

Invitation à la soutenance de thèse

PREDICTION DE L'EVOLUTION DE LA SIGNATURE OPTIQUE D'UNE PEINTURE BLANCHE SOUMISE A L'ENVIRONNEMENT RADIATIF SPATIAL

*PREDICTION OF THE EVOLUTION OF THE OPTICAL SIGNATURE OF A WHITE PAINT
EXPOSED TO THE SPACE RADIATION ENVIRONMENT*

Agnès LECADRE-SCOTTO

Le 24 novembre 2025 à 9h30
Auditorium Caroline Aigle, ONERA
2 avenue Marc Pégérin, 31400 Toulouse

Devant le jury composé de :

Myriam ZERRAD	Institut Fresnel, Aix-Marseille Université	Rapportrice
Laurent GALLAIS	Institut Fresnel, Ecole Centrale Marseille	Rapporteur
Sylvain GIRARD	Lab. Hubert Curien, Univ. Jean Monnet Saint-Etienne	Examineur
Stéphanie REMAURY	CNES	Examinatrice
Christophe INGUIMBERT	DPHY, ONERA	Directeur de thèse
Simon LEWANDOWSKI	DPHY, ONERA	Co-directeur de thèse
Romain CEOLATO	DOTA, ONERA	Encadrant, invité
Laurent SAUQUES	DGA	Invité
Rémi GILBLAS	IMT Mines Albi	Invité

Résumé

Les engins spatiaux en orbite autour de la Terre baignent dans un environnement radiatif agressif composé de particules énergétiques ionisantes (protons, électrons, UV, ions lourds, particules alpha) qui interagissent avec les matériaux de surface de ces engins et modifient leur structure physico-chimique. Ces interactions induisent des modifications des propriétés thermo-optiques des revêtements. Dans le cas particulier des revêtements froids, l'absorptance solaire initialement faible augmente, ce qui entraîne la hausse de la température d'équilibre du système ce qui peut endommager les composants conçus pour opérer dans des plages de température limitées. D'autre part, dans le contexte de la surveillance spatiale, l'observation de scènes est un enjeu émergent. Pour répondre à l'ensemble de ces besoins, un enjeu majeur consiste à prédire l'évolution des propriétés thermo-optiques des revêtements froids et en particulier de l'absorptance solaire.

Généralement, les propriétés optiques d'un matériau sont évaluées par mesure de sa signature optique (réflectance, transmittance) en fonction du niveau de radiation reçu lors d'essais d'irradiation au sol. Mais ces essais se limitent souvent à des irradiations successives de particules mono-énergétiques, ne reflétant pas l'effet synergique de la combinaison de particules et d'énergies variées de l'environnement spatial. Ils sont de plus coûteux en temps et en ressources. Les approches numériques constituent alors une alternative plus appropriée pour s'affranchir de ces contraintes.

Ces travaux ont été mis en place pour prédire numériquement, au cours de l'irradiation par des particules ionisantes, l'évolution des propriétés optiques d'une peinture blanche formée par un liant polydiméthylsiloxane (PDMS) et un pigment d'oxyde de zinc (ZnO).

Pour cela, la première étape a consisté à développer un code de transfert radiatif capable de simuler la signature optique sur [250 ; 2500] nm d'échantillons de cette peinture et de ses constituants (PDMS, ZnO) déposés sur plusieurs types de substrats. Le transport des photons est calculé par Monte Carlo et est modélisé grâce aux fonctions physiques de GEANT4 : le code intègre la paramétrisation des processus de transport (interactions surfaciques, absorption, diffusion) et de l'environnement de la simulation de façon à calculer les réflectances et transmittances des échantillons. Ces dernières ont été validées par comparaison avec celles mesurées par spectroscopie UV-visible-proche infrarouge.

La deuxième étape de l'étude a consisté à étudier le vieillissement des échantillons par des protons d'énergies 45 keV et 240 keV, aux fluences variant de 10^{15} à 10^{16} p+/cm². Un modèle empirique d'évolution du coefficient d'extinction du PDMS en fonction de la dose intégrée dans l'épaisseur dégradée a été développé puis a été appliqué pour évaluer les signatures optiques du PDMS et de la peinture. Cette approche se différencie des méthodes classiques qui considèrent un niveau de dose approximé constant à la surface d'un matériau. La dose intégrée sur l'épaisseur dégradée tient compte de la proportion de dommages liés aux modifications structurales et chimiques induits au sein d'une épaisseur de matériau, permettant ainsi une modélisation robuste de la dégradation pour différentes énergies de protons.

Cette recherche ouvre la voie à un modèle de prédiction global, plus physique, pour évaluer l'évolution des propriétés optiques des revêtements spatiaux sous irradiation, indépendamment du type de particule et de son énergie ce qui est essentiel pour les applications spatiales à conditions d'irradiation variées.

Mots clés

Signature optique, Peinture blanche, Revêtement, Environnement radiatif spatial, Modélisation, Dégradation