

PROPOSITION DE SUJET DE THESE

Intitulé : **Modélisation et simulation des effets des déséquilibres vibrationnels moléculaires sur le rayonnement des jets de moteurs fusées à haute altitude**

Référence : **MFE-DMPE-2026-08**

(à rappeler dans toute correspondance)

Début de la thèse : Janvier 2027

Date limite de candidature : Juin 2026 (de préférence avant avril 2026)

Mots clés

Jet, Rayonnement, écoulement supersonique, déséquilibre vibrationnel, modèles de bandes, signature infrarouge

Profil et compétences recherchées

Diplôme d'Ingénieur et/ou Master 2 Recherche

Connaissances en énergétique, en physique des transferts radiatifs et/ou mécaniques des fluides, goût pour la modélisation et la simulation numérique

Présentation du projet doctoral, contexte et objectif

Les moteurs à propergol solide ou à ergol liquide utilisés dans les engins aéronautiques produisent habituellement des trajectoires qui pénètrent la haute atmosphère. Au-dessus de 80 km d'altitude, le fonctionnement de ces moteurs engendre des jets composés de produits de combustion dont la portée peut atteindre plusieurs centaines de mètres. Le fort rapport de pression entre la chambre du moteur et le milieu extérieur raréfié provoque une très forte détente de l'écoulement, entraînant un déséquilibre thermique important. Il devient alors indispensable d'utiliser une modélisation thermodynamique multi-température afin de décrire les degrés d'énergie internes des différentes espèces gazeuses présentes. Dans le cadre de l'alerte avancée, la détermination de la signature infrarouge de ces jets à haute altitude constitue un enjeu majeur, mais demeure un défi scientifique tant l'influence du déséquilibre thermique sur l'écoulement et le rayonnement du jet reste mal maîtrisée.

Depuis de nombreuses années, l'ONERA conçoit des outils numériques pour simuler les jets de moteurs et en caractériser la signature infrarouge. Ces dernières années, des travaux ont été menés pour modéliser et simuler les jets à haute altitude en intégrant le déséquilibre thermique entre le gaz et les particules d'alumine pour des propergols dopés en aluminium [1][2][3], et plus récemment [4][5][6], l'attention a été portée sur le déséquilibre vibrationnel des molécules diatomiques (CO, N₂, HCl) ainsi que sur la molécule triatomique CO₂, plus complexe à modéliser de par ses trois modes de vibration v₁, v₂, v₃ (avec v₁ et v₂ couplés). Ces études récentes ont mis en évidence l'importance du déséquilibre vibrationnel sur le rayonnement du jet. Dans ces travaux, des tests de sensibilité au déséquilibre vibrationnel de la molécule H₂O, également présente dans le jet et généralement prise en compte à l'équilibre thermodynamique local (ETL), ont montré un impact significatif sur la signature infrarouge du jet.

Dans ce contexte, le sujet de la thèse porte sur un problème fortement multiphysique : la mécanique des fluides compressibles et réactifs, la thermochimie hors équilibre, le rayonnement de gaz hors ETL et leurs interactions mutuelles. L'objectif principal est de développer une modélisation du déséquilibre vibrationnel de la molécule H₂O dans le jet ainsi que son rayonnement hors ETL et son interaction avec l'écoulement.

Le déroulement de la thèse se fera en trois phases.

La première phase sera consacrée à la modélisation multi-température du jet, avec en particulier, l'étude du déséquilibre vibrationnel de H₂O via une cinétique détaillée pour décrire le peuplement des niveaux de vibration de cette molécule en interaction avec les autres molécules présentes dans le jet (CO₂, CO, HCl, N₂). Cette étude permettra d'avoir un schéma complet de cinétique vibrationnelle et une représentation fine des différents déséquilibres vibrationnels de l'ensemble des

molécules (8 températures de vibration en plus de la température de translation-rotation). A l'issue de ce travail de modélisation, un travail d'implantation sera effectué dans le solveur Navier-Stokes multi-température de l'ONERA (CHARME-MTE) dédié aux applications énergétiques.

Dans une deuxième phase, des bases de données spectroscopiques [7] seront exploitées pour générer des spectres d'émission et d'absorption à haute résolution (approche dite raie-par-raie (RPR)) de la molécule H₂O pour des conditions représentatives de jets à haute altitude en tenant compte des populations des niveaux d'énergie basées sur l'approche multi-température mise au point lors de la première phase. Ces spectres de référence serviront à construire des modèles statistiques à bandes étroites, à plus faible résolution spectrale pour être compatible de avec des simulations 3D très consommatrices en ressources informatiques, mais permettant néanmoins de tenir compte des forts gradients thermochimiques au sein du jet. Lors de ce travail, une attention particulière sera portée au traitement des corrélations spectrales existantes entre les phénomènes d'émission, d'absorption et de transmission pour un milieu hors équilibre thermique. De plus, une réflexion sera menée sur l'usage de ce type de modélisation pour prendre en compte la transmission atmosphérique entre le jet et un détecteur positionné soit au sol (capteur segments sol) soit en vol (capteur aéroporté) soit dans l'espace (capteur satellitaire). L'ensemble de ces modélisations sera ensuite intégré dans les codes de transfert radiatif de l'ONERA [8][9].

La troisième et dernière phase de la thèse sera dédiée à la mise en œuvre des outils numériques enrichies des nouvelles modélisations pour simuler des cas de la littérature afin de valider l'ensemble de la chaîne de calcul Ecoulement / Rayonnement. Différents aspects seront notamment à l'étude, les effets de couplage entre le rayonnement et l'écoulement, les effets d'épaisseur optique, et de surcroît, les effets de déséquilibre vibrationnel de H₂O dans la zone de détente du jet mais aussi dans la couche de mélange avec l'écoulement extérieur.

- [1] Binauld, Q. (2018). Modélisation et simulation du rayonnement dans les jets de moteurs à propergol solide à haute altitude (Doctoral dissertation, Université Paris Saclay (COmUE)).
- [2] Binauld, Q., Lamet, J. M., Tessé, L., Rivière, P., & Soufiani, A. (2019). Numerical simulation of radiation in high altitude solid propellant rocket plumes. *Acta Astronautica*, 158, 351-360.
- [3] Binauld, Q., Rivière, P., Lamet, J. M., Tessé, L., & Soufiani, A. (2019). CO₂ IR radiation modelling with a multi-temperature approach in flows under vibrational nonequilibrium. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 239, 106652.
- [4] Janodet, G. (2025). Modélisation de jets de moteurs-fusées à haute altitude et caractérisation de leur signature infrarouge (Doctoral dissertation, Université Paris-Saclay).
- [5] Janodet, G., Rivière, P., Lamet, J. M., Rialland, V., Tessé, L., & Soufiani, A. (2023). Modelling radiative properties of gas mixtures in nonequilibrium high-altitude rocket plumes. *Proceedings of the 10th International Symposium on Radiative Transfer, RAD-23*.
- [6] Janodet, G., Rivière, P., Lamet, J. M., Rialland, V., Tessé, L., & Soufiani, A. (2024). Statistical Narrow Band model for vibrational nonequilibrium CO₂ radiation. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 314, 108856.
- [7] Rothman, L. S., Gordon, I. E., Barber, R. J., Dothe, H., Gamache, R. R., Goldman, A., ... & Tennyson, J. (2010). HITRAN, the high-temperature molecular spectroscopic database. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 111(15), 2139-2150.
- [8] Tessé, L., & Lamet, J. M. Radiative Transfer Modeling Developed at Onera for Numerical Simulations of Reactive Flows. *J. AerospaceLab* 2, 2011.
- [9] Rialland V, Guy A, Gueyffier D, Perez P, Roblin A, Smithson T, "Infrared signature modelling of a rocket jet plume – comparison with flight measurements", *Journal of Physics: Conference Series* 676 (2016).

Collaborations envisagées

Cette thèse sera effectuée dans le cadre d'une collaboration ONERA-EM2C. Le candidat fera une première partie de la thèse au laboratoire EM2C (CentraleSupélec) suivie d'une période à l'ONERA. L'encadrement ONERA se fera entre deux départements, le DMPE et le DOTA sur les sites de Toulouse et Palaiseau.

<p>Laboratoire d'accueil à l'ONERA Département : Département Multi-Physique pour l'Energétique Lieu (centre ONERA) : Toulouse Contact : Jean-Michel Lamet / Valérie Rialland / Guillaume Janodet Tél. : 05 62 25 28 41 / 01 80 38 63 81 / 05 62 25 28 47 Email : jean-michel.lamet@onera.fr / valerie.rialland@onera.fr / guillaume.janodet@onera.fr</p>	<p>Directeur de thèse Nom : Anouar Soufiani, Philippe Rivière Laboratoire : EM2C (CentraleSupélec) Tél. : 01 75 31 60 71 Email : anouar.soufiani@centralesupelec.fr / philippe.riviere@centralesupelec.fr</p>
---	--

Pour plus d'informations : <https://www.onera.fr/rejoindre-onera/la-formation-par-la-recherche>