

www.onera.fr

## PROPOSITION DE SUJET DE THESE

**Intitulé :** Modélisation de la signature infrarouge de différents satellites pour identification de leur type et évaluation de nouveaux systèmes d'observation

Référence : **PHY-DOTA-2024-11** (à rappeler dans toute correspondance)

Début de la thèse : 09/2024 Date limite de candidature : 06/2024

#### Mots clés :

signature, infrarouge, satellite, thermique, optique, imagerie hyper-spectrale, transfert radiatif, modélisation.

## Profil et compétences recherchées :

Ecoles d'ingénieur ou Master en Physique (thermique, optique).

Connaissances en thermique et en optique classique (équations de diffusion de la chaleur et de la lumière). Programmation : Langage C, Python, notions COMSOL.

# Présentation du projet doctoral, contexte et objectif :

La prolifération des objets dans l'espace est un sujet de préoccupation croissant, et il devient crucial de disposer d'informations fiables sur ces objets pour être en mesure de les localiser et les identifier. Les moyens d'observation actuels utilisent principalement le radar et l'optique, ils sont en grande majorité basés au sol, et certains moyens commencent à être basés dans l'espace. La conception de nouveaux systèmes d'observation nécessite de disposer de données « source » fiables pour réaliser leur dimensionnement. La signature optique est composée des images et des spectres de la cible, cette quantité complexe intègre donc à la fois la qualité du moyen d'observation, la géométrie de la scène observée, l'émission propre et réfléchie de l'objet, et l'environnement radiatif et optique de l'objet. Les signatures optiques des objets d'intérêt sont peu nombreuses et parcellaires, d'où l'intérêt de disposer en complément d'un outil de simulation prédictif. L'ONERA dispose des codes de signature CRIRA (aéronef et satellite) [1], SIRIUS (satellite) [1] avec un moteur de rendu permettant de calculer la signature optique d'un satellite dans le visible.

Ces outils peuvent calculer la signature infrarouge d'un satellite, mais il est nécessaire de connaître au préalable la température de surface de l'objet. De plus, ce calcul n'ayant jamais été réalisé, il nécessite d'être validé avec les mesures appropriées. Ainsi, nous proposons dans le cadre de cette thèse de modéliser les signatures optiques de différents types de satellites et d'étendre tels calculs à l'infrarouge (voir dans la figure ci-dessous l'exemple de la signature visible du satellite ENVISAT, un spectre est associé à chaque pixel de l'image). Pour y parvenir, nous proposons donc le développement d'un code de thermique (basé sur COMSOL [5], cette approche permet le calcul des flux thermiques en 3D et notamment la modélisation de l'intérieur du satellite) pour estimer la température des surfaces des satellites.

Le projet de recherche proposé s'inscrit dans le cadre de travaux de mise au point et de validation d'outils pour prédire la signature infrarouge d'un satellite (ce genre de modèle n'existe pas aujourd'hui), en vue d'apporter des réponses aux besoins de dimensionnement et d'évaluation de nouveaux systèmes d'observation ou d'identification de la catégorie d'un satellite en fonction de sa signature spectrale.

L'objectif scientifique de ce travail de recherche est de maîtriser les modèles de signature spectrale de satellites. Pour y arriver, il est nécessaire d'adapter à l'infrarouge les outils de simulation numérique de la signature développés à l'ONERA [1, 2, 3]. En conséquence il faut réaliser une modélisation de la température de surface des satellites considérés. Pour cela, un modèle thermique 3D sera développé en utilisant l'outil COMSOL v6.1 [5] qui intègre un module thermique à éléments finis pour les satellites. Ce dernier permettra de prendre en compte le flux issu de l'environnement radiatif constitué du Soleil, de la Terre et de l'atmosphère, les propriétés optiques et thermiques des matériaux et une description géométrique 3D du satellite et de ses matériaux. COMSOL permet notamment de simuler l'électronique à l'intérieur du satellite pour calculer les flux thermiques générés en interne et qui peuvent être utilisés pour déterminer l'activité du satellite (passivement à travers l'imagerie infrarouge). Les cartes de température ainsi générées seront intégrées aux codes de signature. Les informations concernant l'orbite et les matériaux seront issues de la littérature, complétées par des données issues de projets menés par l'ONERA et le CNES. Les cartes de température calculées par COMSOL devront alors être importées par le code SIRIUS qui les utilisera pour évaluer l'émission thermique de chaque facette sur la surface. De plus, le code de transfert radiatif de l'ONERA, MATISSE [4], sera utilisé pour calculer la transmission et la luminance atmosphérique (pour le cas

d'un observateur au sol ou dans l'atmosphère) ainsi que la sphère d'éclairement dans la bande infrarouge souhaitée (en tenant compte des flux solaire et terrestre). Enfin, le code de signature SIRIUS prendra en entrée les cartes de température, les propriétés optiques des surfaces, la transmission, la luminance atmosphérique et la sphère d'éclairement pour calculer une image hyper-spectrale d'un satellite dans l'infrarouge. Les signatures calculées seront comparées pour validation aux données de différentes campagnes de mesures réalisées par l'ONERA et le CNES.

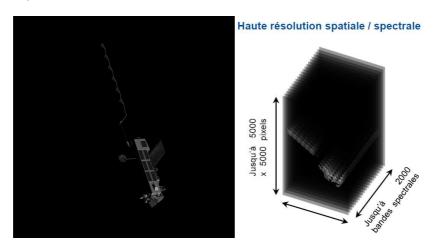
Enfin, l'effet de la PSF (point spread function) de l'instrument ou de la turbulence atmosphérique (pour un observateur au sol ou dans l'atmosphère) sur la génération d'image sera aussi étudié en relation avec la BRDF (Bidirectional reflectance distribution function) et l'émissivité des matériaux des satellites pour déterminer la source principale de la signature optique dans le visible et l'infrarouge.

Les principales étapes du projet proposé sont les suivantes :

- Etude bibliographique sur les méthodes de calcul de température de surface des satellites sur l'orbite et recherche de modèles 3D de différents types de satellites (avec les matériaux optiques et thermique associés, pour exemple le satellite ENVISAT).
- Développement du modèle thermique dans COMSOL (géométrie, orbite, matériaux, environnement et électronique à l'intérieur) pour le calcul de la température de surface des satellites,
- Validation par données thermiques issues du code thermique de référence de l'ESA (ESATAN [6]), et comparaison avec cas test pour le satellite AZIMOV,
- Calcul dans l'infrarouge des images hyper-spectrales du satellite correspondant à différentes positions/orientations sur l'orbite vues par un autre satellite ou par un télescope sur la surface terrestre,
- Comparaison des signatures calculées avec les données de différentes campagnes de mesures,
- Etude de l'effet combiné de la PSF, de la BRDF et de l'émissivité sur les images obtenues (déterminer la source principale de la signature optique),
- Publication de ces travaux de recherche dans des revues internationales à comité de lecture.

Les travaux proposés dans la thèse visent à enrichir les connaissances sur la signature des satellites (sujet très peu présent dans la littérature). L'extension à l'infrarouge des codes de signature permettra d'évaluer ultérieurement de nouveaux concepts: distinguer un satellite actif des débris spatiaux, évaluer la possibilité de limiter l'effet du fond sur les images, identifier les matériaux du satellite, suivre le satellite lorsqu'il est dans l'ombre de la Terre, savoir s'il y a des composants électroniques actifs ou des cryostats sur le satellite et enfin d'identifier la catégorie d'un satellite en fonction de sa signature spectrale.

Ce travail de recherche permettra au ou à la candidat(e) retenu(e) d'accroître ses compétences dans la thermique et l'optique des satellites, les méthodes de rendu et d'acquérir des compétences en modélisation multi-physique COMSOL [5]. Le projet permettra de travailler en environnement de recherche et de participer à la collaboration entre laboratoires. De nouvelles compétences en programmation C, C++ (SYCL) et Python seront également acquises.



Exemple de la signature visible (image hyper-spectrale) pour le satellite ENVISAT (observation hors atmosphère). Un spectre est associé à chaque pixel de l'image.

#### Références :

- [1] E. Coiro, "Global Illumination Technique for Aircraft Infrared Signature Calculations", Journal of Aircraft, Vol. 50, No 1, January-February 2013, AIAA, DOI: 10.2514/1.C031787.
- [2] R. Hoarau, E. Coiro, S. Thon and R. Raffin "Interactive Hyper Spectral Image Rendering on GPU", International Conference on Computer Graphics Theory and Applications, Jan 2018, Funchal, Portugal, DOI: 10.5220/0006549800710080.

- [3] François Margall & Eric Coiro. "GPU computing and importance sampling dedicated to aircraft and satellites signature predictions in the visible and infrared bands " OPTRO, Versailles, 2022.
- [4] Luc Labarre et al., "MATISSE-v2.0 : new functionalities and comparison with MODIS satellite images", Proc. of SPIE Vol. 8014, 80140Z, 2011.
- [5] https://www.comsol.com/blogs/computing-orbital-heat-loads-with-comsol-multiphysics/
- [6] https://www.esatan-tms.com/
- [7] Velez-Reyes, Miguel, et al. "Understanding non-resolved space object signatures for space domain awareness." Advanced Maui Optical and Space Surveillance Technologies (AMOS) Conference. 2022.

#### Collaborations:

Nicolas Delaygue (CNES). Romain Fétick (LAM-ONERA).

## Laboratoire d'accueil à l'ONERA :

Département : Optique et Techniques Associées Lieu (centre ONERA) : Salon-de-Provence

Contact : Ugo Tricoli & Eric Coiro

Tél.: Tricoli +33 4 90 17 01 08 & Coiro +33 4 90 17 01 12

Email: ugo.tricoli@onera.fr eric.coiro@onera.fr

## Directeur de thèse / Co-directeur :

Nom: Thierry Fusco / J.-F. Sauvage Laboratoire: DOTA ONERA / DOTA HRA Tél.: +33 6 62 48 48 36 / +33 6 63 57 35 40

Email: thierry.fusco@onera.fr

jean-francois.sauvage@onera.fr

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