

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-2023-32** (à rappeler dans toute correspondance)

Début : 1er trimestre 2024 – Financement Acquis (ANR)

Date limite de candidature : Jan. 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/métrie) 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.

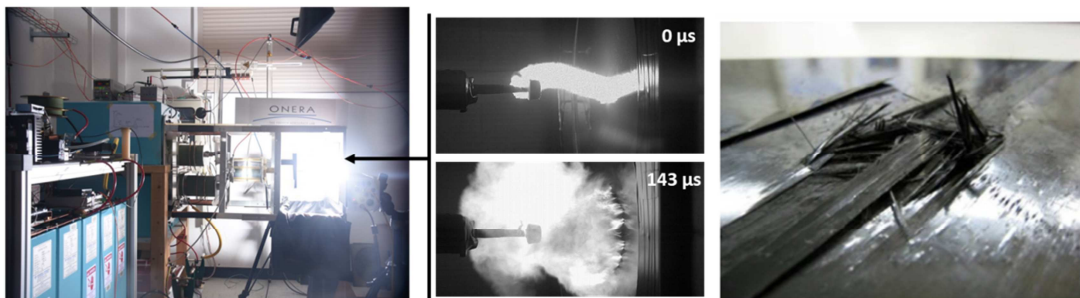


Figure 1 : Photographie d'un impact foudre sur le banc foudre de l'ONERA et dommages induits sur un panneau CFRP impacté par un arc de 40000 ampères.

Dans cette thèse, vous vous appuyerez 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

Development of a predictive X-ray phase-contrast imaging method for the analysis of lightning-struck aeronautical materials

Référence : PHY-DPHY-2023-32

Beginning: 1st quarter 2024 – Acquired financing (ANR)

Deadline for application: Jan. 2024

Key words: X-ray imaging, advanced optical methods, phase extraction methods, carbon composite, thermo-mechanical damage, lightning, radiation-matter interaction.

Profile and skills required: The student must have:

- a strong interest in numerical simulation and the coupled simulation/experimentation approach
- a background in physics (optics/plasma physics/ionizing radiation-matter interaction/metrology) that may include notions of materials science
- good knowledge of computer programming languages (Python / C, C++, Matlab...).
- knowledge of Monte Carlo particle transport codes would be a plus.

At the end of the thesis, the student will have developed skills in:

- X-ray non-destructive testing on an emerging topic with strong industrial demand
- wavefront analysis methods
- composite materials and the physics of their damage
- numerical simulation
- problem-solving, teamwork, project management, oral and written communication.

Presentation of the doctoral project, context and objectives:

Replacing aluminum by carbon fiber composites (CFRP) in the aeronautic industry is a research effort towards **sustainable aviation**. But compared to aluminium, CFRP have lower thermal and electrical conductivities and a sheet-like structure, meaning that there is a larger risk of thermo-mechanical damage if lightning strikes occur. A better **understanding of the physical phenomena** leading to this type of damage would enable aircraft manufacturers to make a reliable assessment of the type of lightning protection they need to put in place to further optimize aircraft weight and materials management.

In situ investigation of materials requires the use of X-rays. However, images of CFRP, which are light materials, have low contrast if the imaging method is based solely on **X-rays absorption** (absorption contrast imaging or radiography). ONERA and CEA are therefore developing innovative imaging methods that also exploit **X-rays deflection** (phase contrast imaging or XPCI). The related imaging bench has recently provided tangible results to characterize the **core damage** of CFRP stricken on the ONERA lightning test bench (post-mortem analysis). These results have aroused strong industrial interest and led to the award of an ANR research grant.

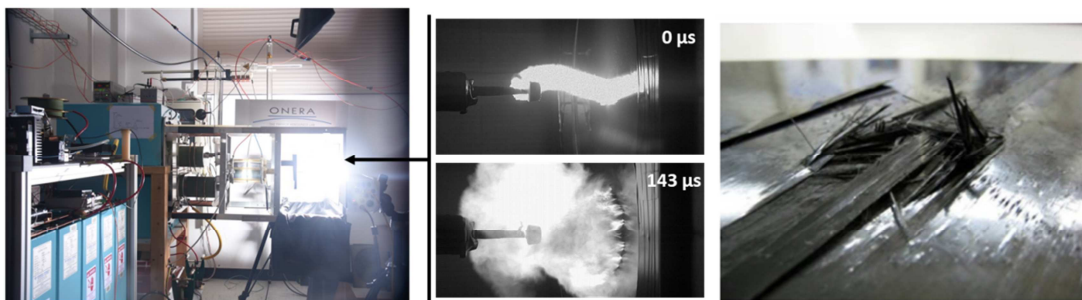


Figure 2 : Photograph of a lightning strike on ONERA's lightning bench and damage to a CFRP panel struck by a 40,000 ampere arc.

In this thesis, you will use the XPCI numerical simulation tools of CEA and material damage tools of ONERA to develop a **predictive imaging method** for CFRP impacted by lightning. These simulations will be compared with experimental images to **help in the interpretation and analysis of damage**. Developments will be guided by the long-term objective of dynamically imaging CFRP damage during lightning strikes on ONERA's lightning test bench.

This thesis is funded by the ANR DyXPLAY project (2024-2028). To carry out the work, you will join the "Lightning, Plasmas and Application" team of ONERA, which has a long expertise in the physics of lightning. The team pursues modelling and experimental studies to understand the lightning arc interaction with aeronautical structures. You will be supervised by A. Jarnac, who has initiated the development of high-speed X-ray diagnostics at ONERA and has extensive experience of synchrotrons. You will have access to **static**

XPCI bench of CEA and participate in experimental runs in **synchrotron** in the framework of the Shock BAG at ESRF [7] to verify the validity of your numerical developments. The doctoral project will be led by A. Stolidi from CEA List (Saclay) who develops innovative X-ray diagnostics for non-destructive testing and J. Primot from the Optics and Associated Technics Department (DOTA, ONERA Palaiseau), who is behind the development of advanced phase measurement methods.

References:

[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>

Possible collaborations

ONERA/DOTA, ONERA/DMAS (Materials and Structures Department), CEA List, ESRF

Welcome Laboratory at ONERA

Department : Physics, Instrumentation, Environment, Space
Place : Palaiseau

Contact of the supervisor: Amélie Jarnac

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

PhD director

Name : Adrien Stolidi
Laboratory : CEA List

Phone :

Email : adrien.stolidi@cea.fr

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