

## PROPOSITION DE SUJET DE THESE

**Intitulé : Étude multi-physique de la chambre à arc de la soufflerie hypersonique F4**

Référence : **MFE-DMPE-2026-09**  
(à rappeler dans toute correspondance)

**Début de la thèse :** janvier 2027

**Date limite de candidature :** février 2026

**Mots clés :**

Énergétique, multi-physique, CFD, soufflerie, hypersonique, dégradation des matériaux, arc électrique

**Profil et compétences recherchées :**

Université et/ou école d'ingénieurs (ENSTA, X, groupe ISAE, groupe Centrale, groupe INSA, ENSEEIHT, ENSEIRB-Matméca etc.)

Énergétique, mécanique des fluides, transferts thermiques et radiatifs, CFD, développement de code (Fortran, C/C++, Python, etc...)

**Présentation du projet doctoral, contexte et objectif :**

La soufflerie hypersonique F4 est une installation capable de générer un écoulement à une vitesse proche de celle atteinte par les véhicules spatiaux lors de leur rentrée dans l'atmosphère ( $> 5$  km/s). Après plusieurs années de mise à l'arrêt, la réexploitation de cette installation est prévue prochainement et s'accompagne de travaux de recherches dans le cadre du projet ONERA HypHypF4. La soufflerie F4 a la particularité d'être hyper-enthalpique, c'est-à-dire que le gaz de test (air, azote ou CO<sub>2</sub>) est porté à haute énergie et à haute vitesse dans la veine d'essai, permettant de se rapprocher des conditions de vol d'un véhicule de rentrée (effet de gaz réels, détente, choc...). Cette capacité, dite de soufflerie "hotshot", en fait une installation unique en Europe (hors Russie).

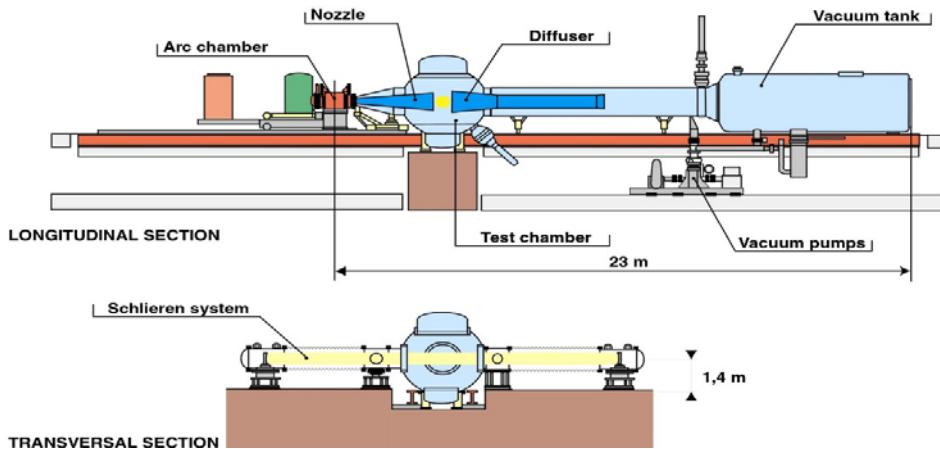


Figure 1 - Schéma de principe de la soufflerie F4

Pour parvenir à ces conditions spécifiques d'écoulement, le gaz de test est préalablement confiné dans une chambre en amont de la veine d'essai dans laquelle un arc électrique tournant de forte puissance est généré (150 MW) pendant une centaine de millisecondes environ. Le gaz est ainsi porté à haute pression et haute enthalpie, avant l'ouverture d'un bouchon pyrotechnique qui va alors libérer l'écoulement chaud dans la veine d'essai.

L'un des défis associés à cette installation est de connaître précisément les conditions génératrices de l'écoulement dans la veine d'essai, correspondant à l'état du fluide dans la chambre à arc juste avant l'ouverture du bouchon pyrotechnique. En effet, l'enthalpie génératrice ne peut pas être mesurée directement dans la veine d'essai, mais peut être reconstruite par des corrélations utilisant des mesures sur la maquette elle-même. Par ailleurs, les températures très élevées dans la chambre à arc entraînent la dégradation du liner en carbone protégeant la chambre, ainsi que les électrodes qui génèrent l'arc électrique. Cette dégradation initie une pollution du gaz de test par les produits de décomposition des matériaux carbonés.

Dans ce contexte, l'objectif de la thèse est de caractériser les conditions génératrices et la composition du gaz à l'entrée de la veine d'essai par la modélisation multi-physique de la chambre à arc. Une des difficultés principales est la simulation numérique de l'arc électrique, qui nécessite un temps de calcul très important. Pour cela, deux volets sont envisagés dans le cadre du projet.

- 1) Une première approche simplifiée dite de « dépôt d'énergie », où l'énergie apportée par l'arc électrique est représentée par un terme source volumique instationnaire. Avec cette méthode, une phase complète de chauffe de la chambre à arc peut être simulée, permettant ainsi d'étudier la dégradation des électrodes et du liner, et le dégazage associé. En somme, cette approche permet de quantifier l'influence de ces phénomènes sur les conditions génératrices et sur la composition du gaz à la fin de la phase de chauffe. La simulation couplée sera mise en place avec les outils de l'ONERA. La plateforme CEDRE permet de simuler l'écoulement réactif dans la chambre grâce au solveur Navier-Stokes compressible CHARME, ainsi que le rayonnement des espèces gazeuses par méthode de Monte-Carlo avec le solveur radiatif ASTRE. La conduction au sein des matériaux et leur dégradation est modélisée à l'aide du solveur de transferts thermiques en milieu poreux MoDe-TheC. Le couplage entre ces codes est réalisé par la bibliothèque CWIPI qui assure les échanges de données entre les domaines de calcul de chaque solveur.

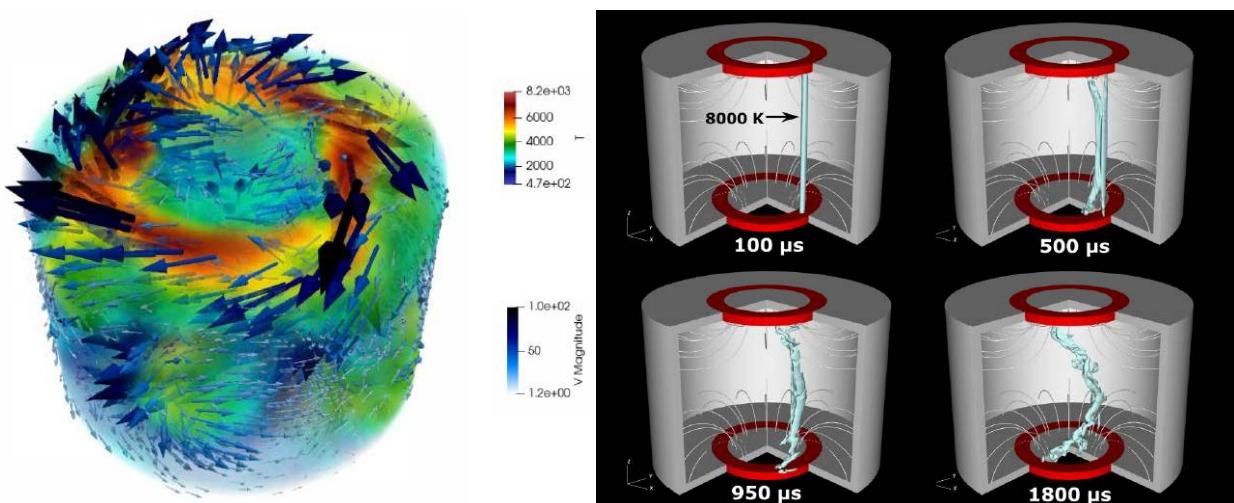


Figure 2 - Champs de température et de vitesse dans la simulation couplée de la chambre à arc (gauche), iso-contours de température à 8000 K issus de la simulation MHD (droite)

- 2) Une deuxième approche fondée sur la simulation haute-fidélité de l'arc électrique avec le solveur MHD (Magnétohydrodynamique) Taranis de l'ONERA. Ce travail sera mené en parallèle de la première approche dans le cadre du projet interne HyphyF4. Les résultats de cette simulation seront utilisés dans un deuxième temps comme donnée d'entrée pour le calcul couplé afin d'améliorer la représentativité du terme source provenant de l'arc.

## Collaborations envisagées

Départements DMPE (Multi-physique pour l'Énergétique) et DPHY (Physique, Instrumentation, Environnement, Espace) de l'ONERA

### Laboratoire d'accueil à l'ONERA

Département : Multi-physique pour l'Énergétique

Lieu (centre ONERA) : Toulouse

**Contact** : X. Lambole, B. Khiar (co-directeur), G. Janodet

Tél.: 05 62 25 26 93, 01 80 38 64 27, 05 62 25 28 47

Email : [xavier.lambole@onera.fr](mailto:xavier.lambole@onera.fr), [benjamin.khiar@onera.fr](mailto:benjamin.khiar@onera.fr), [guillaume.janodet@onera.fr](mailto:guillaume.janodet@onera.fr)

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

### Directeur de thèse

Nom : P.-Q. Elias

Laboratoire : Physique, Instrumentation, Environnement, Espace (école doctorale Ondes et Matières, Paris)

Tél. : 01 80 38 61 71

Email : [paul-quentin.elias@onera.fr](mailto:paul-quentin.elias@onera.fr)