

PROPOSITION DE SUJET DE THESE

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

Référence : **PHY-DPHY-2026-24**
(à rappeler dans toute correspondance)

Début de la thèse : 2026

Date limite de candidature : Septembre 2026

Mots clés

CFD, plasma, foudre, simulation 3D, HPC, MHD, adaptation de maillage anisotrope

Profil et compétences recherchées

M2 ou diplôme d'ingénieur : spécialité en mathématiques appliquées, méthodes numériques, calcul intensif. Des compétences en physique des plasmas ou en CFD seraient un plus.

Présentation du projet doctoral, contexte et objectif

Contexte :

Un avion de ligne est frappé par la foudre en moyenne une fois par an. Cet évènement étant imprévisible, inévitable et représentant un risque important pour l'intégrité de l'avion, les autorités de l'aviation civile imposent que les avions soient protégés de la foudre dès la phase de conception. D'un point de vue physique, l'éclair est un arc électrique (Plasma thermique) parcouru par des courants de quelques centaines d'ampères sur des durées de plusieurs centaines de milliseconde sur lesquels viennent se superposer des courants impulsionnels pouvant atteindre 200 000 A mais sur des durées de quelques dizaines de microseconde. Lors du foudroiement, l'éclair est connecté à l'avion par 2 pieds d'arc (Figure 1a) qui vont se déplacer sur la surface de l'avion à cause du mouvement relatif des canaux de l'éclair par rapport au mouvement de l'avion (Figure 1b).



(a)



(b)

Figure 1: (a) Image de foudroiement d'un aéronef (<https://www.youtube.com/watch?v=i-LCQFB860>). (b) Illustration du phénomène de balayage d'un des deux pieds d'arc de la foudre sur la surface de l'avion (Images AIRBUS).

Sur ce phénomène, l'ONERA est à la pointe de la recherche mondiale, notamment par le développement de capteurs embarqués, par ses moyens expérimentaux pour reproduire en laboratoire ce phénomène et par le développement d'outils numériques pour le simuler.

Problématique

L'unité de recherche FPA (Foudre Plasma et Applications) de l'ONERA, où se déroulera la thèse, a développé une expérience mondiale reconnue sur la simulation numérique de l'arc foudre sur une structure d'aéronef. L'équipe développe une modélisation magnétohydrodynamique (MHD) de l'arc foudre supposé à l'équilibre thermodynamique local (ETL). Cette modélisation consiste à rajouter, à l'équation d'énergie de la mécanique des fluides, les termes sources liés aux chauffages par le courant électrique et par le rayonnement, à l'équation de la quantité de mouvement, l'action des forces électromagnétiques force de Laplace.

La modélisation multiphysique de ce phénomène 3D est très coûteuse du fait de sa nature 3D multi-échelle (spatiale et temporelle) ce qui représente de véritables défis tant en termes des modèles physiques à développer/mettre en place que des schémas numériques et architecture de calcul à utiliser/développer, pour avoir des temps de calcul avec une modélisation de l'arc et de son interaction avec la structure optimale.

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 2 montre un exemple 2D d'un écoulement à mach M=3 autour d'un obstacle réalisé avec le couplage TARANIS/feflo.a.

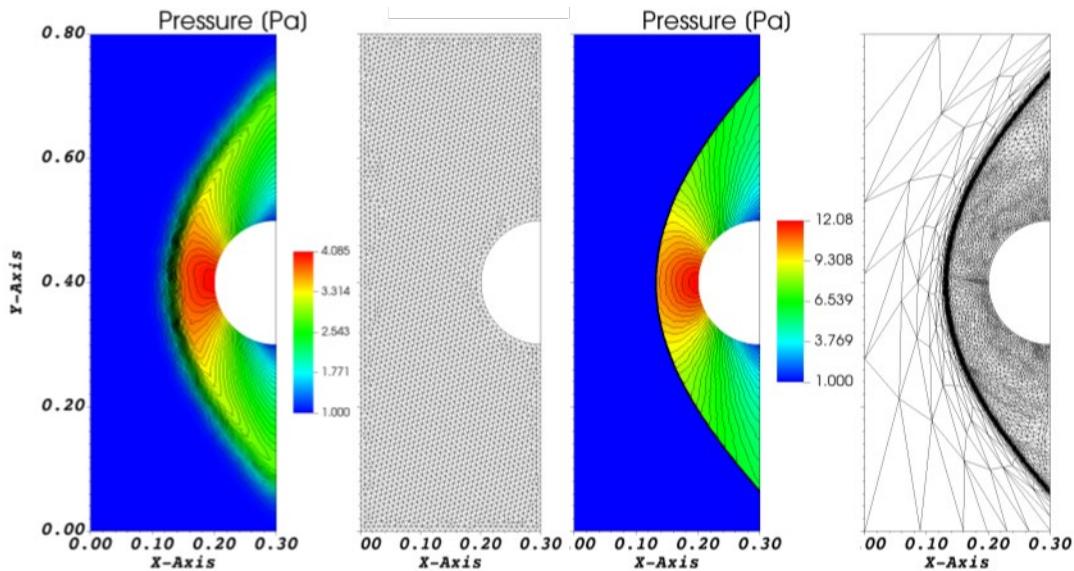


Figure 2: Profils de pression avec maillage fixe et adapté d'un écoulement à mach $M = 3$ sur un obstacle en forme de demi-cylindre. Thèse ONERA G. Barreau 2024.

La Figure 3 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 en 3D pour la première fois 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.

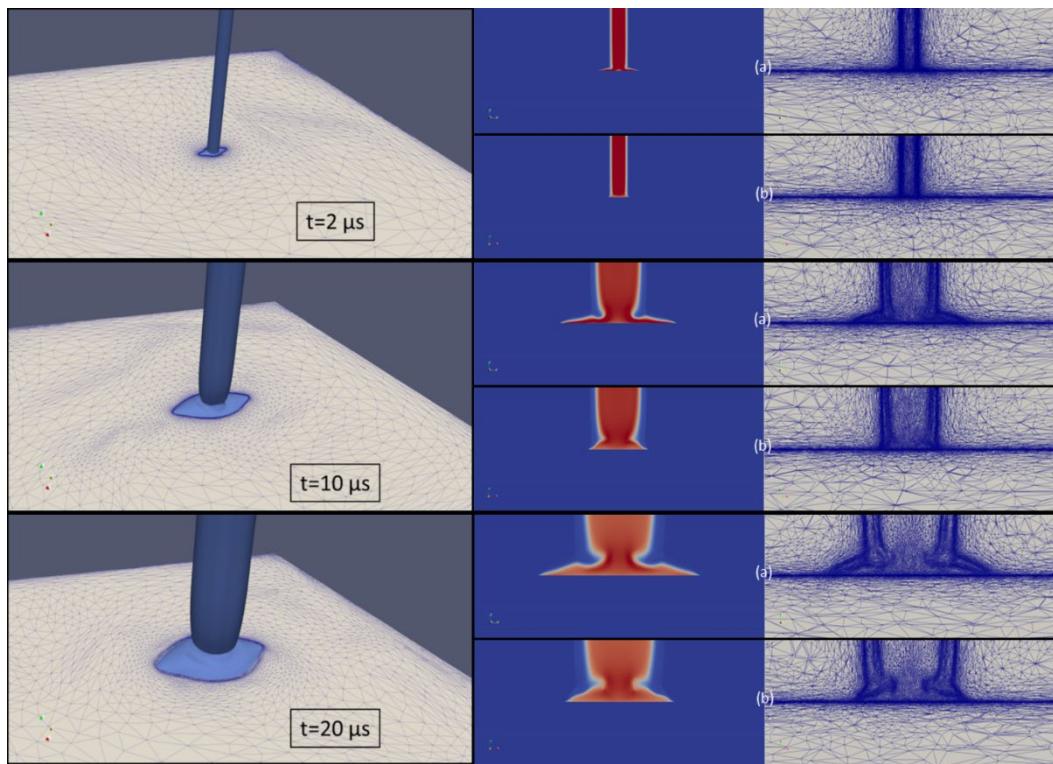


Figure 3: Simulation d'un arc impulsif sur matériau composite. Vue 3D d'une iso-surface de température à 5 000 K à différents temps $t = 2, 10$ et $20 \mu\text{s}$ sur la colonne de gauche. Coupe selon l'axe y (a) et l'axe x (b) de profils 2D de températures et de maillages au temps $t = 2, 10$ et $20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

Travaux de thèse :

Les travaux de cette thèse s'inscrivent dans la simulation 3D du balayage du pied d'arc foudre sur la surface d'un avion, ce qui représente un véritable challenge d'un point de vue numérique.

Dans un premier temps, les travaux consisteront :

- à prendre en main le code TARANIS/feflo.a,
- à simuler des configurations expérimentales originales de déplacement du pied d'arc, réalisé dans le cadre d'une précédente thèse, avec comme objectif de produire des articles scientifiques
- à faire un bilan sur les performances de l'outil tant en termes de modèles physiques que schémas numériques.

Dans un second temps, les travaux consisteront à proposer des voies d'optimisation de l'outil TARANIS/feflo.a et d'en développer certaines.

Tous ces travaux pourront s'appuyer sur les moyens expérimentaux foudre de l'ONERA qui pourront alimenter la validation des simulations.

Collaborations envisagées

INRIA équipe GAMMAO (Palaiseau), INRIA équipe CONCACE (Bordeaux)

Laboratoire d'accueil à l'ONERA

Département : Physique, instrumentation, environnement, espace

Lieu (centre ONERA) : Centre de Palaiseau

Contact : François Pechereau

Tél. : 01 80 38 64 28 Email : francois.pechereau@onera.fr

Directeur de thèse

Nom : G. Puigt

Laboratoire : ONERA/DMPE/HEAT

Tél. : 05 62 25 29 40

Email : guillaume.puigt@onera.fr

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