



**HAL**  
open science

## **SOUFFLERIES À JETS DE PLASMAS RAREFIÉS**

P. Lasgorceix, P. Tardy, S. Cayet, W. Fan, R. Melet, M. Dudeck

► **To cite this version:**

P. Lasgorceix, P. Tardy, S. Cayet, W. Fan, R. Melet, et al.. SOUFFLERIES À JETS DE PLASMAS RAREFIÉS. Journal de Physique Colloques, 1990, 51 (C5), pp.C5-441-C5-446. 10.1051/jphyscol:1990553 . jpa-00230863

**HAL Id: jpa-00230863**

**<https://hal.science/jpa-00230863>**

Submitted on 4 Feb 2008

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

## SOUFFLERIES À JETS DE PLASMAS RAREFIÉS

P. LASGORCEIX, P. TARDY, S. CAYET, W. FAN, R. MELET et M.A. DUDECK

*Laboratoire d'Aérothermique du CNRS, 4ter. Route des Gardes F-92190 Meudon, France*

**Abstract :** Plasmas jets are studied at low pressure ( $10^{-1}$  - 10 torr) and high temperature (2000 K - 8000 K) to simulate a lot of parameters of re-entry plasma. The experimental apparatus is described and the used diagnostic techniques as electrostatic probes, mass spectrometer, MHD and optical spectrometer are presented.

The obtained plasmas are modeled with a two-temperature model (electron temperature and heavy particle temperature).

**Résumé :** Des jets de plasma sont étudiés à basse pression ( $10^{-1}$ - 10 torr) et à haute température (2000-8000 K) pour simuler certains paramètres caractérisant le plasma de ré-entrée d'un engin dans la zone atmosphérique. L'ensemble expérimental est décrit et les méthodes de diagnostic telles que les sondes électrostatiques, le spectromètre de masse, la MHD et la spectroscopie optique d'émission sont présentées.

Les plasmas obtenus expérimentalement sont modélisés en utilisant une approche à deux températures (température électronique et température des espèces lourdes).

### Introduction

L'analyse de l'aérothermochimie des problèmes de rentrée en atmosphère raréfiée nécessite le développement de codes de calcul, mais aussi des études expérimentales, soit pour étudier les propriétés locales du plasma, formé dans des conditions de basse pression et de haute température, soit pour étudier l'interaction du plasma avec un matériau.

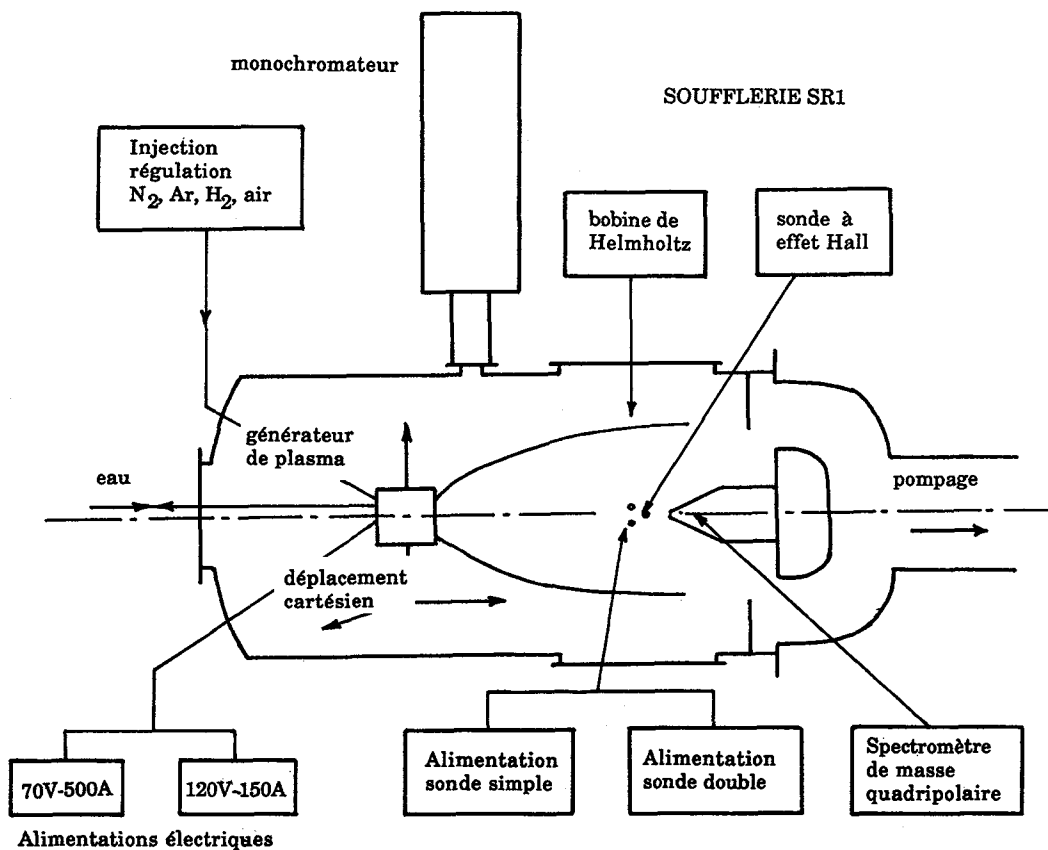
La reconstitution au sol des conditions de rentrée peut être réalisée par des souffleries supersoniques ou hypersoniques, fonctionnant en continu [1] ou par rafales [2], par des tubes à choc [3] ou par des souffleries continues à arc soufflé [4, 5]. Le laboratoire d'Aérothermique s'est orienté vers l'utilisation de cette dernière technique, qui a l'avantage de pouvoir reconstituer la zone ionisée se créant derrière une onde de choc au moyen d'un jet de grande dimension, tout en disposant d'un long temps d'expérience. Cependant, l'ensemble des propriétés de rentrée n'est pas simulé, puisque l'apport énergétique est produit par un arc électrique à la place d'une onde de choc. Aucune investigation au sol ne reproduisant l'ensemble des paramètres de rentrée, les différentes simulations en soufflerie sont complémentaires.

Plusieurs générateurs à plasma d'arc ont été conçus et réalisés au laboratoire d'Aérothermique et des études continuent d'être développées afin d'améliorer leurs performances.

Actuellement, les méthodes de diagnostic sont essentiellement intrusives (sondes électrostatiques et spectrométrie de masse), elles seront complétées au cours des prochaines années par des mesures optiques.

### Les souffleries

Les souffleries à jets de plasma raréfiés du laboratoire d'Aérodynamique constituent un ensemble expérimental important et en cours d'extension, permettant de réaliser des écoulements ionisés, stationnaires, subsoniques ou supersoniques, à basse pression et à haute température. L'argon, l'azote, l'hydrogène ou l'air sont utilisés comme gaz plasmagènes avec des débits compris entre 0,1 et 0,5 gramme par seconde. Le plasma est créé par un générateur à arc soufflé, la décharge étant stabilisée par un mouvement vortex du gaz. La puissance électrique des torches à plasma utilisées est comprise entre 1 et 7 kW et leur refroidissement s'effectue par une circulation d'eau. L'arc électrique est obtenu entre une cathode en tungstène thorié ou en cuivre avec un implant en zirconium et le col d'une tuyère en cuivre. Deux alimentations électriques (120V-150A et 70V-500A) délivrent un courant continu stabilisé et permettent le fonctionnement simultané de deux torches à plasma. La décharge est amorcée par une impulsion haute fréquence et haute tension. Trois caissons d'expériences de différents volumes, SR1 : 2 m<sup>3</sup>, SR5 : 1 m<sup>3</sup> et SR6 (projet) 0,5 m<sup>3</sup>, sont utilisés pour réaliser la détente des jets de plasma. Un revêtement d'aluminium assure la protection intérieure du caisson SR1. Les trois caissons sont reliés à un double groupe de pompage qui permet de travailler à une pression statique comprise entre 0,1 et 10 torr pour les débits utilisés. Ces deux groupes de pompage peuvent fonctionner simultanément sur deux caissons différents.



### Les jets

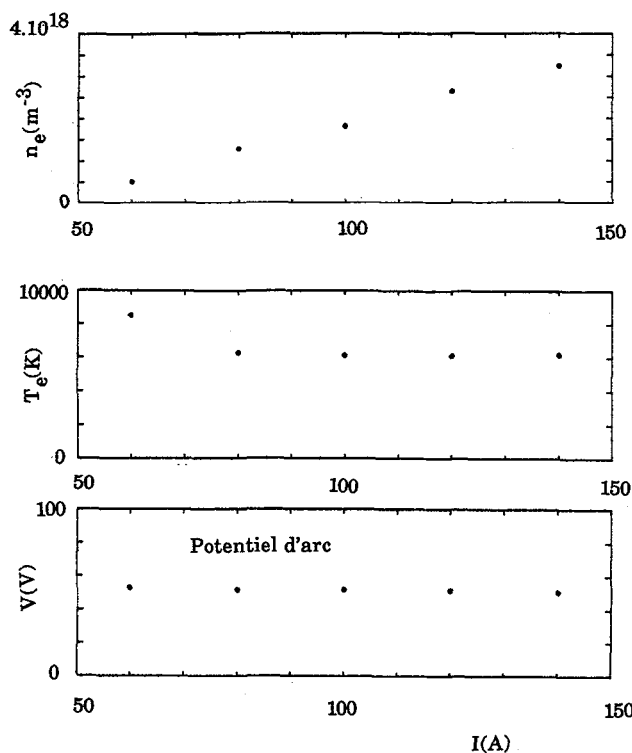
Les générateurs mis au point peuvent être utilisés avec de l'argon, de l'azote, de l'hydrogène ou de l'air. Les jets obtenus sont à symétrie cylindrique, de grandes dimensions (diamètre 60 cm, longueur 1,5 m au maximum) et stationnaires.

La densité électronique est comprise entre  $10^9$  et  $10^{13}$  électrons par  $\text{cm}^3$  et la température électronique est comprise entre 2000 K et 6000K.

### Les moyens de diagnostic

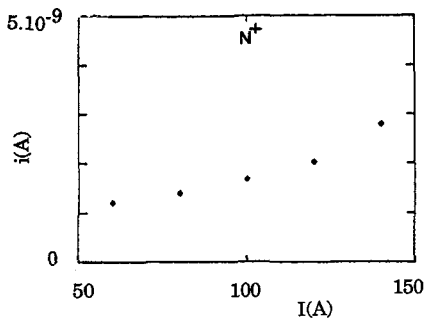
Quatre systèmes de diagnostic sont actuellement installés sur la soufflerie SR1 .

\* Un système de mesure de la densité et de la température électroniques par sondes électrostatiques pulsées. Ce système comporte deux générateurs délivrant un potentiel triangulaire d'amplitude et de fréquence variables et un dispositif permettant d'enregistrer les caractéristiques courant-tension pour une sonde simple ou double. Les sondes sont planes ou cylindriques . Un logiciel réalisé au laboratoire permet d'analyser les caractéristiques de sonde à partir de différents modèles théoriques (théorie classique et théorie du continuum) [6].

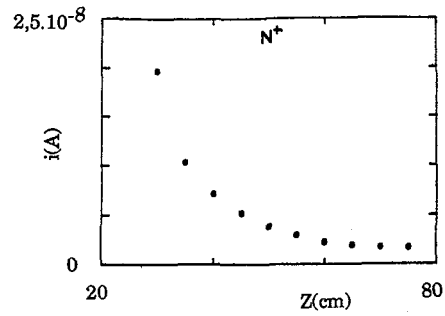


Effet de l'intensité du courant d'arc sur la température et la densité électroniques  
(azote : débit = 15 l par mn, distance à partir du plan de sortie de la tuyère : 45cm)

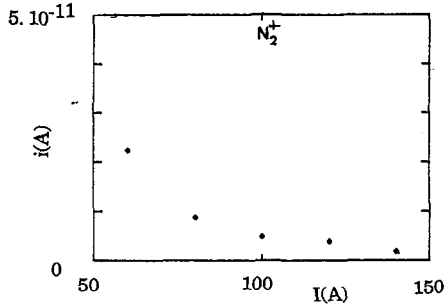
\* Un système de spectrométrie de masse quadripolaire permet d'évaluer les densités relatives en particules lourdes, neutres ou chargées ainsi que les fonctions de distribution de l'énergie des particules chargées. Ce système informatisé permet d'obtenir rapidement une optimisation des paramètres de réglage du spectromètre ainsi qu'une exploitation des spectres de masse [6].



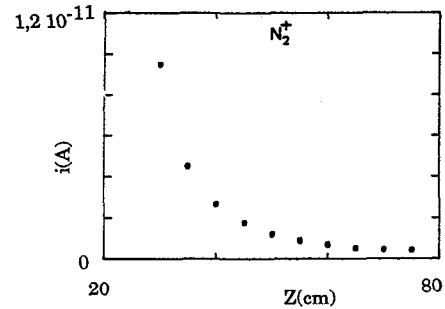
Signal recueilli en fonction  
du courant d'arc



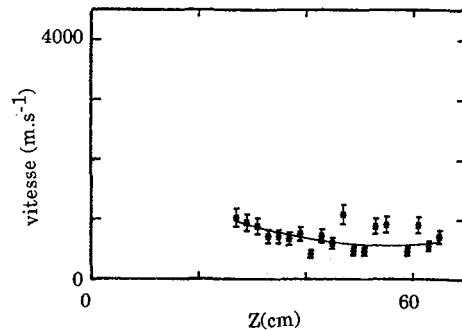
Signal recueilli en fonction de la distance  
au plan de sortie du générateur



Vitesse dans un plasma d'azote  
courant d'arc : 100A



\* Un système de mesure de la vitesse d'écoulement globale du jet de plasma par une technique issue de la théorie magnétohydrodynamique (MHD) est actuellement étudié. Un champ électrostatique induit apparaît dans le jet de plasma lorsque celui-ci est soumis à un champ magnétique extérieur. La théorie MHD indique que l'amplitude du champ électrostatique est proportionnelle au champ magnétique, ainsi qu'à la vitesse d'écoulement du plasma. Cette propriété permet la mesure de la vitesse d'écoulement.



\* Un système de spectroscopie optique d'émission (dans la gamme 2000-7000Å) est développé en collaboration avec le Laboratoire de Physique des Gaz et des Plasmas de l'Université de Paris-Sud. Ce système est utilisé pour estimer les températures de rotation et de vibration dans le cas des gaz plasmagènes moléculaires, en comparant les spectres d'émission expérimentaux avec des spectres synthétiques calculés.

### Modélisation des jets de plasma

L'état de référence pour les plasmas obtenus expérimentalement est celui de l'équilibre thermodynamique dans les mêmes conditions de température et de pression. Les concentrations des espèces neutres et ionisées ont été calculées dans un plasma d'azote à l'équilibre thermique par la méthode de Brinkley [7] et par une méthode algébrique [8]. L'influence d'un déséquilibre entre la température cinétique des espèces lourdes (ions, neutres) et celle des électrons a été étudiée [9].

L'évolution des différentes concentrations s'obtient à partir de la résolution des équations de conservation introduisant les effets convectifs, diffusifs et chimiques. Les termes convectifs sont calculés en utilisant une évaluation expérimentale de la vitesse d'écoulement. Les coefficients de diffusion ont été calculés [2] à partir des différentes intégrales de collision et en utilisant la théorie cinétique avec un développement de Chapman-Enskog dans le cas d'un milieu à deux températures. La détermination des schémas réactifs prépondérants [7, 8] a été effectuée en analysant les effets des différents processus réactifs par une méthode numérique de type Runge-Kutta en absence de phénomènes diffusifs. Les concentrations dans un jet libre de plasma raréfié d'azote ont été ensuite calculées.

L'évolution de la température électronique et de la température des espèces lourdes est actuellement étudiée pour un plasma d'azote. Les coefficients de conduction thermique (particules lourdes, électrons, interne, réactif) ont été calculés à partir de la théorie cinétique en présence d'un déséquilibre thermique [10].

### Développements

Différentes méthodes de diagnostic seront associées à un même jet de plasma d'azote ou d'air à basse pression. Les mesures par spectrométrie de masse couplées à des mesures par sondes électrostatiques permettent d'obtenir les densités absolues des particules chargées et d'analyser les phénomènes d'ionisation. Les mesures de vitesse effectuées par effet MHD seront comparées à celles utilisant une perturbation des conditions génératrices du plasma. Quant aux techniques optiques par spectroscopie d'émission, développées actuellement pour la détermination des températures de rotation et de vibration, elles seront complétées ultérieurement par des mesures par fluorescence induite par laser.

L'ensemble des souffleries et des moyens de diagnostic constitue dès à présent un ensemble utile pour l'étude des plasmas de rentrée dans la zone atmosphérique, pour la mise au point de méthodes de mesures associées aux jets de plasma, pour l'analyse physico-chimique des évolutions dans les jets à haute température et basse pression et pour l'analyse des interactions entre des écoulements de plasma et des matériaux.

### Références

- [1] A. Chpoun, Hypersonic flow in a compression corner in 2-D and 3-D configuration, AIAA Paper 89-1876, 20th Fluid Dynamics, Plasma Dynamics and Laser Conference, Buffalo, N-Y, June 12-14, 1989.
- [2] A. Girard, A. Boutier, J. P. Chevallier, G. Francois, Instrumentation en cours de développement pour la soufflerie F4 de l'ONERA, 26<sup>ème</sup> Colloque d'Aérodynamique Appliquée, Toulouse 23-25 octobre 1989
- [3] R. Brun, Non-equilibrium effects in high speed flows : modelling and experimentation, First Joint Europe-US Short Course on Hypersonics, Paris, 1987.
- [4] M. Vervish, Communication présentée au "Hermès Project Meeting", Chatenay-Malabry, 29 nov. 1989.
- [5] P. Fauchais, Communication présentée au "Hermès Project Meeting", Chatenay-Malabry, 29 nov. 1989.
- [6] P. Lasgorceix, M.A. Dudeck, J.P. Caressa, Measurements in low pressure, high temperature and reactive nitrogen jets, AIAA Paper, Buffalo, USA, 1989.

- [7] C. Danton, Modélisation de l'évolution des concentrations dans un jet raréfié de plasma d'azote en déséquilibre thermique, Thèse, Université de Paris XI, avril 1988.
- [8] P. Lasgorceix, Ensemble expérimental d'analyse de jets raréfiés de plasma d'arc. Application à un jet de plasma d'azote, Thèse, Université de Paris XI, avril 1989.
- [9] W. Fan, M. Dudeck, Concentrations dans un plasma d'azote en déséquilibre thermique, rapport 89-5 du laboratoire d'Aérothermique, déc. 1989.
- [10] W. Fan, M. Dudeck, J. Aubreton, Calculation of thermal conductivity of gas mixtures at low pressure and high temperature, Communication présentée au 9th Int. Conf. on Heat Transfer, Jérusalem, Israël, 19-24 août 1990.