

PROPOSITION DE STAGE EN COURS D'ETUDES

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

Lieu : Palaiseau

Département/Dir./Serv. : DPHY/FPA

Tél. : 01.80.38.64.28

Responsable(s) du stage : Pechereau François

Email. : francois.pechereau@onera.fr

DESCRIPTION DU STAGE

Thématique(s) : CFD, plasma, foudre, simulation 3D, MHD, adaptation de maillage anisotrope

Type de stage : ☒ Fin d'études bac+5 ☒ Master 2 ☐ Bac+2 à bac+4 ☐ Autres

Intitulé : Modélisation multiphysique CFD/plasma: simulation 3D de l'interaction éclair-aéronef grâce à l'adaptation de maillage anisotrope

Sujet : Un aéronef est frappé par la foudre en moyenne une fois toutes les 1500 heures de vol environ, ce qui correspond à deux foudroiements par an pour les avions de ligne. Cet événement est inévitable et donc, les services officiels de l'aviation civile imposent la protection des avions contre le foudroiement. Lors d'un phénomène de foudroiement, un arc qui est spatialement statique par rapport à l'avion qui se déplace, peut, de ce fait, potentiellement se propager sur une très grande partie de la surface externe d'un avion et interagir avec les matériaux présents en surface celui-ci.

Lors de la phase de balayage de l'éclair, des décharges d'arcs plasmas, dits continus, sont des arcs électriques parcourus par un courant constant allant de quelques ampères à plusieurs milliers d'ampères, et dont la dynamique opère sur des temps longs, de l'ordre de la seconde. Mais dans des situations d'écoulement (i.e autour d'un aéronef) ou de mouvement rapide de l'arc, l'interaction avec le fluide est particulièrement forte et sujette à des forces MHD (MagnétoHydroDynamique). Ce mécanisme est fondamental dans l'étude du risque foudre, qui repose sur un « zoning » de l'aéronef, visant schématiquement à prédire le niveau de courant maximal attendu en chaque point de l'appareil. La principale limite de cette approche utilisée en certification est qu'elle ne prend pas en compte la rétroaction complexe de l'arc sur l'écoulement local, sa tortuosité due aux instabilités MHD, ainsi que sa capacité à effectuer des « bonds » sur la structure. Ces différents aspects sont néanmoins cruciaux dans l'évaluation du risque foudre sur les nouveaux concepts d'aéronefs et sur les équipements, et une meilleure compréhension de tels arcs continus est aujourd'hui indispensable.

Les arcs dit continus sont très étudiés dans la communauté scientifique, notamment dans la modélisation des disjoncteurs de forte puissance, des torches plasma, ou encore, plus récemment, dans l'étude des défaillances dans les réseaux de puissance embarqués. L'unité FPA (Foudre Plasma et Applications) de l'ONERA, où se déroulera le stage, a développé une expérience forte dans la modélisation des arcs dans le contexte du foudroiement. Lors d'un impact foudre sur un avion, l'arc en interaction forte avec l'écoulement aérodynamique externe d'un aéronef, est transporté par convection et l'action des forces électromagnétiques et rétroagit sur l'écoulement par des effets thermiques et mécaniques. La modélisation multiphysique de ce phénomène 3D est très coûteuse du fait de sa nature 3D multiéchelle (spatiale et temporelle). Dans le cadre des travaux sur la foudre, l'équipe FPA a développé le code parallèle TARANIS 3D non-structuré couplant un modèle MHD résistif, un modèle de transfert radiatif et la mécanique des fluides afin de réaliser ce type de simulations. Pour réaliser des simulations 3D avec un coût de calcul réduit, le code TARANIS a été couplé avec le code feflo.a de l'INRIA qui permet de faire de l'adaptation de maillage 2D/3D anisotrope. La Figure 1 montre un exemple 2D d'un écoulement à mach $M=3$ autour d'un obstacle réaliser avec le couplage TARANIS/feflo.a.

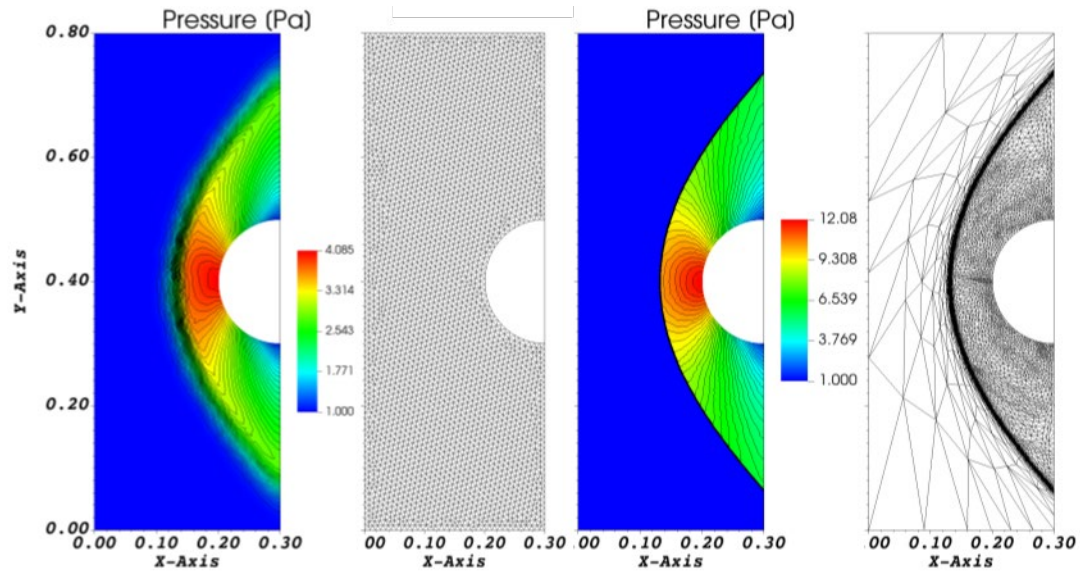


Figure 1: Profils de pression avec maillage fixe et adapté d'un écoulement à mach $M = 3$ sur un obstacle en forme de demi-cylindre. Thèse ONERA G. Barreau 2024.

La Figure 2 montre un autre exemple de calcul utilisant le couplage TARANIS/feFlo.a. Dans cette étude publiée à la conférence EUCASS 2023, un arc soumis à une impulsion de courant sur plaque composite a été simulé avec le couplage TARANIS/feFlo.a. On remarque que le pied d'arc sur plaque composite a une forme de losange qui grandit dans le temps. C'est un résultat que l'on observe aussi dans les expériences démontrant ici l'intérêt de l'utilisation de l'adaptation de maillage anisotrope 3D, car ce résultat a été obtenu sur 300 000 nœuds sur une centaine de processeurs. Sur maillage fixe, il aurait fallu 100 fois plus de nœuds au moins et plusieurs milliers de processeurs.

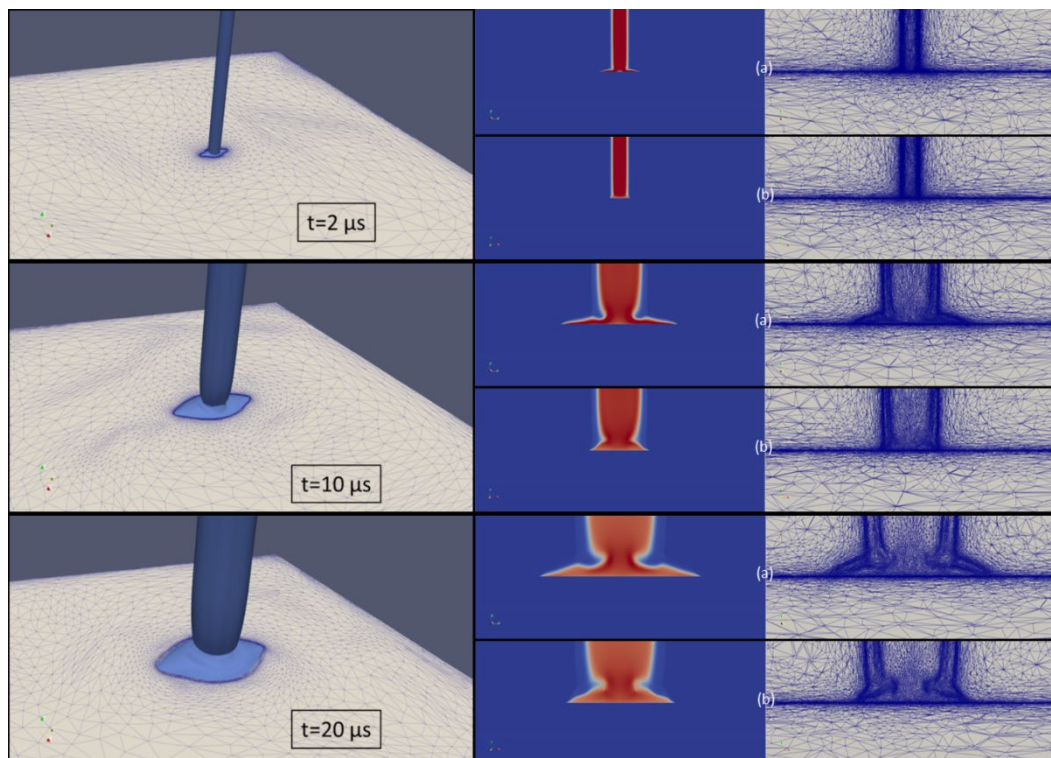


Figure 2: Simulation d'un arc impulsif sur matériau composite. Vue 3D d'une iso-surface de température à 5 000 K à différents temps $t = 2, 10$ et $20 \mu s$ sur la colonne de gauche. Coupe selon l'axe y (a) et l'axe x (b) de profils 2D de températures et de maillages au temps $t = 2, 10$ et $20 \mu s$ sur la colonne de droite. F. Pechereau et al, EUCASS, 2024.

Grâce aux récents travaux de thèse de Gabriel Barreau, on peut utiliser un nouveau schéma semi-implicite dans le code TARANIS qui permet d'accélérer significativement le temps de calcul avec une extension de ce schéma aux gaz réels pour simuler des arcs soumis à un courant continu. Les tables thermodynamiques sont générées par le code SETHI développé aussi dans l'unité FPA.

L'objectif du stage est multiple. Au delà de la prise en main du code TARANIS, de la compréhension du schéma semi-implicite et de son extension en gaz réel, il faudra améliorer la gestion des tables

thermodynamiques en optimisant le processus de création de tables avec SETHI, mais aussi leur utilisation dans le code TARANIS. Cette première étape servira pour réaliser une première étude paramétrique 3D sur l'influence du niveau de courant sur la dynamique d'un arc libre soumis à un courant continu dans l'air à pression atmosphérique. Le dernier objectif du stage est de réaliser une première simulation d'un balayage d'arc sur un aéronef en 3D. Cette étude est le point de départ d'un travail de thèse sur le balayage d'arc de foudre sur aéronef en 3D avec adaptation de maillage anisotrope.

Pour cela, les travaux suivants seront menés lors de ce stage:

- analyse bibliographique sur la modélisation des arcs continus et sur l'adaptation de maillage anisotrope;
- proposer d'une méthodologie de tables thermodynamiques pour le couplage feflo.a/TARANIS ;
- étude de l'influence du niveau de courant sur les instabilités MHD dans une colonne d'arc libre ;
- étude d'un balayage d'arcs continus en 3D sur aéronefs.

Est-il possible d'envisager un travail en binôme ? Non

Méthodes à mettre en oeuvre :

- | | |
|---|---|
| ☒ Recherche théorique | ☒ Travail de synthèse |
| ☒ Recherche appliquée | ☒ Travail de documentation |
| ☐ Recherche expérimentale | ☒ Participation à une réalisation |

Possibilité de prolongation en thèse : Oui

Durée du stage : Minimum : 5 mois Maximum : 6 mois

Période souhaitée :

PROFIL DU STAGIAIRE

Connaissances et niveau requis :
programmation, méthodes numériques,
CFD/plasma/électromagnétisme

Ecoles ou établissements souhaités :
Master 2 ou école d'ingénieur