

## Avis de Soutenance

Monsieur Ulysse Dubuet

Soutiendra publiquement ses travaux de thèse intitulés

***Kinetics of a Nonequilibrium Recombining Air/Argon Plasma***  
*Cinétique d'un plasma air/argon en recombinaison hors-équilibre*

Thèse dirigée par **Marie-Yvonne PERRIN et Christophe LAUX**

Le **mercredi 7 février 2024 à 9h30**

À CentraleSupélec, 3 rue Joliot-Curie, 91192 Gif-sur-Yvette Cedex

Théâtre Rousseau (Bâtiment Bouygues)



Image: ESA - D. Ducros

*Artist rendering of an atmospheric reentry. Credits: D. Ducros, ESA.*

### Composition du jury

**Dr. Brett CRUDEN**

**Pr. Elena KUSTOVA**

**Pr. Arnaud BULTEL**

**Dr. Mario LINO DA SILVA**

**Dr. Kazuhisa FUJITA**

**Mr. Philippe TRAN**

NASA Ames Research Center, USA, *Research Scientist*

Saint Petersburg State University, Russia, *Professor*

Université Rouen-Normandie, France, *Professor*

Instituto Superior Técnico Lisboa, Portugal, *Assistant Professor*

ElevationSpace Inc., Japan, *CTO*

ArianeGroup, France, *Ingénieur Expert*

Rapporteur

Rapporteur

Examinatrice

Examineur

Invité

Invité

**Titre:** Cinétique d'un plasma air/argon en recombinaison hors-équilibre

**Mots-clés:** plasma hors-équilibre ; cinétique chimique ; modèle collisionnel-radiatif ; recombinaison ; entrée atmosphérique ; arrière-corps

**Résumé:** Les entrées atmosphériques sont l'une des phases les plus critiques des missions spatiales. Un vaisseau entrant dans l'atmosphère terrestre subit un fort chauffage via conduction et rayonnement. Dans la région de l'arrière-corps, le flux thermique est dominé par le rayonnement, qui est prédit avec de fortes incertitudes qui induisent une surestimation des marges de sécurité pour le dimensionnement des TPS. Les incertitudes proviennent des limites des modèles cinétiques pour la prédiction des densités hors-équilibre des principales espèces rayonnantes dans la zone d'arrière-corps.

Cette thèse s'intéresse à la modélisation de la cinétique détaillée d'un plasma d'air en recombinaison. Elle vise à fournir une meilleure compréhension des principaux mécanismes de recombinaison et une meilleure prédiction des populations des états excités dans un plasma d'air en recombinaison. Pour cela, nous comparons les prédictions du modèle collisionnel-radiatif à des mesures dans un plasma d'air en recombinaison hors-équilibre.

Nous avons développé un modèle électronique-spécifique pour un plasma d'air/argon. Une attention particulière a été apportée aux travaux précédents réalisés au lab. EM2C sur l'azote, et à leur extension pour d'autres espèces de l'air comme les états électroniques de l'oxide d'azote.

Le modèle a été comparé à des mesures d'émission dans un plasma d'air/argon montrant des populations fortement déséquilibrées.

Nous avons comparé les prédictions du modèle à des mesures de densité des électrons, NO(X, A, B, C, D) et N<sub>2</sub>(C).

Dans les expériences, la recombinaison maintient des conditions d'équilibre jusqu'à 15 cm, mais pas entre 30 et 65 cm. Les simulations prédisent une recombinaison trop lente jusqu'à 15 cm, et trop rapide entre 40 et 65 cm. Les simulations peuvent être améliorées avant 15 cm en augmentant le taux de recombinaison de NO(X) à hautes températures. A basses températures, le modèle n'explique pas le comportement gelé. Nous avons été capables d'en extraire des informations importantes sur les principaux mécanismes responsables de l'évolution des populations dans le mélange. La recombinaison des atomes d'azote se fait principalement via recombinaison dans N<sub>2</sub>(A) et dans NO(X). De plus, le modèle souligne le rôle central des atomes pour la population de plusieurs autres espèces, via des réactions imposant des équilibres partiels entre les espèces. Nous avons pu obtenir les densités de N(4S) et de N(2D) à partir des mesures OES de densité de NO(C) et N<sub>2</sub>(C) grâce à l'analyse des équilibres partiels dans le mélange.

Cette thèse est la première comparaison quantitative entre un modèle électronique-spécifique et des mesures de densité des états excités dans un plasma air/argon en recombinaison hors-équilibre. Elle souligne le besoin d'une meilleure compréhension et modélisation de la recombinaison de N (et O) via NO(X) et N<sub>2</sub>(A).

**Title:** Kinetics of a Nonequilibrium Recombining Air/Argon Plasma

**Keywords:** nonequilibrium plasma; chemical kinetics; state-to-state model; recombination; atmospheric entry; afterbody

**Abstract:** Atmospheric entry is one of the most critical phases of space missions. Spacecrafts entering the Earth's atmosphere experience large heating by conduction and radiation. In the afterbody region, the heat flux is dominated by its radiative contribution, whose prediction suffers from very large uncertainties leading to an overestimation of the safety margins for the design of the TPS. Uncertainties arise from the limitations of kinetic models in predicting the nonequilibrium densities of the main radiative species in the wake regions.

This thesis addresses modeling the state-specific kinetics of a recombining air plasma. It aims to provide a better understanding of the main recombination processes and prediction of the excited states populations in a recombining air plasma. This is achieved by comparing state-to-state model predictions to measurements for a nonequilibrium recombining air plasma.

We developed an electronic-specific model for an air/argon plasma. Particular attention was paid to the use of previous works done at Lab. EM2C on nitrogen, and their extension to other air species such as nitric oxide electronic states.

The model was tested against OES measurements in an air/argon plasma that found important nonequilibrium populations. We compared model predictions to the measured densities of the electrons, NO(X, A, B, C, D) and N<sub>2</sub>(C).

In the experiments, the recombination maintains LTE conditions up to 15 cm but not between 30 to 65 cm. The simulations show a too-slow recombination up to 15 cm, and too fast between 40 and 65 cm. The simulations below 15-20 cm can be improved by enhancing the NO(X) recombination rate constants at high temperatures. At lower temperatures, the frozen behavior is not yet explained by the model.

We were able to retrieve important information on the main mechanisms responsible for the evolution of the densities in the mixture. The recombination of the nitrogen atoms happens primarily via the recombination into N<sub>2</sub>(A) and into NO(X). Moreover, the model highlighted the central role of the atoms for the population of several other species via reactions imposing partial equilibrium between the species. We could retrieve the densities of N(4S) and N(2D) from the OES measurements of NO(C) and N<sub>2</sub>(C) thanks to analysis of partial equilibriums in the mixture.

This work represents the first quantitative comparison between an electronic-specific model and absolute density measurements of excited states in a high-temperature air/argon recombining plasma. It highlights the need for a better understanding and modeling of N (and O) recombination via NO(X) and N<sub>2</sub>(A).

