

1. SUJET DE THESE CIFRE SAFRAN/EM2C

« Modélisation de la dynamique d'un arc électrique dans différentes conditions d'environnement »

2. DESCRIPTIF SCIENTIFIQUE :

2.1. DESCRIPTION DU CONTEXTE ET DES ENJEUX ASSOCIES POUR SAFRAN

Dans le domaine de l'aéronautique, deux types d'arcs peuvent être rencontrés :

- Les arcs dits *de coupure*, observés lors de l'ouverture de contacts de puissance et nécessaire à la configuration et la protection de la distribution électrique du réseau.
- Les arcs dits *de défaut* (qu'ils soient série ou parallèle) dont les conséquences sont synonymes d'endommagement majeurs des dispositifs ou des structures.

Jusqu'à présent, il n'existait pas de verrou technologique associé à l'un ou l'autre de ces phénomènes pour les niveaux de tension et courant traditionnellement utilisés en aéronautique. Désormais, les travaux engagés par Safran visent à proposer de nouvelles chaînes de distribution électriques hybridées ou tout électrique dont les puissances envisagées viendront perturber ce paradigme.

L'augmentation des niveaux de tension sur les réseaux ainsi envisagés, aura pour conséquence :

- D'augmenter la probabilité d'apparition des arcs de défauts
- D'augmenter la puissance électrique déployée par les arcs de coupure et arcs de défaut.
 - o En conséquence, l'interaction arc/matière sera fortement modifiée vis-à-vis des connaissances antérieures.
- D'augmenter la durée d'arc électrique alimenté par de tels réseaux.
- D'augmenter la longueur d'arc maximale admissible des arcs de coupure et arcs de défaut
- ...

De ce fait, les designs actuels des chambres de coupure doivent être revus en vue de satisfaire des durées très faibles d'extinction de l'arc (de coupure). De plus, l'environnement aéronautique sévère dans lequel certains composants seront déportés doit être étudié. Il s'agit notamment de comprendre puis maîtriser l'impact de l'altitude sur les propriétés physiques du phénomène.

De la même manière, les autres composants impactés par les arcs de défauts (composants formant un système de distribution appelé Electrical Wiring Interconnection System) et leur environnement direct (structure, harnais, éléments de fixation, autres systèmes, zones à risques, ...) devront respecter des directives plus impactantes aux vues des conséquences d'un tel arc de défaut pour de telles puissances.

Jusqu'à aujourd'hui, la modélisation de ces phénomènes électriques (arcs de défaut et arc de coupure) n'accompagne pas ou peu les designs. Désormais, les risques et les contraintes*¹ imposés par les spécifications des avions deviennent prédominants au point de chercher à maîtriser plus finement le défaut. Il s'agit de l'enjeu thématique proposé par cette thèse : une modélisation physique des différents paramètres d'influence de l'arc électrique en milieu aéronautique.

2.2. OBJECTIFS ET VEROUS SCIENTIFIQUES

Les objectifs du travail proposé sont de proposer un outil de modélisation de l'arc électrique pris en compte dans son environnement aéronautique afin de l'intégrer dans le design des composants impactés volontairement par un arc de coupure ou involontairement par un arc de défaut.

Les principaux verrous scientifiques sont principalement liés au fait que l'arc électrique est un phénomène erratique, souvent mal compris. Egalement, la transposition du phénomène sur des géométries plus ou moins libres (cas de l'arc de défaut par exemple) est un véritable verrou pour assurer une modélisation fiable. En conséquence, les difficultés majeures seront :

- D'identifier les différents paramètres influencés par l'environnement,
- De comprendre l'impact de la géométrie (électrodes et cibles environnantes) sur l'arc (de coupure ou de défaut)
- De comprendre l'impact de l'environnement (altitude notamment) sur la nature des paramètres physiques de l'arc électrique

Ceci nous conduit à développer des recherches complémentaires.

2.3. DEMARCHE SCIENTIFIQUE ADOPTEE ET CONTRIBUTION AU PROGRES DES CONNAISSANCES

Le but des travaux de thèse est de développer des modèles fiables décrivant la dynamique d'un arc électrique, et la possibilité de son extinction, dans différentes conditions de pression, de température, et de composition du mélange gazeux, notamment à basse pression pour les applications aéronautiques. Le modèle développé sera de type magnéto-hydro-dynamique (MHD) impliquant un couplage entre les équations de l'électromagnétisme, les équations de bilan de masse, de quantité de mouvement et d'énergie, ainsi que le transport d'énergie par rayonnement. Les questions fondamentales auxquelles nous souhaitons apporter des réponses comprennent entre autres les interrogations suivantes :

¹ * Contraintes aéronautiques perturbant la stratégie de mitigation et du design des éléments de coupure

- Beaucoup de volumes confinés = peu de place pour ségréguer par exemple ou peu de volume disponible pour les chambres de coupure
- Contraintes de poids à embarquer pour les chambres de coupure et éléments de protection
- Exigences safety très élevées = interdiction de rater un arc de défaut à ces niveaux de puissance
- Contraintes environnementales sévères et nécessité de déporter des équipements en zone dépressurisée par exemple

- Quelles sont les conditions thermodynamiques sous lesquelles on peut adopter l'hypothèse d'équilibre thermodynamique et chimique local ?
- Quel est le rôle des pertes énergétiques de l'arc, notamment par rayonnement thermique, sur la dynamique et la possibilité de son extinction ?
- Quel est le rôle de la pression sur la vitesse de propagation de l'arc ?
- Quelles sont les conditions aux limites électriques pour lesquelles l'arc se maintient ou s'éteint ? Quelle est l'influence de la température et de la pression sur ces conditions aux limites menant à l'extinction de l'arc ?

Afin de pouvoir apporter des réponses à ces questions, il s'agit de développer d'abord un certain nombre de modèles et d'outils numériques qui seront implémentés dans une plateforme générale de résolution d'écoulements fluides. Les outils préalables nécessaires aux simulations couplées comprennent :

- Le calcul de la composition chimique du mélange gazeux en fonction des conditions thermodynamiques et du mélange initial considéré.
- La détermination des propriétés thermodynamiques (énergies internes, chaleurs spécifiques, ...) et des propriétés de transport (conductivité électrique, conductivité thermique, viscosité, ...) du plasma.
- La détermination des propriétés radiatives du plasma dans un vaste domaine spectral allant de l'infrarouge à l'ultraviolet du vide.
- L'élaboration ou l'adaptation d'un solveur de transferts radiatifs utilisant les données précédentes sous forme directe ou en passant par des modèles simplifiés.

Le laboratoire EM2C a développé certains de ces outils (voir références [1-14] ci-dessous) qui ont été appliqués dans d'autres conditions que celles visées ici. Il s'agit de les compléter, et les adapter avant de les inclure dans un solveur couplant l'ensemble des phénomènes.

Avant l'exploitation de cette plateforme numérique dans différentes conditions, le modèle devra être validé sur des cas d'études expérimentales existantes ou à susciter au travers de collaborations académiques et/ou industrielles.

2.4. DESCRIPTION DETAILLÉE DES TRAVAUX ENVISAGÉS PAR ANNÉE

1^{ère} Année

Il s'agira d'effectuer :

- Une étude bibliographique poussée sur l'état de l'art de la modélisation de la dynamique des arcs électriques.
- Prise en main et adaptation des outils décrits précédemment.
- Mise au point du modèle MHD sur le plan théorique et choix d'une stratégie de résolution numérique.

Sorties :

- Modèle complet couplant les différents mécanismes physico-chimiques pour l'étude de la propagation de l'arc.
- Outils amont pour le calcul de la composition chimique, des propriétés thermodynamiques et de transport, des propriétés radiatives du plasma et des transferts radiatifs.

2^{ème} Année

Elle sera consacrée :

- L'analyse critique des différents solveurs commerciaux et open source et choix du solveur en adéquation avec le modèle développé.
- L'implémentation du modèle mis au point en première année dans le solveur choisi.
- La validation du modèle et de l'outil numérique par simulation de certaines études expérimentales publiées dans la littérature.

Sorties : Outil de simulation numérique validé.

3^{ème} Année

Enfin, il s'agira de :

- Exploiter le modèle et l'outil numérique développés dans différentes configurations d'intérêt pratique dans le domaine de l'aéronautique.
- Analyser physiquement les résultats obtenus
- Publier les résultats obtenus dans des revues spécialisées et présenter une ou deux communications dans des congrès.
- Rédiger le mémoire de thèse.

Sorties :

- Mémoire de Thèse
- Publications
- Modèle et outils numériques exploitables par la suite par les équipes de SAFRAN.

3. EVALUATION DU POTENTIEL DE PUBLICATION

Très important et dans des communautés scientifiques différentes telles que la physique appliquée, le génie électrique, l'aéronautique, ...

Les principales revues internationales visées seront : Journal of Applied Physics, Journal of Physics D, IEEE Transactions on Transportation Electrification, IEEE transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, ...

Concernant les conférences, on visera en particulier les conférences AIAA/IEEE Electrical Aircraft Technology Symposium, les conférences sur la physique des gaz comme GD (Gas Discharges and their Applications) et ICPIG (International Conference on Phenomena in Ionized Gases).

4. PRESENTATION DU LABORATOIRE EM2C :

Laboratoire Energétique Moléculaire et Macroscopique, Combustion (EM2C) CNRS UPR 288, CentraleSupélec, Gif-sur-Yvette

Le laboratoire EM2C est une unité propre du CNRS (UPR288) rattachée à l'INSIS. Il est installé depuis de nombreuses années sur le campus de CentraleSupélec (anciennement École Centrale Paris et Supélec) qui lui apporte un peu plus de la moitié de ses effectifs. Son personnel partage son activité entre la recherche, la valorisation de la recherche et le transfert de ses résultats, l'enseignement supérieur au travers de la formation des ingénieurs et des masters et la formation par la recherche.

Pour ses activités scientifiques, le laboratoire a naturellement comme rattachement principal la section 10 du comité national du CNRS et la section 62 du CNU. Son effectif est (chiffres 2019) de 26 chercheurs et enseignants-chercheurs (dont 3 émérites), 12 ITA, 3 post-doctorants, 50 doctorants et 3 enseignants-chercheurs ou chercheurs invités.

Par sa recherche académique de très haut niveau en énergétique et combustion depuis les échelles moléculaires jusqu'à des échelles plus macroscopiques et par des études appliquées en partenariat avec les plus grandes entreprises ou centres de recherche du domaine des transports et de l'énergie, le Laboratoire EM2C contribue significativement au progrès des connaissances sur les enjeux majeurs dans ces deux domaines. Les activités de recherche du laboratoire sont organisées autour de trois axes intitulés Combustion, Plasmas Hors Équilibre, Physique des Transferts et d'une action transversale en Mathématiques appliquées.

1. Combustion : Les activités dans l'axe Combustion concernent la compréhension, la maîtrise, la simulation, l'amélioration et l'optimisation de la combustion. Les objectifs sont une meilleure connaissance des mécanismes élémentaires et de leurs interactions grâce aux compétences développées simultanément dans l'expérimentation, la modélisation et la simulation numérique haute performance. Ces recherches s'appuient aussi sur des innovations dans le domaine des diagnostics, des capteurs, des actionneurs, des méthodes de contrôle et des moyens de simulation.

2. Plasmas Hors Équilibre : Les études pour les Plasmas Hors Équilibre comprennent d'une part un volet fondamental sur la physique des décharges électriques, ainsi que sur la cinétique chimique et le diagnostic des plasmas hors équilibre à pression atmosphérique, et d'autre part un volet applicatif dans les domaines de l'énergétique (allumage et stabilisation de mélanges pauvres en combustible, production d'hydrogène), de l'aérodynamique, de la rentrée atmosphérique et de l'environnement (traitement d'effluents gazeux).

3. Physique des Transferts : Les recherches conduites dans l'axe Physique des Transferts s'articulent autour des transferts par rayonnement, tant dans les milieux gazeux et réactifs qu'en milieux divisés, des transferts dans les milieux poreux et de la nano-thermique. En combinant approches fondamentales et développement de modèles effectifs de transferts thermiques, ces recherches permettent de s'attaquer à des verrous scientifiques et technologiques liés à des applications aussi variées que la rentrée atmosphérique de véhicules spatiaux, le transfert dans un cœur de réacteur nucléaire ou les nanomatériaux.

4. Activité transversale en Mathématiques Appliquées : Cette action transversale s'appuie sur une activité soutenue dans le domaine des mathématiques et la mise en place de projets à l'interface des disciplines utilisant le calcul scientifique et le calcul haute performance (HPC). Elle est menée en forte interaction avec les expérimentateurs du laboratoire. Ces études expérimentales permettent en effet

d'envisager dans un premier temps la validation des codes de calcul développés. Les simulations couplées aux résultats expérimentaux forment alors une nouvelle source de compréhension approfondie des phénomènes physiques étudiés.

Site du laboratoire : <http://em2c.centralesupelec.fr/en>

Rapport HCERES 2019 : <https://www.hceres.fr/fr/rechercher-une-publication/em2c-laboratoire-energetique-moleculaire-et-macroscopique-combustion>.

Liste des permanents impliqués dans l'encadrement

Philippe Rivière (philippe.riviere@centralesupelec.fr)

Laurent Soucasse (laurent.soucasse@centralesupelec.fr)

Anouar Soufiani (anouar.soufiani@centralesupelec.fr, directeur de thèse)

Quelques Publications récentes autour des applications de la modélisation fluide plasma

- R. Sousa Martins, Ph. Rivière, C. Zaepffel, F. Passilly, and A. Soufiani. Analysis of energy exchanges during the interaction between pulsed lightning arcs and metallic plates. *Journal of Applied Physics*, 128(22):223301, 2020/12/10 2020.
- F. Paillous, C. Zaepffel, R. Sousa Martins, L. Philippe, and A. Soufiani. Vaporization of Metallic Protections During Lightning Strikes: Experimental Study and Model. In *International Conference On Lightning And Static Electricity - Icolse 2019*, number Session 12, paper 59, Wichita, Kansas, United States, Sept. 2019.
- Q. Binauld, Ph. Rivière, J.-M. Lamet, L. Tessé, and A. Soufiani. CO₂ IR radiation modelling with a multi-temperature approach in flows under vibrational nonequilibrium. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 239:106652, 2019.
- R. Sousa Martins, L. Chemartin, C. Zaepffel, P. Lalande, and A. Soufiani. Electrical and hydrodynamic characterization of a high current pulsed arc. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 49(18):185204, 2016.
- L. Soucasse, J. B. Scoggins, Ph. Rivière, T. E. Magin, and A. Soufiani. Flow-radiation coupling for atmospheric entries using a Hybrid Statistical Narrow Band model. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 180:55–69, 9 2016.
- S. Prasanna, Ph. Rivière, and A. Soufiani. Modelling radiative properties of participating species in a microwave plasma reactor for diamond deposition. *Journal of Physics: Conference Series*, 550(1):012050, November 2014

5. BIBLIOGRAPHIE

[1] Y. Babou, P. Rivière, M. Y. Perrin, and A. Soufiani. High-temperature and nonequilibrium partition function and thermodynamic data of diatomic molecules. *International Journal of Thermophysics*, 30(2):416–438, 2009.

- [2] Q. Binauld, Ph. Rivière, J.-M. Lamet, L. Tessé, and A. Soufiani. CO₂ IR radiation modelling with a multi-temperature approach in flows under vibrational nonequilibrium. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 239:106652, 2019.
- [3] C. Deron. Rayonnement thermique des plasmas d'air et d'argon : modélisation des propriétés radiatives et étude expérimentale. Thèse de doctorat, École Centrale Paris, June 2003.
- [4] C. Deron, M.-Y. Perrin, Ph. Rivière, and A. Soufiani. Coupled Radiation, Conduction, and Joule Heating in Argon Thermal Plasmas. *J. of Therm. Heat Transf.*, 20(2):211–219, 2006.
- [5] N. Kahhali, Ph. Rivière, M.-Y. Perrin, J.-P. Gonnet, and A. Soufiani. Effects of radiative transfer modelling on the dynamics of a propagating electrical discharge. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 43(42):425204, 2010.
- [6] N. Kahhali, Ph. Rivière, and A. Soufiani. Study of an oct-tree based Monte Carlo algorithm for gas radiative transfer in complex geometries. In *Proceedings of the Eurotherm 83, Computational Thermal Radiation in participating media III*, Lisbon, Portugal, April, 15–17, 2009.
- [7] F. Paillous, C. Zaepffel, R. Sousa Martins, L. Philippe, and A. Soufiani. Vaporization of Metallic Protections During Lightning Strikes: Experimental Study and Model. In *International Conference On Lightning And Static Electricity - Icolse 2019*, number Session 12, paper 59, Wichita, Kansas, United States, Sept. 2019.
- [8] B. Peyrou, L. Chemartin, P. Lalande, B. Chéron, Ph. Rivière, M. Perrin, and A. Soufiani. Radiative properties and radiative transfer in high pressure thermal air plasmas. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 45:455203, 2012.
- [9] S. Prasanna, Ph. Rivière, and A. Soufiani. Modelling radiative properties of participating species in a microwave plasma reactor for diamond deposition. *Journal of Physics: Conference Series*, 550(1):012050, November 2014.
- [10] L. Soucasse, J. B. Scoggins, Ph. Rivière, T. E. Magin, and A. Soufiani. Flow-radiation coupling for atmospheric entries using a Hybrid Statistical Narrow Band model. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 180:55–69, 9 2016.
- [11] A. Soufiani, Ph. Rivière, and M. Perrin. High Temperature Gas Radiation (HTGR) Database And Models. In *Radiation And Gas-Surface Interaction Phenomena In High Speed Re-Entry, VKI-Lecture Series Brussels (STO-AVT-218-VKI)*, Belgium, May 6-8, 2013.
- [12] R. Sousa Martins, L. Chemartin, C. Zaepffel, P. Lalande, and A. Soufiani. Electrical and hydrodynamic characterization of a high current pulsed arc. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 49(18):185204, 2016.
- [13] R. Sousa Martins, Ph. Rivière, L. Chemartin, C. Zaepffel, and A. Soufiani. Radiative transfer during a pulsed lightning arc on a metallic plate. In *Proceedings of the 16th International Heat Transfer Conference*, Beijing, China, August, 10–15, pages IHTC16–22943, 2018.
- [14] R. Sousa Martins, Ph. Rivière, C. Zaepffel, F. Passilly, and A. Soufiani. Analysis of energy exchanges during the interaction between pulsed lightning arcs and metallic plates. *Journal of Applied Physics*, 128(22):223301, 2020/12/10 2020.