



## Invitation à la soutenance de thèse

**CARACTERISATION QUALITATIVE ET QUANTITATIVE DE MATERIAUX COMPOSITES  
FOUDROYES PAR IMAGERIE RAYONS X EN CONTRASTE DE PHASE DEPLOYEE SUR  
BANC DE LABORATOIRE**

**QUALITATIVE AND QUANTITATIVE CHARACTERIZATION OF LIGHTNING-STRUCK  
COMPOSITE MATERIALS USING PHASE-CONTRAST X-RAY IMAGING ON A  
LABORATORY SETUP**

Laureen Guitard

**Vendredi 08 novembre 2024, à 9h30**

Amphithéâtre 33/34

Bât 565 – Digitéo – CEA Saclay, 91191 Gif-sur-Yvette



**Devant le jury composé de :**

Dr. Emmanuel BRUN  
Pr. Peter MOONEN  
Pr. Marco STAMPANONI  
Pr. Christine ESPINOSA  
Pr. Yvan SORTAIS  
Dr. Matthieu GRESIL  
Dr. Jérôme PRIMOT  
Dr. Adrien STOLIDI  
Dr. Amélie JARNAC

Université Grenoble Alpes, INSERM  
Université de Pau et des Pays de l'Adour  
Paul Scherrer Institut  
ISAE-SUPAERO  
Université Paris-Saclay  
Monash University  
DOTA, ONERA  
CEA, List  
DPHY, ONERA

Rapporteur  
Rapporteur  
Examinateur  
Examinatrice  
Examinateur  
Examinateur  
Directeur de thèse  
Encadrant  
Encadrante



## Résumé

De nos jours, les composites à fibres de carbone en polymère renforcés (CFRP) sont de plus en plus utilisés dans l'aéronautique. Quand ils sont foudroyés, des défauts complexes peuvent apparaître dans leurs structures et avoir des répercussions sur leur durée de vie. L'objectif de cette thèse est de développer une approche alliant foudroiement contrôlé en laboratoire et contrôle non destructif innovant. Classiquement, de nombreuses solutions de CND peuvent être utilisées. Parmi elles, les rayons X permettent une inspection de volume à haute résolution. Cependant, le carbone, peu atténuant, apporte peu de contraste sur l'image. Pour pallier cela, une approche est d'utiliser la phase de l'onde, modifiée par l'échantillon, afin de compléter l'information d'atténuation et d'enrichir ainsi la caractérisation.

Plusieurs techniques utilisant la phase des rayons X existent. Ce travail s'appuie sur un banc d'imagerie à haute résolution spatiale (micrométrique) composé d'un tube micro-foyer, un détecteur haute résolution et une unique grille régulière 2D permettant la mesure de la phase des rayons X. C'est la méthode d'interférométrie à décalage multilatérale (IDML) inventée à l'ONERA pour le visible et déployée au CEA sur tube à rayons X. Cette méthode permet d'accéder à l'image d'atténuation, aux gradients de phase selon quatre directions et en les intégrant, reconstruire la phase d'un échantillon. Elle permet aussi de faire de l'imagerie darkfield pour être sensible aux éléments diffusants des échantillons. Chaque mesure a sa propre résolution spatiale et offre l'avantage d'être sensible aux plis des CFRP selon chaque direction. Dans cette thèse, j'ai appliqué l'IDML et plusieurs méthodes associées permettant l'imagerie robuste des CFRP.

Le banc de mesure du CEA m'a permis, dans un premier temps, d'étudier qualitativement un échantillon de CFRP foudroyé en laboratoire. J'ai mis en évidence que l'analyse des gradients, de la phase, du darkfield et de l'atténuation permet d'obtenir des informations sur la direction prise par le courant dans les fibres et sur le type de dégât causé. Une méthode d'auto-évaluation de la qualité d'image permet une analyse plus fine de la situation en déduisant de la présence d'artefacts des informations concernant le foudroiement. J'ai comparé les résultats d'imagerie en contraste de phase à d'autres méthodes de CND : tomographie rayons X en atténuation et de thermographie infrarouge.

Dans un second temps, j'ai démontré la faisabilité d'obtenir une information quantitative sur la variation de densité d'un CFRP foudroyé. Afin d'établir une relation entre l'endommagement et le foudroiement, j'ai réalisé une étude paramétrique sur huit échantillons foudroyés à trois niveaux de courant différents amenant des résultats significatifs participant à la compréhension du phénomène de foudroiement dans les CFRP. Cette étude est à la croisée des savoirs entre les méthodes optiques, l'imagerie par rayons X et la physique des endommagements des matériaux. J'ai appliqué pour la première fois la méthode IDML sur banc de laboratoire rayons X à un matériau concret ayant subi un endommagement complexe. Cette étude permettra de fournir des informations physiques sur l'endommagement des composites par la foudre et alimentera les modèles numériques d'interaction arc-matériau en cours de développement à l'ONERA.

## Mots clés

Rayons X, Contraste de Phase, CFRP, Foudroiement, Interférométrie

