

# Sujet de thèse : Développement d’approches Galerkin continue et discontinue pour la simulation hydrodynamique des décharges électriques dans les milieux diélectriques solides gazeux

## 1 Contexte

Le virage vers le “tout électrique” impose une augmentation massive de la production d’électricité décarbonée, accompagnée d’un déploiement accéléré des réseaux de transport et de distribution. Ces infrastructures intègrent des appareillages haute et moyenne tension – tels que disjoncteurs, câbles à isolation gazeuse ou postes sous enveloppe métallique – reposant sur des systèmes d’isolation hybrides, combinant gaz sous pression et matériaux solides.

Jusqu’à présent, le SF<sub>6</sub> s’est imposé comme gaz isolant de référence grâce à ses performances diélectriques inégalées – environ trois fois supérieures à celles de l’air. Toutefois, son potentiel de réchauffement global extrêmement élevé (GWP = 23900, soit l’équivalent d’environ 24 tonnes de CO<sub>2</sub> pour un seul kilogramme de SF<sub>6</sub>) en fait un gaz à effet de serre redoutable. Son utilisation devient donc intenable face aux impératifs de réduction des émissions de gaz à effet de serre. Les alternatives actuellement envisagées en moyenne tension (air comprimé, mélanges Air/CO<sub>2</sub>, fluorokétone, etc.) présentent cependant des performances diélectriques significativement inférieures. Cela rend leur substitution directe impossible sans reconfigurer en profondeur les dispositifs, notamment pour maintenir des niveaux de sécurité et de compacité équivalents. Parallèlement, les isolants solides utilisés à ce jour – notamment les résines époxy – sont remis en question en raison de la future interdiction des anhydrides aromatiques, composants clés de leurs formulations. Ces matériaux posent également des défis majeurs en matière de recyclabilité, de compatibilité environnementale et de tenue à long terme sous contraintes électriques, thermiques et mécaniques. Dans ce contexte, le développement de dispositifs compacts reposant sur des gaz et des matériaux solides alternatifs, moins performants électriquement mais plus respectueux de l’environnement, impose une avancée décisive : la mise au point de modèles prédictifs capables de simuler les mécanismes de transport de charge régissant la formation des décharges précurseurs du claquage électrique. Ces modèles doivent être suffisamment robustes pour simuler avec précision le comportement des nouvelles configurations dans une large gamme de conditions opératoires. Cette démarche est essentielle pour garantir la conciliation entre performance, sécurité et transition écologique.

Le modèle le plus couramment utilisé pour les simulations à grande échelle dans ce contexte est le modèle fluide. Il repose sur un système d’équations aux dérivées partielles (EDP) non linéaires de type advection–diffusion–réaction, qui décrivent la distribution des densités d’électrons, d’ions positifs et d’ions négatifs, couplé à l’équation de Poisson, qui régit la distribution du champ électrique. Le système d’équations issu du modèle fluide est fortement non-linéaire,

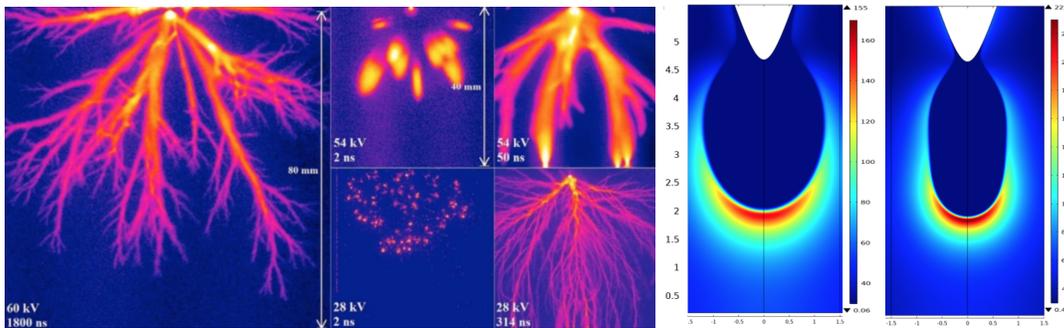


Figure 1: A gauche : décharges naturelles et streamers générés en laboratoire. A droite : résultats de simulations 2D simplifiées.

raide en temps et spatialement multi-échelle (voir la Figure 1 dans le cas du streamers). Il est notamment caractérisé

par la présence d'un front de décharge extrêmement localisé, dont la résolution précise dans l'ensemble du domaine de calcul et au cours de l'évolution temporelle est indispensable pour une modélisation fidèle du phénomène. À ce jour, la grande majorité des travaux dans la littérature se concentrent sur des configurations 2D, qui, bien qu'informatives, ne permettent pas de capturer certains mécanismes physiques essentiels tels que le branching des streamers qui ne peut être correctement reproduit que dans le cadre d'une modélisation tridimensionnelle. Le passage à la dimension 3D représente cependant un verrou scientifique et numérique majeur, en raison du coût computationnel particulièrement élevé qu'il implique, notamment pour la résolution de fronts fins dans de grands domaines.

## 2 Objectifs de la thèse

Ce travail de thèse va s'intéresser à l'analyse et à l'application de la méthode de Galerkin continue, en particulier la méthode des méthodes d'éléments finis stabilisées, ainsi que la méthode de Galerkin discontinue, mieux adaptée à la discrétisation des équations d'advection-diffusion-réaction. Ces approches seront combinées à des techniques de raffinement et déraffinement adaptatifs du maillage et à des intégrateurs temporels adaptées à la résolution des équations différentielles raides.

Les développements s'appuieront sur MFEM, une bibliothèque open-source de référence, largement reconnue pour ses fonctionnalités avancées particulièrement adaptées à la modélisation des phénomènes de décharge. MFEM offre notamment le support des méthodes d'éléments finis classiques ainsi que des éléments de Galerkin discontinus, la prise en charge d'éléments d'ordre élevé, la possibilité de raffinement/déraffinement adaptatif du maillage, l'intégration de schémas temporels adaptés aux systèmes raides, ainsi qu'une infrastructure facilitant l'implémentation d'algorithmes parallèles optimisés pour le calcul haute performance, indispensable à la résolution efficace de problèmes 3D complexes.

Les développements envisagés s'appuieront sur des travaux préliminaires réalisés dans le cadre de stages, portant sur l'implémentation dans MFEM des méthodes de Galerkin appliquées à la modélisation numérique des streamers.

## 3 Profil recherché/compétences requises

- a. Formation de niveau Bac +5 (Master universitaire ou diplôme d'ingénieur).
- b. Connaissances solides en mathématiques appliquées.
- c. Maîtrise de la programmation, en particulier de la programmation orientée objet.
- d. Intérêt pour la modélisation numérique et l'électromagnétisme computationnel.

## 4 Contacts

Nelly BONIFACI (email : nelly.bonifaci@g2elab.grenoble-inp.fr),

Clément JOURDANA (email : clement.jourdana@univ-grenoble-alpes.fr),

Innocent NIYONZIMA (email : innocent.niyonzima@univ-grenoble-alpes.fr).