à l'Ecole Centrale Paris)  
Encadrants Onera : Nicolas Bertier (DEFA), Sébastien Deck (DAAP)

L'amélioration des performances des lanceurs spatiaux en terme de charge utile ou d'orbite visée passe entre autres par l'accroissement de la poussée des propulseurs au décollage. Afin d'atteindre cet objectif, l'une des solutions adoptées pour les tuyères propulsives convergent – divergent est d'augmenter la valeur de  $S$  défini comme le rapport entre la section de sortie du divergent et la section au col, pour preuve l'évolution de  $S$  au cours du temps sur la série de moteurs Vulcain (I:  $S=40$ , II:  $S=65$ ). Cette augmentation de  $S$  implique cependant des nombres de Mach de plus en plus élevés en sortie de divergent conduisant à un niveau de pression inférieur à la pression atmosphérique élevée à basse altitude. Ce régime de surdétente se traduit d'un point de vue aérodynamique par l'apparition d'un choc fort dans la tuyère qui interagit avec la couche limite développée à la paroi provoquant un décollement tridimensionnel, asymétrique et instationnaire créant des charges latérales aérodynamiques dont l'étude a été menée entre autres par S. Deck [1]. Pour des écoulements réactifs, l'existence d'une recirculation en sortie de tuyère permet aux gaz issus de la chambre de combustion contenant du dihydrogène imbrûlé de se mélanger avec l'oxygène atmosphérique créant une potentiel zone de « post - combustion » qu'il convient de prendre en compte notamment pour étudier les charges thermiques. Ainsi, l'objectif de cette thèse est de simuler numériquement ce phénomène combustif sur un cas de tuyère cryotechnique surdétendue étudiée dans le cadre du programme ATAC sur le banc MASCOTTE de l'Onera et sur lequel ce type de phénomènes a été diagnostiqué. Le code de calcul utilisé dans ce travail est le code d'énergétique CEDRE de l'Onera.

Afin de mener à bien cette étude il a fallu dans un premier temps implémenter et valider un modèle d'aérodynamique instationnaire hybride Reynolds Averaged Navier Stokes (RANS) / Large Eddy Simulation (LES), la Delayed Detached Eddy Simulation (DDES) [2] dans le code CEDRE. En effet, l'hybridation permet à la fois de modéliser la dynamique pariétale selon une approche RANS tout en résolvant les structures turbulentes les plus énergétiques par une approche LES dans les zones décollées ce qui permet de s'affranchir de la contrainte de maillage imposée par la LES proche des parois pour résoudre les couches limites. La première étape de la validation a donc consisté à vérifier le bon fonctionnement de la DDES - basée sur un modèle RANS  $k-\omega$  SST [3] - en aérodynamique. D'abord le modèle a été validé sur une couche limite attachée puis pour un écoulement inerte de marche descendante bien documenté (opération A3C de l'Onera) qui a l'avantage de présenter à la fois des couches limites attachées mais aussi une zone massivement décollée en aval de la marche.

Dans un second temps, ce même cas de marche descendante est simulé pour un écoulement réactif (air- $\text{CH}_4$  prémélangé). La nature des résultats obtenus pour les modèles de combustion classique présents dans le code CEDRE justifie l'introduction d'un modèle de combustion turbulente plus évolué, la Thickened Flame LES [4] permettant une meilleure résolution de la flamme tout en conservant une bonne interaction entre la flamme et la turbulence pour des écoulements prémélangés. Ce modèle a donc été implémenté dans sa version Dynamique qui permet également de prendre en compte des flammes de diffusion comme celles rencontrées dans les tuyères a priori. L'importance de l'utilisation de conditions aux limites non réfléchissantes a également été soulignée (figure 1).

Enfin, des calculs préliminaires sur un maillage bidimensionnel du cas de la tuyère ATAC ont été réalisés (figure 2). Ils permettent de vérifier l'effet de la meilleure prise en compte du mélange introduite par la LES dans la zone décollée, en comparaison avec des approche RANS.

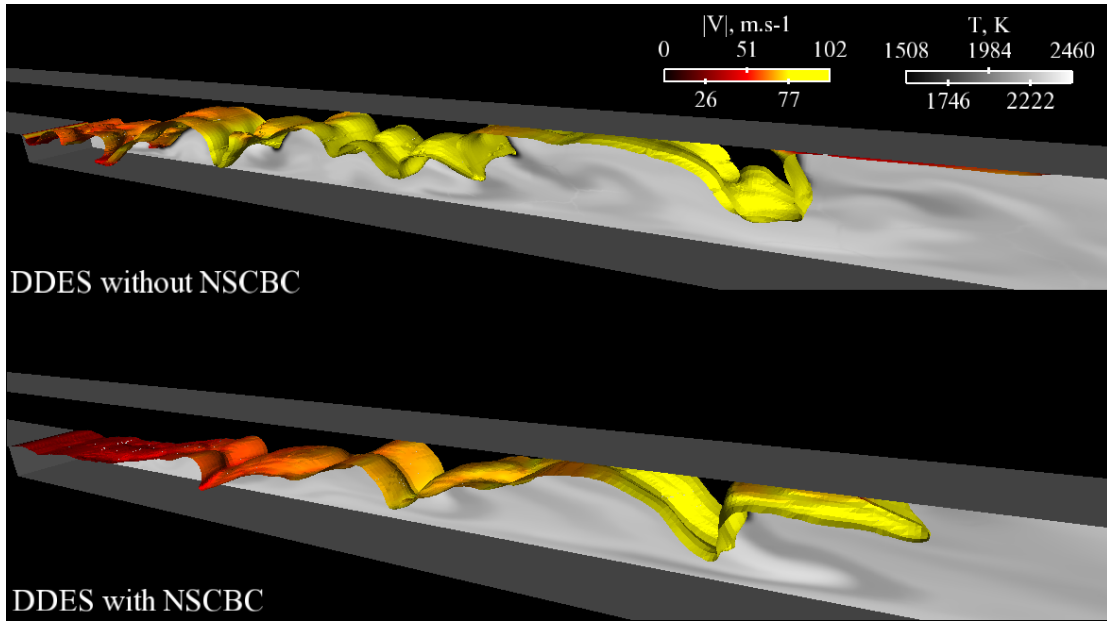


Figure 1 : Iso-surfaces de température (1500K) matérialisant la flamme et colorées par le module de la vitesse, température en fond, (haut) cas avec sortie partiellement réfléchissante (bas) cas avec sortie non réfléchissante

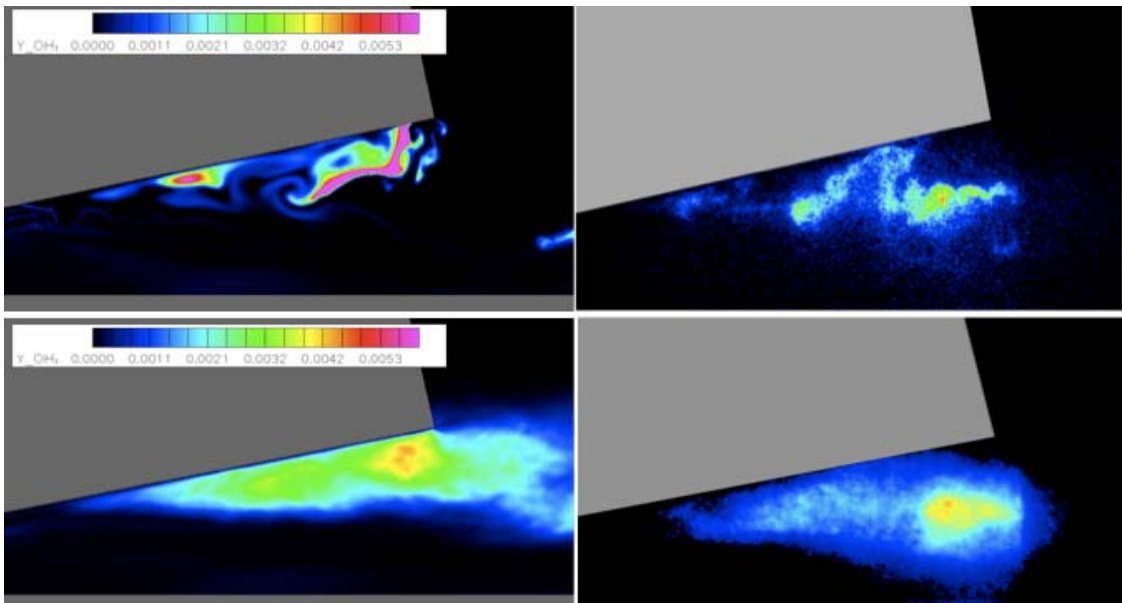


Figure 2 : (en haut) Champs instantanés de OH dans le divergent de la tuyère ATAC (à gauche DDES, et à droite mesures par PLIF), (en bas) champs moyens.

Références bibliographiques :

- [1] S. Deck. *Simulation Numérique des Charges Latérales Instationnaires sur des Configurations de Lanceurs*. Thèse de doctorat, Université d'Orléans, 2002.
- [2] P.R. Spalart, S. Deck, M.L. Shur, K.D. Squires, M. Strelets, A. Travin. *A new version of detached eddy simulation, resistant to ambiguous grid densities*. Theor. Comput. Fluid Dyn. 20: 181-195, 2006.
- [3] F.R. Menter. *Zonal two- equation k - omega turbulence models for aerodynamic flows*. AIAA Paper 1993-2906, 1993.
- [4] O. Colin, F. Ducros, D. Veynante, and T. Poinso. *A Thickened Flame model for Large Eddy Simulations of turbulent premixed combustion*. Physics of Fluids, 12-7:1843–1863, 2000.

## Étude expérimentale et modélisation des propriétés radiatives de mélanges gazeux CO<sub>2</sub>-N<sub>2</sub> à très haute température : Applications aux rentrées atmosphériques martiennes

Sébastien DEPRAZ (DEFA)

Directeur de thèse : Anouar Soufiani (Laboratoire EM2C, Ecole Centrale Paris)  
Encadrant ONERA : Lionel Tessé (DEFA)

Lors d'une mission d'exploration planétaire, la rentrée du véhicule spatial dans l'atmosphère est une phase critique durant laquelle l'appareil subit un important échauffement pariétal. Afin de préserver l'intégrité de l'appareil et de sa charge utile, un système de protection thermique équipe les sondes d'exploration. Le dimensionnement de tels systèmes repose sur la prédiction de la charge thermique reçue par l'appareil lors de la phase de rentrée. L'échauffement de la paroi est dû aux transferts convectifs mais également radiatifs, lesquels peuvent devenir prédominants selon le type de rentrée. En effet, pour des rentrées à vitesses hypersoniques, un plasma à très haute température se forme dans la couche de choc devant l'engin. Ce plasma émet un important rayonnement qui contribue de manière significative à l'échauffement de la paroi.

Les objectifs de la thèse sont de deux ordres. D'une part, il s'agit de valider expérimentalement à très haute température la base de données spectroscopique développée au laboratoire pour la molécule CO<sub>2</sub> dans l'infrarouge (zones de 2,7 et 4,3 microns) et de l'adapter en cas de désaccord majeur avec l'expérience. D'autre part il conviendra de développer un modèle simplifié (type MSBE) afin d'implémenter la base de données dans le code de calcul ASTRE [1] à l'ONERA. Un couplage entre les calculs de rayonnement obtenus avec ASTRE et les calculs CFD obtenus avec le code CelHyo2D [2,3] permettra par la suite de mieux simuler la charge thermique perçue par la sonde et ainsi d'améliorer le dimensionnement des protections thermiques de l'engin.

La base de données spectroscopique des propriétés radiatives de la molécule CO<sub>2</sub> disponible au laboratoire EM2C a été initialement développée pour des applications à des gaz de combustion. Elle a été validée jusqu'à des températures de l'ordre de 2000-2500K [4]. Cela reste insuffisant pour des applications de type rentrées atmosphériques martiennes où les températures peuvent atteindre 7000 K, la contribution de la molécule CO<sub>2</sub> au flux radiatif total étant prédominante jusqu'à 4500 K (Figure 1). Afin de vérifier la fiabilité de l'extrapolation faite à très haute température, un banc expérimental a été mis en place (Figure 2). Un plasma de CO<sub>2</sub> est généré à l'aide d'une source micro-ondes [5]. Ce plasma est confiné au moyen d'un tube en quartz (celui-ci doit être prochainement remplacé par un tube en saphir afin de pouvoir avoir accès à l'émission du CO<sub>2</sub> autour de 4,3 microns, longueur d'onde absorbée par le quartz) et observé dans l'infrarouge au moyen d'un spectromètre à transformée de Fourier. L'inversion d'Abel des données permet de revenir aux grandeurs locales d'émissivité. Les spectres ainsi obtenus sont comparés en absolu avec des spectres simulés pour CO<sub>2</sub>, sachant qu'on se base sur l'émissivité de CO (dont les propriétés sont bien connues) ainsi que sur l'émission des molécules diatomiques dans le visible et UV pour déterminer le profil de température et les concentrations des différentes espèces. Des codes ont été développés à ces fins pour le traitement des signaux.

Des premiers résultats ont été obtenus et sont encourageants (Figure 4) mais avant d'obtenir les données permettant de valider la base de données, il faut achever de mettre le trajet optique sous vide pour s'affranchir de l'absorption par l'air ambiant (voir zone 3400-3800 cm<sup>-1</sup> Figure 3), celle-ci perturbant les observations effectuées sur les raies de CO<sub>2</sub>. Une fois les codes validés à basse température et le montage achevé, nous pourrons faire des comparaisons à plus haute température – au moins jusqu'à 4500-5000K.

Dans la deuxième phase de la thèse, afin d'accélérer les calculs et d'alléger l'espace mémoire requis pour les simulations, un modèle simplifié de type modèle statistique à bandes étroites (MSBE) sera construit pour l'implémentation de la base de données spectroscopique de CO<sub>2</sub>, ainsi que celles relatives aux molécules diatomiques présentes dans le plasma, dans le code ASTRE. Cela conduira à des simulations couplées entre la CFD et le rayonnement dans le cadre de rentrées atmosphériques martiennes.

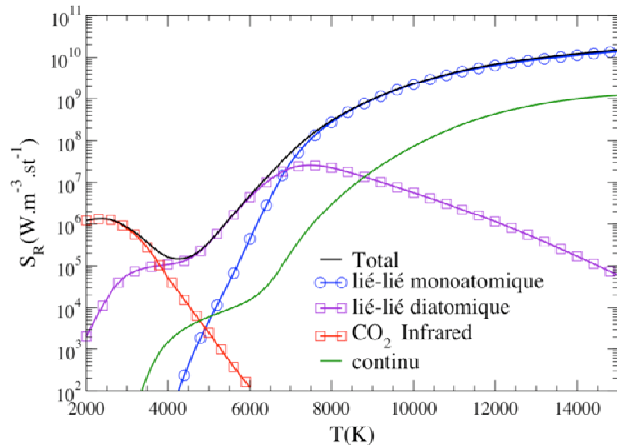


Figure 1 : Contributions de différents mécanismes à l'émission mince dans un plasma de CO<sub>2</sub> à l'ETL.

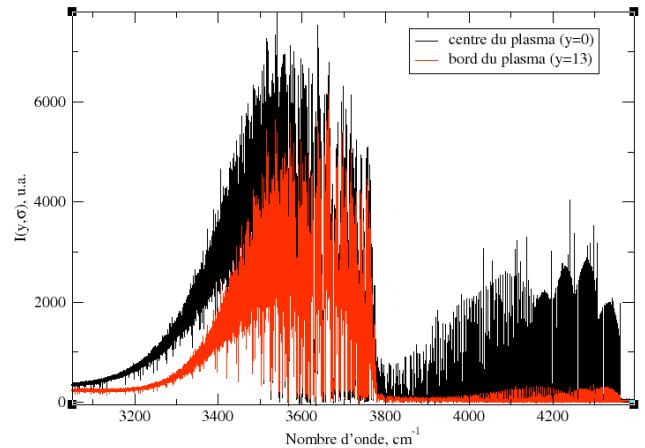


Figure 3 : Comparaison de l'émission de CO<sub>2</sub> et de CO au centre et au bord du plasma (émission intégrée et avant calibration)



Figure 2 : Montage Expérimental (en fonctionnement)

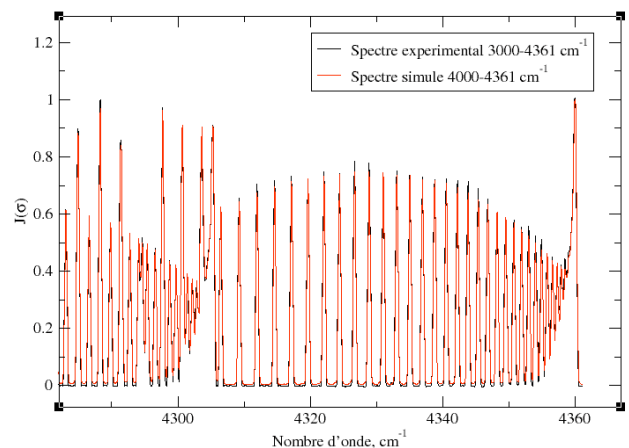


Figure 4 : Comparaison théorie/expérience pour l'émission locale normalisée des bandes  $\Delta v=2$  de CO ( $r=13$  mm et  $T=2400$ K)

#### Références bibliographiques :

- [1] L. Tessé. *Modélisation des transferts radiatifs dans les flammes turbulentes par une méthode de Monte-Carlo*. Thèse de doctorat, École Centrale Paris, 2001.
- [2] F. Coquel and C. Marmignon. *Numerical methods for weakly ionized gas*. *Astrophysics and Space Science*, 260(1-2):15–27, 1998.
- [3] T. Soubrié. *Prise en compte de l'ionisation et du rayonnement dans les écoulements de rentrée terrestre et martienne*. Thèse de doctorat, École Nationale Supérieure de l'Aéronautique et de l'Espace, 2006.
- [4] D. Scutaru, *Etudes théorique et expérimentale de l'absorption IR par CO<sub>2</sub> à haute température, application à des modèles de rayonnement des gaz*, Thèse de doctorat, Laboratoire EM2C-ECP, 1994.
- [5] Y. Babou, *Transferts radiatifs dans les plasmas de mélanges CO<sub>2</sub>-N<sub>2</sub>, base de données spectroscopiques, étude expérimentale et application aux rentrées atmosphériques*, Thèse de doctorat, Laboratoire EM2C-ECP, 2007.

## Simulation numérique de dispositifs de contrôle du buffeting culot sur des configurations de lanceur

Pierre-Elie WEISS (DAAP)

Directeur de thèse : Pierre Sagaut (IJLRA-UMPC/Paris VI)  
Encadrant ONERA : Sébastien Deck (DAAP)

L'exploitation des données en vol d'Ariane 5 a mis en évidence la présence de fortes fluctuations de pression pouvant induire des efforts instationnaires repris par les vérins du moteur Vulcain. L'origine de ces fluctuations est liée aux phénomènes tridimensionnels et instationnaires des courants de recirculation, organisés autour d'enroulements tourbillonnaires [1], qui siègent au niveau de la zone décollée caractéristique du culot d'un lanceur.

Les instabilités de l'écoulement de culot peuvent donc constituer une source d'excitation (le *buffeting culot*), nuisible à la charge utile et au pilotage du lanceur. La nécessité d'améliorer le confort de la charge utile en terme de réduction des efforts de *buffeting* conduit à l'examen de nouveaux concepts de contrôle aérodynamique [2]. L'objectif de cette étude est d'estimer des charges latérales instationnaires (*buffeting culot*) et d'évaluer des dispositifs de contrôle de ces efforts. Pour ce faire, une étude numérique basée sur des modélisations avancées de type RANS/LES a été entreprise [3]. Les travaux de validation portent sur une configuration axisymétrique testée expérimentalement dans la soufflerie S3Ch de l'ONERA (Meudon). La maquette est composée d'un corps central doté d'une émergence. Le nombre de Mach de l'écoulement externe est égal à 0,7 avec un nombre de Reynolds basé sur le diamètre du cylindre le plus large  $Re_D \sim 1,2 \cdot 10^6$ . Le maillage a pu être limité à  $12 \cdot 10^6$  points grâce à une topologie en O.

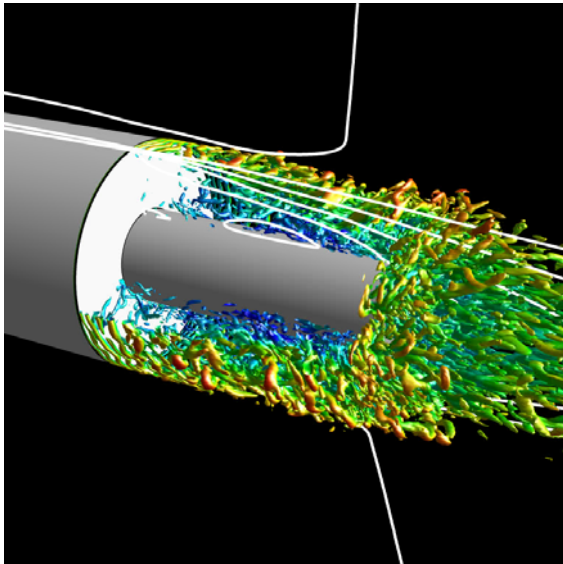


Figure 1a : Visualisation des structures turbulentes en aval de l'arrière-corps axisymétrique

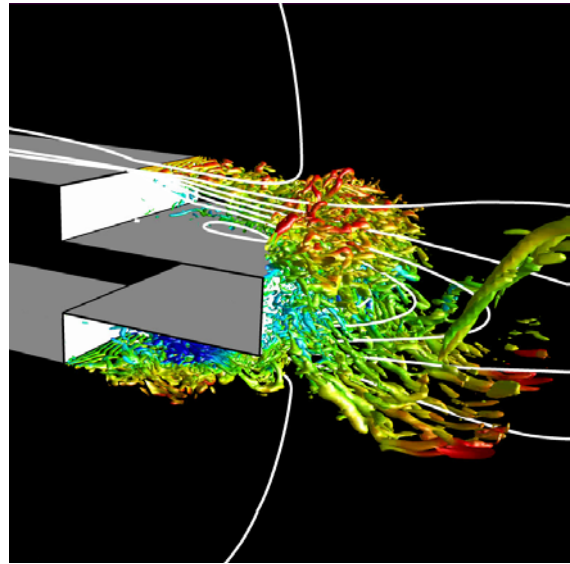


Figure 1b : Visualisation des structures turbulentes en aval de l'arrière-corps plan

De nombreuses études relatives au contrôle des écoulements décollés sur des cas plans ayant été menées par le passé, une comparaison rigoureuse entre le cas axisymétrique et son homologue plan a été effectuée. Ainsi, la transposition directe de dispositifs de contrôle réputés efficaces pour des cas plans à des cas axisymétriques se révèle difficile à réaliser du fait des différences phénoménologiques de ces écoulements. L'organisation générale du champ aérodynamique instantané pour les deux cas est donnée sur les figures 1a et 1b. Il apparaît clairement que les dynamiques mises en jeu dans les cas axisymétrique et plan sont singulièrement différentes.

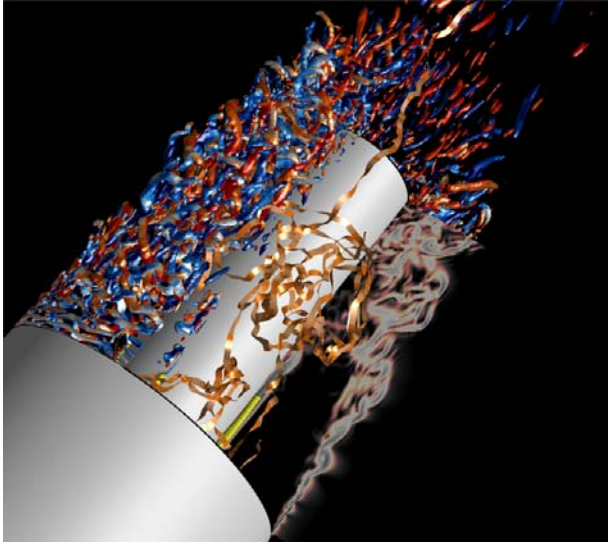


Figure 2a : Visualisation des structures turbulentes en aval de l'arrière-corps axisymétrique contrôlé (en jaune : estimation relative de la longueur de pénétration des jets dans l'écoulement de recirculation)

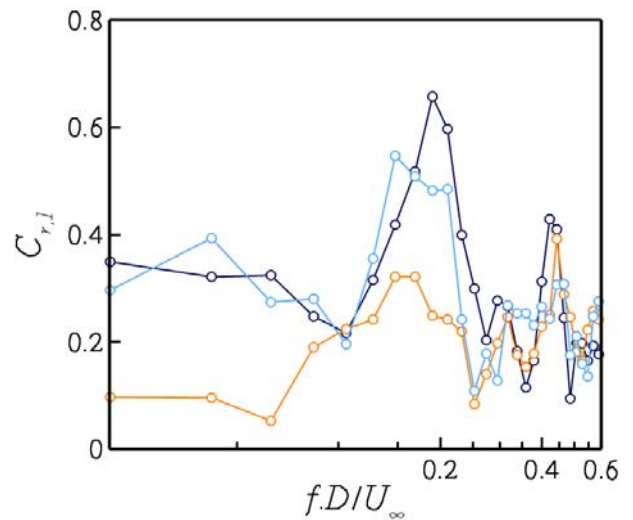


Figure 2b : Spectre de pression fluctuante pour le mode antisymétrique. (bleu foncé : cas non contrôlé ; bleu : cas de contrôle au niveau de la couche de mélange ; orange : cas de contrôle à la jonction culot / émergence)

Dans le cas de la configuration axisymétrique (configuration à contrôler), l'examen du champ de pression fluctuant a permis de mettre en évidence l'occurrence d'un mode azimutal antisymétrique ( $m=1$ ) conduisant à la génération d'efforts latéraux. Une analyse en deux points des fluctuations de pression pariétale a permis d'étudier l'organisation spatiale du champ de pression fluctuant et de localiser sur l'arrière-corps le mode azimutal  $m=1$ . Une étude de stabilité locale associée à cette localisation spatiale l'occurrence d'une zone d'instabilité absolue. Cette zone semble piloter la dynamique de l'écoulement et constitue de ce fait une zone potentiellement réceptive à un dispositif de contrôle. Plusieurs dispositifs de contrôle ont donc été simulés afin d'agir directement ou non sur cette zone. La figure 2a illustre un cas efficace de contrôle longitudinal via un soufflage équiréparti en azimut à la jonction culot/émergence. La figure 2b montre l'action du contrôle sur le mode azimutal  $m=1$  à savoir une diminution significative de l'énergie de ce mode aux basses fréquences pour le cas de la figure 2a (courbe orange) par rapport au cas de référence (courbe bleu foncé). Le contrôle direct de la zone de réceptivité détectée précédemment agit donc significativement sur les charges latérales à la différence du dispositif dont l'énergie est représentée par la courbe bleu de la figure 2b. Il consiste en un soufflage équiréparti en azimut au niveau du départ des instabilités de la couche de mélange et influence ainsi indirectement la zone d'instabilité absolue.

Cette étude confirme donc la possibilité de contrôler les charges latérales de façon efficace et permet d'envisager des post-traitements approfondis visant à la compréhension du mécanisme régissant le contrôle ainsi qu'une étude d'optimisation du contrôle.

- [1] D. Deprés. *Analyse physique et modélisation des instationnarités dans les écoulements d'arrière-corps transsonique*. Thèse de doctorat, Université de la Méditerranée Aix-Marseille II, Ecole Supérieure de Mécanique de Marseille, soutenue le 23 octobre 2003.
- [2] I. Lee, H. J. Sung. *Multiple-arrayed pressure measurement for investigation of the unsteady flow structure of a reattaching shear layer*. Journal of Fluid Mechanics, vol. 463, July 2002, pp 377-402.
- [3] S. Deck, P. Thorigny. *Unsteadiness of an axisymmetric separating-reattaching flow: Numerical investigation*, Physics of Fluids, 2007, vol. 19.

## **Transferts radiatifs dans les plasmas hors d'équilibre : Applications aux écoulements de rentrées atmosphériques terrestres**

**Jean-Michel LAMET (DEFA)**

Directrice de thèse : Marie-Yvonne Perrin (École Centrale Paris, laboratoire EM2C)  
Encadrants ONERA : Jean-Luc Vérant (DMAE), Lionel Tessé (DEFA)

Lors d'une mission d'exploration planétaire, la rentrée du véhicule spatial dans l'atmosphère est une phase critique durant laquelle l'appareil subit un important échauffement pariétal. Afin de préserver l'intégrité de l'appareil et de sa charge utile, un système de protections thermiques équipe les sondes d'exploration. Le dimensionnement de tels systèmes repose sur la prédiction de la charge thermique reçue par l'appareil lors de la phase de rentrée. L'échauffement de la paroi est dû aux transferts convectifs mais également radiatifs. En effet, pour des rentrées à vitesses hypersoniques, un plasma hors d'équilibre à très haute température se forme autour de l'engin dans la couche de choc. Celui-ci émet alors un important rayonnement qui contribue de manière significative à l'échauffement de la paroi.

L'objectif de la thèse est d'une part, de simuler numériquement, avec le code ASTRE [1], le transfert radiatif dans les plasmas de rentrée terrestre, hors d'équilibre chimique et thermique, et d'autre part de coupler les phénomènes de rayonnement aux calculs CFD réalisés avec le code CelHyo2D [2,3] afin de prédire au mieux la charge thermique reçue par la sonde.

Pour ce faire, dans un premier temps, l'utilisation de la base de données spectroscopiques HTGR du laboratoire EM2C, initialement développée pour des applications de plasmas à l'équilibre thermodynamique local (ETL) [4], a été étendue à des applications hors ETL. À partir de ce travail et dans le cadre d'un Workshop organisé par l'Agence Spatiale Européenne (ESA), des calculs raie par raie de luminance sur ligne d'arrêt de la sonde FIRE II [5] ont été réalisés pour quatre points de trajectoire à partir de champs aérothermochimiques fournis par l'ESA. Les comparaisons des résultats aux mesures en vol ont montré un accord général relativement bon entre mesures et calculs mais aussi l'importance de prendre en compte le déséquilibre thermo-chimique dans les calculs de rayonnement [6]. Ces calculs à haute résolution sont précis mais trop coûteux en temps de calcul pour être mis en œuvre sur des géométries 3D et pour être utilisés de manière itérative en vue d'étudier l'effet du rayonnement sur l'aérothermochimie de l'écoulement.

Afin de simplifier et d'accélérer les calculs de rayonnement, un modèle de propriétés radiatives, type Modèle Statistique à Bandes Étroites (MSBE) [7], pour les systèmes moléculaires optiquement épais a été construit à partir de la base de données spectroscopiques HTGR. Ce modèle est combiné à un modèle simple à coefficients (d'absorption et d'émission) moyens par bande pour les systèmes moléculaires optiquement minces et les continua et à une approche raie par raie pour les spectres atomiques. Ce nouveau modèle hybride a été mis en œuvre et comparé avec succès aux calculs réalisés précédemment sur ligne d'arrêt avec un gain important en temps de calcul (facteur 1000). Le modèle a été ensuite implémenté dans le code ASTRE, solveur radiatif 3D basé sur une approche Monte-Carlo. L'implémentation a été validée dans une configuration plan tangent par rapport à une méthode de lancer de rayons. Des calculs 3D relatifs à l'expérience FIRE II ont par la suite été réalisés avec le code ASTRE [8]. Le haut de la figure 1 montre, à ce titre, le flux radiatif reçu par la paroi de la sonde FIRE II pour le point de trajectoire 1643 s et pour un nombre de rayons différents (20 et 200 millions). La partie basse de la figure 1 indique les écarts type des deux calculs. On constate que pour 200 millions de rayons, le calcul est convergé.

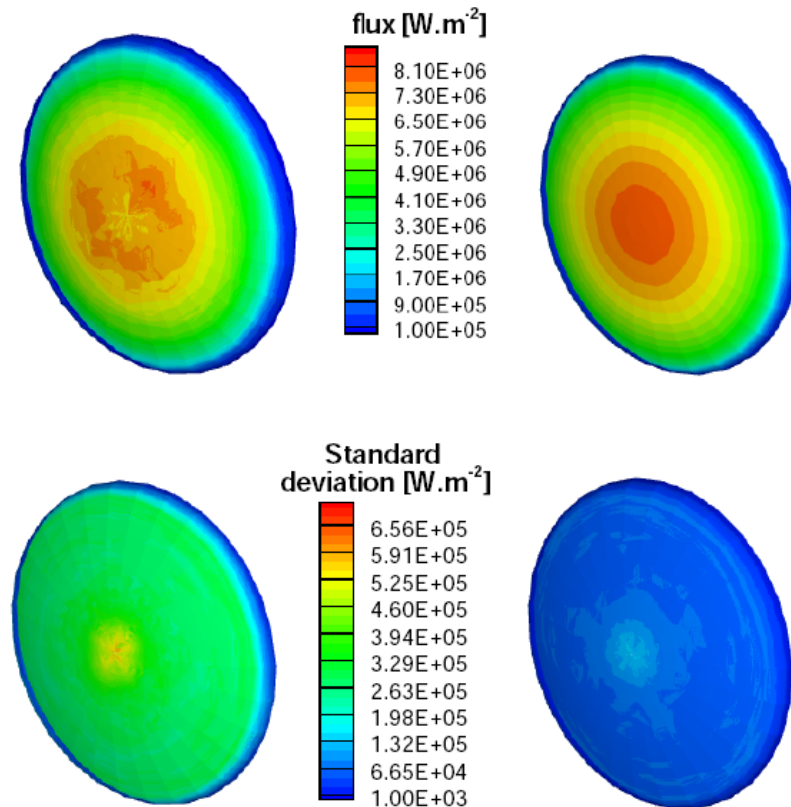


Figure 1 : Flux radiatif à la paroi avec son écart type pour le point de trajectoire 1643 s de la sonde FIRE II. À gauche, les résultats pour 20 millions de rayons et à droite pour 200 millions.

- [1] L. Tessé. *Modélisation des transferts radiatifs dans les flammes turbulentes par une méthode de Monte-Carlo*. Thèse de doctorat, École Centrale Paris, 2001.
- [2] F. Coquel and C. Marmignon. *Numerical methods for weakly ionized gas*. *Astrophysics and Space Science*, 260(1-2):15–27, 1998.
- [3] T. Soubrié. *Prise en compte de l'ionisation et du rayonnement dans les écoulements de rentrée terrestre et martienne*. Thèse de doctorat, École Nationale Supérieure de l'Aéronautique et de l'Espace, 2006.
- [4] S. Chauveau, Ch. Deron, M.-Y. Perrin, Ph. Rivière, and A. Soufiani. *JQSRT*, 77:113–130, 2003.
- [5] J.-M. Lamet, Y. Babou, Ph. Rivière, M.-Y. Perrin, A. Soufiani, Proceedings of the 2nd Int. Workshop on Radiation of High Temperature Gases in Atmospheric Entry, Rome, 2006.
- [6] J.-M. Lamet, Y. Babou, Ph. Riviere, M.-Y. Perrin, and A. Soufiani. *JQSRT*, 109:235– 244, 2008.
- [7] R. Goody and Y. Young. *Atmospheric Radiation*. Oxford University Press, 1989.
- [8] J.-M. Lamet, Ph. Rivière, L. Tessé, A. Soufiani, M.-Y. Perrin. Proceedings of the 3rd Int. Workshop on Radiation of High Temperature Gases in Atmospheric Entry, Heraklion, 2008.