

# Méthodes numériques et modèles pour la simulation aux grandes échelles couplée aux transferts radiatifs.

## Contexte

Le laboratoire EM2C est reconnu depuis plusieurs années pour l'expertise développée dans l'interaction des transferts radiatifs avec la combustion au travers de simulations aux grandes échelles (LES). Une approche Monte Carlo optimisée [1-2] est retenue pour résoudre l'équation de transfert radiatif, ce qui fournit des résultats de référence avec une précision contrôlée. Combinée à une description précise des propriétés radiatives des gaz, les calculs couplés ainsi conduits sont d'une grande fidélité malgré un coût de calcul conséquent mais désormais possible avec les ressources de calcul actuelles. Ces avancées ont permis d'étudier avec une grande précision l'impact du rayonnement sur les couches limites [3-5] et jets [6] turbulents.

Pour l'étude de flammes réelles, la prédiction des températures de paroi résultant des différents transferts thermiques dans la chambre de combustion nécessite un couplage additionnel avec la conduction de la chaleur dans les parois solides. Plusieurs flammes turbulentes [7-9] ont ainsi pu être décrites pour la première fois par des simulations aux grandes échelles multiphysiques où le rayonnement thermique est résolu par un code Monte Carlo. Quelques illustrations d'études combinant codes LES/Thermique Solide/Rayonnement sont présentées dans les figures 1 et 2.

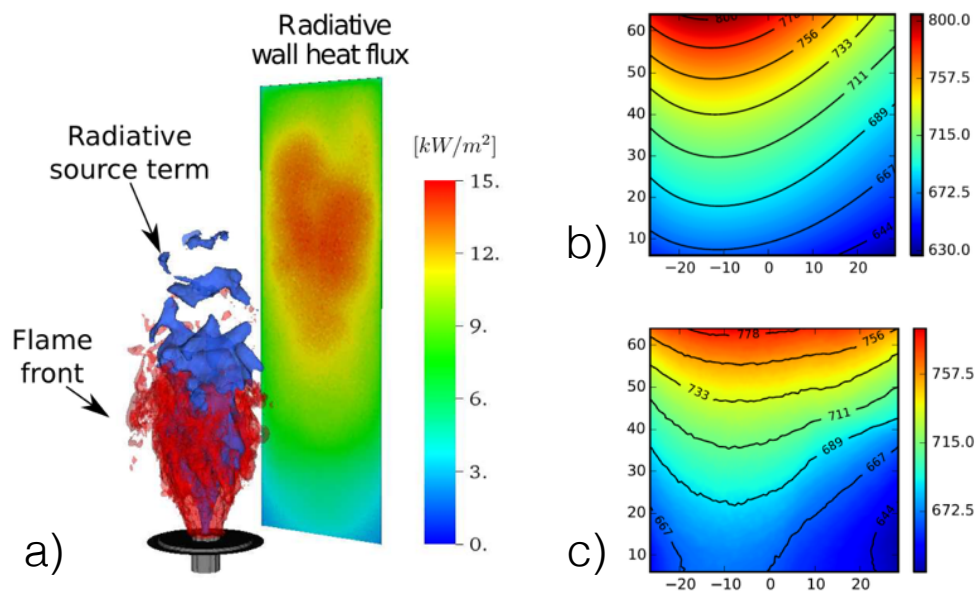


Figure 1 — Flamme swirlée confinée avec prise en compte du rayonnement [7]. a) Vue de la flamme turbulente au sein de la simulation aux grandes échelles multiphysique couplée. b) Mesure de température (en Kelvin) à la paroi. c) Température moyenne pariétale (en Kelvin) obtenue par le calcul couplé LES/Thermique Paroi/Rayonnement

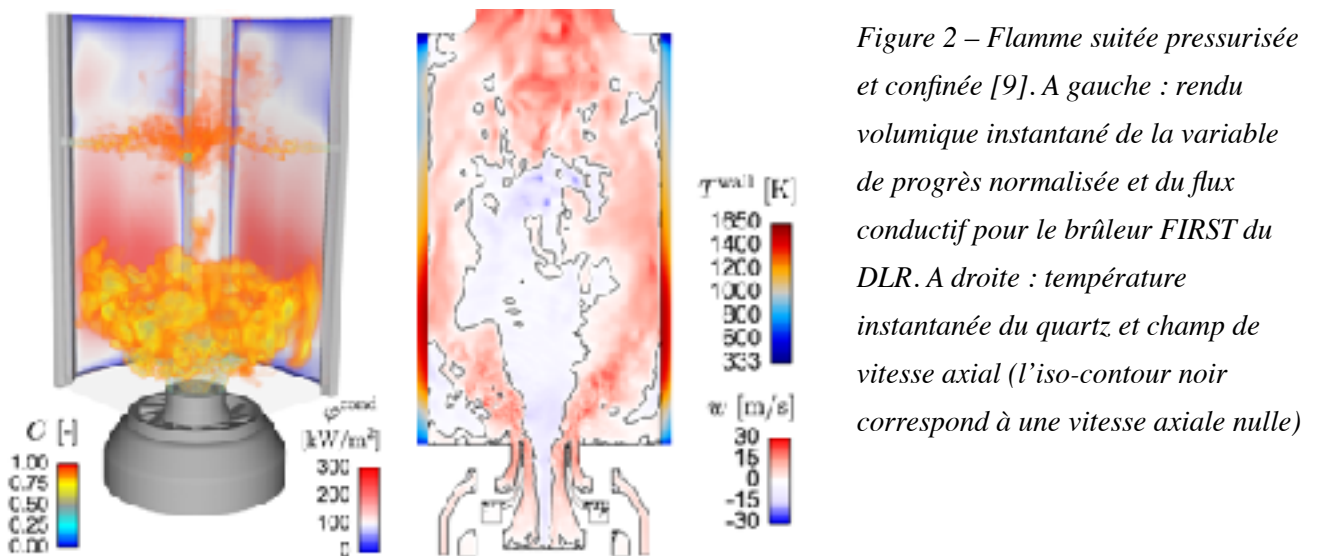


Figure 2 – Flamme suitée pressurisée et confinée [9]. A gauche : rendu volumique instantané de la variable de progrès normalisée et du flux conductif pour le brûleur FIRST du DLR. A droite : température instantanée du quartz et champ de vitesse axiale (l'iso-contour noir correspond à une vitesse axiale nulle)

Le cadre de simulations multiphysiques ainsi développé permet de déterminer avec une grande richesse physique les températures et flux aux parois et leur rétroaction sur l'écoulement turbulent réactif. Plusieurs études restent toutefois nécessaires pour améliorer davantage les méthodes et modèles employés ainsi que la compréhension des transferts dans plusieurs types d'application.

## Objectifs

L'expérience croissante de ces simulations couplées avec le rayonnement thermique demande aujourd'hui d'accroître leur robustesse et de contrôler encore davantage leur précision pour aller vers un compromis précision-coût maîtrisé. Les travaux mèneront à établir des standards de référence pour calculer les phénomènes couplés entre les écoulements turbulents (réactifs ou non) et les transferts radiatifs dans le cadre de simulations haute-fidélité : méthode Monte Carlo pour le rayonnement ; simulation numérique directe (DNS) et simulation aux grandes échelles (LES) pour la turbulence.

Le (la) candidat(e) abordera ainsi dans la thèse plusieurs facettes de tels calculs : choix des paramètres de couplage (période, maillage), amélioration des modèles et méthodes dans le calcul des transferts radiatifs, modèles de sous-maille. Les outils de calculs mis à disposition pendant la thèse sont le code de rayonnement Rainier, développé au laboratoire EM2C, et les codes de simulations d'écoulement turbulent (AVBP, YALES2).

L'ensemble des méthodes et modèles développés et implémentés pourra être testé sur la large batterie de simulations couplées rassemblées lors des études précédentes. Le (la) doctorant(e) pourra comparer les résultats de référence ainsi obtenus avec d'autres types d'approches (DOM, modèles globaux) tels qu'utilisés dans d'autres groupes de recherche.

## **Plan indicatif de la thèse**

*Tâche 1 : Contrôle de la précision des méthodes de couplage entre DNS et rayonnement*

*Tâche 2 : Améliorations des méthodes et modèles au sein du code Monte-Carlo traitant les transferts radiatifs*

*Tâche 3 : Simulation numérique directe couplée de référence à l'aide de ressources de calcul massivement parallèle*

*Tâche 4: Modélisation de sous-maille pour les transferts radiatifs couplés à la simulation aux grandes échelles*

*Extra : Etudier l'intérêt de l'intelligence artificiel pour l'accélération de convergence des calculs de rayonnement et les modèles de sous-maille*

## **Profil et compétences recherchées**

Master ou équivalent en Energétique, Aéronautique ou Mécanique des Fluides. Une expérience en programmation et méthodes numériques est souhaitée. Bonne qualité de rédaction et présentation. Niveau anglais C1.

## **Candidatures :**

Envoyez les documents suivants à [ronan.vicquelin@centralesupelec.fr](mailto:ronan.vicquelin@centralesupelec.fr) :

- Une copie du passeport/carte d'identité
- Une lettre de motivation (~1 page)
- Copies de diplôme et relevés académiques
- Votre CV avec noms et contacts d'au moins deux référents
- Lettres de recommandation envoyées séparément par les référents

## **Contact**

Pr. Ronan Vicquelin ([ronan.vicquelin@centralesupelec.fr](mailto:ronan.vicquelin@centralesupelec.fr))  
Laboratoire EM2C, CNRS, CentraleSupélec, Université Paris-Saclay  
8 rue Joliot Curie  
91192 Gif-surYvette cedex  
FRANCE

## Références

- [1] Y. F. Zhang, O. Gicquel, and J. Taine. Optimized emission-based reciprocity monte carlo method to speed up computation in complex systems. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 55(25–26) :8172–8177, 12 2012.
- [2] Palluotto, L., Dumont, N., Rodrigues, P., Gicquel, O., and Vicquelin, R. (2019). Assessment of randomized quasi-monte carlo method efficiency in radiative heat transfer simulations. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 236:106570.
- [3] Y. F. Zhang, R. Vicquelin, O. Gicquel, and J. Taine. Physical study of radiation effects on the boundary layer structure in a turbulent channel flow. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 61(0) :654–666, 6 2013.
- [4] R. Vicquelin, Y. F. Zhang, O. Gicquel, and J. Taine. Effects of radiation in turbulent channel flow : analysis of coupled direct numerical simulations. *Journal of Fluid Mechanics*, 753 :360–401, 8 2014.
- [5] Y. F. Zhang, R. Vicquelin, O. Gicquel, and J. Taine. A wall model for les accounting for radiation effects. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 67(0) :712–723, 12 2013.
- [6] Armengol, J. M., Vicquelin, R., Coussement, A., Santos, R. G., and Gicquel, O. (2019). Scaling of heated plane jets with moderate radiative heat transfer in coupled dns. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 139:456–474.
- [7] C. Koren, R. Vicquelin, and O. Gicquel. Multiphysics simulation combining large-eddy simulation, wall heat conduction and radiative energy transfer to predict wall temperature induced by a confined premixed swirling flame. *Flow Turbulence and Combustion*, 201(1): 77-102, 2018.
- [8] Rodrigues, P., Gicquel, O., Franzelli, B., Darabiha, N., and Vicquelin, R. (2019). Analysis of radiative transfer in a turbulent sooting jet flame using a monte carlo method coupled to large eddy simulation. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 235:187–203.
- [9] Rodrigues, P. (2018) Modélisation multiphysique de flammes turbulentes suitées avec la prise en compte des transferts radiatifs et des transferts de chaleur pariétaux. Thèse de l'Université Paris-Saclay récompensée par le prix Gérard de Soete du Groupement Français de Combustion.