PROPOSITION DE SUJET DE THESE – English below

Intitulé : Développement d'une méthode prédictive d'imagerie par rayons X en contraste de phase pour l'analyse des matériaux aéronautiques foudroyés

Référence : **PHY-DPHY-2024-01** *(à rappeler dans toute correspondance)*

Début : 2024 – Financement Acquis (ANR)	**Date limite de candidature :** Décembre 2024

Mots clés : Imagerie de rayons X, méthode optique avancée, méthode d'extraction de phase, composite carboné, endommagement thermomécanique, foudre, interaction rayonnement-matière.

Profil et compétences recherchées : L'étudiant(e) doit avoir :

- un fort attrait pour la simulation numérique et l'approche couplée simulation/expérimentation
- une formation en physique (optique/physique des plasmas/interaction rayonnement ionisant-matière/métrologie) pouvant inclure des notions de science des matériaux
- une bonne connaissance des langages de programmation informatique (Python / C, C++, Matlab...)
- la connaissance des codes de transport de particules Monte Carlo serait un plus.

A l'issue de la thèse, l'étudiant(e) aura développé des compétences en :

- contrôle non destructif r-X sur une thématique émergente, avec une forte demande industrielle
- méthode d'analyse de front d'onde
- matériaux composites et la physique de leur endommagement
- simulation numérique
- résolution de problème, travail en équipe, gestion de projet, communication orale et écrite.

Présentation du projet doctoral, contexte et objectif :

Le remplacement de l'aluminium par des composites à fibres de carbone (CFRP) dans l'industrie aéronautique s'inscrit dans une **démarche d'aviation durable**. Or comparé à l'aluminium, les CFRP ont une conductivité thermique et électrique plus faible et une structure en feuillet, produisant un endommagement thermomécanique plus sévère en cas d'impact de la foudre. Une meilleure **compréhension des phénomènes physiques** conduisant à ce type d'endommagement permettrait aux avionneurs d'évaluer de façon fiable la nature des protections foudre à mettre en place pour continuer d'optimiser la masse des aéronefs et la gestion des matériaux.
L'investigation *in situ* des matériaux nécessitent l'emploi des rayons X (r-X). Or les images de CFRP, qui sont des matériaux légers, sont peu contrastées si la méthode d'imagerie se base uniquement sur **l'absorption des r-X** (imagerie par contraste d'absorption ou radiographie). L'ONERA et le CEA développent donc des méthodes innovantes d'imagerie exploitant aussi la **déviation des r-X** (imagerie par contraste de phase ou XPCI). Le banc d'imagerie associé a récemment fourni des résultats concrets pour observer **l'endommagement à cœur** de CFRP foudroyés en condition contrôlée sur le banc foudre de l'ONERA (analyse post-mortem). Ces résultats s'inscrivent dans un contexte de forte demande industrielle et ont permis d'obtenir une bourse de recherche de l'ANR.

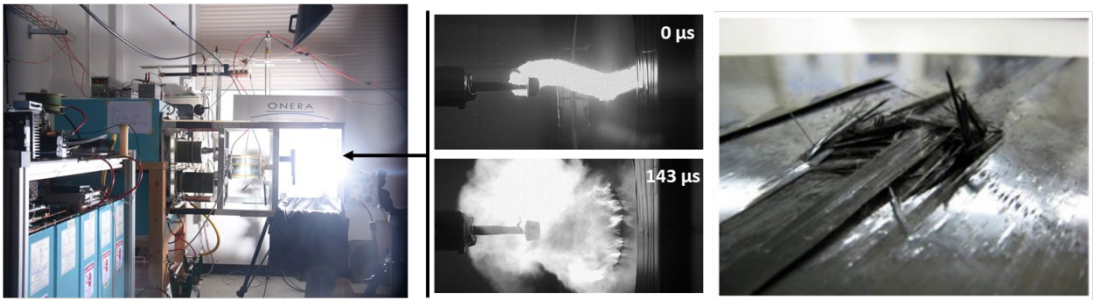

Figure 1 : Photographie d'un impact foudre sur le banc foudre de l'ONERA et dommages induits sur un panneau CFRP impacté par un arc de 40000 ampères.

Dans cette thèse, vous vous appuierez sur les outils de simulation numérique d'XPCI du CEA et d'endommagement matériaux de l'ONERA, pour **développer une méthode prédictive** d'imagerie XPCI des CFRP impactés par la foudre. Ces simulations seront comparées à des images expérimentales afin **d'aider à**

l'interprétation et l'analyse de l'endommagement. Les développements seront guidés par l'objectif à long terme d'imager dynamiquement l'endommagement du CFRP pendant le foudroiement sur le banc d'essai foudre de l'ONERA.

Cette thèse est financée par le projet ANR DyXPLAY (2024-2028). Elle s'inscrit dans une collaboration très active entre le département de physique (DPHY) de l'ONERA Palaiseau, le département d'optique (DOTA) de l'ONERA Palaiseau et le CEA List à Saclay. Vous rejoindrez l'équipe « Foudre, plasma et applications » du DPHY, experte dans la physique de la foudre. L'équipe mène des études numériques et expérimentales pour comprendre l'interaction de l'arc de foudre avec les structures aéronautiques. Vous serez encadré par A. Jarnac, qui a initié le développement de diagnostics par rayons X pour l'analyse de l'endommagement foudre et possède une forte expérience des synchrotrons. Vous aurez accès au **banc statique XPCI du CEA** et participerez à des campagnes expérimentales au **synchrotron de Grenoble** (ESRF) dans le cadre du Shock BAG pour vérifier la validité de vos développements numériques. La thèse sera dirigée par A. Stolidi du CEA List qui développe des diagnostics innovants par rayons X pour le contrôle non destructif et J. Primot du DOTA, qui est à l'origine du développement de méthodes avancées de mesure de phase.

Références :

[1] L. Chemartin et al., Direct Effects of Lightning on Aircraft Structure: Analysis of the Thermal, Electrical and Mechanical Constraints, AerospaceLab, p. 1-15 (2012)

[2] R. Sousa Martins, Etude expérimentale et théorique d'un arc de foudre et son interaction avec un matériau aéronautique, Thèse Université Paris-Saclay (2016).

[3] A. Momose, Recent Advances in X-ray Phase Imaging, Jpn. J. Appl. Phys. 44, 6355 (2005)

[4] A. Stolidi et al., "Confidence map tool for gradient-based X-ray phase contrast imaging." Optics Express 30, 4302 (2022)

[5] G. Giakoumakis et al., "Artifacts reduction in high-acutance phase images for X-ray grating interferometry." Optics Express 30, 41147 (2022)

[6] A. Stolidi et al., "X-ray phase contrast imaging model: application on tomography with a single 2D phase grating", 11th Conference on Industrial Computed Tomography, Wels, Austria (iCT 2022)

[7] https://www.esrf.fr/BAG/MI1397

Collaborations envisagées

ONERA/DOTA, ONERA/DMAS (Département matériaux et structures), CEA List, ESRF

Laboratoire d'accueil à l'ONERA

Département :
Physique, instrumentation, environnement, espace

Lieu (centre ONERA) : Palaiseau

Contact de l'encadrante : Amélie Jarnac

Tél. : 0180386430 Email : amelie.jarnac@onera.fr

Directeur de thèse

Nom : Adrien Stolidi

Laboratoire : CEA List

Tél. :

Email : adrien.stolidi@cea.fr