
Intelligence artificielle pour l'analyse de front d'onde spatiale embarquée

Name of the laboratory: Laboratoire d'Astrophysique de Marseille

Thesis advisors: Jean-François Sauvage

Email and address Advisors: sauvage@onera.fr +33663573540

Un nombre croissant de domaines scientifiques et techniques requiert la combinaison d'images prises depuis l'espace à très haute résolution (résolution spatiale) couplées à un haut taux de revisite (résolution temporelle). Ce besoin s'étend de l'observation de la Terre au survol de corps du système solaire.

Parmi les nombreux intérêts scientifiques, on peut par exemple citer le Climat et l'Astrophysique.

Du point de vue climatique, les échelles spatiotemporelles de l'Albédo terrestre sont critiques pour la précision des modélisations à long terme des évolutions climatiques. Cet albédo est un élément clé du forçage climatique, et sa connaissance aujourd'hui n'existe qu'à une revisite de plusieurs jours et une résolution kilométrique (Copernicus Global Land Service). Une mesure permettant de suivre son évolution diurne et à l'échelle sub-kilométrique, voire idéalement métrique serait une révolution dans ce domaine. En particulier l'échelle métrique permet de mesurer l'albédo à des échelles urbaines, suivre des sources de polluant très ponctuelles (cheminées d'usine etc.).

Dans le domaine de l'exploration du système solaire, les meilleures résolutions des planètes et des corps du système solaire obtenues in-situ sont données par des instrument onéreux, uniques, et dont les tailles d'ouvertures les plus ambitieuses sont aujourd'hui au maximum de 30cm (HRI, Deep Impact) et en général de 10 ou 20cm (NAC camera sur Rosetta, Cassis camera sur TGO, New Horizon camera). Proposer des taux de revisite plus élevés couplés à des ouvertures de taille similaire permettrait de porter un regard nouveau sur le système solaire, en particulier sur les phénomènes transitoires (geysers d'Encelade, volcanisme de Io pour ne parler que des corps les plus connus).

Combiner ces deux types de résolution spatiale et temporelle est aujourd'hui hors de portée à des coûts raisonnables : la seule façon d'accéder à la résolution temporelle consiste à utiliser des constellations de satellites permettant de multiplier les prises de vues, augmentant d'autant les coûts de l'ensemble.

Une solution pour conserver un coût raisonnable à une constellation de satellite est d'utiliser de petites plate-formes (micro- ou nano-satellites, ou le standard CubeSat) réduisant les coûts, mais leur petite taille réduit d'autant la taille maximale du télescope embarquable et in fine la résolution atteignable au sol. Dans le cas de l'observation de la Terre, un télescope de 10cm de diamètre - taille maximale embarquable dans un CubeSat - limite la résolution au sol à 3m depuis une orbite basse de 500km dans le visible. Pour atteindre le régime de très haute résolution (1m au sol), un diamètre de 30cm est requis. Nous proposons de lever ce verrou en développant un concept de télescope déployable pour CubeSat, bénéficiant conjointement du faible coût de ces plate-formes et de la grande résolution d'un télescope déployé et phasé (projet AZIMOV).

Des solutions de ce type sont proposées par la communauté depuis quelques années consistant en des télescopes segmentés, dont les optiques (primaires et secondaires, baffles) sont lancées repliées dans le satellite, et se déploient une fois en orbite. Ces solutions requièrent en particulier la maîtrise de la qualité optique, non seulement au moment du déploiement du télescope, mais également au cours de l'observation elle-même.

On peut bien sûr citer le JWST, qui devra assurer le phasage à une fraction de longueur d'onde de ses 17 segments, pour un diamètre total de 6.5m. On est bien loin cependant d'une solution bas coût (10 milliards de dollars) ni autonome et encore moins temps-réel : cette opération de déploiement et de phasage se fera depuis le sol, sous opération humaine, pendant une période de 6 mois. Aujourd'hui, aucune de ces méthodes n'est en opération.

Par ailleurs l'utilisation de méthodes actuelles (type diversité de phase ou senseur auxiliaire) nécessiterait idéalement une phase préliminaire de calibration sur une étoile fixe, avant de pouvoir retourner le satellite et observer le sol. Ce retournement, coûteux en temps, n'est pas compatible avec les évolutions rapides des perturbations attendues en orbite basse (cycles de 90 minutes).

L'environnement complexe des images spatiales, couplé au volume (très) restreint accessible à bord d'une petite plate-forme comme un CubeSat fait de l'optique active un véritable défi. On souhaite faire à bord d'un CubeSat et de façon autonome ce qui sera fait depuis le sol pour le phasage des segments du JWST. L'utilisation d'un senseur de front d'onde auxiliaire (type SH ou autre) est inenvisageable pour un si petit volume, il est donc primordial de pouvoir utiliser l'image scientifique (plan-focal) directement. Cette difficulté procure cependant la possibilité d'un développement ambitieux, où l'optique active, l'analyse de front d'onde, la maîtrise de la qualité optique et la restauration d'image peuvent cohabiter de façon très constructive.

Objectif et contenu de la thèse :

Au cours de cette thèse, un premier objectif est d'étudier l'intérêt des algorithmes d'intelligence artificielle pour optimiser la performance optique d'un télescope déployable embarqué. Cet environnement implique plusieurs facettes : l'analyse de front d'onde, le suivi de performance optique et le contrôle actif des composants mobiles. Cette fonction, habituellement séparée en plusieurs postes, doit être prise en charge intégralement par l'algorithme d'apprentissage pour être efficace. Dans ce cadre, des premiers réflexions sont menées en collaboration avec l'INETEC, laboratoire de l'université de Porto en co- direction de cette thèse. Une analyse des méthodes supervisées ou non supervisées a été menée et en montre l'intérêt. Des travaux menés dans d'autres domaines sont également prometteurs : l'équipe chilienne d'Esteban Vera montre de très bonnes performances sur la mesure des premiers modes de Zernike d'un système optique à base de réseau neuronaux convolutifs. Des travaux menés pour l'optimisation de la performance de l'imageur scientifique d'HARMONI (par Alvaro Menduina, université d'Oxford) montrent également des performances très prometteuses. Enfin, des travaux similaires menés par Pierre-Olivier Vanberg à l'Université de Liège montrent également des résultats très encourageants pour appliquer ces méthodes à l'imagerie à haut contraste.

Un second objectif est de considérer l'IA pour la restauration d'image, c'est-à-dire pour estimer le critère de qualité optique de l'instrument (estimation de la PSF) ainsi que l'objet estimé. Les outils proposés dans cette thèse seront comparés aux méthodes déterministes développées à l'ONERA depuis de nombreuses années (Diversité de phase, déconvolution).

Enfin, considérer l'IA dans l'ensemble de la chaîne de l'optique active couplée à la restauration d'image permet d'envisager de l'utiliser dans la co-conception du système complet. Cette méthode de co-conception, éprouvée sur des instruments d'OA précédents (SAXO pour SPHERE par exemple) a

montré son intérêt, permettant de relâcher des contraintes matérielles lors de la conception du système. L'idée dans le cadre de cette thèse est de relâcher les contraintes sur le phasage des segments en prenant en compte dans la conception du satellite la capacité de faire de la restauration d'image embarquée ou au sol.

Collaborations et rôle des acteurs de la thèse :

L'équipe Haute Résolution Angulaire de l'ONERA est un spécialiste reconnu mondialement dans le domaine des systèmes d'optique adaptative et d'optique active, au sol et dans l'espace. L'ONERA a la direction de cette thèse et apportera son savoir-faire en terme d'analyse de surface d'onde, et de connaissance des méthodes existantes. Le directeur de la thèse est Jean-François Sauvage (passage HDR en 2021).

L'INESCTEC est un laboratoire associé à l'Université de Porto. Fort de 30 années d'expérience dans le domaine de la computer Science, et le développement d'algorithmes d'intelligence artificielle dans différents domaines dont l'astronomie. Carlos Correia, chercheur associé à l'INESCTEC et ancien thésard ONERA, sera le point de contact pour cette thèse et le co-encadrant de la thèse.

L'ATC apporte à cette thèse son expertise en instrumentation spatiale (JWST/MIRI et ESA/LISA) et son implication sur la mission spatiale cube-sat HighRes pour l'observation de la Terre. Cette mission en cours de développement à l'ATC pourra permettre de tester des concepts développés au cours de la thèse. Le contact ATC responsable de cette activité est Noah Schwartz, ancien thésard ONERA et collaborateur dans le cadre d'activités astronomiques avec l'équipe intégrée LAM-ONERA. L'ATC vient d'obtenir un financement (ISAAC) leur permettant de développer plus avant HighRes, un démonstrateur de télescope déployable à bord d'un CubeSat (miroir primaire, orienté test de composant).

Le LAM est le laboratoire d'astrophysique de Marseille, université d'Aix Marseille. L'équipe GRD (groupe Recherche et Développement) imagine, conçoit et développe une instrumentation innovante. Le contact au LAM sera Marc Ferrari. Le LAM a mis en place récemment un pôle d'algorithmie Deep Learning / Machine Learning, dirigé par Morgan Gray, également contact de cette thèse. Ce pôle a pour but d'animer les activités d'application algorithmiques à l'instrumentation.

L'équipe GRD au LAM sera le laboratoire d'accueil pour la moitié de cette thèse, et INESCTEC l'autre moitié (dépendant des financements trouvés).

Duration: 3 years

Starting date: Fall 2021

Deadline for applications: 31 March 2021

Skills and Know-How

Excellent candidates with astronomy, applied physics, mathematics, engineering backgrounds with strong signal processing and programming skills are encouraged to apply.