

Préparer le futur

FORMATION PAR LA RECHERCHE
THÈSES DE DOCTORAT
HDR & POST-DOCS

2024

Thèses de doctorat, HDR et post-docs

Année 2024

Chiffres clés ONERA 2024

2207	Collaborateurs
1751	Ingénieurs et cadres
376	Doctorants
16	Post-doctorants
128	HDR
112	Thèses soutenues en 2024
6	Soutenances HDR en 2024
16	Post-docs terminés en 2024

Doctorat, le nouveau sésame



Cette nouvelle édition du fascicule des thèses de doctorat menées à l'ONERA illustre, outre la grande variété des sujets de recherche de nos équipes, le dynamisme de nos jeunes chercheuses et chercheurs.

C'est ici qu'a débuté leur parcours professionnel, entre recherche académique et recherche finalisée, en bénéficiant d'un encadrement que nous voulons de la meilleure qualité. L'ONERA remplit ainsi sa mission de formation par la recherche des futurs acteurs de l'industrie et de la recherche aérospatiale. Ces vingt dernières années, les statistiques indiquent que 50% des alumni ONERA ont rejoint le secteur ASD (Aéronautique, Spatial, Défense), et que 30% travaillent dans des secteurs industriels connexes.

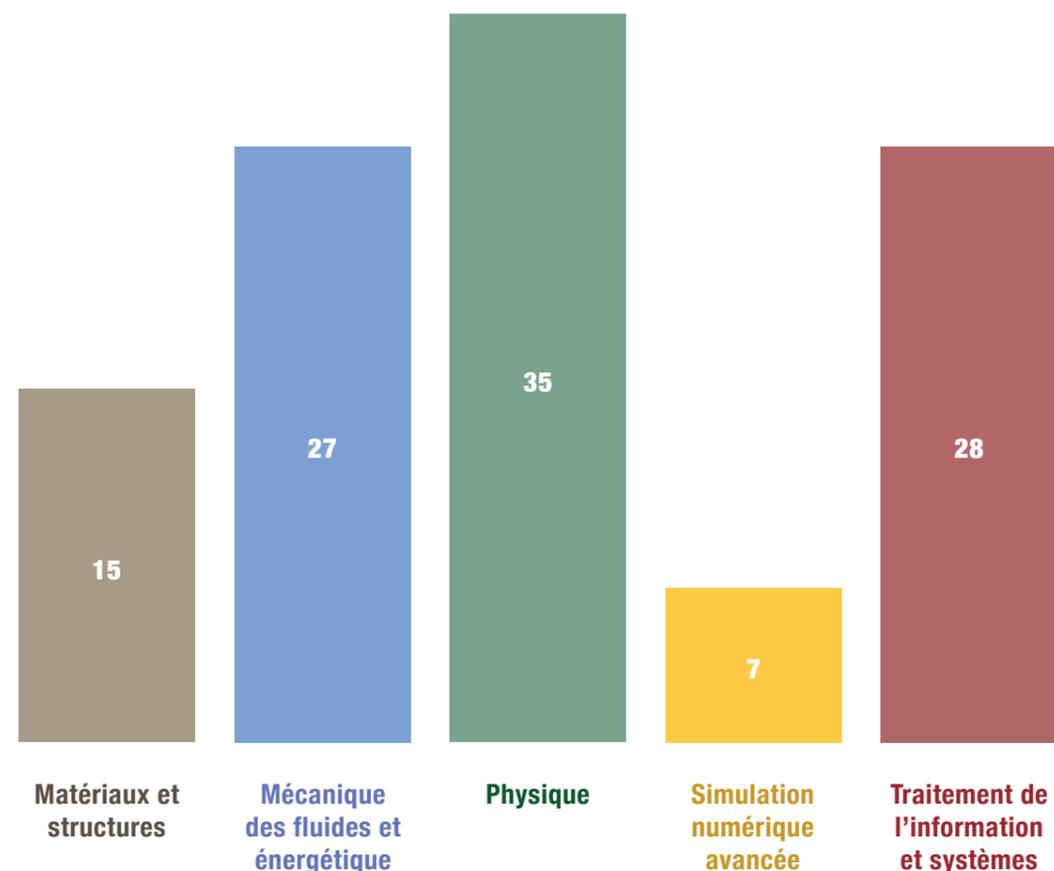
Au-delà de cette mission de formation, les doctorantes et doctorants sont la force vive de la politique scientifique de l'ONERA en apportant la diversité culturelle et la disponibilité intellectuelle indispensables pour faire émerger ou fructifier des idées originales et innovantes. Ils participent à la recherche la plus fondamentale, pour préparer l'avenir d'une recherche finalisée, avec des travaux qui puisent leur source dans les problématiques applicatives. Enfin ils contribuent au rayonnement de l'ONERA par les collaborations liées à leur thèse, par la dissémination de leurs travaux dans les revues scientifiques et les congrès, et par leur impact dans le monde aérospatial à l'issue de leur soutenance.

On trouvera également dans ce recueil les Habilitations à diriger des recherches (HDR) soutenues cette année ainsi qu'un compte-rendu des contrats post-doctorants finalisés en 2024.

Riad Haidar

Directeur Scientifique Général

112 thèses soutenues en 2024



La formation par la recherche à l'ONERA



Les thèses de doctorat ont lieu dans l'environnement de recherche des départements scientifiques de l'ONERA. Nos doctorants sont toujours encadrés d'au moins un personnel ONERA spécialiste de la thématique scientifique.

Un directeur de thèse, universitaire ou ONERA, titulaire d'une HDR, dirige et supervise les travaux.

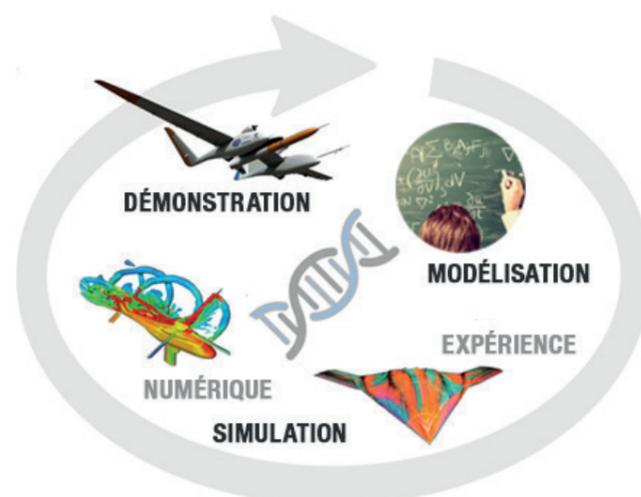
La thèse, de la proposition du sujet jusqu'à la soutenance en passant par le recrutement du doctorant et le montage du dossier avec les éventuels partenaires, est coordonnée par la Direction scientifique générale. Chacun des cinq directeurs scientifiques de domaine en supervise le déroulement, notamment à l'occasion des journées des doctorants qui mobilisent chaque année toutes nos jeunes chercheuses et chercheurs.

Suite à ces journées, un prix des doctorants distingue, pour chaque domaine scientifique, un doctorant ou une doctorante de troisième année dont les travaux et la présentation sont jugés remarquables.

Cristina Rotaru

Chargée de mission Formation par la recherche
cristina.rotaru@onera.fr

L'ADN de l'ONERA



LA FORMATION PAR LA RECHERCHE À L'ONERA 2024

Thèses soutenues

• Matériaux et structures	9
• Mécanique des fluides et énergétique	43
• Physique	101
• Simulation numérique avancée	177
• Traitement de l'information et systèmes	195

HDR soutenues	255
----------------------	------------

Contrats post-doctoraux	269
--------------------------------	------------

Index des auteurs	286
--------------------------	------------

**Thèses de doctorat ONERA
soutenues en 2024**

**Domaine scientifique
MATÉRIAUX ET STRUCTURES**

Thèses de doctorat ONERA soutenues en 2024

Domaine MATÉRIAUX ET STRUCTURES

Selon les départements et leurs thématiques scientifiques :

AÉRODYNAMIQUE, AÉROÉLASTICITÉ, ACOUSTIQUE

Aéroélasticité

Dimitri Magand	Étude de la réponse forcée des OGV d'un moteur UHBR sous ingestion de vortex de sol	12
Matthias Plath	Stabilité globale aéroélastique de profils laminaires transsoniques	14

MATÉRIAUX ET STRUCTURES

Matériaux architecturés et multifonctionnels

Ines Hamadouche	Mécanismes d'endommagement d'un composite à matrice céramique revêtu d'une barrière environnementale sous sollicitations multiphysiques	16
Xavier Majnoni d'Intignano	Fatigue-corrosion de l'acier 316L issu de la fabrication additive	18
Charlotte Vernozy	Croissance de monocristaux de ZnGeP ₂ et amélioration de leurs performances optiques par irradiation aux électrons de haute énergie et par dopage chimique	20

Matériaux structuraux innovants

Zoé Borius	Développement et caractérisation de CMC oxyde/oxyde élaborés par imprégnation de mèches en continu	22
Nina Kergosien	Étude de l'intégration de transducteurs piézoélectriques à cœur de matériau composite de type aéronautique pour le contrôle santé intégré par ondes de Lamb	24

Mécanique structurale, conception et optimisation des structures

Mathieu Goron	Simulation numérique d'impacts hydrodynamiques impliquant des phénomènes de succion : application à l'amerrissage d'avions de transport	26
Loïc Mastromatteo	Durabilité de systèmes de contrôle santé intégré (SHM) par ondes guidées pour la revalidation des lanceurs spatiaux réutilisables	28
Enrico Stragiotti	Conception et optimisation de structures treillis modulaires pour l'aérospatial	30

Modélisation des phénomènes macroscopiques complexes

Pierre Bertrand	Étude du comportement d'interface d'une barrière environnementale sur composite à matrice céramique	32
Bastien Lammens	Caractérisation de la décohésion dynamique des matériaux composites à matrice organiques CMO	34
Manon Lenglet	Modèle d'endommagement de fatigue en lien avec la microstructure dans un alliage d'aluminium	36

Physique et comportement des matériaux : de l'atome à la microstructure

Abdelhalim Chirouf	Modélisation des transformations de phase diffusives par changement d'échelle depuis l'échelle mésoscopique	38
--------------------	---	----

Structures de basse dimension

Elisa Serrano-Richaud	Modélisation des propriétés électroniques et optiques des hétérostructures latérales 2D	40
-----------------------	---	----

Dimitri Magand

Thèse soutenue le 2 avril 2024 à Châtillon

ED 626 (IPP) - Institut Polytechnique de Paris

Encadrement

Département Aérodynamique, aéroélasticité, acoustique (DAAA), ONERA Châtillon

Direction de thèse : Sébastien Deck, ONERA/DAAA

Autres : Alain Dugeai, Nicolas Renard, ONERA/DAAA

Jury

Jean-Camille Chassaing, Institut Jean le Rond d'Alembert

Stéphane Aubert, Centrale Lyon

Isabelle Vallet, Institut Jean le Rond d'Alembert

Nicolas Gourdain, ISAE-Supaero

Tony Spriet, Safran Aircraft Engines

Financement CIFRE Safran Aircraft Engines

Contact alain.dugeai@onera.fr@onera.fr

Résumé Lors de la phase de décollage d'un aéronef par vent de travers, l'écoulement ingéré par le moteur peut interagir avec le sol et la nacelle, entraînant la formation d'un vortex de sol devant l'entrée d'air. Ce phénomène est particulièrement rencontré par les nouvelles architectures de turbomachines à haut taux de dilution et entrée courte. Le vortex de sol est ingéré par le moteur et interagit avec le fan en rotation, entraînant le hachage du tourbillon. Cet écoulement extrêmement complexe et instationnaire est transporté par convection jusqu'à la roue redresseuse de sortie du flux secondaire (OGV) et est vu comme une source d'excitation aérodynamique par les aubages. Cela conduit dans certaines conditions observées en essai à de forts niveaux de réponse forcée affectant la structure de l'OGV. Ces vibrations peuvent entraîner des phénomènes de fatigue ou la rupture de l'aube. L'objectif de la thèse est de caractériser la source d'excitation aérodynamique des OGV générée par l'interaction entre le fan et le vortex de sol à l'aide de modèles numériques de turbulence de différents niveaux de fidélité (URANS, ZDES), dans une approche progressive incluant la mise en œuvre d'un cas-test académique représentatif. Le calcul haute-fidélité ZDES permet l'établissement d'une base de données de référence de l'interaction entre des aubes fan et un vortex incident. Dans un second temps, par exploitation des acquis de la première phase, une stratégie numérique est développée afin de prévoir l'amplitude de vibration des OGV soumis au vortex transformé dans le cas d'une configuration industrielle par un calcul aéroélastique découplé, tout en analysant la source d'excitation aérodynamique et les phénomènes aéroélastiques mis en jeu.

Mots-clés Aéroélasticité, vortex, réponse forcée, ZDES, turbomachine

*OGV : *Outer Guide Vane* (aubes directrices de sortie)

*UHBR : *Ultra High Bypass Ratio* (à très haut taux de dilution)

Matthias Plath

Thèse soutenue le 06 décembre 2024 à Meudon

ED 579 (SMEMaG) - Sciences Mécaniques et Énergétiques, Matériaux et Géosciences
- Paris-Saclay

Encadrement

Département Aérodynamique, aéroélasticité, acoustique (DAAA), ONERA Meudon

Direction de thèse : Christian Tenaud, CNRS, CentraleSupélec

Autres : Florent Renac, Olivier Marquet, ONERA/DAAA

Jury

Neil Sandham, Université de Southampton

Eusebio Valero, Université de Politechnique de Madrid

Jean-Christophe Robinet, Arts et Métiers ParisTech

Isabelle Vallet, Institut Jean le Rond d'Alembert

Sebastian Timme, Université de Liverpool, Royaume-Uni

Financement ITN

Contact florent.renac@onera.fr

Résumé Ce travail de thèse concerne le développement et l'application d'outils d'analyses linéaires et non linéaires d'écoulements aérodynamiques et aéroélastiques autour de profils d'aile laminaires en régime transsonique. La complexité des comportements instationnaires de l'écoulement dans ce régime, même en l'absence de mouvement structurel, rend difficile la prévision numérique précise de ces phénomènes. Par conséquent, la plupart des modèles numériques actuels fonctionnent sur l'hypothèse d'écoulement "pleinement turbulent", en négligeant l'effet de la transition de la couche limite. Ce travail vise à combler cette lacune en étendant les approches numériques à une formulation modélisant la transition en régime transsonique. La première étape consiste à développer un modèle de transition à une équation, basé sur la corrélation, couplé au modèle de turbulence de Spalart-Allmaras et discrétisé à l'aide d'une méthode de Galerkin discontinue (DG). Les concepts de stabilité globale linéaire sont ensuite introduits, ce qui conduit à la mise en œuvre de ces méthodes dans un module de stabilité unifié, basé sur le modèle de transition linéarisé. Les outils numériques développés sont validés au moyen de cas tests bien référencés, puis appliqués au profil laminaire OALT25, analysant divers phénomènes à basse, moyenne et haute fréquences se produisant au voisinage du phénomène de tremblement (buffet) et comparant les résultats modélisés aux études précédentes. La deuxième partie de la thèse étend les outils numériques au cadre aéroélastique en référentiel mobile non inertiel. Cette formulation, combinée à un modèle de structure à deux degrés de liberté, conduit à un solveur d'interaction fluide-structure (FSI) non linéaire basé sur la discrétisation DG.

Une analyse de stabilité linéaire globale est appliquée au modèle couplé, le système discret étant linéarisé analytiquement et l'approche FSI linéaire résultante implémentée dans le module de stabilité globale. La dernière partie de la thèse présente une analyse détaillée de la dynamique aéroélastique autour du profil OALT25 au voisinage du buffet transsonique, au moyen de calculs linéaires et non linéaires pour identifier les régions où le comportement aéroélastique diffère du cas aérodynamique. L'analyse révèle des similitudes avec des études antérieures d'écoulements pleinement turbulents, tout en soulignant les différences entre les modèles à un seul degré de liberté et les modèles entièrement couplés. L'étude identifie notamment un nouveau comportement aéroélastique, où la stabilisation complète du système est obtenue grâce à une forte déviation des modes.

Mots-clés Transition, Galerkin discontinu, stabilité de l'écoulement, interaction fluide-structure

Télécharger la thèse : <https://theses.fr/s297945>

Ines Hamadouche

Thèse soutenue le 26 mars 2024 à Châtillon

ED 579 (SMéMaG) - Sciences Mécaniques et Énergétiques, Matériaux et Géosciences
- Paris-Saclay

Encadrement

Département Matériaux et structures (DMAS), ONERA Châtillon

Direction de thèse : François Hild, Université Paris Saclay

Autres : Thibaut Archer, Pierre Beauchêne, ONERA/DMAS

Jury

Jérôme Favergeon, Université de Technologie de Compiègne

Jonathan Cormier, Institut P³

Emmanuel Baranger, Université Paris Saclay

Pierre Vacher, Savoie Mont-Blanc

Thomas Vandellos, Safran Ceramics

Financement Safran Ceramics, ONERA

Contact Thibaut.Archer@onera.frtrrott

Mécanismes d'endommagement d'un composite à matrice céramique revêtu d'une barrière environnementale sous sollicitations multiphysiques

Résumé Cette étude s'inscrit dans le développement de la prochaine génération de moteurs d'avion. Les composites à matrice céramique (CMC) en SiC/SiC sont aujourd'hui des matériaux prometteurs pour être introduits dans les zones chaudes des turboréacteurs. Néanmoins, l'environnement extrême du moteur implique de protéger le CMC par un revêtement jouant le rôle de barrière environnementale (EBC) contre les espèces oxydantes. Dans ce contexte, cette étude a consisté à caractériser, modéliser et comprendre les mécanismes d'endommagement du système CMC/EBC sous des sollicitations multiphysiques couplées : thermique/mécanique et thermique/oxydation, représentatives de l'environnement du moteur. Pour répondre à cette problématique, plusieurs configurations d'essais à haute température (> 1200°C) sous gradients thermiques (chauffage laser) couplés à un chargement mécanique (flexion 4points) ou un environnement oxydant (vapeur d'eau) ont été mises en place. L'analyse de l'instrumentation utilisée (détection de l'endommagement par émission acoustique, mesure de champs thermiques et cinématiques) complétée par des analyses post-mortem au MEB et des simulations éléments finis ont permis d'étudier l'impact des chargements et des états de contraintes sur la fissuration du revêtement. Le couplage entre la fissuration du revêtement et l'oxydation du système a également été investigué.

Mots-clés Barrière environnementale, essais à haute température, comportement thermomécanique, fissuration, oxydation

Xavier Majnoni d'Intignano

Thèse soutenue le 15 mai 2024 à Talence

ED 432 (SMI) - Sciences des Métiers de l'Ingénieur - Mines/ENSAM ParisTech

Encadrement

Département Matériaux et structures (DMAS), ONERA Châtillon

Direction de thèse : Nicolas Saintier, ENSAM Bordeaux, I2M

Olivier Devos, Université de Bordeaux, I2M

Autres : Mohamed El May, ENSAM Bordeaux, I2M ; Charles Bianchetti, Sébastien Mercier, ONERA/DMAS

Jury

Marie-Georges Olivier, Université de Mons, Belgique

Cécilie Duhamel, Mines Paris, Centre des Matériaux

Bernard Normand, INSA Lyon, MATEIS

Jean Kittel, IFP Énergies Nouvelles

Financement Région Aquitaine, ONERA

Contact sebastien.mercier@onera.fr

Résumé L'acier inoxydable 316L produit par fusion laser sur lit de poudre (LPBF) présente une excellente résistance face à la corrosion par piqûres par rapport à un acier inoxydable 316L conventionnel et une tenue en fatigue qui est comparable à ce dernier, mais qui reste très dépendante des paramètres de fabrication. Cependant, peu d'études s'intéressent au couplage des deux phénomènes comme c'est le cas lors d'essais de fatigue-corrosion. L'objectif principal de ce travail est d'étudier les interactions qui se produisent entre le chargement cyclique appliqué, la microstructure du matériau et les mécanismes de corrosion mis en jeu lors de ces essais.

Dans un premier temps, des traitements thermiques ont été appliqués dans le but de modifier la microstructure du 316L LPBF à plusieurs échelles. Une caractérisation de chaque microstructure obtenue a ensuite été réalisée. Les essais de corrosion menés dans une solution contenant 0,6 M NaCl ont permis d'étudier les différentes interactions électrochimiques de chaque état métallurgique avec l'environnement. Enfin, des mesures par spectroscopie d'impédance électrochimique (SIE) à potentiel imposé ont été réalisées autour du pic d'activation dans une solution contenant 0,5 M NaCl + 2 M H₂SO₄ pour comparer les cinétiques de formation des films passifs des aciers 316L conventionnel et 316L PBF.

Dans un second temps, des essais de fatigue uniaxiale à grand nombre de cycles (106 cycles) ont été menés dans l'air et dans une solution contenant 0,6 M NaCl avec un rapport de charge R = 0,1. Le comportement électrochimique du film passif a été étudié pendant les essais de fatigue-corrosion ensuivant le potentiel libre et en effectuant des mesures par SIE. Ce suivi électrochimique a permis d'identifier les phases d'amorçage et de propagation des fissures de fatigue.

Mots-clés Fabrication additive, fatigue-corrosion, acier inoxydable 316L, spectroscopie d'impédance électrochimique

Charlotte Vernozy

Thèse soutenue le 12 décembre 2024 à Palaiseau

ED 626 (IPP) - Institut Polytechnique de Paris

Encadrement

Département Matériaux et structures (DMAS), ONERA Palaiseau

Direction de thèse : Valérie Vénard, CNRS

Autres : Johan Petit, ONERA/DMAS

Jury

Pascal Loiseau, Institut de Recherche de Chimie Paris, CNRS

Ian Vickridge, CNRS

Patricia Segonds, Institut Néel, CNRS

Antonino Alessi, CEA

Financement ONERA

Contact johan.petit@onera.fr

Best Presentation Award à la conférence EMIRUM 2023, Caen

Résumé L'importance des sources laser dans le Moyen InfraRouge (MIR), notamment pour la détection de gaz à distance, a conduit au développement de cristaux aux propriétés optiques non linéaires. Parmi eux, le ZnGeP_2 (ZGP) s'est imposé comme un matériau de référence pour les Oscillateurs Paramétriques Optiques (OPO), grâce à ses excellentes propriétés optiques et thermiques. Toutefois, une absorption optique résiduelle demeure autour de 2 μm , longueur d'onde clé pour le pompage des OPO. Des défauts ponctuels formés lors de l'élaboration des cristaux, notamment les lacunes de zinc (V-Zn), en sont responsables. Plusieurs traitements comme le recuit, l'irradiation électronique et le dopage à l'étain sont explorés pour la réduire. Dans ce travail, ces approches sont étudiées pour améliorer la qualité optique du ZGP. L'élaboration des cristaux est d'abord mise en œuvre par la méthode Bridgman. Puis, en fonction des conditions de traitements des cristaux, des caractérisations des quantités en V-Zn sont réalisées par Résonance Paramagnétique Électronique (RPE) et des mesures d'absorption optique sont effectuées. Une diminution de la quantité en V-Zn d'un facteur 4 et une absorption optique de $\sim 0,01 \text{ cm}^{-1}$ sont observées dans ce travail. Grâce à l'efficacité du dopage à l'étain combiné au recuit et à une dose d'irradiation, ces travaux montrent l'obtention de cristaux de ZGP de meilleure qualité optique, ouvrant la voie à des applications laser plus performantes.

Mots-clés Croissance cristalline, cristaux-défauts, faisceaux électroniques, résonance paramagnétique électronique, optique cristalline

Télécharger la thèse : <https://theses.fr/s297413>

Zoé Borius

Thèse soutenue le 18 décembre 2024 à Châtillon

ED 468 (MEGEP) - Mécanique, Énergétique, Génie civil, Procédés - Toulouse

Encadrement

Département Matériaux et structures (DMAS), ONERA Châtillon

Direction de thèse : Thierry Cutard, IMT Mines

Autres : Aurélie Julian-Jankowiak, ONERA/DMAS

Jury

Yann Le Petitcorps, Université de Bordeaux

Fabrice Rossignol, CNRS/IRCER

Florence Ansart, Université Toulouse III

Pascal Reynaud, CNRS/MATEIS

Antoine Débarre, ONERA/DMAS

Marc Singlard, IRT Saint Exupéry

Éric Bouillon, SAFRAN Ceramics

Financement IRT Saint-Exupéry, ONERA

Contact aurelie.jankowiak@onera.fr

Résumé L'introduction de composites à matrice céramique (CMC) oxyde/oxyde est envisagée dans les turbomachines de nouvelle génération. Les principaux freins à l'industrialisation de ces matériaux sont la diversité des procédés d'élaboration, leurs coûts, ainsi que l'hétérogénéité des microstructures et des propriétés mécaniques.

Ces travaux de thèse en collaboration entre l'ONERA, l'IRT Saint-Exupéry et l'ICA étudient une nouvelle voie d'élaboration de CMC alumine/alumine, par une étape d'imprégnation de mèche en continu. Pour commencer, une étude de formulation de suspensions aqueuses d'alumine compatibles avec l'élaboration de composites par le procédé d'imprégnation en ligne suivi d'une mise en forme en autoclave et d'un frittage a été menée. Deux plastifiants organiques hygroscopiques, le sorbitol et le glycérol, ainsi qu'un gélifiant, la boehmite, ont été évalués. Les cycles thermiques en autoclave ont été adaptés à la composition des suspensions et en particulier aux additifs organiques.

Plusieurs compositions de suspensions ont été retenues et les microstructures des CMC résultants ont été caractérisées. Les relations entre la composition de la suspension, son adaptabilité au procédé et la microstructure du composite ont été investiguées. Enfin, les comportements mécaniques à température ambiante des différentes nuances de CMC ont été examinés en lien avec leurs microstructures, et des scénarios d'endommagement en traction ont été proposés.

Mots-clés Composite à matrice céramique (CMC), procédé, imprégnation, oxyde, microstructure, caractérisation mécanique

Nina Kergosien

Thèse soutenue le 26 février 2024 à Châtillon

ED 162 (MEGA) - Mécanique, Énergétique, Génie civil, Acoustique - Lyon

Encadrement

Département Matériaux et structures (DMAS), ONERA Châtillon

Direction de thèse : Olivier Bareille, École centrale Lyon (LTDS)

Autres : Ludovic Gaverina, Florence Saffar, ONERA/DMAS ;

Guillemette Ribay, CEA

Jury

Emmanuel Moulin, IEMN, Université Polytechnique des Hauts-de-France

Adrien Pelat, LAUM, Université du Mans

Mourad Bentahar, LAUM, Université du Mans

Financement CEA, ONERA

Contact ludovic.gaverina@onera.fr

Étude de l'intégration de transducteurs piézoélectriques à cœur de matériau composite de type aéronautique pour le contrôle santé intégré par ondes de Lamb)

Résumé Des systèmes CSI sont actuellement à l'étude pour vérifier l'intégrité des matériaux composites des avions. Ils permettent d'optimiser la maintenance, en donnant la possibilité de suivre l'état des structures en temps réel ou de contrôler ponctuellement des pièces difficiles d'accès par les méthodes de CND courantes. Les matériaux composites offrent la possibilité d'intégrer un système CSI directement à cœur du matériau. De cette façon, l'instrumentation est protégée de l'environnement et les problématiques de collage en surface sont résolues. L'objectif de cette thèse est de déterminer les effets de l'intégration de transducteurs ultrasonores piézoélectriques à cœur d'un composite PRFC stratifié de type aéronautique sur leur comportement en émission et en réception afin de montrer les avantages et inconvénients d'une telle intégration à cœur pour le monitoring de ces structures par ondes de Lamb. Les transducteurs PZT minces se sont révélés être les transducteurs les plus adaptés à l'intégration, car ils supportent les conditions d'élaboration d'un composite de structures aéronautiques élaboré en autoclave (7 bar et 180 °C) et sont capables d'émettre et de recevoir des ondes guidées se propageant dans les plaques. La méthode d'intégration a été adaptée pour préserver l'intégrité des PZT et optimiser leur capacité d'émission d'ondes dans un composite. A cette occasion, la capacité des mesures d'impédance électromécanique à vérifier rapidement l'efficacité de la mise en œuvre de l'intégration a été validée. La caractérisation du champ d'onde qA0 a été réalisée expérimentalement, grâce aux déplacements hors plan mesurés avec un vibromètre laser suite à l'excitation de disques PZT intégrés à des fréquences comprises entre 30 et 200 kHz. La capacité du PZT intégré à détecter un défaut simulé de type aimant a aussi été étudiée en essai d'émission-réception et a été comparée avec le comportement de PZT couplés en surface de composite. Une étude par modélisation fréquentielle multiphysique a ensuite été réalisée afin de mettre en évidence les phénomènes physiques mis en jeu par l'intégration d'un PZT à cœur de composite. Ainsi, la direction des plis en contact du PZT intégré, la profondeur d'intégration et le couplage du PZT au composite influent sur le mécanisme de transduction ultrasonore. De plus, les contraintes induites par l'actionneur PZT ne permettent pas d'être simplifiées sous forme d'un modèle de type pin-force habituellement utilisé comme chargement d'un PZT en surface de matériau isotrope. En effet, les contraintes induites localement par l'excitation du PZT intégré ne sont pas radiales et dépendent de l'électrode du PZT considérée ainsi que des fréquences de génération d'ondes.

Mots-clés contrôle non-destructif (CND), contrôle santé intégré (CSI), composite en polymère renforcé de fibres de carbone (PRFC) stratifié, disques minces intégrés en titano-zirconate de plomb (PZT), ondes de Lamb, mode quasi-antisymétrique d'ordre 0(qA0), impédance électromécanique

Télécharger la thèse : <https://theses.fr/2024ECDL0008>

Mathieu Goron

Thèse soutenue le 9 février 2024 à Lille

ED 602 (SPI) - Sciences pour l'Ingénieur - Centrale Nantes

Encadrement

Département Matériaux et structures (DMAS), ONERA Lille

Direction de thèse : Nicolas Jacques, ENSTA-Bretagne ;
Bertrand Langrand, ONERA/DMAS

Autres : Alan Tassin, IFREMER ; Thomas Fourest, ONERA/DMAS

Jury

Grégory Pinon, Université Le Havre Normandie

Guillaume Oger, École centrale de Nantes

Elisabeth Longatte Lacazedieu, Université polytechnique Hauts-de-France

M'Hamed Souli, Université de Lille

Financement Ifremer, ONERA

Contact bertrand.langrand@onera.fr

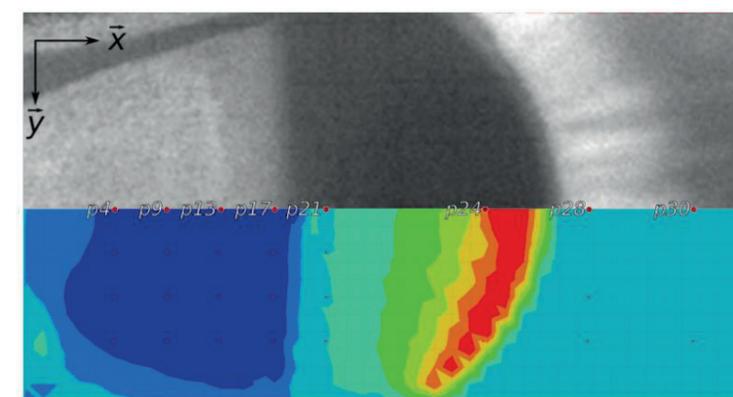
Résumé La certification à l'amerrissage des avions repose majoritairement sur d'importantes campagnes expérimentales menées au cours de la seconde moitié du XX^e siècle et sur la comparaison avec des avions existants. Au vu des récents progrès des méthodes numériques, dans l'objectif d'analyser plus finement les phénomènes physiques en jeu et d'adapter la certification, notamment à des nouvelles conceptions et formes avions, il existe une forte volonté d'augmenter la part de l'analyse numérique dans ce processus.

C'est dans ce contexte que s'inscrivent ces travaux de thèse. Si l'influence de phénomènes hydrodynamiques complexes, tels que la succion et la cavitation, sur

l'évolution du chargement subi par l'avion au cours d'un amerrissage est avérée, leur prise en compte dans les simulations d'impacts hydrodynamiques reste encore aujourd'hui une question ouverte. Les objectifs de ces travaux sont de mettre en place une méthode numérique adaptée à l'étude d'impacts hydrodynamiques et d'évaluer sa capacité à modéliser des phénomènes de succion, voire de cavitation, dans des conditions d'impact représentatives de l'amerrissage d'un avion.

La méthode numérique déployée dans cette thèse repose sur l'utilisation du solveur éléments finis explicite Radioss, développé par la société Altair, d'une approche couplée Euler-Lagrange (CEL) et d'une gestion de l'interaction fluide-structure par pénalisation. Cette méthode numérique a été appliquée à l'étude d'impacts hydrodynamiques variés, en augmentant progressivement la complexité des phénomènes physiques pris en compte : de l'impact vertical d'un dièdre à vitesse constante, à l'impact oblique d'une section de fuselage d'un avion générique impliquant des phénomènes de succion et de cavitation.

Par comparaison avec des résultats expérimentaux, il a été possible d'acquérir une bonne confiance quant aux capacités prédictives de la méthode numérique pour les différents cas étudiés. La méthode numérique s'est révélée adaptée à la modélisation de phénomènes de succion. Elle a également permis de prédire de façon satisfaisante le chargement hydrodynamique subi par la structure en présence de phénomènes de cavitation.



Impact oblique du modèle SP3 pour $U = 45.2$ m/s : distribution de pression de contact

Mots-clés Impact hydrodynamique, amerrissage, simulation numérique, interaction fluide-structure

Télécharger la thèse : <https://theses.fr/2024ENTA0011>

Loïc Mastromatteo

Thèse soutenue le 12 décembre 2024 à Châtillon

ED 579 (SMéMaG) - Sciences Mécaniques et Énergétiques, Matériaux et Géosciences
- Paris-Saclay

Encadrement

Département Matériaux et structures (DMAS), ONERA Châtillon

Direction de thèse : François-Xavier Irisarri, ONERA/DMAS

Autres : Ludovic Gaverina, Jean-Michel Roche, ONERA/DMAS

Jury

Odile Abraham, Université Gustave Eiffel

Emmanuel Moulin, Université Polytechnique

Guillaume Laffont, CEA LIST

Nazih Mechbal, École Nationale des Arts et Métiers

Marie Jacquesson, Cnes

David Barnoncel, ArianeGroup

Financement Cnes, ONERA

Contact Ludovic.Gaverina@onera.fr

Prix des doctorants ONERA Matériaux et structures 2024

Résumé Les systèmes SHM par ondes guidées sont une potentielle solution pour l'inspection des structures de lanceurs réutilisables avant leur retour en vol. Ces systèmes, composés de réseaux de capteurs intégrés aux structures, sont soumis à des sollicitations thermomécaniques sévères qui peuvent altérer leur fonctionnement. Ainsi, ces travaux visent à identifier et à diagnostiquer les phénomènes affectant les capteurs sous des conditions de vieillissement thermique représentatives de l'environnement du lanceur pour en évaluer l'influence sur la capacité du système à détecter un dommage dans la structure. Différents systèmes SHM combinant des capteurs PZT et FBG ont été collés ou cocuits sur des plaques composites stratifiées. Ces systèmes ont été sollicités thermiquement sur un banc laser ou dans une enceinte climatique et des impacts incrémentaux ont été réalisés sur une tour de chute pour évaluer la capacité de détection d'endommagement. Le diagnostic des capteurs est réalisé par suivi des spectres d'admittance et vibrométrie laser pour les PZT et par suivi des spectres en réflexion pour les FBG. L'analyse de ces mesures permet d'identifier la présence de décollements des capteurs et l'évolution des propriétés de l'adhésif, ainsi que celle des PZT, en particulier la permittivité. L'influence de ces phénomènes sur la transduction d'ondes guidées est caractérisée pour les modes de Lamb A0 et S0. On montre que les évolutions de propriétés des PZT ou de la colle affectent principalement l'amplitude des signaux, ce qui ne dégrade pas la détection dans la configuration étudiée. A contrario, les décollements distordent significativement les signaux d'ondes guidées et dégradent fortement la capacité de détection du système, la signature d'un décollement pouvant masquer celle d'un dommage sur la structure ou être confondue avec celle-ci.

Mots-clés Contrôle santé intégré (SHM), ondes guidées, lanceurs réutilisables, durabilité, transducteurs piézoélectriques (PZT), capteurs fibres optiques à réseau de Bragg (FBG), composite (CFRP)

Télécharger la thèse : <https://theses.fr/s354055>

Enrico Stragiotti

Thèse soutenue le 27 mars 2024 à Châtillon

ED 467 (AA) - Aéronautique Astronautique - Toulouse

Encadrement

Département Matériaux et structures (DMAS), ONERA Châtillon

Direction de thèse : Joseph Morlier, ICA/ISAE Supaero ; François-Xavier Irisarri, ONERA/DMAS

Autres : Cédric Julien, ONERA/DMAS

Jury

Pierre Duysinx, Université de Liège

Jun Wu, TU Delft

Anita Catapano, Bordeaux INP

Financement ONERA

Contact francois-xavier.irisarri@onera.fr

Résumé Dans l'industrie aérospatiale, il existe une demande constante pour des aérostructures plus légères, motivée par la nécessité d'améliorer l'efficacité énergétique et les performances globales de l'avion. Ces évolutions offrent des opportunités pour explorer des concepts innovants tels que l'aile volante ou les ailes haubanées transsoniques, s'éloignant de la configuration traditionnelle des avions *Tube And Wing (TAW)*. Une approche prometteuse pour répondre à ces demandes est l'utilisation de structures modulaires en treillis, reconnues pour leur extrême légèreté et leur modularité. La conception modulaire offre divers avantages, notamment l'assemblage de grandes structures à partir de modules répétitifs plus petits, faciles à fabriquer, la réparabilité sur le terrain et l'assemblage rapide pour des structures temporaires.

Dans cette thèse, une méthodologie de conception et d'optimisation pour des aérostructures ultralégères et modulaires est développée. L'optimisation est conduite avec l'approche nommée *Truss Topology Optimization (TTO)*, qui utilise des barres comme éléments de discrétisation de la structure. Cependant, la formulation classique du TTO présente des limitations dans la formulation mécanique, telles que l'incapacité à traiter les contraintes de flambage locale, à prendre en compte plusieurs cas de charge, à limiter l'élanement minimum des barres et à assurer la compatibilité mécanique de la structure. Pour surmonter ces défis, nous avons formulé une approche globale et développé un algorithme innovant d'optimisation en deux étapes. Cela implique d'utiliser un problème simplifié pour générer une solution initiale, qui sert de point de départ pour l'optimisation d'une formulation complète.

La deuxième partie de la thèse se concentre sur l'adaptation de la formulation monolithique proposée pour modéliser des structures modulaires. Initialement, nous nous concentrons sur l'optimisation de la topologie d'une structure entièrement modulaire, où un seul module est répété tout au long du design. Nous examinons comment les hyperparamètres, tels que le nombre de sous-domaines et la complexité des modules, affectent les performances mécaniques de la structure. Ensuite, nous explorons un scénario plus complexe en optimisant plusieurs topologies de modules et leur disposition dans la structure. Cela est réalisé grâce à une nouvelle stratégie de résolution basée sur une approche *Discrete Material Optimization (DMO)*, utilisant un optimiseur à descente de gradient. En abordant les défis de la conception légère et de la modularité dans les aérostructures, cette recherche vise à contribuer à l'évolution continue des technologies aérospatiales et à améliorer l'efficacité et les performances des futurs avions.

Mots-clés Structures architecturées, optimisation des structures, optimisation topologique, structures modulaires.

Télécharger la thèse : <https://theses.fr/2024ESAE0017>

Pierre Bertrand

Thèse soutenue le 5 décembre 2024 à Châtillon

ED 579 (SMéMaG) - Sciences Mécaniques et Energétiques, Matériaux et Géosciences
- Paris-Saclay

Encadrement

Département Matériaux et structures (DMAS), ONERA Châtillon

Direction de thèse : Francois Hild, CNRS

Autres : Thibaut Archer, Cédric Huchette, ONERA/DMAS
Thomas Vandellos, Safran Composites

Jury

Zoheir Aboura, Université de Technologie de Compiègne

Éric Martin, ENSEIRB-MATMECA

Jean-Noël Périé, Institut Clément Ader

Vincent Maurel, Centre des Matériaux, Mines PSL

Financement CIFRE Safran

Contact cedric.huchette@onera.fr

Étude du comportement d'interface d'une barrière environnementale sur composite à matrice céramique

Résumé Un des enjeux de l'aéronautique est de réduire l'impact environnemental des avions. Cet objectif se traduit par le développement de solutions alternatives aux matériaux métalliques comme les composites à matrice céramique. Pour les applications visées, les pièces sont soumises à des environnements thermomécaniques et physico-chimiques (oxydation/corrosion) très sévères pouvant mener à la dégradation du matériau et à une limitation de sa durée de vie. Pour protéger le composite à matrice céramique (CMC), les pièces sont revêtues de barrières environnementales (EBC) qui limitent la corrosion du CMC. La compréhension des mécanismes d'endommagement des EBC sur CMC est donc cruciale pour le développement des pièces en CMC à base carbure. Dans ce contexte, cette thèse s'est focalisée sur le comportement aux interfaces des différents constituants du système pour analyser la tenue du revêtement sur CMC. Il s'agit ainsi, d'une part, de proposer et de mettre en place des essais à l'ambiante et à haute température pour quantifier l'amorçage et la propagation de décohésions aux interfaces et de caractériser les propriétés associées, telles que l'énergie d'adhérence du revêtement sur le CMC, en utilisant différentes méthodes expérimentales de suivi de fissuration par méthodes optiques. D'autre part, le but est de proposer un dialogue étroit entre les essais et les modélisations associées. Pour cela des essais de flexion 4 points ont été menés à température ambiante et à 1000 °C afin de faire propager des fissures stables à l'interface du système. Des mesures de champs cinématiques par corrélation d'images ont permis d'alimenter des simulations éléments finis afin de suivre la propagation des fissures et d'extraire une énergie d'adhérence interfaciale à l'échelle macroscopique. Ces essais et leur exploitation ont servi à caractériser la phase de propagation pour les deux températures et de comparer l'adhérence de systèmes sains et de systèmes préalablement vieillies sous environnement oxydant. Dans un deuxième temps, des essais au banc laser avec la présence de gradients thermiques au sein du système ont permis de caractériser la phase d'amorçage. Des observations au microscope électronique à balayage, l'utilisation de caméras thermiques et de capteurs d'émission acoustique sont venus compléter la base de données expérimentales.

Mots-clés Interface, écaillage, énergie d'adhérence, haute température, corrélation d'images numériques

Télécharger la thèse : <https://theses.hal.science/tel-04880443>

Bastien Lammens

Thèse soutenue le 13 mars 2024 à Lille

ED 602 (SPI) - Sciences pour l'Ingénieur - Centrale Nantes

Encadrement

Département Matériaux et structures (DMAS), ONERA Lille

Direction de thèse : Julien Réthoré, Centrale Nantes

Autres : Gérald Portemont, Julien Berthe, ONERA/DMAS ;
Rian Seghir, Centrale Nantes

Jury

Jean-Benoît Kopp, Arts et Métiers, Bordeaux

Jean-Charles Passieux, INSA ,Toulouse

Frédéric Daghia, ENS Paris-Saclay

Franck Lauro, Université polytechnique Hauts-de-France

Patrick Rozycki, Centrale Nantes

Financement Région Pays de la Loire, ONERA

Contact gerald.portemont@onera.fr

Résumé Les matériaux composites stratifiés à matrice organique sont utilisés dans le domaine de l'aéronautique pour alléger la masse des structures. Cependant, lors d'un impact sur ce type de matériaux, différents mécanismes d'endommagements peuvent apparaître comme le délaminage. C'est un processus de décohésion macroscopique du milieu inter-laminaire qui peut être caractérisé par GIC (ou KIC).

La littérature montre une grande disparité dans les mesures du fait d'un découplage incomplet des effets du confinement de la résine par les fibres, des non linéarités de comportement et/ou des effets de vitesse.

Ce travail propose d'élaborer un protocole expérimental de caractérisation de résine pure via mesures de champs pour étudier méthodiquement ces couplages. L'objectif est d'élucider l'impact de la vitesse de propagation de fissure et des effets de structure sur le comportement en fissuration et ainsi étendre l'approche de Griffith aux stratifiés.

Différentes géométries d'éprouvette sont utilisées pour reproduire certains effets de structure. Des vitesses de fissuration allant du quasi-statique à la dynamique sont étudiées et l'ensemble des essais sont interprétés au travers de la mécanique élastique linéaire de la rupture et de l'étude des facies. Ce travail propose finalement une modélisation décrivant l'évolution de KIC, pour la résine Hexply®M21 utilisée dans l'aéronautique, à partir des termes non-singuliers du champ des contraintes, le T-stress, B-stress et aussi de la vitesse de propagation de fissure \dot{a} dans les gammes [0–15] MPa, [-200–10] MPa.m^{-0.5} et [10⁻⁶, 600] m.s⁻¹ respectivement.

Mots-clés Fissuration dynamique, facteur d'intensité des contraintes critiques, séries de Williams, Termes non-singuliers, corrélation d'images numériques, résine époxy

Télécharger la thèse : <https://theses.fr/2024ECDN0007>

Manon Lenglet

Thèse soutenue le 10 avril 2024 à Châtillon

ED 621 (ISMME) - Ingénierie des Systèmes, Matériaux, Mécanique, Énergétique - PSL Mines ParisTech

Encadrement

Département Matériaux et structures (DMAS), ONERA Châtillon

Direction de thèse : Samuel Forest, CNRS, Mines Paris

Autres : Anna Ask, Pascale Kanouté, Serge Kruch ONERA/DMAS

Jury

Jean-Yves Buffière, INSA Lyon

Arjen Roos, Safran Tech

Véronique Aubin, Centrale Supélec

Yoann Guilhem, ENS Paris Saclay

Myriam Kaminski, ONERA/DMAS

Financement Clean Sky 2, ONERA

Contact anna.ask@onera.fr

Résumé Dans le domaine aéronautique, un défi majeur réside dans l'optimisation du dimensionnement des pièces en tenant compte de leur durée de vie en fatigue. Les phénomènes de fatigue dans les structures métalliques, comme celles du fuselage en aluminium 2139, dépendent de la microstructure. Cependant, comprendre et modéliser ces phénomènes à une échelle aussi fine est coûteux. Jusqu'à présent, l'endommagement des pièces, défini par l'amorçage et la propagation de fissures de fatigue, est pris en compte seulement à l'échelle macroscopique : cela sous-estime la durée de vie des pièces, entraînant un surdimensionnement et des essais coûteux. D'une part, sur le plan expérimental, le comportement mécanique du 2139 sous chargement monotone à l'échelle microscopique et sous chargement cyclique à l'échelle macroscopique est bien compris. Cependant, le comportement de cet alliage sous chargement cyclique et à l'échelle microscopique n'est pas documenté. D'autre part, de nombreuses méthodes numériques ont été développées pour prédire l'amorçage de fissures de fatigue. Les Fatigue Indicator Parameters (FIPs) offrent une approche économique et facile à implémenter, mais il n'y a pas de consensus sur le FIP le plus pertinent. De plus, bien que des méthodes existent pour modéliser la propagation de fissures dans les polycristaux, il n'y a pas de méthode unique utilisant les FIPs pour modéliser à la fois l'amorçage et la propagation de fissures. Ainsi, cette thèse vise à développer une méthode pour modéliser l'amorçage et la propagation de fissures de fatigue à l'échelle de la microstructure. Pour appliquer cette méthode au cas du 2139, divers outils ont été utilisés, notamment des simulations par éléments finis avec Z-set. Le zoom structural a permis de modéliser les phases intermétalliques, sites d'amorçage des fissures de fatigue, et le module de remaillage adaptatif Z-cracks a été employé pour modéliser l'amorçage et la propagation de fissures dans l'alliage. Une campagne expérimentale a également permis de caractériser le comportement cyclique de l'alliage pour les simulations, et grâce à la microscopie optique et électronique il a été possible de suivre l'amorçage et la propagation de fissures en surface à l'échelle de quelques microns. Certaines des fissures observées ont été sélectionnées et reproduites numériquement avec une bonne fiabilité, apportant des perspectives prometteuses pour la simulation des fissures courtes dans les alliages métalliques.

Mots-clés Microstructure, phases intermétalliques, fatigue, plasticité cristalline, alliage d'aluminium, fissure courte

Télécharger la thèse : <https://theses.fr/2024UPSLM007>

Abdelhalim Chirouf

Thèse soutenue le 1er juillet 2024 à Nancy

ED 606 (C2MP) - Chimie Mécanique Matériaux Physique - Université de Lorraine

Encadrement

Département Matériaux et structures (DMAS), ONERA Châtillon

Direction de thèse : Miha Založnik, Université de Lorraine ;
Alphonse Finel, ONERA/DMAS

Jury

Jean-Yves Buffière, INSA Lyon

Arjen Roos, Safran Tech

Véronique Aubin, Centrale Supélec

Yoann Guilhem, ENS Paris Saclay

Myriam Kaminski, ONERA/DMAS

Financement ONERA

Contact alphonse.finel@onera.fr

Résumé

Les transformations de phase dans les alliages métalliques constituent un problème complexe multi-échelles et multiphysique : elles sont en effet contrôlées par différents phénomènes (transfert de chaleur, diffusion, mécanique ...) se produisant à des échelles de longueur qui s'étendent sur environ cinq ordres de grandeur. À l'échelle macroscopique (généralement l'échelle du processus de production, c'est-à-dire 1 m), un transfert de chaleur et des phénomènes multiphasiques ont lieu. À l'échelle mésoscopique (1 μm à 1 mm), les grains ou précipités germent et croissent, contrôlés par le soluté et le transport de chaleur impliquant des interactions collectives. À l'échelle microscopique (inférieure à 1 μm), la diffusion du soluté et la tension superficielle déterminent la morphologie des précipités et des grains. En raison du fort couplage entre les phénomènes se produisant aux différentes échelles de longueur, un modèle qui simule le comportement à l'échelle macroscopique doit intégrer les phénomènes aux échelles microscopique et mésoscopique. Inclure ces phénomènes en les simulant directement nécessiterait une puissance de calcul au-delà des capacités actuelles. Dans le présent travail, nous visons à développer un nouveau cadre pour enrichir les modèles à l'échelle macroscopique en utilisant des calculs extensifs à l'échelle mésoscopique. Ce cadre se veut général et s'appliquera à toutes les transformations contrôlées par diffusion, à l'état solide ou à la solidification.

Mots-clés

Changement d'échelle, modélisation, changement de phase

Télécharger la thèse : <https://theses.fr/s283367>

Elisa Serrano-Richaud

Thèse soutenue le 19 novembre 2024 à Châtillon

ED 572 (EDOM) - Ondes et Matière - Paris-Saclay

Encadrement

Département Matériaux et structures (DMAS), ONERA Châtillon

Direction de thèse : Sylvain Latil, CEA, CNRS

Autres : Lorenzo Sponza, LEM, Université Paris-Saclay, ONERA, CNRS

Jury

Maurizia Palumbo, INFN, Université de Rome

Jean-Christophe Charlier, IMCN, UCLouvain

Odile Stéphan, LPS Université Paris-Saclay

Giorgia Fugallo, LTEN, Université de Nantes

Financement ONERA

Contact lorenzo.sponza@onera.fr

Best Poster Award, 6th Workshop on Epitaxial Graphene and 2D Materials, 2024

Résumé Le graphène (Gr) et le nitrure de bore hexagonal (hBN) ont un paramètre de maille similaire (décalage de $\sim 1,5\%$) et des propriétés très différentes. Le Gr est un métal connu pour sa bonne conductivité électrique et le hBN est un semi-conducteur à large gap (~ 7 eV) avec une forte émission d'UV. En raison de ces deux caractéristiques, ils sont des candidats parfaits pour être empilés côte à côte dans une hétérostructure latérale. Cependant, lors de la synthèse de ce type d'hétérostructures, des défauts, tels que des rugosités ou des défauts non hexagonaux, peuvent apparaître à l'interface et affecter les propriétés du système. Dans cette thèse, je m'intéresserai à la modélisation des propriétés électroniques et optiques des hétérostructures latérales composées de nanorubans successifs de graphène et de nitrure de bore (AGBN) ainsi qu'à caractériser l'impact des défauts à l'interface.

Plus précisément, j'ai examiné les caractéristiques générales des AGBNs à partir de techniques *ab-initio* (*Density Functional Theory, GW et Bethe-Salpeter Equation*) ; du rôle de chaque matériau et notamment la forte dépendance des propriétés des AGBNs par rapport à la taille de Gr, jusqu'à les propriétés excitoniques comme le confinement caractéristique de l'exciton dans la partie Gr de l'hétérostructure. Cependant, les techniques *ab-initio* sont très exigeant en termes de calcul et ne peuvent pas être appliqués pour étudier des AGBN avec défauts. C'est pourquoi parallèlement j'ai paramétré un modèle TB semi-empirique et fixé ses limites de validité pour décrire le spectre d'absorption des AGBNs (dans l'approximation des particules indépendantes). Avec ce modèle TB, j'ai pu caractériser l'impact d'une faible rugosité à l'interface ou de défauts non-hexagonaux comme les Stone-Wales et double-vacancy 585. Une faible rugosité ne produit pas des effets notables sur le gap ainsi que sur des excitations à basse énergie, par contre les défauts non-hexagonaux ferment le gap et déplacent le spectre d'absorption vers des plus basses énergies.

Mots-clés Hétérostructures latérales, graphène, nitrure de bore hexagonale, exciton, défauts à l'interface, *density functional theory, GW, Bethe-Salpeter Equation et tight-binding*

Télécharger la thèse : <https://theses.fr/2024UPASP121>

**Thèse de doctorat ONERA
soutenues en 2024**

**Domaine scientifique
MÉCANIQUE DES FLUIDES
ET ÉNERGÉTIQUE**

Thèses de doctorat ONERA soutenues en 2024

Domaine MÉCANIQUE DES FLUIDES ET ÉNERGÉTIQUE

Selon les départements et leurs thématiques scientifiques :

AÉRODYNAMIQUE, AÉROÉLASTICITÉ, ACOUSTIQUE MULTI-PHYSIQUE POUR L'ÉNERGÉTIQUE

Contrôle des écoulements		
Carmen Riveiro Moreno	Interaction des ondes de choc avec des parois souples	46
Mathieu Salmon	Contrôle en boucle fermée de perturbations d'amplitude finie, application à des bifurcations d'écoulements sous- et super-critiques	48
Développement de techniques de mesure et montages expérimentaux		
Sébastien Garcia	Caractérisation granulométrique de sprays denses par imagerie laser	50
Martin Maillard	Développement de nouvelles sources laser pour l'allumage et le rallumage en altitude des turboréacteurs	52
Dynamique des écoulements libres		
Thomas Huret	Génération en soufflerie d'écoulements cisailés représentatifs des écoulements environnementaux de couches limites atmosphériques par des dispositifs passifs	54
Johan Valentin	Couplage multi-fidélité de particules tourbillonnaires avec lignes portantes et méthode eulérienne pour la simulation d'écoulements aéronautiques 3D visqueux	56
Dynamique des écoulements pariétaux		
Baptiste Égreteau	Contrôle de transition laminaire turbulent par aspiration pariétale à travers des matériaux poreux innovants	58
Julian Giehler	Caractérisation et modélisation de pièges poreux pour le contrôle de la couche limite avec et sans interaction d'une onde de choc	60
Julien Husson	Développement d'un traitement robuste des couches limites turbulentes combinant ZDES et LBM : application à la simulation du bruit d'extrémité de volet	62
Simon Lecler	Modèles analytiques spectraux et apprentissage automatique pour la prévision des fluctuations de pression en régime transsonique pour les lanceurs spatiaux	64
Hugues Pantel	Modélisation aérodynamique d'hélice par termes sources stationnaires et instationnaires	66

Ludovic Taguema	Modélisation de l'intermittence en transition naturelle par équations de transport pour des applications aéronautiques	68
Écoulements multiphasiques		
Nikolay Kirov	Simulation numérique de l'écoulement air-huile dans une enceinte moteur	70
Écoulements réactifs		
Thomas Decker	Agglomération de l'aluminium dans les propergols solides : Étude des phénomènes physiques associés par ombroscopie et simulation numérique	72
Pierre Hellard	Étude numérique et expérimentale d'une chambre de combustion à détonation rotative à injection partiellement prémélangée	74
Jean-Michel Klein	Étude des instabilités de combustion, mouvements de flamme et flashbacks dans un foyer comprenant un élargissement brusque	76
Sebastian Milu-Vaideseagan	Étude de l'interaction flamme/paroi : influence de la multiperforation sur les émissions polluantes	78
Exploitation de données expérimentales et numériques		
Magdeleine Airiau	Analyse d'images expérimentales par apprentissage profond pour la caractérisation de la combustion de l'aluminium en propulsion solide	80
Benjamin Etchebarne	Identification de sources aéroacoustiques en conduit par antennerie externe	82
Philippe Farjon	Développement et mise en oeuvre de méthodes d'optimisation sur des chambres de combustion H ₂ -air	84
Leonardo Geiger	Analyse multi-échelle de l'atomisation d'oxygène liquide dans les flammes cryogéniques des moteurs-fusées à ergols liquides	86
Michele Romanelli	Lois de paroi à apprentissage profond pour simulations aérodynamiques	88
Léo Walter	Étude théorique et expérimentale du mélange d'un jet léger	90
Physique du givrage		
Boris Aguilar	Étude expérimentale et modélisation numérique des phénomènes d'accrétion de particules de neige sur des structures aéronautiques ou de génie civil	92
Thomas Alary	Étude de l'impact de gouttes surfondues sur une paroi	94
Bastien Delacroix	Développement d'un modèle intégral avec transport d'une fonction couleur pour la simulation d'écoulements de films minces partiellement mouillants	96
Transferts thermiques et dégradation des matériaux		
Melissa Lantelme	Modélisation des grandeurs aérothermodynamiques pariétales : application à la rentrée atmosphérique des lanceurs réutilisables	98

Carmen Riveiro Moreno

Thèse soutenue le 29 janvier 2024 à Meudon

ED 626 (IPP) - Institut Polytechnique de Paris

Encadrement

Département Aérodynamique, aéroélasticité, acoustique (DAAA), ONERA Meudon

Direction de thèse : Reynald Bur, ONERA/DAAA

Autres : Marie Couliou, Olivier Marquet, Nicolò Fabbiane, ONERA/DAAA

Jury

Jean-Christophe Robinet, DynFLuid, Arts et Métiers

Ferry Schrijer, Delft University of Technology, Delft, Pays-Bas

Marianna Braza, CNRS, Institut de Mécanique des Fluides de Toulouse

Diogo Camello Barros, Université Aix-Marseille

Erwin Gowree, ISAE-Supaero

Financement DGA/AID, ONERA

Contact marie.couliou@onera.fr

Résumé Cette thèse vise à caractériser l'interaction entre une onde de choc normale transsonique et une paroi souple et à comprendre l'impact de la charge aérodynamique ainsi que des paramètres structurels sur l'interaction fluide-structure.

La topologie et la dynamique de l'écoulement d'une onde de choc normale interagissant avec la couche limite turbulente entrante au-dessus d'une paroi rigide ont d'abord été déterminées. Les visualisations strioscopiques et les mesures de pression instationnaires ont fourni des informations sur les différentes échelles temporelles et spatiales impliquées dans l'interaction onde de choc/couche limite turbulente.

Deux parois souples ont ensuite été conçues au moyen d'une étude numérique paramétrique. L'une d'entre elles présente un comportement élastique pour les conditions de la soufflerie, tandis que la seconde présente un comportement viscoélastique. Les propriétés mécaniques du matériau qui constitue les deux parois souples ont été caractérisées expérimentalement.

L'impact de la charge aérodynamique sur l'interaction fluide-structure a été étudié en modifiant la position du choc le long de la paroi élastique. L'interaction fluide-structure dépend fortement de la position du choc, passant d'un régime synchronisé de grande amplitude à un régime non synchronisé. Un modèle empirique, basé sur l'amortissement aérodynamique négatif, a été proposé pour expliquer la grande oscillation auto-entretenu du choc et de la structure. L'effet des paramètres structurels sur l'interaction fluide-structure a été évalué en modifiant l'épaisseur de la paroi élastique, ses conditions limites et la viscosité structurelle. Cette dernière a été étudiée en utilisant la paroi viscoélastique. Il est intéressant de noter qu'avec une paroi viscoélastique, aucune interaction dynamique fluide-structure n'est observée, quelle que soit la localisation du choc. Ce résultat met en évidence la capacité des matériaux viscoélastiques à réagir différemment en fonction de la fréquence du forçage externe : la grande déformation statique de la paroi correspond à une structure souple, tandis que sa réponse dynamique est caractéristique d'une structure rigide.

Mots-clés Interaction fluide-structure, interaction choc-couche limite, écoulement compressible

Mathieu Salmon

Thèse soutenue le 16 décembre 2024 à Paris

ED 432 (SMI) - Sciences des Métiers de l'Ingénieur - Mines/ENSAM ParisTech

Encadrement

Département Aérodynamique, aéroélasticité, acoustique (DAAA), ONERA Meudon

Direction de thèse : Jean-Christophe Robinet, DynFLuid (Arts et Métiers) ;
Denis Sipp, ONERA/DSG

Autres : Colin Leclercq, ONERA/DAAA

Jury

George Papadakis, Imperial College, London

Yohann Duguet, CNRS

Carlo Cossu, CNRS

Bérengère Podvin, CNRS

Laurent Cordier, Institut Pprime

Financement ONERA

Contact colin.leclercq@onera.fr

Résumé Les méthodes de contrôle actuelles rencontrent des difficultés pour stabiliser un champ de base soumis à des perturbations d'amplitude finie. Une frontière appelée « *edge of chaos* » sépare en deux zones distinctes l'espace des phases d'un écoulement qui transitionne de façon sous-critique à la turbulence. Le bassin d'attraction turbulent rassemble les perturbations capables de faire transitionner l'écoulement, le bassin d'attraction laminaire est l'ensemble des perturbations qui sont relaminarisées. La situation précédente, caractérisée par deux attracteurs locaux qui coexistent, peut être rencontrée en dehors du cadre de la transition à la turbulence. Un écoulement autour d'un cylindre à $Re = 100$ possède un champ de base globalement instable ainsi qu'un cycle limite stable. Deux bassins d'attraction émergent lors de la stabilisation du champ de base par un contrôleur linéaire optimisé sur les équations de Navier-Stokes linéarisées. Nous cherchons dans cette étude à augmenter la taille du bassin d'attraction du champ de base. La nouveauté de ce travail réside dans le choix de la fonctionnelle qui est optimisée avec contrôle. En effet, l'optimisation vise l'énergie d'une perturbation située sur la frontière des deux bassins d'attraction. La transition sous-critique à la turbulence est étudiée par le biais du modèle SSP de Waleffe, un modèle d'ordre réduit des équations de Navier-Stokes avec seulement quatre degrés de liberté. Les méthodes de contrôle élaborées dans ce travail sont efficaces pour induire une croissance du bassin d'attraction «laminaire». Par ailleurs ces méthodes ont mis au jour un mécanisme de contrôle linéaire qui semble plus efficace que le contrôle par opposition, et qui consiste en un feedback négatif des stries vers les tourbillons longitudinaux. Dans l'écoulement autour d'un cylindre, la robustesse d'un contrôleur initial à des perturbations d'amplitude finie est augmentée localement avec succès dans une direction du portrait de phase. Néanmoins, la robustesse accrue aux non-linéarités selon une direction de perturbation peut se traduire par une dégradation dans d'autres directions. Nous avons également observé la non-convexité du bassin d'attraction du champ de base contrôlé, ce qui signifie que stabiliser une perturbation d'amplitude finie n'implique pas de stabiliser des perturbations d'amplitude moindre. Ces difficultés suggèrent donc, dans de futurs travaux, de «tirer» le bassin d'attraction dans plusieurs directions simultanément.

Mots-clés Optimisation non-linéaire, contrôle robuste, transition à la turbulence, écoulement de type oscillateur

Télécharger la thèse : <https://hal.science/DYNFLUID/tel-05025683v1>

Sébastien Garcia

Thèse soutenue le 11 mars 2024 à Toulouse

ED 468 (MEGEP) - Mécanique, Énergétique, Génie civil, Procédés - Toulouse

Encadrement

Département Multiphysique pour l'Énergétique (DMPE), ONERA Toulouse

Direction de thèse : Jérôme Anthoine, ONERA/DMPE

Autres : Mikaël Orain, Pierre Doublet, Christine Lempereur, ONERA/DMPE

Jury

Christine Mounaïm-Rousselle, PRISME, Université d'Orléans

Jean-Philippe Matas, LMFA, Université Claude Bernard Lyon 1

Maria Rosaria Vetrano, Mechanical Engineering, KU Leuven

Édouard Berrocal, Combustion Physics, Lund University

Financement Région Occitanie, ONERA

Contact mikael.orain@onera.fr

Prix de thèse de la fondation ISAE-Supaéro, 2024

Résumé Les contraintes qui pèsent sur le domaine du transport aérien sont aujourd'hui nombreuses. L'une des principales est la réduction des émissions de polluants, notamment celles des gaz à effet de serre. Ces mesures incitent le secteur de l'aéronautique à optimiser en permanence les systèmes de propulsion. La maîtrise de la combustion nécessite une compréhension précise des processus physiques qui se produisent en amont : injection du carburant et atomisation, évaporation du carburant liquide, qualité du mélange air/carburant, entre autres. Ainsi, dans le but

d'améliorer les connaissances sur les écoulements réactifs (ou non) internes et d'optimiser la propulsion des avions français, l'ONERA a développé des moyens expérimentaux innovants (banc LACOM et MERCATO) et des codes de calcul toujours plus représentatifs (CEDRE). L'ONERA a également bien identifié le grand intérêt des techniques de diagnostic optique pour la caractérisation expérimentale des écoulements diphasiques.

Les techniques d'imagerie laser, non intrusives, permettent de fournir des informations essentielles à la caractérisation des sprays en un temps limité. En effet, ces techniques fournissent des cartographies 2D caractéristiques de la topologie (angle d'ouverture, longueur de pénétration...), mais aussi de l'atomisation des sprays (taille et concentration de gouttes, vitesse des phases, flux volumique...). Cette thèse s'inscrit dans le cadre du développement de diagnostic optique pour la caractérisation de sprays aéronautiques, en se focalisant sur deux techniques granulométriques : la technique d'imagerie «LIF/Mie» et la technique du ratio de polarisation.

Le premier objectif est d'étudier la technique LIF/Mie d'un point de vue expérimental et théorique. Cette dernière permet de mesurer le diamètre moyen de Sauter (D_{32}) sur un large champ, en un temps limité. Néanmoins, sa mise en œuvre reste difficile car les hypothèses sous-jacentes de la technique ne sont pas toujours validées dans la pratique. Ainsi, un dispositif expérimental innovant a été mis au point et caractérisé dans des conditions simples d'injection pour définir ses limitations. Pour permettre l'application de l'imagerie laser dans des conditions plus critiques d'injection, une méthode permettant de définir l'applicabilité a également été proposée. Cette méthode s'appuie principalement sur des quantifications du phénomène de diffusion multiple par le biais de simulations numériques et la mise en place du système d'éclairage 1p-SLIPI (Structured Laser Illumination Planar Imaging) dans le montage expérimental. Enfin, des caractérisations ont été réalisées par le nouveau système LIF/Mie sur le banc industriel MERCATO, permettant la mesure de D_{32} dans des conditions critiques de ré-allumage en haute altitude (utilisation du kérosène jet A-1, présence d'une chambre de confinement, pression sub-atmosphérique de l'ordre de 0,3 bar et température d'injection du liquide de -40 °C).

Le second objectif a été de proposer une alternative à la technique de mesure LIF/Mie pour la caractérisation granulométrique des sprays, à savoir la technique du ratio de polarisation. Cette technique repose sur l'acquisition des composantes polarisées perpendiculairement et parallèlement à la lumière laser diffusée par les gouttes, dont le rapport est proportionnel au diamètre moyen surfacique (D_{21}). Cette dernière technique n'avait jamais été appliquée sur un spray polydisperse avant cette thèse. Ainsi, un nouveau dispositif expérimental a été réalisé et a permis une première application de la technique sur un cas d'injection industriel. En complément de cette première caractérisation, une analyse exhaustive des paramètres expérimentaux influençant l'application de la technique est réalisée.

Mots-clés Diagnostic optique, sprays, granulométrie, LIF/Mie, ratio de polarisation

Télécharger la thèse : <https://theses.fr/2024ESAE0014>

Martin Maillard

Thèse soutenue le 8 février 2024 à Toulouse

ED 209 (SPI) - Sciences Physiques et de l'Ingénieur - Bordeaux

Encadrement

Département Multiphysique pour l'Énergétique (DMPE), ONERA Toulouse

Direction de thèse : Éric Freysz, Université de Bordeaux/LOMA

Autres : Mikaël Orain, ONERA/DMPE

Jury

Jérôme Degert, Université de Bordeaux/LOMA

Gabi-Daniel Stancu, CentraleSupélec/EM2C

Richard Moncorgé, Université de Caen/CIMAP

Marc Bellenoue, ISAE-Ensm/Prime

Claude Bérat, Safran Helicopter Engines

Financement Région Aquitaine, ONERA

Contact mikael.orain@onera.fr

Développement de nouvelles sources laser pour l'allumage et le rallumage en altitude de turboréacteurs

Résumé Cette thèse explore le développement de nouvelles sources laser pour l'allumage et le rallumage en altitude de turboréacteur. Le projet LAMA, au cœur de cette thèse, capitalise sur les résultats des projets CALAS et ECLAIR. Il permet le développement d'une source laser produisant des impulsions de 40 mJ, d'une durée de 1 ns à une cadence de répétition de 100 Hz, avec une qualité modale de $M^2 = 1,4$.

Pour atteindre de telles performances, une étude des effets de lentilles thermique et de gain dans un barreau de Nd : YAG fut nécessaire. Elle mit en évidence l'influence de la longueur d'onde du laser sur sa propagation dans un milieu amplificateur.

Ce laser couplé à une tête de focalisation adaptée à une chambre de combustion d'un moteur ARDIEN 3G de Safran HE, fit la première démonstration d'allumage d'un moteur d'hélicoptère par laser.

Afin d'étudier le domaine d'allumage du laser dans différentes conditions de températures et dépressions, des campagnes d'essais furent réalisées sur le banc MERCATO de l'ONERA. Elles mirent en évidence l'existence d'une position optimale pour l'étincelle dans la chambre de combustion (photo 1) ainsi que la capacité de ce dernier à fonctionner à froid et en dépression, dans des conditions représentatives d'une altitude de 7000 m.

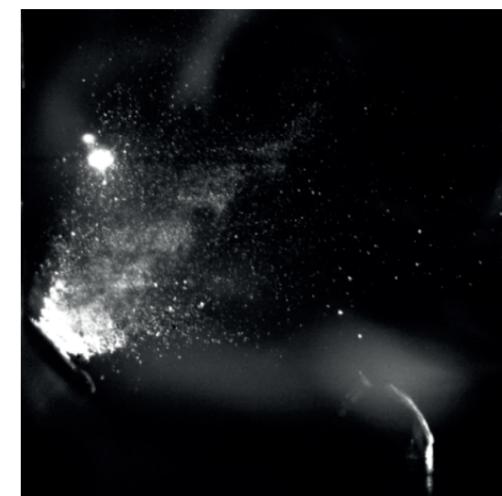


Image par diffusion de Mie du spray de l'injecteur de démarrage enflammé par un plasma laser.

Mots-clés Laser, allumage, turboréacteur

Télécharger la thèse : <https://theses.fr/2024BORD0018>

Thomas Huret

Thèse soutenue le 12 juillet 2024 à Lille

ED 072 (SPI) - Sciences pour l'Ingénieur - Lille

Encadrement

Département Aérodynamique, aéroélasticité, acoustique (DAAA), ONERA Lille
Direction de thèse : Christos Vassilicos, CNRS ; Laurent Jacquin, ONERA/DSG
Autres : Geoffrey Tanguy, ONERA/DAAA ; Quentin Gallas, ONERA/DSFM

Jury

Sandrine Aubrun, École centrale de Nantes
Klara Jurcakova, Académie des Sciences Techniques, Prague
Joachim Peinke, Université d'Oldenburg
Laurent Perret, École centrale de Nantes

Financement Région Hauts de France, ONERA

Contact quentin.gallas@onera.fr

Best Student Presentation Award, congrès PHYMOD 2022

Génération en soufflerie d'écoulements cisailés représentatifs des écoulements environnementaux de couches limites atmosphériques par des dispositifs passifs

Résumé Dans le domaine de l'ingénierie du vent, les dispositifs les plus couramment utilisés pour générer des écoulements de Couche Limite Atmosphérique (CLA) en soufflerie consistent en l'association de rugosités de paroi avec un alignement de « spires » (flèches) en amont. La conception de ce type de dispositifs passe par des phases expérimentales d'essai-erreur longues et coûteuses, à réaliser pour chaque nouvelle configuration. Un nouveau type de dispositifs de grilles passives – des Grilles Multi-échelles Inhomogènes (MIG) – est introduit pour tenter de maîtriser à la fois les profils de vitesse moyenne et d'intensité turbulente en soufflerie en s'affranchissant des étapes d'essai-erreur dans la conception.

Un algorithme de conception de ces grilles MIG est validé expérimentalement par *Hot-Wire Anemometry (HWA)* pour générer des profils de vitesse moyenne représentatifs de tout ou partie d'une CLA neutre en soufflerie. De plus, le déclin d'intensité turbulente mesuré en aval de différents niveaux de grilles MIG montre un « collapse » une fois normalisé par un modèle d'interaction de sillages issue d'études précédentes sur la turbulence de grilles sans cisaillement moyen. Pour les grilles MIG où le cisaillement moyen n'est pas négligeable, une influence de ce paramètre subsiste en aval malgré la normalisation de la turbulence, ce qui justifie le développement au cours de ce travail d'un modèle basé sur des simplifications de l'équation sur l'énergie cinétique turbulente pour prendre en compte cette influence. Ce modèle est complété par des modèles empiriques des contraintes de Reynolds et des longueurs intégrales, mais il requerra par la suite une modélisation empirique du taux de dissipation turbulente pour être refermé et fournir des prédictions a priori.

Enfin, ce travail montre que les « spires » peuvent être conceptuellement conçus et étudiés comme des grilles MIG « continues », dont les profils de champs moyens générés en aval suivent le même modèle que pour les grilles MIG discrètes. Pour autant, on montre que cette proximité conceptuelle ne s'étend pas à la turbulence générée, qui ne « collapse » pas sur la même courbe que pour les grilles MIG discrètes une fois normalisée par le modèle d'interaction de sillages, indiquant ainsi un autre mécanisme à l'oeuvre. Des mesures par *Stereo Particle Image Velocimetry (S-PIV)* révèlent la présence d'une couche de cisaillement intense, issue de la région de proche sillage autour des « spires », qui pourrait expliquer la différence de régime de turbulence observée en aval. De plus, des structures complexes de vorticités moyennes longitudinales sont observées, étonnamment autant en aval des grilles MIG discrètes que des « spires ». Ceci suggère la nécessité d'orienter les futurs efforts de modélisation vers les sillages proches, afin de prendre en compte la complexité qui y est générée et ainsi améliorer la conception des « spires » et des grilles MIG discrètes pour générer une couche limite atmosphérique en soufflerie.

Mots-clés Ingénierie du vent, turbulence, couche limite, atmosphérique, soufflerie

Télécharger la thèse : <https://theses.fr/2024CLIL0011>

Johan Valentin

Thèse soutenue le 12 décembre 2024 à Meudon

ED 591 (PSIME) - Physique, Sciences de l'Ingénieur, Matériaux, Énergie - Université de Normandie

Encadrement

Département Aérodynamique, aéroélasticité, acoustique (DAAA), ONERA Meudon

Direction de thèse : Elie Rivoalen, INSA Rouen

Autres : Luis Bernardos, ONERA/DAAA

Jury

Annie Leroy, École de l'air et de l'espace

Iraj Mortazavi, CNAM

Ivan Delbende, Institut Jean Le Rond d'Alembert

Chloé Mimeau, CNAM

Paul Mycek, Cerfacs

Financement DGAC, ONERA

Contact luis.bernardos@onera.fr

Couplage multi-fidélité de particules tourbillonnaires avec lignes portantes et méthode eulérienne pour la simulation d'écoulements aéronautiques 3D visqueux

Résumé Cette thèse développe une approche multi-fidélité pour la simulation d'écoulements visqueux instationnaires et 3D autour de configurations aéronautiques complexes, en utilisant la Vortex Particle Method (VPM) lagrangienne, couplée soit avec une méthode Ligne Portante et une méthode Unsteady Reynolds-Averaged Navier-Stokes (URANS) eulérienne. L'objectif principal est de fournir une méthode à la fois efficace en termes de coût de calcul et suffisamment précise pour modéliser la dynamique des tourbillons, les interactions de sillage et le transport du fluide pour des applications aéronautiques.

La VPM est au cœur de cette méthode. Elle simule l'évolution des tourbillons et la dynamique du sillage sans avoir recours à un maillage et avec peu de dissipation numérique. Cela la rend idéale pour capturer les interactions complexes de sillage présentes dans les simulations aéronautiques. Cependant, la VPM seule est mal adaptée pour capturer les effets proches des parois. Pour remédier à cela, la VPM est d'abord couplée avec une méthode Ligne Portante afin de modéliser des surfaces portantes minces, permettant l'interaction entre un corps solide et le fluide. De plus, une méthode eulérienne est intégrée afin de résoudre les effets visqueux et compressibles de façon détaillée près des parois. Cette approche hybride multi-fidélité entre la VPM et l'URANS permet ainsi de simuler à la fois le transport du sillage dans le champ lointain et l'évolution des interactions de la couche limite proche des surfaces solides, la rendant applicable à une grande variété d'écoulement. Afin de pallier les limitations inhérentes à la VPM, plusieurs contributions sont proposées. Un modèle de viscosité turbulente dynamique est ainsi développé pour la VPM, améliorant sa gestion de la diffusion visqueuse dans les écoulements à haut Reynolds. Pour maintenir sa stabilité numérique, une nouvelle technique de filtrage basée sur l'enstrophie est introduite, permettant de préserver la cohérence des tourbillons dans les écoulements très turbulents. La VPM, ainsi que son couplage avec les méthodes Ligne Portante ou URANS, est validée par des cas de référence analytiques, expérimentaux et numériques, incluant notamment des tourbillons analytiques, des ailes, des hélices, des éoliennes, des drones et des hélicoptères envol stationnaire. Ces résultats démontrent de la précision et de l'efficacité de cette approche dans la simulation d'une large gamme d'écoulements aérodynamiques complexes à un coût de calcul raisonnable, tout en étant capable de capturer les caractéristiques clés de l'écoulement. Cette thèse propose des méthodes couplées multi-fidélité capables de traiter un large éventail de configurations aéronautiques, positionnant la VPM comme un outil pertinent pour l'optimisation moderne de la conception aérodynamique, l'évaluation des performances et la simulation de vol.

Mots-clés VPM, cortex, particule, ligne portante, URANS, hybride, couplage

Télécharger la thèse : <https://theses.fr/s392254>

Baptiste Égreteau

Thèse soutenue le 20 décembre 2024 à Toulouse

ED 468 (MEGEP) - Mécanique, Énergétique, Génie civil, Procédés - Toulouse

Encadrement

Département Multiphysique pour l'Énergétique (DMPE), ONERA Toulouse

Direction de thèse : Fabien Méry, ONERA/DMPE

Autres : Cécile Davoine, Marc Thomas, ONERA/DMAS

Jury

Mathilde Laurent Brocq, Institut de Chimie et des Matériaux Paris-Est

Julien Weiss, TU Berlin

Remy Dendievel, SIMAP

Éric Laurendeau, Polytechnique Montréal

Jean-Philippe Monchoux, CEMES

Fabien Méry, ONERA/DMPE

Marc Thomas, ONERA/DMAS

Cécile Davoine, ONERA/DMAS

Financement CS2 NACOR

Contact fabien.mery@onera.fr

Résumé Cette thèse porte sur le développement et la mise en œuvre de matériaux perméables faits à partir de poudres métalliques pour le contrôle de transition laminaire-turbulent de la couche limite par aspiration pariétale. Cette aspiration, habituellement appliquée à travers des tôles de titane microperforées par laser, a

pour but de retarder la transition de la couche limite vers le régime turbulent, et donc de réduire la traînée et ainsi de réduire la consommation de carburant des avions.

Deux procédés de fabrication différents ont été utilisés pour fabriquer de nouveaux matériaux poreux : le *Spark Plasma Sintering (SPS)* et la fusion laser sur lit de poudre (LPBF en anglais). Le SPS est un système de frittage assisté sous champ électrique. Il a été employé en densification partielle avec de la poudre grossière de TA6V afin de contrôler la perméabilité des matériaux via les paramètres de fabrication. Le LPBF est un procédé de fabrication additive. Il a été employé avec de la poudre d'Inconel718 de deux manières différentes : en concevant des matériaux à structure lattice et en créant du manque de fusion par diminution de l'énergie apportée à la poudre. Ces trois familles de matériaux ont été caractérisées en mesurant leur perméabilité, la rugosité, résistance acoustique et la morphologie de leurs réseaux poreux. La caractérisation des matériaux microporeux faits par SPS et LPBF a montré qu'il était possible de contrôler la perméabilité avec une large gamme de porosités. L'analyse de la morphologie de leurs réseaux poreux a notamment mis en lumière l'anisotropie des réseaux poreux. Pour le SPS, cette anisotropie apparaît avec une pression de frittage de 20 MPa et est favorable à l'écoulement à travers le matériau. Tandis que pour le LPBF, cette anisotropie est favorable à l'écoulement dans le plan des lits de poudre. Cette caractérisation a permis de comparer leurs performances et choisir le procédé avec les paramètres de fabrication adéquats afin de réaliser un panneau perméable de grandes dimensions. Cette étude d'upscaling a été menée pour le LPBF en manque de fusion ainsi que le SPS, et la fabrication d'un panneau d'aspiration complet a abouti pour ce dernier procédé. Le panneau SPS est plus rugueux qu'une tôle microperforée laser, d'une perméabilité similaire et légèrement moins résistif acoustiquement.

Pour étudier la transition de la couche limite dans un écoulement 2D sans gradient de pression, une maquette type plaque plane a été conçue en y intégrant des chambres d'aspiration. Cette maquette a été installée dans la soufflerie de recherche TRIN2, dédiée aux expériences sur la transition. Dans un premier temps, la position de transition sur la plaque plane pour un cas lisse a été déterminée afin d'avoir un cas de référence. Ensuite, une tôle microperforée et le panneau SPS ont été montés successivement. La position de transition a été mesurée pour chacun de ces panneaux avec et sans aspiration. Pour les deux panneaux poreux, la position de transition sans aspiration est avancée par rapport au cas lisse. Pour la tôle microperforée, c'est principalement dû à une condition d'impédance acoustique sur-amplifiant les ondes de Tollmien-Schlichting responsables de la transition. Pour le panneau SPS, la transition est encore plus avancée, principalement à cause de la rugosité de surface. En appliquant l'aspiration pariétale, la position de transition est repoussée de la même distance par rapport à la position sans aspiration pour les deux panneaux.

Mots-clés Étude expérimentale, transition laminaire turbulent, contrôle de transition par aspiration, matériaux poreux, *Spark Plasma Sintering*, fabrication additive

Télécharger la thèse : <https://theses.fr/2024ESAE0069>

Julian Giehler

Thèse soutenue le 19 mars 2024 à Meudon

ED 626 (IPP) - Institut Polytechnique de Paris

Encadrement

Département Aérodynamique, aéroélasticité, acoustique (DAAA), ONERA Meudon

Direction de thèse : Reynald Bur, ONERA/DAAA

Autres : Pierre Grenson, ONERA/DAAA

Jury

Holger Babinski, Université de Cambridge

Piotr Doerffer, Institute of Fluid Flow-Machinery, Gdansk

Julien Weiss, Technical University, Berlin

Christian Tenaud, CentraleSupélec

Jean-Pierre Rosenblum, Dassault Aviation

Christophe Nottin, MBDA

Financement Marie Curie ITN TEAMAero

Contact pierre.grenson@onera.fr

Caractérisation et modélisation de pièges poreux pour le contrôle de la couche limite avec et sans interaction d'une onde de choc

Résumé Le contrôle de l'écoulement à l'aide de piège poreux est étudié à la fois numériquement et expérimentalement. On s'intéresse dans un premier temps au cas d'une couche limite turbulente en régimes supersonique puis subsonique. On traite en seconde partie du contrôle de l'interaction onde de choc/couche limite.

L'étude numérique se compose de deux parties. Tout d'abord, une étude paramétrique est réalisée afin d'identifier l'influence des paramètres géométriques et des conditions d'écoulement dans le but de générer une base de données exhaustive. Les concepts d'efficacité et d'effectivité d'un piège poreux sont introduits et évalués. L'efficacité décrit la capacité à assurer un niveau d'aspiration sans recourir à une pression trop basse dans la cavité. L'effectivité représente la capacité à augmenter la quantité de mouvement de l'écoulement de couche limite à proximité de la paroi en prélevant un débit minimal d'air. Dans la deuxième phase de l'étude, les modèles de pièges poreux issus de la littérature sont appliqués en tant que condition d'aspiration continue dans le solveur compressible structuré elsA. Une comparaison exhaustive de ces modèles est conduite sur la base de données issue de l'étude paramétrique. Des écarts significatifs entre les modèles sont observés concernant la prévision de l'efficacité et de l'effectivité des pièges poreux. Des expériences dans la soufflerie S8Ch à Meudon sont réalisées pour les nombres de Mach $M = 1,62$ et $M = 0,5$. Les mesures de pressions pariétales ainsi que de champs de vitesse par vélocimétrie laser à franges (VLF) ont permis de valider les conclusions des études numériques dans la mesure où un très bon accord entre les simulations et les expériences est observé.

Dans un dernier temps, nous avons élaboré un nouveau modèle de piège poreux en appliquant une condition d'aspiration distribuée. Le modèle est validé à la fois pour les écoulements supersonique et subsonique, à partir de grandeurs pariétales uniquement. L'efficacité et l'effectivité des pièges poreux issus de la base de données sont calculées finement avec une grande précision. Le modèle est finalement appliqué et validé au cas complexe du contrôle de l'interaction onde de choc/couche limite.

Mots-clés Contrôle de l'écoulement, écoulements supersoniques, interaction onde de choc/couche limite, condition d'aspiration, modélisation

Télécharger la thèse : <https://theses.fr/2024IPPAX047>

Julien Husson

Thèse soutenue le 3 décembre 2024 à Meudon

ED 626 (IPP) - Institut Polytechnique de Paris

Encadrement

Département Aérodynamique, aéroélasticité, acoustique (DAAA), ONERA Meudon

Direction de thèse : Sébastien Deck, ONERA/DAAA

Autres : Marc Terracol, ONERA/DAAA

Jury

Éric Lamballais, Université de Poitiers/Institut Pprime

Simon Marié, CNAM

Béregère Podvin, EM2C, CentraleSupélec

Aloïs Sengissen, Airbus

Financement DGAC, ONERA

Contact marc.terracol@onera.fr

Développement d'un traitement robuste des couches limites turbulentes combinant ZDES* et LBM* : application à la simulation du bruit d'extrémité de volet

Résumé La signature sonore d'un aéronef est devenue un élément important de sa phase de conception notamment en raison des réglementations acoustiques strictes sur l'environnement sonore aéroportuaire. En phase d'atterrissage, la majeure partie du bruit d'un aéronef est d'origine aérodynamique, en particulier causé par les becs, les extrémités de volets et les trains d'atterrissage. Du point de vue du constructeur, il est nécessaire d'être à même de prévoir les mécanismes générateurs du bruit d'extrémité de volet. Cependant la simulation numérique de ces mécanismes nécessite la résolution précise de la turbulence au sein d'un écoulement fortement instationnaire impliquant une large gamme de phénomènes physiques : couches limites turbulentes tridimensionnelles, enroulement de couches de cisaillement, appariement et éclatement tourbillonnaire. Une telle simulation requiert donc une méthode numérique instationnaire ayant de bonnes propriétés acoustiques comme la méthode de Boltzmann sur réseau (LBM) utilisée dans cette étude. Un facteur limitant inhérente à cette méthode est la modélisation des couches limites, peu précise à coût de calcul modéré. Afin d'améliorer cet aspect, un cadre numérique robuste a été proposé durant ces travaux, basé sur l'amélioration de la mise en œuvre numérique des lois de paroi ainsi que sur l'implantation et la validation de la ZDES mode 2 (2020) permettant d'assurer un traitement RANS des couches limites attachées bien moins coûteux qu'un traitement LES.

Ce nouveau cadre numérique a été validé sur une série de cas-tests de complexité croissante comme celui d'une couche limite turbulente de plaque plane, d'une marche descendante et d'un profil hypersustenté. Enfin, son utilisation dans le cadre d'une configuration d'extrémité de volet a permis d'expliquer l'origine physique d'une source acoustique mesurée lors d'essais en soufflerie.

Mots-clés Méthode de Boltzmann sur réseaux, *Zonal Detached Eddy Simulation*, turbulence, couches limites

*ZDES : *Zonal Detached Eddy Simulation*

*LBM : *Lattice Boltzmann Method*

Télécharger la thèse : <https://theses.hal.science/tel-04952454/>

Simon Lecler

Thèse soutenue le 16 juillet 2024 à Meudon

ED 626 (IPP) - Institut Polytechnique de Paris

Encadrement

Département Aérodynamique, aéroélasticité, acoustique (DAAA), ONERA Meudon

Direction de thèse : Sébastien Deck, ONERA/DAAA

Autres : Pierre-Élie Weiss, ONERA/DAAA

Jury

Marcello Meldi, LFML

Laurent Cordier, CNRS/Institut Pprime

Stefania Cherubini, Politecnico di Bari

Régis Marchiano, Sorbonne Université

Hadrien Lambaré, Cnes

Financement Cnes

Contact pierre-elie.weiss@onera.fr

Modèles analytiques spectraux et apprentissage automatique pour la prévision des fluctuations de pression en régime transsonique pour les lanceurs spatiaux

Résumé La conception de lanceurs spatiaux de nouvelle génération nécessite de sélectionner à tout moment du processus de développement les outils offrant le meilleur compromis entre le coût d'exécution et la précision des résultats aérodynamiques escomptée. Actuellement, en phase d'avant-projet, des modèles empiriques et analytiques sont utilisés pour estimer le champ de pression instationnaire à la paroi du lanceur en régime transsonique. La prévision des fluctuations de pression pariétale durant cette phase de vol est critique en raison des charges latérales instationnaires et vibrations induites, pouvant menacer l'intégrité du lanceur et de sa charge utile. Ces méthodes, caractérisées par un temps de réponse très court, ont cependant des domaines de validité très restreints et ne sont par exemple pas adaptés aux écoulements complexes détachés que l'on peut rencontrer autour des lanceurs spatiaux. Cette thèse a donc pour objectif de développer des modèles de prévision des fluctuations de pression pariétale adaptés aux configurations de lanceurs spatiaux en régime transsonique tout en présentant un faible temps de restitution. Dans cette optique, une base de données de simulations numériques RANS et ZDES de diverses configurations plus ou moins représentatives des cas applicatifs a été constituée afin d'accompagner le développement et la validation des modèles. Un modèle analytique de prévision des fluctuations de pression adapté aux écoulements tridimensionnels et compressibles a été développé, puis évalué sur une configuration de plaque plane puis de lanceur générique. Pour pallier les limites de cette approche, en particulier dans les zones de décollement massif, une méthode basée sur des algorithmes d'apprentissage automatique (réseaux de neurones de convolution) est proposée. Cette approche est étendue et généralisée à des conditions physiques diverses en ayant recours à l'analyse physique et dimensionnelle des écoulements décollés/recollés et en établissant un plan d'expérience basé sur des simulations ZDES.

Mots-clés Fluctuations de pression pariétale, lanceurs spatiaux, transsonique, ZDES, modélisation analytique, apprentissage automatique

Télécharger la thèse : <https://theses.fr/2024IPPAX048>

Hugues Pantel

Thèse soutenue le 4 décembre 2024 à Meudon

ED 468 (MEGEP) - Mécanique, Énergétique, Génie civil, Procédés - Toulouse

Encadrement

Département Aérodynamique, aéroélasticité, acoustique (DAAA), ONERA Meudon

Direction de thèse : Xavier Carbonneau, ISAE-Supaero ;
Fabrice Falissard, ONERA/DAAA

Autres : Guillaume Dufour, ISAE-Supaero

Jury

Guillaume Dufour, ISAE-Supaero

Marcello Manna, University of Naples Federico II

Jens Nørkær Sorensen, Technical University of Denmark

William Thollet, Airbus

Leo Veldhuis, Delft University of Technology

Financement CS2 ADEC, DGAC, ONERA

Contact fabrice.falissard@onera.fr

Résumé De plus en plus de prototypes d'aéronefs se basent sur une propulsion à hélices (eVTOL, propulsion électrique distribuée, avions régionaux). Contrairement aux turboréacteurs qui sont carénés, les hélices interagissent fortement avec la cellule avion. Un des enjeux majeurs du développement de ces appareils est de quantifier les effets d'intégration sur les performances aérodynamique, c'est-à-dire d'évaluer l'impact du positionnement des hélices et/ou rotors sur l'enveloppe de vol.

Modélisation aérodynamique d'hélice par termes sources stationnaires et instationnaires

On utilise pour cela des méthodes de simulations numériques des écoulements avec des modélisations plus ou moins fines du système propulsif en fonction de la finalité de la simulation. De nos jours deux types de méthodes sont privilégiées :

- Une simulation instationnaire qui modélise l'écoulement autour des pales en rotation en résolvant les équations de Navier-Stokes instationnaires. Cette méthode décrit le sillage de façon précise mais a un coût de calcul et un temps de restitution qui peuvent être prohibitifs lors des phases de conception ;
- Une simulation stationnaire qui modélise les hélices par des termes sources dans les équations de Navier-Stokes. Cette méthode permet de significativement gagner en temps de calcul par rapport à une simulation complète car elle est stationnaire et permet d'éviter de mailler les pales de l'hélice. Toutefois, du fait de son aspect stationnaire, elle ne permet pas de rendre compte de certains phénomènes instationnaires pouvant être dimensionnants.

L'objectif de la thèse est d'une part de mieux comprendre comment fonctionnent ces modélisations par termes sources stationnaires, et d'autre part de développer une modélisation instationnaire d'hélices par termes sources. Celle-ci s'appuie sur la méthode dite "Actuator Line" et permet de représenter de façon réaliste le sillage tourbillonnaire des pales. Cette méthode, répandue dans le domaine éolien (écoulements incompressibles, faible nombre de pales), doit être étendue et validée pour la problématique des hélices (écoulements compressibles, nombre de pales élevé, fort chargement). Le but final est d'utiliser ces deux modèles pour capturer les interactions aérodynamiques réciproques entre le système propulsif et la cellule de l'appareil. L'étude du modèle stationnaire, appelé RANS/BET, a permis de tirer des conclusions générales sur la modélisation d'hélices par termes sources. Celles-ci portent notamment sur le calcul des efforts par la théorie de l'élément de pale, la distribution des termes sources dans le domaine de calcul et sur l'importance du terme source dans l'équation de l'énergie. Plusieurs corrections de bout de pale ont aussi été comparées. Le modèle final a été évalué sur une hélice pour plusieurs angles de calage en vol axial et pour des incidences de 3° à 9°. Pour chaque point de vol, la traction est prévue à 2% de la référence pale maillée, et la puissance à moins de 1%. Les efforts sur pale sont analysés en détail. Le modèle reproduit les champs de vitesse aussi fidèlement que les efforts. Le modèle instationnaire, implémenté de manière innovante, a été évalué sur les mêmes cas d'application. Il surestime systématiquement les charges de 5% environ, surtout en tête. Cet écart est peu sensible au paramétrage du modèle et au maillage, là où les modèles décrits dans la littérature sont très sensibles à ces paramètres. Le modèle restitue également très bien le sillage tourbillonnaire de l'hélice. Les deux modèles sont aussi évalués dans le cas d'une hélice en interaction avec une aile. La distribution des charges sur l'aile est très bien prévue, à la fois en moyenne temporelle et en instantanée. La perturbation de l'aile sur la performance hélice est également bien capturée, avec des écarts du même ordre de grandeur qu'en configuration isolée.

Mots-clés Hélice, rotor, voilure, interaction, sillage, tourbillon, *body force*, *actuator line*, *actuator disk*.

Télécharger la thèse : <https://theses.fr/2024ESAE0058>

Ludovic Taguema

Thèse soutenue le 17 décembre 2024 à Toulouse

ED 468 (MEGEP) - Mécanique, Énergétique, Génie civil, Procédés - Toulouse

Encadrement

Département Multiphysique pour l'Énergétique (DMPE), ONERA Toulouse

Direction de thèse : François Chedevergne, ONERA/DMPE

Autres : Lucas Pascal, ONERA/DMPE

Jury

Michel Visionneau, École centrale de Nantes

Héloïse Beaugendre, Université de Bordeaux

Christophe Airiau, Université Paul Sabatier Toulouse

Guillaume Lehnasch, ISAE-Ensma

Julien Cliquet, Airbus Operation SAS

Financement CIFRE Airbus

Contact francois.chedevergne@onera.fr

Résumé Pour améliorer l'aérodynamisme des avions, les ingénieurs cherchent à réduire la traînée de frottement causée par les effets visqueux en paroi, dans la région que l'on nomme couche limite.

L'écoulement dans cette région peut être laminaire, turbulent ou transitionnel. Le régime laminaire, plus ordonné, génère moins de traînée que le régime turbulent, marqué par un comportement chaotique. La transition entre ces deux états se

manifeste par l'apparition de spots turbulents qui croissent, se propagent et s'agrègent jusqu'à rendre l'écoulement entièrement turbulent. La transition de la couche limite dépend de sa réceptivité aux perturbations extérieures. Pour de faibles niveaux, la transition est dite naturelle et est déclenchée par la croissance modale des ondes de Tollmien-Schlichting (TS) pour les cas sans flèche. En aval des abscisses de transition, l'écoulement peut être décrit à l'aide du facteur d'intermittence γ , qui mesure la fraction de temps pendant laquelle un point de l'écoulement est turbulent. Ce facteur est fonction de la distance au point de transition, de l'historique de vitesse et du taux de production et de propagation des spots turbulents $n\sigma$. Dans les codes RANS, la modélisation du facteur d'intermittence s'effectue généralement à l'aide d'équations aux dérivées partielles (EDP) qu'il est possible de répartir en deux catégories distinctes. La première repose sur l'emploi exclusif de corrélations locales, tandis que la seconde, basée sur l'expression analytique du facteur d'intermittence de Narasimha, privilégie une approche plus physique. Cependant, ces méthodes présentent des limites lorsqu'il s'agit de modéliser la transition naturelle induite par les ondes TS. En effet, elles ont été initialement développées pour des applications de turbomachines, où la transition est principalement de type bypass. Dans ces cas, les niveaux élevés de perturbations extérieures influencent fortement les taux de production et de propagation des spots turbulents $n\sigma$. La première contribution de cette thèse a donc été de développer une EDP pour le facteur d'intermittence, reposant sur un modèle dérivé de l'expression de Narasimha, et dont le taux de production et de propagation des spots turbulents est spécifiquement adapté aux faibles niveaux de turbulence extérieure (Tu) rencontrés dans le cadre de la transition naturelle. La seconde contribution de cette thèse a été de doter CODA, le solveur RANS développé par Airbus, l'ONERA et le DLR, de ce nouveau modèle d'intermittence capable de modéliser les régions de transition pour des applications d'aérodynamique externe. Cette thèse débute par une revue de l'état de l'art sur la région de transition et sa modélisation dans les codes Navier-Stokes. Elle examine les mécanismes menant à la turbulence, la nature intermittente de la région transitionnelle, et l'influence des taux de turbulence extérieure sur son étendue. Le critère de transition AHD-transporté et l'EDP pour γ de Suzen et Huang sont identifiés comme des modèles particulièrement pertinents pour cette étude. Elle se poursuit par l'élaboration d'une nouvelle corrélation pour $n\sigma$, développée à partir de données expérimentales pour la transition naturelle. Cette corrélation, qui propose une indépendance de $n\sigma$ vis-à-vis du Tu pour la transition naturelle, est intégrée dans une version modifiée de l'équation d'intermittence de Suzen et Huang et testée dans un code de couche limite. Enfin, cette version modifiée du facteur d'intermittence, comprenant la nouvelle corrélation sur $n\sigma$, est implantée dans le solveur CODA, où elle est couplée au critère AHD-transporté et au modèle de turbulence Spalart-Allmaras. Des simulations sont effectuées sur une plaque plane, un profil aérodynamique et une nacelle pour valider la chaîne de calcul complète, démontrant ainsi la capacité de CODA à modéliser avec précision les régions de transition dans ces diverses configurations aéronautiques.

Mots-clés CFD, transition laminaire-turbulent, CODA, intermittence

Télécharger la thèse : <https://theses.fr/s244398>

Nikolay Kirov

Thèse soutenue le 25 mars 2024 à Toulouse

ED 468 (MEGEP) - Mécanique, Énergétique, Génie civil, Procédés - Toulouse

Encadrement

Département Multiphysique pour l'Énergétique (DMPE), ONERA Toulouse

Direction de thèse : Jean-Luc Estivalèzes, ONERA/DMPE

Autres : Jean-Mathieu Senoner, ONERA/DMPE

Jury

Stéphane Vincent, Université de Marne La Vallée

Pierre Trontin, Université Claude Bernard de Lyon

Annafederica Urbano, ISAE de Toulouse

Nicolas Grenier, Université Paris Saclay

Gabriel Cristovam, Safran Aircraft Engines

Davide Zuzio, ONERA/DMPE

Financement CIFRE Safran Aircraft Engines

Contact davide.zuzio@onera.fr

Résumé La tendance actuelle vers des moteurs d'avion plus puissants et plus économes en carburant crée le besoin de roulements capables de transférer des charges mécaniques plus élevées entre les composants rotatifs et fixes de la machine, à des températures extrêmes et à des régimes moteur plus élevés. Les roulements

Simulation numérique de l'écoulement air-huile dans une enceinte moteur

nécessitent d'être lubrifiés en permanence avec une huile spécialisée afin de réduire les frottements, de dissiper la chaleur, d'éloigner les minuscules débris et ainsi d'assurer l'intégrité mécanique du moteur. Les débits massiques d'huile qui en résultent au sein du moteur sont importants et le lubrifiant doit donc être recyclé en permanence via un système de recirculation d'huile. En conséquence, les roulements sont enfermés dans des enceintes, constitués de joints étanchetés et des roulements eux-mêmes. Les enceintes à huile sont essentiellement des chambres étanches adjacentes aux roulements, ou parfois les enfermant, dans lesquelles l'huile éjectée est canalisée après la lubrification. Ils sont généralement scellés avec de l'air sous pression du côté opposé, qui passe à travers un joint labyrinthe afin d'empêcher tout écoulement sortant. En règle générale, une ouverture d'orifice de ventilation est incluse sur le dessus pour permettre à l'air de s'échapper, et une ouverture d'orifice de récupération est située près du bas pour ramener l'huile vers les pompes de récupération d'huile vers le réservoir. À l'intérieur de l'enceinte, l'huile et l'air forment un écoulement complexe à deux phases, dans lequel les effets centrifuges, le cisaillement aérodynamique et les forces de gravité provoquent la dispersion de la majorité de l'huile dans l'enceinte huile et s'accumulent sous forme de film dans les parois extérieures. Un transfert de chaleur de ces parois vers l'huile pré-refroidie à lieu, lui conférant ainsi une fonction secondaire importante : absorber une partie de la chaleur et donc refroidir l'enceinte. Il est cependant important que l'huile des roulements soit collectée et renvoyée au réservoir avant d'atteindre des températures trop élevées, afin d'éviter la cokéfaction ou, pire encore, l'inflammation, qui pourrait déclencher un incendie dans l'enceinte. La physique complexe des écoulements diphasiques conduit à un problème d'optimisation qui ne peut être résolu que via des simulations numériques. À ce jour, une quantité considérable d'incertitude demeure quant à la pratique de modélisation informatique la plus optimale pour une simulation précise, fiable et rentable des chambres de roulements dans différentes conditions de fonctionnement. L'objectif de cette thèse est donc de tester plusieurs approches de modélisation numérique pour la simulation d'un banc d'essai simplifié, ici nommé ELUBSYS, pour lequel certaines mesures expérimentales sont disponibles et peuvent être utilisées pour fournir des moyens de validation desdites approches. Il s'agit, en l'occurrence, d'une approche interfaciale multi-fluide à interface diffuse, d'une approche simplifiée Eulerian Integral Thin Film (EITF), d'une approche à phase dispersée lagrangienne (Disperse Particles Model, DPM) et, enfin, d'une approche couplée EITF-DPM. Au cours de toutes ces investigations, de nouvelles connaissances ont été acquises sur les caractéristiques de l'écoulement, les paramètres d'influence et les performances globales, par rapport aux données expérimentales pour deux configurations de chambres de roulements sous une variété de débits massiques d'huile et de vitesses de rotation de l'arbre. La méthodologie couplée EITF-DPM s'est avérée obtenir une bonne précision pour les mesures de distribution d'épaisseur de film pour un coût contenu et pour une variété de régimes de fonctionnement.

Mots-clés Dynamique, des fluides numérique, enceinte à huile, écoulement air-huile, approche couplée EITF-DPM, approche à interface diffuse, moteur d'avion

Télécharger la thèse : <https://theses.fr/2024ESAE0015>

Thomas Decker

Thèse soutenue le 4 avril 2024 à Palaiseau

ED 579 (SMéMaG) - Sciences Mécaniques et Énergétiques, Matériaux et Géosciences
- Paris-Saclay

Encadrement

Département Multiphysique pour l'Énergétique (DMPE), ONERA Palaiseau

Direction de thèse : Jérôme Anthoine, Robin Devillers, ONERA/DMPE ;

Stany Gallier, ArianeGroup

Jury

Fabien Halter, Université d'Orléans

Jean-Bernard Blaisot, Université de Rouen

Filippo Maggi, Politecnico di Milano

Séverine Barbosa, Université Aix-Marseille

Financement ArianeGroup

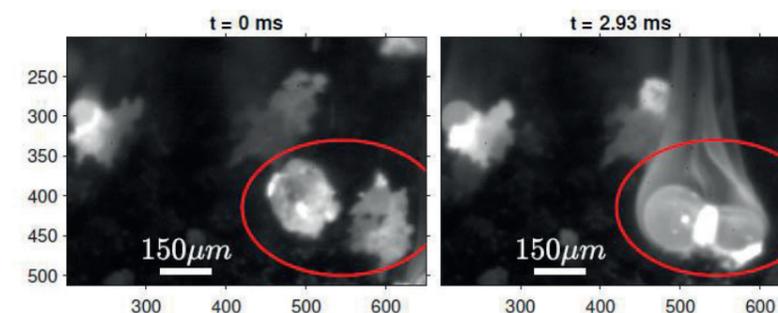
Contact robin.devillers@onera.fr

Résumé Les moteurs à propergol solide (MPS) sont couramment employés en propulsion civile et militaire. La plupart incorporent dans leur carburant des particules d'aluminium, sujettes à divers mécanismes physiques générant des agglomérats, gouttes contenant jusqu'à plusieurs centaines de particules initiales. Or, ces gouttes d'aluminium interagissent avec le gaz produit par combustion. Ces interactions peuvent réduire les performances ou induire des instabilités. Elles dépendent au premier ordre de la taille initiale des gouttes ; il est donc primordial de prédire l'agglomération de ces particules dans les MPS. Les modèles de la littérature liés à l'agglomération sont simplifiés et incomplets par manque de caractérisations expérimentales des mécanismes et des phénomènes physiques la limitant.

La thèse vise à observer les phénomènes physiques d'agglomération par des

Agglomération de l'aluminium dans les propergols solides : Étude des phénomènes physiques associés par ombroscopie et simulation numérique

diagnostics expérimentaux précis et à les caractériser par des outils d'analyse d'images avancés. Le but est par ailleurs d'explicitier l'influence de paramètres comme la pression ou la granulométrie sur les mécanismes et phénomènes physiques impliqués. L'objectif final est la réalisation d'un modèle capable de prédire l'agglomération avec précision. Des compositions de propergol à particules inertes sont étudiées en premier lieu, car plus simples à étudier et permettant l'analyse précise de phénomènes physiques spécifiques tels que la formation d'agrégats. Pour cela, des mesures haute cadence d'ombroscopie sont réalisées. L'agrégation des particules inertes lors de la combustion du propergol solide est visualisée en détail, et analysée par de nouveaux algorithmes performants d'analyse d'image développés pour l'occasion. De façon similaire, l'agrégation des particules d'aluminium et leur coalescence en agglomérats sont observées par des mesures de visualisation haute cadence, pouvant monter jusqu'à 77 kHz. L'importance de plusieurs mécanismes physiques complexes est démontrée, tels que la coalescence de multiples agrégats/agglomérats nommée super-fusion, l'oxydation des agglomérats encore attachés à la surface, ou la prépondérance des phénomènes physiques qui limitent l'agglomération. La mesure de la taille des gouttes d'aluminium formées est réalisée par des outils d'analyse d'images précis reposant sur l'apprentissage profond, confirmant les paramètres fondamentaux déterminant l'agglomération : la granulométrie des grains oxydants du propergol et la pression. Un modèle d'agglomération est développé à partir de ces analyses expérimentales. Concernant les particules d'aluminium, des critères d'allumage et de super-fusion des agrégats sont développés. Il est montré que les grandeurs expérimentales sont très bien reproduites par simulation numérique pour des propergols de composition différente à plusieurs pressions, montrant la capacité du modèle à prédire correctement l'agglomération pour les propergols testés.



Visualisation expérimentale de
l'agglomération en surface du propergol

Mots-clés Agglomération, aluminium, propergol solide, ombroscopie, traitement d'image, modélisation physique, simulation numérique

Télécharger la thèse : <https://theses.fr/2024ESAE0016>

Pierre Hellard

Thèse soutenue le 27 novembre 2024 à Chasseneuil-du-Poitou

ED 609 (SIMME) - Sciences et Ingénierie des Matériaux, Mécanique, Énergétique -
Université de Poitiers

Encadrement

Département Multiphysique pour l'Énergétique (DMPE), ONERA Palaiseau

Direction de thèse : Pierre Vidal, Institut Pprime, CNRS

Autres : Ratiba Zitoun, Institut Pprime; Thomas Gaillard, ONERA/DMPE

Jury

Luc Vervisch, CORIA

Myles Bohon, Technical Universität Berlin

Nabiha Chaumeix, CNRS/ICARE,

Jiro Kasahara, Nagoya University

Pierre Boivin, M2P2

Financement Région Aquitaine, ONERA

Contact thomas.gaillard@onera.fr

Prix des doctorants ONERA Mécanique des fluides et énergétique 2024

Résumé Depuis les années 1950, des concepts de propulseurs à détonation oblique, pulsée ou rotative ont été étudiés continuellement. Depuis une vingtaine d'années, le moteur à détonation rotative (RDE pour *Rotating Detonation Engine*) concentre la majorité des recherches. La géométrie de chambre la plus examinée est l'espace annulaire entre deux cylindres coaxiaux dans lequel les gaz réactifs sont injectés continûment et brûlés par une ou plusieurs détonations en rotation permanente.

L'utilisation de la détonation comme mode de combustion dans des propulseurs aérobie ou fusées laisse espérer une amélioration significative de leurs performances, tout en réduisant l'encombrement et la masse du moteur par rapport aux systèmes conventionnels. La raison est la vitesse supersonique du front de détonation, ce qui produit un gain de pression dans la chambre et limite fortement l'épaisseur de la couche de mélange réactif. Ces vitesses très élevées exigent des temps de mélange des ergols extrêmement courts, typiquement entre 10 et 100 μs . L'injection séparée des ergols et ses perturbations périodiques liées aux passages des détonations produisent des non-uniformités du mélange frais diminuant la vitesse de détonation et donc, dans une certaine mesure, les performances propulsives. Inversement, le prémélange complet des ergols induit un risque de remontée de la combustion qui endommagerait l'injecteur et favoriserait la déflagration parasite au contact avec des gaz chauds. Un système d'injection optimisé constitue donc un élément essentiel d'un propulseur à détonation rotative, tant pour son bon fonctionnement que pour sa fiabilité. Dans cette étude, un injecteur produisant un prémélange partiel des ergols avant leur injection dans la chambre de combustion a été conçu à l'aide de simulations numériques avec le code CEDRE pour les mélanges CH_4/O_2 et H_2/O_2 . Il a ensuite été testé sur le banc RDE GAP (Institut Pprime), ainsi qu'un autre injecteur sans prémélange partiel, d'un type habituellement utilisé sur les RDE. Divers régimes de détonation, leurs éventuelles variations au cours de l'essai et les phases transitoires d'allumage ont été caractérisés à l'aide de visualisations frontale et latérale de la chimiluminescence à hautes fréquences (180 à 230 kHz) et courts temps de pose (100 à 400 ns), et de mesures de pression rapides (1 MHz) à la paroi extérieure de la chambre. L'injecteur avec prémélange partiel a permis d'obtenir pour la première fois, en chambre annulaire, des détonations se propageant à une vitesse au moins égale à 90 % de la valeur théorique D_{CJ} avec le couple CH_4/O_2 à plusieurs débits et richesses. L'injecteur sans prémélange partiel n'a conduit qu'à des vitesses de l'ordre de 60 % de D_{CJ} . Les visualisations ont permis de caractériser les structures latérale et azimutale du front réactif. En particulier, elles mettent en évidence la propagation de la détonation au voisinage proche de la paroi d'injection, ce qui confirme un prémélange de qualité suffisante dès la sortie de l'injecteur. Plusieurs régimes et vitesses de fronts de détonation ont été observés selon les géométries de chambre testées, ce qui rappelle que l'aérodynamique interne de la chambre joue aussi un rôle important dans la stabilité de fonctionnement, toutes choses égales par ailleurs. Pour le couple CH_4/O_2 , les simulations LES 3D du RDE annulaire reproduisent quantitativement les résultats expérimentaux sur la structure et la vitesse des systèmes d'ondes de combustion et de chocs. Elles confirment la bonne qualité du mélange et la faible fraction qui en est consommée par les déflagrations parasites, expliquant de fait l'obtention de hautes vitesses expérimentales de détonation. Cette étude démontre que la méthodologie d'anticipation numérique suivie est désormais en capacité de servir à la conception des systèmes d'injection nécessaires pour obtenir de bonnes performances de RDE, tout en respectant les contraintes industrielles de sécurité et de fabrication.

Mots-clés Combustion à gain de pression, moteur à détonation rotative, prémélange partiel, simulation des grandes échelles, moteurs-fusées, méthane, hydrogène

Télécharger la thèse : <https://theses.fr/2024ESMA0022>

Jean-Michel Klein

Thèse soutenue le 25 juin 2024 à Palaiseau

ED 609 (SIMME) - Sciences et Ingénierie des Matériaux, Mécanique, Énergétique -
Université de Poitiers

Encadrement

Département Multiphysique pour l'Énergétique (DMPE), ONERA Palaiseau

Direction de thèse : Arnaud Mura, CNRS/Pprime

Autres : Aurélien Genot, Axel Vincent-Randonnier, ONERA/DMPE

Jury

Pierre Boivin, CNRS/M2P2, Aix-Marseille université

Franck Richecoeur, EM2C, CentraleSupélec

Françoise Baillot, Université de Rouen

Alexis Giauque, LMFA - École centrale de Lyon

Financement DGA/AID, ONERA

Contact aurelien.genot@onera.fr

Résumé La conception des futurs statoréacteurs bénéficierait d'une meilleure compréhension des instabilités de combustion dans les écoulements rapides présentant des recirculations : une problématique étudiée à l'ONERA avec le banc MICAEDI de l'ONERA. Une flamme de prémélange méthane-air s'y établit au voisinage d'une marche descendante, dans un environnement ayant des similitudes avec les foyers de statoréacteurs. En certains points de fonctionnement, d'importantes oscillations de pression accompagnées de remontées de flammes (*flashbacks*) périodiques y apparaissent sous l'effet de l'excitation de modes acoustiques longitudinaux. Le code CEDRE restitue ces instabilités, les analyse et en améliore la compréhension. Une méthodologie de post-traitement (BEP) a été appliquée d'abord dans le cas d'une flamme de prémélange unidimensionnelle forcée acoustiquement. La dynamique de la flamme y est décrite au travers d'une loi d'échelle au moyen

de deux nombres adimensionnels : (i) un nombre de Strouhal associé aux mouvements de la flamme, qui compare son amplitude de battement à l'épaisseur de flamme laminaire et (ii) l'amplitude de la perturbation en vitesse adimensionnée par la vitesse de propagation de flamme laminaire. Sont ensuite réalisées des simulations numériques aux grandes échelles de flammes. En 2D, une telle approche permet de restituer à moindre coût une dynamique de combustion similaire à celle observée sur le banc MICAEDI. Une étude de sensibilité conduite sur les principaux paramètres opératoires met en évidence les processus associés au développement d'instabilités de combustion et à l'apparition de *flashbacks*. Il apparaît que la rétroaction entre des modes acoustiques longitudinaux et les oscillations du front de flamme sont favorisées si la symétrie des plissements de la flamme est rompue par l'action de la bulle de recirculation s'établissant au pied de la marche descendante. Ce mécanisme est favorisé si le mode acoustique présente un nœud de vitesse au niveau de la marche descendante et si sa fréquence est basse et/ou proche de la fréquence caractéristique de l'instabilité de Kelvin-Helmholtz. Des oscillations peuvent également apparaître à de plus basses fréquences lors du battement du point de raccordement de la flamme à la paroi supérieure. Ces oscillations peuvent provoquer des *flashbacks* suivant deux mécanismes: (i) synchronisation entre les oscillations des modes acoustiques et les détachements périodiques de la bulle de recirculation s'élevant au-dessus de la marche, bloquant la flamme et la faisant temporairement remonter en amont, avant d'être convectée plus en aval et (ii) action de la flamme qui, lors de sa propagation dans la couche limite à de basses fréquences, y cause son décollement et favorise ainsi l'apparition de nouveaux *flashbacks* à plus hautes fréquences. Si les détachements de la bulle provoquent des *flashbacks* pour des niveaux importants d'oscillations de vitesse (la direction de l'écoulement est proche de s'inverser, voire s'inverse périodiquement), les remontées de flamme par la couche limite sont susceptibles d'apparaître pour des niveaux d'oscillation plus modérés. Pour les simulations 3D, une géométrie représentative du foyer MICAEDI permet une restitution fine des instabilités observées (figure). Le cycle limite ainsi obtenu présente de nombreuses similitudes avec les données expérimentales. Les principaux mécanismes analysés en 2D sont également retrouvés sur ce cas 3D assurant une modélisation plus fidèle de la turbulence et de l'acoustique, validant ainsi l'ensemble de l'approche suivie dans cette étude.

Mots-clés Bilans d'énergies des perturbations, instabilités thermoacoustiques, remontées de flamme, stimulations numériques aux grandes échelles, combustion turbulente

Télécharger la thèse : <https://theses.fr/2024ESMA0012>

Sebastian Milu-Vaideseگان

Thèse soutenue le 29 janvier 2024 à Toulouse

ED 468 (MEGEP) - Mécanique, Énergétique, Génie civil, Procédés - Université de Toulouse

Encadrement

Département Multiphysique pour l'Énergétique (DMPE), ONERA Toulouse

Direction de thèse : Pierre Millan, ONERA/DMPE ;

Marc Bellenoue, ISAE-Ensma/Pprime

Autres : Mikaël Orain, ONERA/DMPE

Jury

Christine Rousselle, Prisme, Université d'Orléans

Cédric Galizzi, INSA Lyon

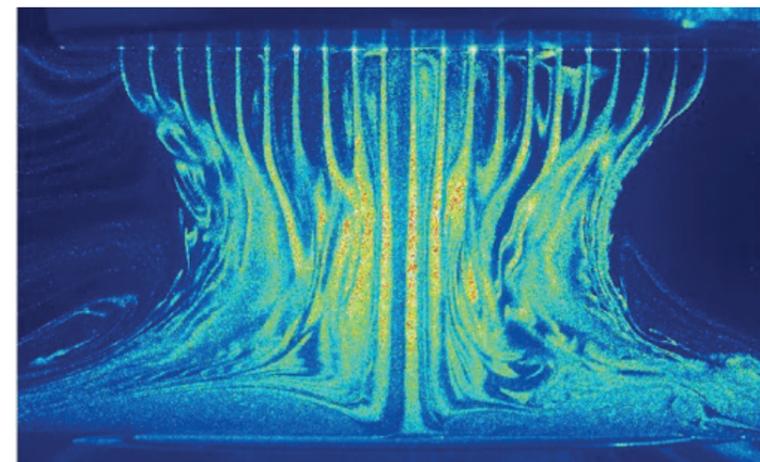
Céline Morin, Université Polytechnique Hauts-de-France

Julien Sotton, ISAE-Ensma/Pprime

Financement ONERA

Contact mikael.orain@onera.fr

Résumé La réduction de l'empreinte carbone du secteur aéronautique requiert une amélioration constante des foyers aéronautiques. Certains motoristes ont opté pour la conception de chambres de combustion plus compactes ayant la particularité de subir une injection de carburant vers les parois. Cette configuration d'injection entraîne la formation d'un front de flamme au niveau du film de refroidissement pariétal. Ces écoulements d'air frais introduits dans la chambre de combustion sous la forme de multi-perforation peuvent perturber la structure de la flamme et influencer les réactions chimiques d'oxydation du carburant. Ils sont donc de nature à modifier la production des polluants, en figeant les réactions (production de CO) où en apportant de l'air frais aux zones de sur-richesse (production de NOx). En retour, l'aérodynamique interne au foyer peut perturber l'efficacité du refroidissement que ces écoulements doivent assurer. Étudier cette interaction est donc capital pour maîtriser les émissions de polluants et optimiser la durée de vie du moteur. Pour caractériser l'influence de la richesse et du débit d'air de refroidissement sur le front de flamme à proximité d'une paroi multi-perforée, un banc d'essai académique CH₄/air a été mis en place. La caractérisation de l'écoulement en proximité de la paroi refroidie a été réalisée à l'aide de mesures PIV. La présence de fronts de flamme au niveau des jets de refroidissement issus de la paroi a été mise en évidence par PLIF-OH. Des simulations numériques 3D RANS du montage expérimental ont été réalisées avec le code CEDRE en utilisant un mécanisme de cinétique chimique réduit et des comparaisons ont été effectuées avec des calculs 1D issus de Cantera pour vérifier la prédictibilité du solveur et calibrer les mesures expérimentales.



Jets de refroidissement sortant d'une plaque multi-perforée positionnée au-dessus d'un brûleur McKenna.

Mots-clés Combustion, multi-perforation, PIV, PLIF-OH

Télécharger la thèse : <https://theses.fr/2024ESAE0006>

Magdeleine Airiau

Thèse soutenue le 8 octobre 2024 à Gif-sur-Yvette

ED 580 (STIC) - Sciences et Technologies de l'Information et de la Communication - Paris-Saclay

Encadrement

Département Multiphysique pour l'Énergétique (DMPE), ONERA Palaiseau

Direction de thèse : Adrien Chan-Hon-Tong, ONERA/DTIS ;
Robin Devillers, ONERA/DMPE

Jury

Léo Courty, Université d'Orléans

Benjamin Pannetier, CS Group

Catherine Achard, Sorbonne Université

Fabien Halter, Université d'Orléans

Achraf Dyani, Cnes

Financement Cnes, ONERA

Contact robin.devillers@onera.fr

Résumé L'aluminium ajouté à la composition du propergol solide augmente les performances propulsives mais peut entraîner des phénomènes néfastes tels que des instabilités thermo-acoustiques conduisant à des oscillations de pression. La caractérisation de l'aluminium en combustion au-dessus de la surface du propergol est donc essentielle pour étudier la stabilité du moteur fusée. De nombreux travaux ont été réalisés pour prédire ces instabilités par le calcul. Cependant, ces modèles numériques manquent de données d'entrées précises, telles que la taille des gouttes d'aluminium et leur vitesse initiale. Ces données sont particulièrement compliquées

à obtenir expérimentalement, compte tenu des conditions de combustion. Une forte sensibilité des simulations aux données d'entrée induit un besoin de mieux connaître les incertitudes sur les tailles et vitesses estimées. Des essais réalisés depuis des années à l'ONERA en ombroscopie permettent de visualiser à haute cadence des échantillons de propergol en combustion montrant les gouttes d'aluminium. Les images montrent de nombreux objets en mouvement dans l'écoulement gazeux. Plusieurs méthodes d'analyse d'images ont été proposées ces dernières années, et dans la thèse de M. Nugue, une approche à partir de réseaux de neurones par apprentissage profond a été utilisée pour la première fois. La présente étude porte sur le développement d'outils, notamment par *deep learning*, pour analyser les images expérimentales issues du montage d'ombroscopie et ainsi obtenir en grand nombre des données telles que les diamètres et les vitesses des gouttes d'aluminium. Une première partie confronte deux méthodes de l'état de l'art pour la sélection automatique d'objets dans une image : la segmentation sémantique avec le réseau U-Net et la segmentation d'instance avec le réseau Mask R-CNN. La supériorité de ce dernier est alors démontrée, avec une détection plus efficace et des résultats plus proches de la taille réelle des gouttes. Cette partie met cependant en lumière que les réseaux de neurones actuels ne prennent pas bien en compte la répartition des tailles des gouttes, un point crucial pour cette thèse. Pour obtenir un compromis efficace entre une détection de qualité et une représentation précise des distributions de diamètre, une deuxième partie introduit une méthode de stabilisation de la distribution de taille des gouttes d'aluminium détectées. Ce réseau fonctionnant avec une fonction de perte modifiée équilibre mieux les détections des grandes et petites gouttes dans le but d'obtenir une représentation plus juste de la population des gouttes. Une méthode de suivi des gouttes, utilisant le tracking multi-objets et un filtre de Kalman, est développée. Leurs trajectoires sont ensuite rigoureusement triées, pour en extraire de nombreuses trajectoires fiables (de 500 à 1500 par essai). Enfin, une dernière partie analyse les données de vitesse et de diamètre des gouttes, obtenues par la chaîne de détection et de suivi, pour des pressions de 6,8 à 26,6 bar, regroupant plus de 6000 trajectoires fiables. Les résultats montrent une faible dépendance de la vitesse initiale des gouttes à la pression, contrairement au diamètre qui est plus impacté. Une simulation numérique 1D de combustion utilisant ces données détaillées permet une estimation plus précise de la localisation du dégagement de chaleur des gouttes, par rapport à une simulation utilisant un seul diamètre caractéristique. Ce travail démontre l'efficacité de l'apprentissage profond pour l'analyse d'images expérimentales et son utilité pour la propulsion solide.

Mots-clés Mécanique des fluides, propulsion solide, combustion, aluminium, IA, *deep learning*, suivi d'objets

Benjamin Etchebarne

Thèse soutenue le 27 novembre 2024 à Châtillon

ED 609 (SIMME) - Sciences et Ingénierie des Matériaux, Mécanique, Énergétique

Encadrement

Département Aérodynamique, aéroélasticité, acoustique (DAAA), ONERA Châtillon

Direction de thèse : Vincent Valeau, Université de Poitiers

Autres : Sandrine Fauqueux, Mathieu Lorteau, ONERA/DAAA ;
David Marx, CNRS

Jury

Quentin Leclere, INSA, Lyon

Emmanuel Perrey-Debain, Université de Technologie de Compiègne

Gwenaël Gabard, Le Mans Université

Joachim Golliard, Almacoustic, Le Mans

Emmanuel Julliard, Airbus, Toulouse

Financement Clean Sky 2 (Advanced Engine and Aircraft Configurations)

Contact sandrine.fauqueux@onera.fr

Résumé L'augmentation du taux de dilution des turboréacteurs d'avion a permis de réduire le bruit associé au jet, faisant du bruit issu de la soufflante mise en rotation à l'intérieur de la nacelle la principale source acoustique. D'un point de vue expérimental, les mesures autour de ces systèmes nécessitent l'utilisation de réseaux de microphones répartis sur la surface de la nacelle et positionnés en affleurement de la paroi interne pour effectuer des mesures non intrusives. Cette approche présente des limitations dans la liberté de placement des microphones, car l'élargissement des nacelles se traduit par un raccourcissement de leur longueur pour limiter la masse du dispositif propulsif. Cette thèse évalue la faisabilité d'une méthode expérimentale permettant de caractériser le contenu modal dans la nacelle (ici simplifiée par un conduit bafflé débouchant dans un espace infini) au moyen d'une antenne microphonique externe, dans une configuration où la génération de la source, sa propagation ainsi que son rayonnement vers l'extérieur sont maîtrisés. Une configuration d'étude est déterminée afin de limiter la complexité des phénomènes acoustiques impliqués. Une méthode de caractérisation de source par déconvolution modale est mise en place, incluant la modélisation de la propagation acoustique en conduit ainsi que du rayonnement externe. Cette méthode est appliquée sur des données provenant de simulations numériques pour validation sous différentes configurations, tenant compte d'un dispositif expérimental où le positionnement des microphones dans le champ externe est optimisé. La méthode de déconvolution modale est ensuite appliquée à des données issues d'une campagne expérimentale autour du dispositif d'étude. Par l'utilisation d'une antenne interne, des résultats de référence sont obtenus concernant les composantes azimutales et radiales du champ acoustique modal. En raison des différences notables entre les résultats de référence et les estimations, des pistes d'étude sont explorées, notamment une analyse des effets de montage des microphones externes dans le dispositif, ainsi que d'autres effets potentiels ne respectant pas les conditions théoriques et compromettant les hypothèses du modèle initial de propagation en conduit et de rayonnement externe.

Mots-clés Sources acoustiques en conduit, antennerie externe, fonction de Green, problème inverse, déconvolution modale, antennerie numérique, évaluation expérimentale, influence des contraintes expérimentales.

Télécharger la thèse : <https://theses.fr/s405027>

Philippe Farjon

Thèse soutenue le 29 novembre 2024 à Toulouse

ED 467 (AA) - Aéronautique Astronautique - Toulouse

Encadrement

Département Multiphysique pour l'Énergétique (DMPE), ONERA Toulouse

Direction de thèse : Jérôme Morio, ONERA/DTIS ; Nicolas Bertier, ONERA/DMPE

Autres : Sylvain Dubreuil, ONERA/DTIS

Jury

Vincent Moureau, CORIA

Régis Duvigneau, INRIA

Delphine Sinoquet, IFPEN

Thierry Poinso, CERFACS, IMFT

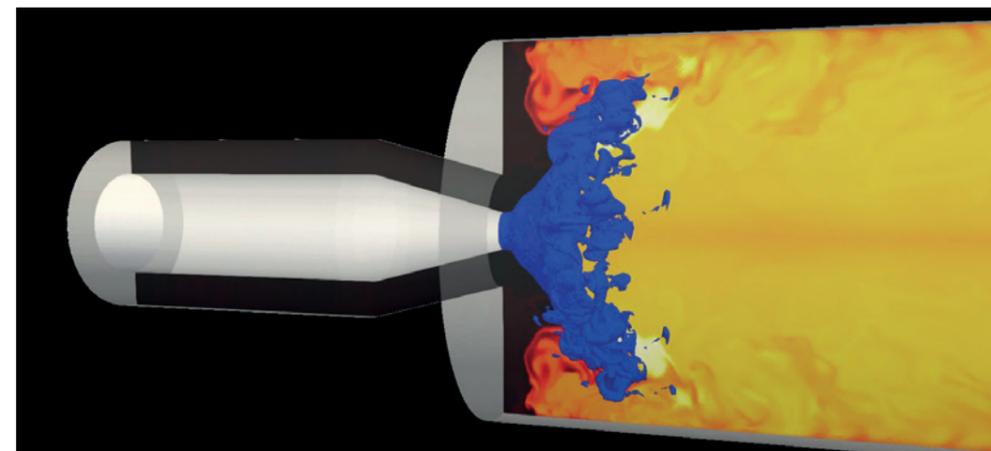
François Jouve, Université Paris-Cité

Financement Région Occitanie, ONERA

Contact nicolas.bertier@onera.fr

Résumé La nécessité de diminuer l'impact climatique de l'aviation pousse les avionneurs à réfléchir à de nouvelles technologies pour décarboner l'aviation. En ce qui concerne la propulsion, l'une des alternatives envisagées à l'utilisation du kérosène est de brûler de l'hydrogène. Ce changement de carburant permettrait de ne pas produire de CO₂ mais implique des modifications profondes au niveau des injecteurs de la chambre de combustion. Historiquement, les différentes technologies d'injection ont été développées par essais-erreurs. Ce processus de conception a

permis des avancées majeures, mais manque de généralité et ne garantit pas l'obtention d'un injecteur optimal. Aujourd'hui, profitant de l'augmentation des moyens numériques, il est possible d'envisager l'utilisation massive de la CFD couplée avec des techniques d'optimisation pour concevoir et développer les nouvelles générations de chambres de combustion qui fonctionneront à l'hydrogène. Dans ce travail de thèse, une nouvelle méthode de conception est proposée afin de concevoir des injecteurs H₂-air. Dans un premier temps, il est nécessaire de commencer par trois étapes préliminaires. À partir d'une version de base de l'injecteur PHYDROGENE (banc MICADO, ONERA Palaiseau) que l'on cherche à améliorer, différentes méthodologies CFD sont comparées à des simulations de référence pour trouver le meilleur compromis précision / temps de restitution. Cette comparaison nous mène à retenir une approche haute fidélité utilisant des simulations LES et une approche basse fidélité basée sur des simulations RANS. En parallèle, une chaîne de calcul automatique est conçue pour faciliter la mise en pratique de la méthode de conception. Ensuite, la dernière étape préliminaire consiste à vérifier l'applicabilité d'une stratégie multi-fidélité, stratégie ayant le potentiel de réduire le coût total de l'optimisation. À la suite de ces étapes préliminaires, plusieurs études d'optimisation à deux et quatre paramètres sont menées afin de déterminer l'algorithme d'optimisation le plus performant à iso-budget entre différentes méthodes d'optimisation bayésienne. Cette comparaison entre les différentes études montre les capacités et limites des algorithmes sélectionnés à identifier des injecteurs prometteurs.



Iso-surface de taux de dégagement de chaleur instantané superposée au champ de température instantanée pour une géométrie optimisée de l'injecteur PHYDROGENE.

Mots-clés Hydrogène, combustion, optimisation bayésienne, CFD, métamodèle

Télécharger la thèse : <https://theses.fr/s299474>

Leonardo Geiger

Thèse soutenue le 9 décembre 2024 à Saint-Étienne-du-Rouvray

ED 591 (PSIME) - Physique, Sciences de l'Ingénieur, Matériaux, Énergie, Normandie Université

Encadrement

Département Multiphysique pour l'Énergétique (DMPE), ONERA Palaiseau

Direction de thèse : Christophe Dumouchel, Jean-Bernard Blaisot, CORIA

Autres : Marie Théron, Cnes ; Nicolas Fdida, Luc-Henry, ONERA/DMPE

Jury

Nicolas Rimbert, LEMTA

Nathanael Machicoane, LEGI

Fabien Halter, ICARE

Thibaut Ménard, CORIA

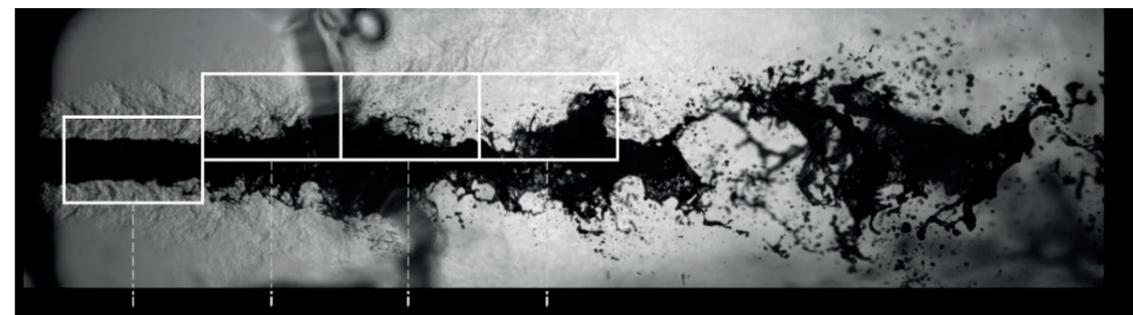
Financement Cnes, ONERA

Contact nicolas.fdida@onera.fr

Résumé Le développement des moteurs-fusées destinés à équiper les futurs lanceurs nécessite une meilleure compréhension des phénomènes physiques complexes qui régissent leur fonctionnement. Dans le cas des moteurs-fusées à ergols liquides, la demande croissante pour des moteurs pouvant être rallumés de manière fiable dans l'espace impose une profonde compréhension des phases transitoires, telles que le démarrage et l'arrêt. Ces phases transitoires incluent généralement des régimes d'injection sous-critiques. L'oxygène est injecté à l'état liquide dans la chambre de combustion et subit une série de mécanismes : atomisation du jet dense, fragmentation des ligaments liquides, évaporation des gouttelettes et combustion turbulente. Dans ces conditions, le processus de combustion est principalement gouverné par

Analyse multi-échelle de l'atomisation d'oxygène liquide dans les flammes cryogéniques des moteurs-fusées à ergols liquides

L'atomisation de l'oxygène liquide, qui doit être reproduite avec précision par simulation afin de mieux comprendre son rôle dans l'apparition des instabilités de combustion. Avant d'utiliser la simulation comme un outil autonome pour étudier le processus d'atomisation, il est nécessaire d'assurer son niveau de précision. Cela nécessite de mener des campagnes d'essais expérimentaux sur des bancs d'essais capables de reproduire des conditions représentatives de moteurs-fusées, tels que le banc d'essai MASCOTTE à l'ONERA ou le banc d'essai MARACA au CORIA. L'objectif est de caractériser le processus d'atomisation et de fournir des données expérimentales qui peuvent être utilisées pour développer et valider des modèles numériques. L'étude expérimentale de l'atomisation primaire de l'oxygène liquide repose en particulier sur des techniques de visualisation des écoulements, qui permettent de représenter les structures liquides impliquées dans le processus. Le processus d'atomisation primaire observé dans les moteurs-fusées à ergols liquides peut être catégorisé comme textuel ou structurel, selon l'échelle à laquelle se produit l'atomisation. Les processus d'atomisation textuelle se caractérisent par le détachement de fins ligaments du jet, tandis que l'atomisation structurelle est liée à la rupture du volume liquide principal. Les visualisations issues de campagnes d'essais expérimentaux révèlent des écoulements diphasiques très complexes impliquant des systèmes liquides texturaux difficiles à caractériser en raison de leur large gamme d'échelles spatiales et temporelles. À ce jour, aucune technique n'est disponible pour décrire quantitativement les ligaments liquides impliqués dans ces processus d'atomisation textuelle observés expérimentalement. Dans cette thèse, une méthodologie est développée pour caractériser les processus d'atomisation primaire textuelle observés dans des conditions d'écoulement diphasique représentatives de celles rencontrées dans les moteurs-fusées à ergols liquides. Basée sur une méthode multi-échelle développée au CORIA, cette analyse fournit une caractérisation quantitative de la taille, de la forme et du nombre des structures liquides texturales impliquées dans le processus d'atomisation textuelle sur toute sa gamme d'échelles spatiales. Cette caractérisation fournit des données pour le développement de modèles numériques d'atomisation primaire. En outre, l'application de cette méthodologie à des systèmes liquides décrits par des visualisations extraites de simulations numériques permet de valider les résultats de simulation en termes de leur reproduction des structures liquides participant au processus d'atomisation textuelle.



Mots-clés Atomisation textuelle, description multi-échelles, turbulence, moteurs-fusées à ergols liquides

Télécharger la thèse : <https://theses.fr/2024NORMR062>



Normandie Université



Michele Romanelli

Thèse soutenue le 12 décembre 2024 à Bordeaux

ED 039 (EDMI) - Mathématiques et Informatique de Bordeaux

Encadrement

Département Aérodynamique, aéroélasticité, acoustique (DAAA), ONERA Meudon

Direction de thèse : Héloïse Beaugendre, Michel Bergmann, INP Bordeaux

Autres : Denis Sipp, Samir Beneddine, Ivan Mary, ONERA/DAAA

Jury

Raphaël Loubère, IMB, Bordeaux

Pierre Sagaut, Université d'Aix-Marseille

Lars Davidson, Université de Technologie, Chalmers

Camilla Fiorini, CNAM

Financement Région Nouvelle Aquitaine

Contact samir.beneddine@onera.fr

Résumé Les simulations aux équations de Navier-Stokes moyennées (RANS) sont largement utilisées dans le domaine industriel. Cependant, leur précision dépend fortement de la solution des écoulements en proche paroi, nécessitant typiquement un maillage très fin pour capturer correctement les forts gradients se développant dans la couche limite. Cela entraîne un impact considérable sur le coût de calcul de la simulation. Les lois de paroi permettent d'alléger ces calculs en remplaçant la résolution coûteuse de la couche limite par une modélisation. Dans ce contexte, des approches basées sur l'apprentissage profond sont explorées et la flexibilité des réseaux de neurones offre un potentiel indéniable dans la modélisation des écoulements pariétaux. Ce travail vise à développer une loi de paroi basée sur l'apprentissage profond qui peut reproduire avec précision l'évolution de la région interne de la couche limite, fournissant ainsi des conditions aux limites valables pour les calculs RANS se déroulant loin de la paroi. Une approche préliminaire consiste à entraîner un réseau de neurones sur des données résolues jusqu'à la paroi pour reconstruire des profils de vitesse adimensionnelle et modéliser l'évolution de la couche limite. Conformément aux lois de paroi analytiques, la vitesse est fonction de la distance à la paroi et du gradient de pression. Ces variables sont adimensionnalisées à l'aide d'une vitesse de frottement caractéristique, qui est estimée de manière itérative à l'aide d'un algorithme de Newton-Raphson. Pour réduire le coût associé à l'estimation itérative de la contrainte visqueuse à la paroi, une nouvelle approche entièrement basée sur l'apprentissage profond a été développée. Elle impose directement le frottement à l'interface entre la région modélisée et le calcul RANS, fixant la dérivée normale du champ de vitesse, qui est estimée à l'aide de deux réseaux de neurones interconnectés : l'un estimant la contrainte de cisaillement à la paroi et l'autre évaluant la dérivée adimensionnelle de la vitesse. Les réseaux de neurones sont entraînés sur des simulations RANS entièrement résolues d'écoulements turbulents sur diverses géométries de bosses bidimensionnelles. Les performances, en termes de précision et coût computationnel, de ce modèle sont ensuite comparées à des calculs résolus jusqu'à la paroi pour des configurations d'écoulements non incluses dans le jeu de données d'entraînement.

Mots-clés Dynamique des fluides numérique, RANS, loi de paroi, apprentissage profond

Télécharger la thèse : <https://theses.fr/2024BORD0358>

Léo Walter

Thèse soutenue le 20 décembre 2024 à Toulouse

ED 468 (MEGEP) - Mécanique, Énergétique, Génie civil, Procédés - Toulouse

Encadrement

Département Multiphysique pour l'Énergétique (DMPE), ONERA Toulouse

Direction de thèse : Jérôme Fontane, ISAE-Supaero ; David Donjat, ONERA/DMPE

Autres : Olivier Léon, ONERA/DMPE ; Gabriele Nastro, ISAE-Supaero

Jury

Fabien Anselmet, École Centrale Marseille

Franco Auteri, Politecnico di Milano

Peter Jordan, Université de Poitiers

Pierre Brancher, IMFT

Financement ISAE

Contact david.donjat@onera.fr

Résumé L'objectif de cette thèse est d'étudier les mécanismes physiques qui gouvernent l'évolution et le mélange des jets latéraux au sein des jets légers. Les jets latéraux consistent en des éjections radiales de fluide du jet, et augmentent drastiquement l'interface de mélange entre le jet et le milieu ambiant. Les mécanismes physiques qui conduisent à la génération des jets latéraux, ainsi que leur effet sur le mélange, ne sont pas entièrement compris. Ainsi, nous étudions à travers une analyse numérique les structures qui se développent lors du développement des jets densité à faible densité afin d'avoir une meilleure compréhension des mécanismes à l'origine des jets latéraux. Nous étudions ensuite la structure des jets latéraux par BOS3D. Cette technique expérimentale se base sur la mesure de déviation des rayons lumineux par le jet léger, et permet de reconstruire des champs 3D de masse volumique. L'analyse de ces champs permet ensuite l'étude du mélange induit par les jets latéraux.

Mots-clés *Background oriented schlieren* tomographique, stabilité non-modale, 3DBOS, jets latéraux, jet à faible densité

Boris Aguilar

Thèse soutenue le 19 janvier 2024 à Toulouse

ED 468 (MEGEP) - Mécanique, Énergétique, Génie civil, Procédés - Toulouse

Encadrement

Département Multiphysique pour l'Énergétique (DMPE), ONERA Toulouse

Direction de thèse : Pierre Trontin, Université Claude Bernard Lyon 1 ;
Philippe Delpech, ISAE-Ensma

Autres : Philippe Villedieu, ONERA/DMPE

Jury

Aurore Naso, Centrale Lyon

Alfons Schwarzenboeck, CNRS, Université Clermont Auvergne

Stephan Bansmer, Politecnico di Milano

Christophe Josserand, CNRS, Institut Jean le Rond d'Alembert

Fabien Dezitter, Airbus

Financement CIFRE Airbus Hélicoptères

Contact Philippe.Villedieu@onera.fr

Résumé Pour garantir la sécurité des vols dans des conditions de neige, les constructeurs d'aéronefs doivent démontrer que chaque moteur et son système d'admission d'air peuvent fonctionner sur toute la plage de puissance de vol du moteur (y compris au ralenti) dans des conditions neigeuses. Cette étude fait partie d'un effort visant à développer des modèles pour l'accumulation de neige. Pour établir le cadre de départ de ce travail sur la modélisation du givrage de la neige,

Étude expérimentale et modélisation numérique des phénomènes d'accrétion de particules de neige sur des structures aéronautiques ou de génie civil

le chapitre 1 est consacré à une revue de la littérature organisée en trois parties : (i) les différents processus de création de neige dans l'atmosphère ; (ii) la modélisation du givrage des cristaux de glace, point de départ de ce travail du point de vue de la modélisation ; (iii) moyens expérimentaux actuels pour mesurer les conditions de neige et les avantages et inconvénients associés. Dans le chapitre 2, nous étudions les modèles de traînée adaptés au cas des flocons de neige pour calculer les trajectoires des particules. Comme mentionné dans l'état de l'art, les modèles classiques développés pour les particules non-sphériques s'avèrent suffisamment précis pour les cristaux de glace. L'objectif est double. D'une part, il s'agit de vérifier que les modèles valables pour les cristaux de glace le sont également pour les flocons de neige, qui sont en fait des agrégats de particules, beaucoup plus grands et de forme géométrique complexe. D'autre part, les modèles de traînée proposés doivent être compatibles avec le type de données d'entrée. Par exemple, à la fin d'une campagne d'essais en vol, les particules ne peuvent être décrites qu'à l'aide d'images 2D, ce qui est loin d'une description 3D complète et détaillée du flocon de neige. Compte tenu du niveau de précision des données d'entrée utilisées pour décrire la particule, l'objectif de ce chapitre est de proposer des modèles de traînée basés sur une description géométrique simple et limitée des flocons de neige. Ce chapitre a été publié dans une revue à comité de lecture. Le chapitre 3 est l'équivalent du chapitre 2 pour l'adaptation des modèles de transfert de chaleur et de masse aux flocons de neige. Le processus de fusion d'un flocon de neige transporté par un flux d'air chaud est étudié. Une fois de plus, l'exigence est double. D'une part, il s'agit de vérifier si les modèles développés pour les cristaux de glace peuvent être facilement étendus au cas des flocons de neige. D'autre part, proposer des modèles pour lesquels la complexité des données d'entrée est compatible avec le niveau de précision des bases de données. Pour rappel, les descriptions 3D des flocons de neige sont rares et difficiles à obtenir. Dans de nombreux cas, une seule image 2D de la particule issue d'une campagne d'essais en vol est disponible. Dans ce chapitre, l'accent est mis sur la description de la densité apparente de la particule, et en particulier sur son évolution au cours du processus de fusion. En effet, la densité apparente peut varier considérablement, de quelques kg/m^3 pour la particule sèche à 997 kg/m^3 pour la gouttelette d'eau résultant du processus de fusion. Ce chapitre a été publié dans une revue à comité de lecture. A l'issue des chapitres 2 et 3, des modèles ont été proposés pour la trajectoire des paillettes et pour le suivi du processus de fusion. Il est ainsi possible d'estimer la localisation de l'impact et la quantité d'eau transportée par les flocons. L'étape physique suivante concerne l'accrétion des particules de neige. Les données expérimentales seront utilisées pour valider ou améliorer les modèles d'accrétion des cristaux de glace. À notre connaissance, aucune base de données traitant de l'accrétion de la neige dans des conditions aéronautiques n'a été mise à disposition jusqu'à présent dans la littérature. C'est dans cette optique que ce chapitre traite de la conception et de la réalisation de ces essais d'accrétion de neige. Une première comparaison avec les simulations numériques du code de givrage IGL002D de l'ONERA sera également proposée.

Mots-clés Givrage, accrétion de neige, agrégat, traînée, fonte, reconstruction de la densité apparente

Télécharger la thèse : <https://theses.fr/2024ESAE0003>

Thomas Alary

Thèse soutenue le 12 février 2024 à Toulouse

ED 468 (MEGEP) - Mécanique, Énergétique, Génie civil, Procédés - Toulouse

Encadrement

Département Multiphysique pour l'Énergétique (DMPE), ONERA Toulouse

Direction de thèse : Pierre Trontin, Université Claude Bernard Lyon 1

Autres : Baptiste Déjean, ONERA/DMPE

Jury

Guillaume Castanet, LEMTA

Thomas Séon, Institut d'Alembert

Dominique Legendre, IMFT

Hugo Pervier, Cranfield University

Financement Région Occitanie, ONERA

Contact virginel.bodoc@onera.fr

Résumé La sécurité des vols est un prérequis en aéronautique et le givrage est une des principales sources d'incidents. L'accrétion de givre, créée lors de la collision de gouttes d'eau surfondues présentes dans les nuages, peut détériorer les performances aérodynamiques de l'aéronef, obstruer des capteurs ou endommager les moteurs. Il est donc essentiel de comprendre le phénomène d'impact de gouttes d'eau en conditions givrantes pour pouvoir prédire la quantité de glace qui peut se former et assurer un dimensionnement suffisant des systèmes de protection contre le givre. Ce phénomène a largement été étudié dans la littérature mais seulement pour de faibles vitesses d'impact de goutte. La nouvelle soufflerie givrante de l'ONERA a permis d'accéder à des régimes d'impact de gouttes plus en accord avec la réalité rencontrée par les aéronefs. Cette thèse se concentre sur l'impact de goutte d'eau sur une paroi pour des nombres de Weber et de Reynolds qui varient respectivement de 15 000 à 170 000 et de 11 000 à 45 000. L'étude de l'impact des gouttes d'eau a été réalisée grâce à un système de détection et de visualisation puis avec un Phase Doppler Analyser pour caractériser les gouttes secondaires créées lors de l'impact. L'impact sur une surface sèche et horizontale a été étudié mais d'autres paramètres tels que l'angle d'impact, l'état de surface, la pression du gaz, la température ont été étudiés pour quantifier leurs influences sur le splashing. Il a été montré que pour les gammes de nombres de Reynolds et de Weber investiguées, le résultat du splashing dépend des propriétés de la surface mais également des propriétés de l'air. Une faible pression d'air ou la présence de givre sur la paroi favorise la formation d'une couronne de fluide qui se décolle après l'impact. La campagne de mesure avec le PDA a permis de montrer que les gouttes secondaires générées lors d'un corona splash sont plus grosses que lors d'un prompt splash. Le modèle d'impact de Riboux et Gordillo, qui attribue le splashing à une force aérodynamique s'exerçant sur le fluide qui s'étale lors de l'impact, permet de bien décrire le splashing. Une seconde campagne de mesures se concentrant sur les formes de glace obtenues lors de l'impact de SLD a permis de valider les nouvelles constantes du modèle de taux de dépôt de Trontin et Villedieu déterminer grâce à de nouvelles données de la littérature.



Mots-clés Goutte, impact, surfusion

Télécharger la thèse : <https://theses.fr/2024ESAE0008>

Bastien Delacroix

Thèse soutenue le 22 janvier 2024 à Toulouse

ED 468 (MEGEP) - Mécanique, Énergétique, Génie civil, Procédés - Toulouse

Encadrement

Département Multiphysique pour l'Énergétique (DMPE), ONERA Toulouse

Direction de thèse : Philippe Villedieu, Claire Laurent, ONERA/DMPE

Autres : Maxime Bouyges, Ghislain Blanchard, ONERA/DMPE

Jury

Christian Ruyer-Quil, LOCIE, Université Savoie Mont-Blanc

Arnaud Antkowiak, FCIH, Sorbonne Université

Raphaël Loubère, IMB, Université de Bordeaux

Anne Gosset, Université de La Corogne

Financement ONERA

Contact claire.laurent@onera.fr

Résumé Pourquoi une goutte d'eau a-t-elle tendance à prendre la forme d'une sphère ? Pourquoi reste-t-elle accrochée sur sa feuille lors de la rosée du matin ? Pourquoi, au contraire, ruisselle-t-elle jusque sur le sol ? Toutes ces questions en apparence simplistes font appel à des phénomènes microscopiques très complexes dont la nature physique est encore aujourd'hui sujet à débat. Leur compréhension est cependant un enjeu majeur pour de nombreuses applications industrielles. C'est notamment le cas en aéronautique où un film mince se forme sur l'aile suite au passage d'un aéronef au travers d'un nuage ou après une opération de dégivrage. L'évolution de la surface mouillée du film modifie directement les transferts thermiques à la paroi qui sont dimensionnants pour les dégivreurs thermiques et joue également sur les formes de regel un peu plus loin en dehors des zones de protection lorsque le film transitionne

en ruisselets en amont. Or, le mouillage n'est classiquement pas pris en compte dans les outils de simulations ; ou alors de manière rudimentaire via des corrélations empiriques. C'est pourquoi il est nécessaire d'améliorer les outils existants en développant de nouveaux modèles capables de prendre en compte l'influence des forces capillaires à l'échelle macroscopique, notamment au niveau de la ligne triple.

L'objectif général de cette étude est donc le développement d'un modèle adapté à la simulation à grande échelle d'écoulements de films minces partiellement mouillants.

Dans cette optique, une approche basée sur un système d'équations de type Saint-Venant a été adoptée. Cependant, ce système sous sa forme classique ne permet pas la simulation de films minces avec effet de mouillage partiel. Une solution pour prendre en compte ces effets est d'ajouter une force macroscopique concentrée au niveau de la ligne de contact. Cette force singulière permet de vérifier localement la loi macroscopique de Young-Dupré mais la difficulté est de localiser précisément la ligne triple pour que la force s'applique au bon endroit. Contrairement aux modèles rencontrés dans la littérature qui se basent tous sur l'utilisation d'un paramètre ajustable, permettant de faire la distinction entre zone sèche et zone mouillée, nous proposons ici une approche avec transport d'une fonction couleur. Cette fonction, définie, dans le cas idéal, comme égale à l'unité dans les zones mouillées et nulle dans les zones sèches, présente l'intérêt d'avoir un gradient identiquement nul, sauf au niveau de la ligne triple, ce qui permet de localiser et de régulariser la force lorsque la fonction couleur varie continument de 0 à 1 entre les zones sèches et les zones mouillées.

L'introduction de cette fonction couleur oblige à reformuler en partie le système d'équations de Saint-Venant afin de tenir compte de cette nouvelle fonction dans l'expression des différents termes de forces agissant sur le film. Pour justifier le choix de cette nouvelle formulation, une méthode basée sur une formulation eulérienne du principe de Hamilton a été utilisée. Cette méthode permet d'obtenir une équation de quantité de mouvement avec comme unique point de départ une expression de la densité d'énergie du système en fonction des variables utilisées. Ce nouveau système d'équations, en plus d'être complètement affranchi d'un paramètre de calibration, présente l'avantage d'être complètement hyperbolique dans le cas où les effets de courbure ne sont pas pris en compte. Cela a permis le développement d'un solveur de Riemann de type HLLC pour résoudre numériquement ce système d'équations. Afin de tester la robustesse des modèles physiques et numériques, un ensemble de cas de validation a été mis en place.

Enfin, les termes de courbure ont été pris en compte dans le schéma numérique final permettant d'étendre considérablement le champ d'application de ce nouveau modèle avec fonction couleur. Ainsi des problèmes où les effets capillaires sont prédominants ont pu être simulés.

Mots-clés Mécanique des fluides, CFD, solveur de Riemann, fonction couleur, films minces, ruissellement

Télécharger la thèse : <https://theses.fr/2024ESAE0005>

Melissa Lantelme

Thèse soutenue le 29 mai 2024 à Toulouse

ED 467 (AA) - Aéronautique Astronautique - Toulouse

Encadrement

Département Multiphysique pour l'Énergétique (DMPE), ONERA Toulouse

Direction de thèse : Nathalie Bartoli, ONERA/DTIS ;

François Chedevergne, ONERA/DMPE

Autres : Ysolde Prévereaud, ONERA/DMPE, Sylvain Dubreuil, ONERA/DTIS

Jury

Emmanuel Rachelson, ISAE-Supaero

Marina Olazabal-Loumé, CEA

Thierry Magin, Von Karman Institute

Sebastian Karl, DLR

Financement Marie-Curie ITN

Contact ysolde.prevereaud@onera.fr

Résumé Cette thèse a pour objectif le développement d'une méthode de prévision de la distribution du flux de chaleur surfacique pour les lanceurs réutilisables, spécifiquement adaptée à la phase de conception préliminaire. Lors de la rentrée atmosphérique, les phases de vol hypersonique les plus critiques correspondent aux régimes où les flux de chaleur atteignent leurs valeurs maximales à la surface du véhicule. Dans le cadre des études de conception et de préparation de mission, il est donc essentiel de disposer d'outils performants, à la fois rapides et précis, permettant d'estimer ces flux de chaleur surfaciques. Ces estimations constituent en effet un élément déterminant pour le dimensionnement global du véhicule, le flux de chaleur représentant une donnée d'entrée majeure pour le dimensionnement du

système de protection thermique, l'optimisation de trajectoire ou encore la conception structurelle. L'objectif principal de la thèse est d'évaluer la contribution des méthodes d'apprentissage automatique (*machine learning*) au développement d'un modèle de prévision du flux de chaleur convectif-diffusif à la surface. Pour ce faire, une approche fondée sur l'utilisation successive de deux modèles de substitution est proposée.

Le premier modèle, basé sur les processus gaussiens, vise à effectuer un adimensionnement des variables, permettant ainsi une utilisation du modèle indépendante des conditions de vol et d'altitude. Le second modèle, reposant sur des réseaux de neurones artificiels, établit la corrélation entre les variables d'entrée – à savoir la distribution de pression surfacique et les paramètres géométriques^a et le flux de chaleur en sortie. La méthode proposée a été développée et testée sur l'étage orbital du concept de lanceur réutilisable *SpaceLiner*. Une base de données de simulations Navier–Stokes a été constituée sur un ensemble de points de vol et d'orientations spécifiquement sélectionnés. Le modèle développé est limité aux écoulements hypersoniques laminaires en régime continu. Les variables d'entrée ont été adimensionnées à partir d'équations analytiques existantes ou de transformations mathématiques simples. Concernant le flux de chaleur au point d'arrêt, un modèle de substitution a été élaboré en couplant le modèle de Lepage-Vérant à une approche de krigeage. Cette combinaison a permis d'obtenir une précision remarquable, avec une erreur moyenne relative de 1,9 % par rapport aux résultats issus des calculs CFD. Le réseau de neurones développé pour la prévision du flux de chaleur sur l'ensemble de la paroi a ensuite été entraîné et évalué. Les comparaisons avec les résultats CFD montrent une concordance satisfaisante, aussi bien dans les zones convexes que, partiellement, dans les zones planes, avec une précision équivalente, voire supérieure, à celle des méthodes actuellement disponibles. Par ailleurs, les réseaux de neurones entraînés sur un nombre restreint de points de vol se sont révélés capables d'interpoler et d'extrapoler les résultats vers des conditions voisines. Cependant, dans les régions où le flux de chaleur adimensionné présente des valeurs très faibles (inférieures à 0,05), les performances du modèle demeurent limitées. Ce point n'est toutefois pas déterminant dans le cadre d'une étude de conception préliminaire. En outre, la base de données utilisée ne permet pas encore de développer un modèle de substitution adapté aux zones concaves. Enfin, à l'instar des approches existantes, la méthode proposée ne parvient pas à reproduire certains phénomènes physiques complexes tels que les interactions choc–choc. En conclusion, les travaux menés démontrent le potentiel de la méthode développée pour une intégration efficace au sein des outils d'analyse et de conception préliminaire des lanceurs réutilisables.

Mots-clés Aérodynamique, lanceur réutilisable, flux de chaleur, écoulement hypersonique, modèle de substitution, réseaux de neurones, krigeage, *machine learning*

Télécharger la thèse : <https://theses.fr/2024ESAE0025>

**Thèse de doctorat ONERA
soutenues en 2024**

**Domaine scientifique
PHYSIQUE**

Selon les départements et leurs thématiques scientifiques :

ÉLECTROMAGNÉTISME ET RADAR

Antennes, matériaux microonde et technologie pour la furtivité		
Alessandro De Oliveira Cabral Junior	Conception et démonstration d'antennes de type réseau transmetteur à balayage électronique de faisceau pour les applications télécom à haut débit	106
Imagerie radar et télédétection		
Lisa-Marie Mazzolo	Étude et développement d'un outil de simulation efficace pour l'évaluation de SER : application à la détection d'objets enfouis à partir de plates-formes aéroportées	108
Max Muzeau	Schémas de détection d'anomalies pour imagerie SAR	110
Propagation et radiocommunications		
Étienne Suquet	Caractérisation multi-fréquence du canal de propagation et modélisation de la similitude en fréquence instantanée pour optimiser des liens satellitaires en bandes Ka et Q/V	112
Simulation de la scène électromagnétique		
Valentin Ritzenthaler	Stratégies de couplage des méthodes Compatible Discrete Operators appliquées aux équations de Maxwell dans le domaine temporel	114
Traitement du signal pour le radar et la guerre électronique		
Ba-Huy Pham	Radar <i>Around-the-Corner</i> : localisation et pistage d'une cible masquée en présence d'ambiguïtés	116
Anthony Torre	Formes d'onde et traitements bio-inspirés	118

OPTIQUE ET TECHNIQUES ASSOCIÉES

Optoélectronique : photodétection et nanophotonique		
Joris Gorée	Développement d'une technique de spot scan cryogénique pour la réponse spatiale de détecteurs infrarouge	120
Clément Gureghian	Étude et réalisation de photodétecteurs nanostructurés pour l'infrarouge	122
Tomasz Matthia	Effets optiques non linéaires dans des dispositifs nanostructurés multi-résonants	124
Laura Paggi	Application de nano-résonateurs optiques à la conception d'un capteur spécifique de spectroscopie infrarouge	126
Environnement et signatures pour les senseurs optroniques		
Killian Aleau	Développement d'un diffusiomètre supercontinuum pour la caractérisation spectro-polarimétrique des aérosols : application au problème de l'inversion des données lidar	128
Alina Ciocarlan	Détection de cibles de petite taille par <i>deep learning</i>	130
Lasers fibrés, lidars et imageurs 3D		
Robin Matha	Interférométrie <i>self-mixing</i> pour la détection de gouttelettes dans l'atmosphère	132
William Patino	Développement d'un lidar à absorption différentielle intégrée basé sur un spectromètre à double peigne pour la surveillance des gaz à effet de serre	134
Kevin Walcarius	Modélisation numérique et mise en œuvre expérimentale d'un prototype imageur laser 3D pour la visualisation de cibles immergées dans un milieu aquatique diffusant	136
Télédétection active et passive		
Thierry Gaubert	Télédétection quantitative des traits foliaires des forêts empérées à partir de mesures spectroscopiques	138

OPTIQUE ET TECHNIQUES ASSOCIÉES (suite)

Maîtrise de la surface d'onde, optique adaptative

Mahawa Cissé	Optimisation des analyseurs à filtrage de Fourier pour l'imagerie à haut contraste : application aux télescopes géants	140
Maxime Dumont	<i>Deep learning</i> pour le phasage de télescope segmenté	142
Arseniy Kuznetsov	Vers la prochaine génération d'instruments tomographiques assistés : techniques d'auto-apprentissage pour l'optimisation du système et l'exploitation scientifique	144
Yann Lucas	Optique adaptative intégrée pour l'atténuation des effets de la turbulence atmosphérique sur les liaisons optiques	146
Pierre Senée	Étude du couplage neurovasculaire rétinien humain à haute résolution par optique adaptative	148

Capteurs optiques et imageurs hyperspectraux

Clément Freslier	Étude de systèmes catoptriques freeform avec une pupille de sortie accessible dans des dispositions coplanaires et non-coplanaires pour nanosatellites	150
Laureen Guitard	Caractérisation qualitative et quantitative de matériaux composites foudroyés par imagerie rayons X en contraste de phase déployée sur banc de laboratoire	152
Jean-Baptiste Volatier	Méthodes différentielles pour la conception des systèmes optiques à forme libre	154

PHYSIQUE, INSTRUMENTATION, ENVIRONNEMENT, ESPACE

Interaction de l'environnement spatial avec les matériaux

Paul Colcombet	Étude de photorécepteurs sous irradiation de protons pour la mission LISA	156
Nathan Dintilhac	Propriétés physiques et mobilité moléculaire de films fins base polyéthylène pour applications ballons stratosphériques	158

Charge et décharges électrostatiques sur satellite

Lucas Nicolas	Étude des mécanismes d'érosion ionique sur matériaux, application au cas de la propulsion électrique spatiale	160
---------------	---	-----

Foudre, plasma et propulseurs électriques

Gabriel Barreau	Application d'une méthode semi-implicite couplée avec des outils d'adaptation de maillage anisotropique pour modéliser des arcs continus	162
Romain Pioch	Dynamiques ioniques dans la tuyère magnétique d'un propulseur ECR	164

Instrumentation et métrologie par spectroscopie laser

Pier-Henri Chevalier	Contribution à l'analyse de l'imagerie LIF sur l'aluminium à l'aide d'outils numériques pour la caractérisation de flammes de propergols solides aluminisés	166
----------------------	---	-----

Capteurs inertiels à atomes froids

Romain Duverger	Métrologie de champs électromagnétiques par spectroscopie de déplétion de piège avec des atomes froids de Rydberg	168
Noémie Marquet	Vers un accéléromètre hybride électrostatique/atomique pour les futures missions spatiales : étude de l'impact de la rotation sur un interféromètre à atomes froids et réduction de cet impact	174
Clément Salducci	Développement expérimental d'un gyromètre compact à atomes froids pour une centrale inertielle hybride	170

Accélérométrie spatiale haute performance

Hugo Lévy	Vers des solutions numériques bien posées et polyvalentes pour les théories tenseur-scalaires de la gravité avec écrantage : applications aux échelles sub-système solaire	172
-----------	--	-----

Alessandro de Oliveira Cabral Junior

Thèse soutenue le 28 novembre 2024 à Toulouse

ED 323 (GEET) - Génie Électrique, Électronique, Télécommunications - Toulouse

Encadrement

Département Électromagnétisme et radar (DEMR), ONERA Toulouse

Direction de thèse : André Barka, ONERA/DEMR ; Hamza Kaouach, INP Toulouse

Jury

Raphaël Gilliard, IETR, INSA Rennes

Claire Migliaccio, Université Côte d'Azur

Philippe Pouliguen, DGA/AID

Nawaz Burokur, Université de Paris Nanterre

Natalie Raveu, INP Toulouse N7

Financement MESR, ONERA

Contact andre.barka@onera.fr

Prix des doctorants ONERA Physique 2024

Prix de la meilleur thèse 2024 de l'école doctorale GEETS de Toulouse

Résumé Les théories tenseur-scalaires de la gravité font partie des alternatives à la relativité dans le domaine des télécommunications de nouvelle génération, le développement rapide des protocoles de communication en bande millimétrique et la diversification des réseaux terrestres et non terrestres, tels que les constellations de satellites en orbite basse (LEO), sont remarquables. La transition vers ces bandes de fréquences élevées est essentielle en raison de la saturation des bandes plus basses. Cependant, les signaux à ces fréquences subissent des pertes importantes dues à la propagation et à l'absorption atmosphérique, augmentant ainsi les coûts

des systèmes antennaires nécessaires pour compenser ces pertes.

Un système de balayage électronique du faisceau est également requis pour réduire les interférences, en focalisant les faisceaux sur chaque utilisateur. Dans ce contexte, les antennes de type réseau transmetteur (*Transmit-Array*, TA) émergent comme une solution prometteuse. Contrairement aux réseaux phasés traditionnels, elles ne nécessitent pas de réseau de formation de faisceau, réduisant ainsi les pertes, la complexité de conception et les coûts. Ces antennes, également appelées « lentilles discrètes », se composent de cellules unitaires périodiquement disposées qui déphasent localement le champ incident pour former et balayer le faisceau mécaniquement ou bien électroniquement.

Cette thèse se concentre sur le développement des TAs à faisceaux reconfigurables pour les télécommunications en bande millimétrique. En intégrant des composants actifs tels que les diodes PIN, nous démontrons la capacité du réseau à contrôler électroniquement le gradient de phase sur son ouverture, permettant ainsi la formation et le balayage 2D variable du faisceau sur une large angle d'ouverture. Par ailleurs, cette thèse vise à concevoir des cellules unitaires reconfigurables qui assurent également une conversion de polarisation linéaire vers circulaire (PL-PC) avec une large bande passante et un faible taux d'ellipticité.

Dans un premier temps, nous avons proposé et validé expérimentalement deux réseaux passifs en bande X et Ka, en introduisant un concept de cellule unitaire qui réalise une conversion PL-PC à large bande et avec de faibles pertes d'insertion. Cette cellule a démontré une transmission très efficace et des performances supérieures à l'état de l'art en termes de bande passante, de gain et de taux d'ellipticité.

Suite aux performances prometteuses du concept passif, nous avons développé une configuration active dite reconfigurable. En intégrant une paire de diodes PIN, nous avons réalisé une commutation de phase 1-bit contrôlable électroniquement. L'étude a porté sur l'implantation des composants actifs, leur modélisation, l'intégration du réseau de polarisation des diodes à la cellule unitaire, et leur contrôle pour générer une loi de phase imposée par un cahier des charges. La cellule a été développée en bande X pour valider le concept, puis en bande Ka pour démontrer la faisabilité et les performances du concept en bande millimétrique pour les applications de cinquième génération (5G). Un réseau 14 × 14 cellules a été fabriqué en bande X (validation du concept), tandis qu'en bande Ka un réseau 20 × 20 cellules a été réalisé, centré à 27,5 GHz. Nous avons mis au point un système électronique utilisant un microcontrôleur et des cartes de multiplexage pour le contrôle dynamique de la polarisation des diodes lors des mesures. Nous avons prouvé la possibilité de réaliser un balayage électronique 2D entre ±60°, avec des taux d'ellipticité inférieurs à 2 dB. Ce concept s'avère prometteur pour des applications de type SatCom, avec un potentiel pour les stations au sol communiquant avec les constellations de satellites en orbite LEO, ainsi que pour des applications radar et le *backhauling* dans les réseaux hétérogènes 5G.

Mots-clés Réseau transmetteur, bande Ka, large bande, dépointage électronique

Télécharger la thèse : <https://theses.fr/2024TLSEP115>

Lisa-Marie Mazzolo

Thèse soutenue le 25 novembre 2024 à Salon de Provence

ED 467 (AA) - Aéronautique Astronautique - Toulouse

Encadrement

Département Électromagnétisme et radar (DEMR), ONERA Salon de Provence

Direction de thèse : Xavier Ferrières, ONERA/DEMR

Jury

Pierre Bonnet, Université Clermont Auvergne

Lionel Pichon, CNRS, Université Paris-Saclay

Hélène Barucq, INRIA

Hélène Oriot, ONERA/DEMR

Gabriel Soriano, Institut Fresnel

Sébastien Tordeux, INRIA

Benoit Neichel, Laboratoire d'Astrophysique de Marseille

Gildas Kubické, DGA-MI

Financement DGA/AID, ONERA

Contact xavier.ferrieres@onera.fr

Étude et développement d'un outil de simulation efficace pour l'évaluation de SER : application à la détection d'objets enfouis à partir de plates-formes aéroportées

Résumé La détection d'objets enfouis, qu'il s'agisse d'engins explosifs dans un contexte militaire ou de structures archéologiques dans un contexte civil, constitue une préoccupation majeure. En termes de télé-détection radar, les systèmes aéroportés, comme le radar à synthèse d'ouverture (SAR), permettent une imagerie non destructive des sous-sols tout en offrant la possibilité d'explorer de vastes zones avec une distance de sécurité par rapport à celles-ci. Cependant, leur efficacité pour la détection d'objets enfouis dépend de nombreux facteurs, tels que les caractéristiques diélectriques du sol, qui affectent la profondeur de pénétration des ondes électromagnétiques, la nature des cibles, le type d'émetteur... Une étude préliminaire, permettant de prédire la réponse des cibles en fonction des caractéristiques des systèmes et de la scène, serait alors un outil précieux pour évaluer les capacités de détection avant d'engager des campagnes de mesures.

Cette thèse s'inscrit dans ce contexte, en se concentrant sur la recherche, le développement et l'optimisation d'un outil de simulation numérique destiné à évaluer précisément la surface équivalente radar (SER) d'objets enfouis. L'approche proposée repose sur une stratégie d'hybridation de solveurs FVTD (*Finite-Volume Time Domain*) appliquée à des maillages hybrides cartésiens/non-structurés dans l'optique d'optimiser les coûts de calcul. En particulier, ces maillages hybrides permettent une représentation conforme des géométries courbes et une discrétisation spatiale localement adaptée aux vitesses de propagation des ondes électromagnétiques dans les différents milieux de la scène de calcul. La procédure d'obtention de ces maillages, basée sur le découpage du domaine de calcul en sous-domaines est détaillée, et les solveurs FVTD utilisés sont décrits en soulignant les choix effectués pour optimiser leur efficacité. L'implémentation des modèles permettant une description représentative du sol, la prise en compte précise d'une source de type onde plane et le calcul de champs lointains en présence d'un milieu avec pertes, est également abordée. L'hybridation des solveurs FVTD via une stratégie multi-domaines / multi-méthodes est présentée en détail, en mettant l'accent sur l'architecture logicielle proposée et en précisant la stabilité de la solution hybride ainsi que les enjeux de l'hybridation. Enfin, une comparaison de résultats simulés avec des données expérimentales obtenues dans le cadre d'une campagne de mesures mise en œuvre pour cette thèse, fournit une première appréciation des performances de l'outil de simulation développé. Pour conclure, la thèse met en avant la possibilité d'utiliser cet outil pour étudier l'impact des paramètres de configuration des systèmes radars sur la SER d'objets enfouis pour des scénarios donnés.

Mots-clés Méthodes volumes finis, équations de Maxwell instationnaires, hybridation de schémas, maillages hybrides cartésiens, non-structurés, objets enfouis, simulation de SER

Télécharger la thèse : <https://theses.fr/2024ESAE0047>

Max Muzeau

Thèse soutenue le 18 décembre 2024 à Gif-sur-Yvette

ED 580 (STIC) - Sciences et Technologies de l'Information et de la Communication - Paris-Saclay

Encadrement

Département Électromagnétisme et radar (DEMR), ONERA Palaiseau

Direction de thèse : Jean-Philippe Ovarlez, CentraleSupélec & ONERA/DEMR

Autres : Chengfang Ren, CentraleSupélec ; Joana Frontera-Pons, ONERA/DEMR

Jury

Jocelyn Chanussot, INP, Grenoble

Laurent Ferro-Famil, ISAE-Supaéro

Florence Tupin, Télécom Paris

Thibaud Ehret, ENS Paris-Saclay

Financement SONDRRA, ONERA

Contact jean-philippe.ovarlez@onera.fr

2nd Best Paper Student Award of EUSAR 2022, Leipzig

Résumé Cette thèse explore de nouvelles approches d'apprentissage profond pour l'analyse d'images SAR, en se concentrant sur la détection d'anomalies et l'extraction de features. Les propriétés uniques de l'imagerie SAR nécessitent des techniques spécialisées différentes des méthodes optiques. Nous abordons ces défis par le biais de nouvelles architectures et approches d'apprentissage auto-supervisé. Pour la détection d'anomalies, une méthode basée sur des auto encodeurs adverses est développée, intégrant une étape de speckling et une fonction de perte guidée statistiquement. Des évaluations quantitatives et qualitatives sont effectuées pour mettre en évidence les performances de notre méthode. En comparaison avec les détecteurs statistiques standard, elle montre des taux de détection plus élevés et des taux de fausses alarmes plus faibles dans le cas des images SAR en bande X à haute résolution. La deuxième contribution de la thèse consiste à développer un extracteur de caractéristiques SAR appelé SAFE. Il est basé sur un apprentissage contrastif adaptés aux caractéristiques de ces images. Il peut traiter divers modes d'acquisition et résolutions. Nous évaluons l'efficacité de SAFE sur plusieurs tâches, notamment la segmentation sémantique, la détection *few-shots*, la visualisation de données et la reconnaissance de motifs, égalant ou surpassant souvent les modèles de pointe sans entraînement spécifique pour chaque tâche. Cette thèse fait progresser le domaine du traitement d'images SAR, proposant des méthodes de détection d'anomalies et d'extraction de caractéristiques qui s'adaptent aux défis uniques de l'imagerie SAR.

Mots-clés Anomalies, apprentissage auto-supervisé, extraction de features, SAR

Télécharger la thèse : <https://theses.fr/2024UPASG100>

Étienne Suquet

Thèse soutenue le 11 mars 2024 à Toulouse

ED 173 (SDU2E) - Science de l'Univers, de l'Environnement et de l'Espace - Toulouse

Encadrement

Département Électromagnétisme et radar (DEMR), ONERA Toulouse

Direction de thèse : Laurent Féral, Laurent Castanet ONERA/DEMR

Jury

Carlo Riva, Politecnico di Milano

Fernando Pérez Fontan, Universidade de Vigo, Espagne

Danielle Vanhoenacker-Janvier, UCLouvain

Financement Cnes, ONERA

Contact laurent.castanet@onera.fr

Caractérisation multi-fréquence du canal de propagation et modélisation de la similitude en fréquence instantanée pour optimiser des liens satellitaires en bandes Ka et Q/V

Résumé La caractérisation du canal de propagation est un enjeu majeur afin d'optimiser les systèmes de communication par satellite. En bande Ka, ou aux bandes de fréquences supérieures, les affaiblissements du signal sont presque exclusivement causés par la troposphère, et en particulier par la pluie, dont l'atténuation peut atteindre des niveaux empêchant toute communication. La similitude en fréquence est une technique permettant d'évaluer l'atténuation troposphérique à une fréquence cible, à partir de mesures effectuées par un récepteur balise à une fréquence généralement plus basse. Cette technique permet d'obtenir des statistiques d'affaiblissement précises à la fréquence souhaitée à partir de celles réalisées à la fréquence de mesure. La similitude en fréquence peut aussi être utilisée pour connaître en temps réel l'affaiblissement sur une liaison satellitaire montante à partir de la mesure sur une liaison descendante, dans le but d'optimiser des techniques de lutte contre l'affaiblissement. Dans ce contexte, le travail de cette thèse a tout d'abord consisté à étudier les sources d'erreur affectant les mesures d'atténuation issues d'un récepteur balise, dans le but de les quantifier, et, si possible, de les corriger. Ensuite, divers modèles de référence de similitude en fréquence ont été évalués. Des axes d'améliorations sont alors proposés. En particulier, l'apport des modèles de similitude en fréquence basés sur des modélisations microphysiques est démontré à partir de mesures de propagation pluriannuelles multifréquences, collectées en bandes Ku, Ka et Q notamment en zone tropicale.

Mots-clés Systèmes satcom VHTS, propagation, similitude en fréquence

Valentin Ritzenthaler

Thèse soutenue le 10 décembre 2024 à Toulouse

ED 475 (MITT) - Mathématiques Informatique Télécommunications de Toulouse

Encadrement

Département Électromagnétisme et radar (DEMR), ONERA Toulouse

Direction de thèse : Xavier Ferrieres, ONERA/DEMR ; Pierre Cantin, INSA Toulouse

Jury

Hélène Barucq, INRIA

Philippe Helluy, Université de Strasbourg

Jérôme Bonnelle, EDF R&D

Stéphane Lanteri, INRIA

Financement Région Occitanie, ONERA

Contact xavier.ferrieres@onera.fr

Résumé Dans le domaine de la simulation numérique des équations de Maxwell, l'un des principaux objectifs consiste à rendre compte numériquement de la réalité physique des champs électromagnétiques avec une haute précision et un faible coût calcul. Il existe aujourd'hui de nombreuses méthodes permettant de résoudre le système de Maxwell en domaine temporel, présentant chacune, en fonction des situations, des qualités et des défauts. Dans cette thèse, on s'intéresse à deux stratégies de couplage des méthodes *Compatible Discrete Operators (CDO)* appliquées aux équations de Maxwell dans le domaine temporel. La première, consiste à définir localement la métrique du schéma en fonction de la géométrie du maillage. La seconde, consiste à partitionner le domaine de calcul en deux sous-domaines et à coupler les méthodes par la définition d'opérateurs sur l'interface. Pour cela, les équations de Maxwell sont étudiées en deux parties : les relations topologiques, d'une part, et les relations constitutives, d'autre part. Dans le cadre CDO, les relations topologiques sont formulées au moyen d'opérateurs différentiels discrets correspondant à la discrétisation des opérateurs vectoriels classiques. Afin de prendre en compte des conditions au bord non homogènes, ces opérateurs sont étendus au bord. Les relations constitutives sont quant à elles formulées au moyen d'opérateurs de Hodge discrets. Ils définissent la métrique du schéma et dépendent des paramètres matériels. Le schéma discret en espace et en temps est alors analysé en termes de stabilité et de consistance. Il est ensuite testé numériquement sur différentes configurations de maillages hybrides.

Mots-clés Équations de Maxwell instationnaires, couplage de schémas numériques, opérateurs compatibles discrets, équations aux dérivées partielles, maillages polyédriques

Ba-Huy Pham

Thèse soutenue le 4 juin 2024 à Orsay

ED 601 (MathSTIC) - Mathématiques et Sciences et Technologies de l'Information et de la Communication

Encadrement

Département Électromagnétisme et radar (DEMR), ONERA Palaiseau

Direction de thèse : Thierry Chonavel, IMT Atlantique

Jury

Olivier Rabaste, ONERA/DEMR

Jonathan Bosse, ONERA/DEMR

Israel Hinojosa, CentraleSupélec

Sylvie Marcos, CentraleSupélec

Stéphanie Bidon, ISAE-Supaero

Yassin El Hillali, Université de Valenciennes et du Haut-Cambresis

Laurent Ferro-Famil, ISAE-Supaero

Han Lun Yap, DSO National Laboratories

Financement SONDRRA, ONERA

Contact olivier.rabaste@onera.fr

Résumé Cette thèse traite de l'exploitation des signaux radar multi-trajets pour la localisation et le pistage d'une cible masquée (ou NLOS - Non-Line of Sight) et située derrière le coin des murs, connue sous le nom de "Around-the-Corner radar" (ACR). Malgré le potentiel prometteur de l'ACR, mis en évidence par des études antérieures, la localisation précise d'une cible NLOS reste un défi majeur en raison d'ambiguïtés signalées par des niveaux de test élevés de positions fantômes. Pour relever ces défis, nous montrons d'abord les avantages pouvant être attendus en utilisant un réseau d'antennes en réception. Cependant, en raison du nombre limité d'antennes disponibles, l'amélioration fournie par les informations sur l'angle d'arrivée des trajets est limitée. Par conséquent, nous introduisons également des solutions algorithmiques axées sur la gestion du nombre de trajets et le pistage. Ces solutions, évaluées à l'aide de signaux synthétiques et de mesures réelles, démontrent des améliorations significatives de la qualité de la localisation.

Mots-clés Multi-trajets, cible NLOS, traitement d'antennes, localisation, pistage, filtrage particulière

Anthony Torre

Thèse soutenue le 19 décembre 2024 à Palaiseau

ED 601 (MathSTIC) - Mathématiques et Sciences et Technologies de l'information et de la communication

Encadrement

Département Électromagnétisme et radar (DEMR), ONERA Palaiseau

Direction de thèse : Thierry Chonavel, IMT Atlantique

Jury

Dominique Poullin, ONERA/DEMR

Abigael Taylor, ONERA/DEMR

Attika Rivenq, IEMN, Université Polytechnique Hauts-de-France

Laurent Ferro-Famil, ISAE-Supaero

Alessio Balleri, Université de Cranfield

Financement ONERA

Contact abigael.taylor@onera.fr

Résumé Cette thèse aborde le sujet de la diversité des formes d'onde afin d'apporter des réponses aux problématiques radar actuelles, telles que la congestion croissante du spectre électromagnétique ou encore le besoin constant de performances améliorées (ou du moins maintenues). En étudiant le principe d'écholocation utilisé par les chauves-souris et leurs formes d'onde, les potentiels atouts de ces signaux innés sont mis en exergue. Une forme d'onde bio-inspirée, la forme d'onde de Parsons, capable d'imiter la construction des signaux de chauves-souris avec une certaine flexibilité, a ainsi été proposée pour des applications radar. Tout au long de la thèse, la comparaison est faite entre la fonction de Parsons et des formes d'ondes radar classiques (le chirp et la fonction hyperbolique) afin de mesurer le potentiel de cette forme d'onde bio-inspirée. En outre, ses réponses au traitement radar classique sont étudiées. En particulier, les bornes de Cramér-Rao ont été calculées pour quantifier l'efficacité de la forme d'onde dans l'estimation du délai et du Doppler. Des discussions sur des données simulées et réelles ont permis de valider la fonction de Parsons en tant que potentielle nouvelle forme d'onde radar. Pour aller plus loin, son implémentation dans des applications radar concrètes est étudiée. Enfin, à la suite de l'étude initiale sur les signaux de chauves-souris, un algorithme de détection de changement, le CuSum, est adapté et développé pour la détection de signaux radar inconnus.

Mots-clés Biomimétisme, chauve-souris, écholocation, forme d'onde, traitement radar

Joris Gorée

Thèse soutenue le 29 mai 2024 à Orsay

ED 572 (EDOM) - Ondes et Matière - Paris-Saclay

Encadrement

Département Optique et techniques associées (DOTA), ONERA Palaiseau

Direction de thèse : Jérôme Primot, ONERA/DOTA

Autres : Sophie Derelle, Édouard Huard De Verneuil, ONERA/DOTA

Jury

Pascal Picart, ENIM

Jérôme Vaillant, CEA-LETI

Caroline Kulcsar, IOGS

Magali Estriebeau, ISAE-Supaero

Olivier Saint-Pé, Airbus Defence and Space, Toulouse

Clémentine Durnez, Cnes

Jean-Christophe Peyrard, DGA

Financement Labex Focus, ONERA

Contact sophie.derelle@onera.fr

Développement d'une technique de spot scan cryogénique pour la métrologie de la réponse spatiale de détecteurs infrarouges

Résumé Dans un contexte scientifique où les besoins d'imagerie à haute résolution spatiale sont primordiaux, la réduction de la taille du pixel pose un défi majeur pour la caractérisation de la Fonction de Transfert de Modulation du Pixel (FTM_{pixel}) des détecteurs infrarouge. La FTM_{pixel} est une fonction de mérite traduisant la capacité du détecteur à restituer les détails d'une scène. En outre, l'émergence de l'imagerie hyper-spectrale ainsi que l'évolution de la structuration des pixels suscitent des questions sur la dépendance spectrale de la FTM_{pixel}. Dans cette thèse, les travaux portent sur le développement d'un protocole expérimental basé sur la méthode spot scan pour la métrologie absolue de la réponse spatiale des détecteurs infrarouge. Un banc de mesure spécifique refroidi à l'azote liquide a été développé en amont de la thèse dans le but de réaliser des mesures avec une grande ouverture optique tout en réduisant le fond thermique. La réponse impulsionnelle optique nécessite d'être précisément connue pour opérer la déconvolution sur la mesure de spot scan. Dans une démarche de métrologie absolue, un raccord avec le principe de Huygens-Fresnel par l'intermédiaire d'un analyseur de front d'onde est réalisé pour déterminer la Fonction de Transfert Optique (FTO) de l'optique de projection. Un traitement algorithmique permet de reconstruire le front d'onde, puis la réponse impulsionnelle optique et d'analyser la propagation des erreurs de mesure grâce à une propriété originale de l'analyseur de front d'onde utilisé. Dans un second temps, une mesure spot scan a été réalisée sur un détecteur moyen-infrarouge, au sein du banc cryogénique. Durant cette étude, des améliorations nécessaires ont été implémentées dans ce banc afin de permettre la caractérisation de plus petits pixels. Un détecteur HgCdTe comportant plusieurs variantes technologiques de pixels a été caractérisé et une dépendance spectrale de la FTM_{pixel} a été observée sur une structure particulière de pixels. Enfin, une inter-comparaison des techniques spot scan et CSIG a été réalisée sur ce même détecteur, mettant en évidence des similarités et différences entre les résultats obtenus.

Mots-clés Détecteurs infrarouge, banc cryogénique, spot scan, réponse spatiale, métrologie

Clément Gureghian

Thèse soutenue le 27 mai 2024 à Orsay

ED 572 (EDOM) - Ondes et Matière - Paris-Saclay

Encadrement

Département Optique et techniques associées (DOTA), ONERA Palaiseau

Direction de thèse : Isabelle Ribet, ONERA/DOTA ; Thierry Taliercio, IES

Autres : Grégory Vincent, ONERA/DOTA

Jury

Anne-Laure Fehrembach, Institut Fresnel

Judikael Le Rouzo, IM2NP, AMU

Marie Delmas, IRnova AB, Stockholm

Jean-Luc Reverchon, Thales III-V Lab

Yvan Sortais, Laboratoire Charles Fabry

Financement ANR, ONERA

Contact gregory.vincent@onera.fr

Résumé Les détecteurs infrarouges quantiques représentent la technologie de choix pour les applications à très hautes performances (faible flux, réponse rapide, etc). En revanche ils sont traversés par un courant même en l'absence d'éclairement. Ce courant, qualifié de courant d'obscurité, est problématique puisqu'il limite la dynamique du circuit de lecture et est associé à un bruit. Sa dépendance exponentielle à la température impose un refroidissement du détecteur. Ces détecteurs nécessitent donc l'utilisation de machines à froid d'autant plus volumineuses, lourdes et consommatrices d'énergie que la température de fonctionnement à atteindre est basse. Plusieurs solutions technologiques sont donc à l'étude pour l'abaissement du courant d'obscurité permettant ainsi l'augmentation des températures de fonctionnement à performances égales. La réduction de l'épaisseur du détecteur (traditionnellement de plusieurs micromètres) est l'une de ces solutions. La chute d'absorption au sein du détecteur qui en est la conséquence peut être compensée par une approche de nanophotonique : l'intégration de celui-ci dans une structure piégeant la lumière aux longueurs d'ondes de détection. Conventionnellement réalisées en métal, le dépôt de ces structures complexifie la fabrication de tels détecteurs. Cependant, de telles structures peuvent aussi être réalisées en semiconducteurs fortement dopés, offrant une meilleure flexibilité et une meilleure compatibilité avec les technologies de croissance des détecteurs.

Je présenterai les travaux de recherche menés sur différentes structures résonantes en tout semiconducteur intégrant un détecteur : la première, intégrant une photodiode en super-réseau de 550 nm dans une cavité Fabry-Perot réalisée en InAsSb fortement dopé au silicium, sur laquelle des mesures optiques et une caractérisation électro-optique ont pu être menées ; la seconde, multi-résonante, intègre un détecteur de 300 nm entre un réseau supérieur et un miroir arrière de n^{++} InAsSb et a été caractérisée optiquement. Des mesures de courant d'obscurité, de réponses spectrales et de rendement quantique seront présentées. L'intérêt de l'amincissement des détecteurs et l'apport des structures multi-résonantes seront discutés, au regard de ces résultats.

Mots-clés Super-Réseau, bande III, nanostructures, photodétection

Tomasz Matthia

Thèse soutenue le 1er février 2024 à Orsay

ED 572 (EDOM) - Ondes et Matière - Paris-Saclay

Encadrement

Département Optique et techniques associées (DOTA), ONERA Palaiseau

Direction de thèse : Patrick Bouchon, ONERA/DOTA

Autres : Baptiste Fix, ONERA/DOTA

Jury

Anne-Laure Fehrembach, CNRS

Antoine Monmayrant, CNRS

Céline Fiorini-Debuisschert, CEA

Giuseppe Leo, Université Paris Cité

Olivier Martin, EPFL

Financement DGA/AID, ONERA

Contact baptiste.fix@onera.fr

Résumé Cette thèse constitue une étude théorique et expérimentale des dispositifs nanostructurés non linéaires. Les nanostructures non linéaires permettent de modifier les propriétés de la lumière incidente grâce à des effets optiques non linéaires, qui sont très faibles dans les matériaux naturels. L'étude se focalise en particulier sur des structures conçues en architecture de type « métal-isolant-métal » (MIM) et fonctionnant dans les gammes spectrales infrarouge et térahertz.

Le premier objectif de cette thèse consiste à réaliser des méthodes de simulation pour les effets optiques non linéaires dans ce type de nanostructures. Ensuite, il s'agit d'exploiter ces outils numériques pour concevoir des dispositifs non linéaires efficaces. Les nanostructures sont réalisées par des techniques de nanofabrication et sont basées sur des résonances plasmoniques ou diélectriques, qui permettent de concentrer la lumière dans des volumes sub-longueur d'onde en augmentant ainsi l'amplitude des effets non linéaires. Le troisième objectif de cette thèse consiste à les caractériser à l'aide d'un banc de mesures expérimentales.

Le manuscrit présente tout d'abord les résultats des travaux visant à réaliser des nanostructures efficaces pour la génération de second harmonique (SHG). La discussion englobe à la fois le point de vue théorique d'une conversion SHG efficace, ainsi que les réalisations expérimentales. Les dispositifs décrits dans ce manuscrit ont permis d'accroître les efficacités de conversion SHG de plusieurs ordres de grandeurs pour ce type de nanostructures dans l'infrarouge.

Ensuite, il s'agit d'étudier un autre phénomène de conversion de fréquence, la génération de différence de fréquence (DFG). Le chapitre dédié à cet effet optique non linéaire constitue une ouverture vers la création des convertisseurs nanostructurés efficaces émettent dans le térahertz. Enfin, le manuscrit présente les méthodes numériques réalisées pour des effets non linéaires d'ordre 3 tels que la génération de troisième harmonique (THG) et l'effet Kerr optique. La thèse s'inscrit dans le cadre des travaux visant à trouver des techniques optimisées pour réaliser des dispositifs nanostructurés non linéaires efficaces faisant appel aux phénomènes non linéaires tels que la SHG, DFG, THG ou encore l'effet Kerr optique.

Mots-clés Photonique, métasurfaces, optique non linéaire, plasmonique, infrarouge, térahertz

Télécharger la thèse : <https://theses.fr/2024UPASP009>

Laura Paggi

Thèse soutenue le 11 juin 2024 à Palaiseau

ED 572 (EDOM) - Ondes et Matière - Paris-Saclay

Encadrement

Département Optique et techniques associées (DOTA), ONERA Palaiseau Direction de thèse : Patrick Bouchon, ONERA/DOTA

Jury

Marc Lamy de la Chapelle, IMMM, Université Le Mans

Angela Vasanelli, LPENS Paris

Lydie Ferrier, INL, INSA

Christophe Galland, LQNO, EPFL

Jean-Jacques Greffet, LCF, IOGS

François Ozanam, PMC, École polytechnique

Financement ANR

Contact patrick.bouchon@onera.fr

Prix de la meilleure présentation des journées scientifiques de l'école doctorale Ondes et matière, UPSaclay, 2022

Résumé Les nano-résonateurs optiques sont des structures de taille sub-longueur d'onde qui permettent d'exalter les interactions lumière-matière à l'échelle nanoscopique. À partir d'empilements de couches minces structurées, il est d'ailleurs possible d'obtenir un large éventail de fonctions optiques pour des applications variées. Cette thèse a pour but d'étudier les propriétés et performances de plusieurs architectures de résonateurs pour la conception d'un détecteur de molécule compact, sensible, sélectif et polyvalent de spectroscopie infrarouge. En effet, un champ électrique fortement exalté localement par un nano-résonateur optique peut donner naissance au phénomène d'absorption exaltée de surface (ou SEIRA) de molécules placées à proximité. Il est alors possible d'observer les lignes d'absorption d'une très faible quantité de matière et repousser les limites de la spectroscopie infrarouge traditionnelle pour la détection de traces de composés chimiques. Je présente dans un premier temps l'exaltation de la réponse de molécules organiques par un résonateur optique de Helmholtz dans une configuration dite sur-couplée. Celle-ci permet une exaltation intense de l'absorption moléculaire et sur une large bande spectrale, proche de la réponse de molécules seules et liée à la quantité de matière sondée. J'exporte ensuite le concept de ce résonateur dans la gamme térahertz. J'explore dans une autre partie différentes stratégies de filtrage spectral dans l'objectif de discriminer une molécule d'une autre. Je présente ainsi le couplage des nano-résonateurs de Helmholtz optiques à des nanocristaux semi-conducteurs pour concevoir une preuve de concept exaltant le photocourant. J'aborde ensuite la possibilité de créer des émetteurs thermiques accordables grâce à des miroirs nanostructurés. Pour terminer, je propose une étude numérique de résonateur à haut facteur de qualité pour l'exaltation SEIRA filtrée et le contrôle du couplage résonateur-molécule.

Mots-clés Spectroscopie infrarouge, nano-résonateurs, détection chimique, photodétection, émission thermique

Télécharger la thèse : <https://theses.fr/s274964>

Killian Aleau

Thèse soutenue le 27 mai 2024 à Toulouse

ED 467 (AA) - Aéronautique Astronautique - Toulouse

Encadrement

Département Optique et techniques associées (DOTA), ONERA Toulouse

Direction de thèse : Romain Ceolato, ONERA/DOTA

Jury

Jorge Garcia-Sucerquia, School of Physics, Universidad

Myriam Zerrad, Institut Fresnel

Jérôme Yon, CORIA, INSA

Nicolas Riviere, ONERA/DPE

Financement CIFRE LEUKOS

Contact romain.ceolato@onera.fr

Développement d'un diffusiomètre supercontinuum pour la caractérisation spectro-polarimétrique des aérosols: application au problème de l'inversion des données lidar

Résumé Les propriétés radiatives des aérosols sont essentielles dans le domaine de la télédétection optique, notamment pour les techniques lidar à rétrodiffusion élastique. Les propriétés en rétrodiffusion, comme le rapport de dépolarisation, sont particulièrement importantes pour dériver des produits physiques d'une mesure lidar. L'objectif de ces travaux de thèse vise à développer une instrumentation de laboratoire dédiée à la mesure spectro-polarimétrique de ces paramètres radiatifs pour des particules telles que les poussières désertiques ou volcaniques. L'instrument, dénommé SOPHOS pour Spectro- Polarimetric and HOlographic Scatterometer, permet de mesurer la rétrodiffusion, en fonction de la longueur d'onde, dans le domaine visible proche-infrarouge, et des états de polarisation. Ces mesures de diffusion spectro-polarimétriques sont couplées à une technique d'imagerie par holographie numérique pour mesurer simultanément les propriétés microphysiques, telles que la taille et la forme des aérosols. Après une validation du concept de mesure, l'instrument SOPHOS a été étalonné à partir de particules sphériques de tailles connues. Il a ensuite été utilisé pour mesurer des propriétés radiatives spectro-polarimétriques d'aérosols atmosphériques tels que des poussières volcaniques et désertiques, mais aussi d'intérêt pour spatial tel que les régolithes lunaires. L'apport de ces mesures sera in fine d'établir un lien entre leurs propriétés microphysiques et radiatives, en particulier en rétrodiffusion pour les lidars aérosols. Cette étude se portera sur l'analyse de la dépolarisation en fonction de la taille et du facteur de forme afin de quantifier l'impact de la non-sphéricité des particules sur la dépolarisation. En perspective, une déclinaison portable de l'instrument SOPHOS a été développée durant la thèse. Cet instrument HALO est un moyen portable de mesure holographique dédié à l'analyse des aérosols dans l'air. Il permet de déterminer la distribution en taille et en forme ainsi qu'une mesure de l'extinction des aérosols dans le but d'apporter une analyse complémentaire aux mesures lidar à distance.

Mots-clés Aérosols, lidar, diffusion de la lumière

Alina Ciocarlan

Thèse soutenue le 10 décembre 2024 à Gif-sur-Yvette

ED 580 (STIC) - Sciences et Technologies de l'Information et de la Communication - Paris-Saclay

Encadrement

Département Optique et techniques associées (DOTA), ONERA Palaiseau

Direction de thèse : Sylvie Le Hégarat-Masclé, Université Paris-Saclay/SATIE

Autres : Sidonie Lefebvre, ONERA/DOTA ;

Arnaud Woiselle, Clara Barbanson, Safran Electronics & Defense

Jury

Sébastien Destercke, CNRS, UTC/Heudiasyc

Ronan Fablet, IMT Atlantique/Lab-STICC

Sébastien Lefèvre, Université de Bretagne Sud/IRISA

Céline Hudelot, CentraleSupélec/MICS

Yann Gousseau, Télécom Paris/LTCI

Financement Safran, ONERA

Contact sidonie.lefebvre@onera.fr

Best PhD Paper à la conférence OPTRO 2024, Bordeaux

Résumé La détection de petits objets dans les images infrarouges (IR) est une tâche complexe mais cruciale pour toutes les applications défense, surtout lorsqu'il s'agit de distinguer ces cibles d'un fond texturé. Les méthodes de détection d'objets classiques peinent à trouver un équilibre entre un taux de détection élevé et un faible taux de fausses alarmes. Bien que certaines approches aient amélioré les réponses des cartes de caractéristiques pour les petits objets, elles restent tout de même sensibles aux fausses alarmes induites par les éléments du fond. Pour résoudre ce problème, la première partie de cette thèse introduit un critère de décision a contrario dans l'entraînement des réseaux de neurones. Cette méthode statistique améliore les réponses des cartes de caractéristiques tout en contrôlant le nombre de fausses alarmes (NFA) et peut être intégrée dans n'importe quel réseau de segmentation sémantique. Le module NFA améliore la détection des petits objets et renforce la robustesse dans des contextes d'apprentissage frugal en données. Cependant, les réseaux de segmentation peuvent entraîner une fragmentation des objets, causant ainsi des fausses alarmes et faussant les métriques de comptage. Pour atténuer cela, le critère a contrario a été intégré dans la tête de détection d'un YOLO. La deuxième partie de la thèse aborde les défis posés par le manque de données annotées grâce à l'apprentissage auto-supervisé (SSL). Nous avons réalisé une étude des catégories de SSL existantes, en mettant l'accent sur les méthodes adaptées à la détection de petits objets. Nous avons ensuite évalué plusieurs stratégies SSL sur différents jeux de données, y compris les data sets de détection de petites cibles en IR. Cette étude nous permet de proposer une feuille de route pour aider à la sélection d'une stratégie de SSL adéquate selon plusieurs paramètres. Enfin, la combinaison du SSL et du paradigme a contrario a donné des résultats impressionnants sur la détection de petites cibles en IR.

Mots-clés Paradigme a contrario, apprentissage auto-supervisé, YOLO, segmentation sémantique

Robin Matha

Thèse soutenue le 28 mai 2024 à Palaiseau

ED 364 (EDSFA) - Sciences Fondamentales et Appliquées - Sophia Antipolis

Encadrement

Département Optique et techniques associées (DOTA), ONERA Palaiseau

Direction de thèse : Stéphane Barland, INPHYNI, CNRS

Autres : François Gustave, ONERA/DOTA

Jury

Alejandro Giacomotti, LP2N, Talence

Julien Perchoux, LAAS, CNRS

Aurélie Jullien, INPHYNI, CNRS

Jean Rinkel, Safran

Delphine Wolfersberger, CentraleSupélec

Financement CIFRE Safran Aerosystems

Contact nicolas.cezard@onera.fr

Résumé Nous proposons ici une méthode permettant d'effectuer la détection de gouttelettes d'eau en condition atmosphérique de façon fiable et robuste. Pour cela, nous avons choisi de tester l'application de l'interférométrie self-mixing à cette problématique. Cette technique optique complexe consiste à extraire une information d'un signal d'interférométrie non-linéaire obtenu aux bornes d'une

Interférométrie *self-mixing* pour la détection de gouttelettes dans l'atmosphère

diode laser soumise à une rétro-injection optique sur une scène. C'est cette scène qui génère et contient l'information. Le cas d'étude représentatif est celui d'une surface solide en déplacement longitudinal dans l'axe du faisceau laser ; le signal se compose de franges d'interférométrie qui se forment dans le milieu non-linéaire qu'est le laser, chaque frange correspond à un déplacement de $\lambda/2$ de la surface (λ étant la longueur d'onde du laser) et l'orientation donne le sens du déplacement de cette surface. L'interféromètre self-mixing, une simple diode laser équipée d'une alimentation et d'une amplification en sortie, est connue pour offrir une grande polyvalence dans l'exploitation des mesures obtenues (mesure de vitesse, détection de micro particules, imagerie 3D, etc) mais il offre également des avantages importants dans la conception d'un capteur : compacité, éléments robustes, peu consommateur en énergie, système auto-aligné et intrinsèquement simple. Cependant, la disponibilité de la mesure dans le signal est très dépendante de la quantité de lumière réinjectée dans la cavité laser. Dans le cadre d'une surface rugueuse cela se traduit par le renouvellement de la figure de speckle générée par la réflexion du faisceau laser sur cette surface. Nous démontrons que la disponibilité de la mesure peut être assurée en extrayant l'information depuis trois canaux d'interférométrie self-mixing (alimentation, système optique et amplification du signal) indépendants mais également en traitant ces signaux à l'aide d'un réseau de neurones pré-entraîné dans ce cadre représentatif de la surface en déplacement. Ainsi, tant qu'au moins un canal présente une information disponible le réseau neuronal est capable de reconstruire la vitesse de déplacement de la surface avec précision. De plus, l'analyse parallèle de plusieurs canaux permet d'augmenter la précision de cette reconstruction. Après avoir effectué ces travaux d'augmentation de la robustesse de l'obtention d'une mesure, ceux-ci ont été adaptés à la détection de gouttes d'eau micrométriques. Après avoir adapté le réseau de neurones pour classifier les signaux, nous parvenons à détecter avec un très faible taux d'erreur la présence de gouttelettes devant le faisceau. De plus, nous sommes également parvenus à classifier des signaux d'interférométrie issus de trois scènes différentes : un nuage de gouttes d'eau micrométriques et le même nuage dans lequel sont injectées de plus grosses gouttelettes dont le diamètre est supérieur à 100 μm avec deux distributions de tailles différentes. Finalement, nous sommes parvenus à allier intelligence artificielle avec un phénomène optique complexe pour faire la démonstration de principe d'un capteur simple, robuste, compact et fiable capable de détecter la présence de gouttelettes dans l'atmosphère ainsi que de distinguer des variations de taille de ces gouttelettes composant le nuage.

Mots-clés Laser à semi-conducteur, interférométrie non-linéaire, mesure optique, contrôle non destructif, réseaux de neurones, rétroaction optique

Télécharger la thèse : <https://theses.fr/2024COAZ5018>

William Patiño

Thèse soutenue le 25 janvier 2024 à Toulouse

ED 173 (SDU2E) - Science de l'Univers, de l'Environnement et de l'Espace - Toulouse

Encadrement

Département Optique et techniques associées (DOTA), ONERA Toulouse

Direction de thèse : Nicolas Cézard, ONERA/DOTA

Jury

Carlo Sirtori, École normale supérieure

Jérôme Genest, Université Laval, Canada

M. Alain Dabas, Météo France

Mme Gaëlle Lucas-Leclin, Institut d'Optique Graduate School

M. Vincent Noël, Laboratoire d'aérodynamique

M. Alexandre Parriaux, Université de Neuchâtel

M. Philippe Hébert, Cnes

Financement Cnes, ONERA

Contact nicolas.cezard@onera.fr

Résumé Dans le contexte de la surveillance des gaz à effet de serre, des études antérieures ont mis en évidence les avantages potentiels de l'utilisation de la spectroscopie à double peigne (DCS) pour les mesures lidar à absorption différentielle à trajet intégré (IPDA). Contrairement aux lidars IPDA traditionnels, dans lesquels les longueurs d'onde de sondage sont émises de manière séquentielle dans le temps, la DCS permet l'émission simultanée de longueurs d'onde régulièrement espacées. Cela peut contribuer à atténuer les erreurs dans la mesure de la concentration de gaz, en particulier dans les scénarios de plateformes mobiles. Cependant, plusieurs défis doivent être relevés avant d'envisager l'extension de la DCS à des applications aériennes ou spatiales.

Cette thèse présente le développement et l'étude des performances d'un lidar IPDA à double peigne de fréquences pour la surveillance des gaz à effet de serre, en particulier le dioxyde de carbone. Nous avons abordé les difficultés associées à l'implémentation de la DCS pour les mesures de gaz atmosphériques en utilisant des cibles non-coopératives à de longues distances (de l'ordre de 1 km). Cela a impliqué le développement d'une architecture lidar, d'une méthode d'inversion et d'un traitement du signal adapté aux pertes optiques élevées et au bruit de speckle inhérents à la mesure lidar. Un modèle de performance permettant d'anticiper et d'optimiser la mesure a été développé, et un prototype de lidar IPDA à double peigne a été mis en œuvre. Le prototype peut fonctionner à deux longueurs d'onde différentes, 1544 nm (avec des impulsions de 100 μ J) et 1572 nm (20 μ J), pour la détection de H₂O et CO₂, respectivement. L'utilisation de peignes électro-optiques permet d'accorder facilement le nombre de dents (inférieur à 10) et leur espacement dans une plage allant jusqu'à 10 GHz. La capacité du lidar à surveiller (non simultanément) les concentrations de vapeur d'eau et de dioxyde de carbone, avec une précision de 3 % et 5 % respectivement, en utilisant une cible non-coopérative située à 700 m de distance, a été démontrée. Une excellente concordance avec des mesures in situ a été observée. Ces résultats pourraient ouvrir la voie à de nouveaux concepts de lidars gaz multi-spectraux robustes et accordables.

Mots-clés Lidar, peignes de fréquence, laser fibré, atmosphère, spectroscopie, H₂O, CO₂

Télécharger la thèse : <https://theses.fr/2024TLSES033>

Kévin Walcarius

Thèse soutenue le 27 septembre 2024 à Toulouse

ED 173 (SDU2E) - Science de l'Univers, de l'Environnement et de l'Espace - Toulouse

Encadrement

Département Optique et techniques associées (DOTA), ONERA Toulouse

Direction de thèse : Thibault Dartigalongue ONERA /DOTA ;
Malik Chami, Sorbonne Université

Jury

Alain Miffre, Université Claude Bernard, Lyon

Paul Checchin, Université Clermont Auvergne

Céline Cornet, Université Lille 1

Vincent Noel, CNRS/LAERO

Financement Région Occitanie, ONERA

Contact thibault.dartigalongue@onera.fr

Student Award - Laser Display and Lighting Conference, Yokohama, 2023

Résumé Dans les domaines de la défense, de l'industrie et de la prospection marine, la représentation détaillée d'une scène en trois dimensions (3D) en toutes conditions est cruciale. Un des enjeux est de pouvoir accéder à cette information 3D dans des conditions de forte teneur en matières en suspension du milieu aquatique. Dans ce contexte, les imageurs 3D à plans focaux utilisent une source laser pulsée et chaque pixel est équipé d'une horloge interne synchronisée sur l'émission laser, permettant d'accéder à l'information 3D tout en filtrant temporellement les photons parasites diffusée par les hydrosols présents dans le milieu étudié. Les caméras à comptage

de photons permettent de capter des flux lumineux très faibles, ce qui permet de voir à travers de fortes épaisseurs optiques tout en minimisant la puissance laser nécessaire. Cependant, un tel régime est fortement sensible au rapport entre le signal du volume d'eau turbide et le signal de la cible. Dans l'optique d'évaluer l'apport potentiel de la technologie lidar pour l'observation de cibles 3D à courte portée (5-20 m) dans des milieux denses, un prototype d'imageur actif avec une matrice de SPAD a été précédemment développé à l'ONERA-Toulouse. L'objectif de cette thèse consiste à évaluer la capacité du prototype à retranscrire une scène 3D dans des conditions de forte turbidité, ainsi que comprendre l'impact de la diffusion par les particules du milieu sur le signal détecté par la caméra. La méthodologie utilisée est basée sur une approche théorique (modélisation) et expérimentale. L'approche théorique a consisté à développer un modèle de transfert radiatif de type Monte-Carlo pour simuler les interactions entre le rayonnement émis par une source laser, les particules du milieu traversé et la cible observée. L'approche expérimentale a consisté à déployer le prototype imageur dans une chambre climatique pour valider le modèle de Monte Carlo mis au point. Un état de l'art des propriétés optiques des milieux aquatiques a été réalisé, puis le modèle de transfert radiatif a été adapté au contexte de l'imagerie à courte portée en milieu dense en proposant une modélisation du phénomène de « flou » optique sur le signal diffusé depuis la colonne turbide proche du détecteur. Ce modèle permet d'accélérer la vitesse de convergence du modèle d'autant plus rapidement que l'épaisseur optique traversée est importante (facteur d'accélération de 6500 pour une épaisseur optique de 4,1). Cela permet de simuler des scènes 3D pour des épaisseurs optiques importantes (> 5), ce qui était auparavant impossible dans un temps de calcul raisonnable. Le modèle a été validé en diffusion simple, puis l'impact de la diffusion multiple et de l'orientation de la diffusion sur le signal 3D reçu par la caméra a été étudié. Des métriques quantitatives ont été proposées pour caractériser du signal cible. L'étude de ces métriques a entre autre montré que la perte de contraste de la restitution 3D de la cible en diffusion multiple dépend de la directionnalité de la diffusion et de la taille des champs de détection et d'illumination. La dernière étape de la thèse a consisté à valider expérimentalement le modèle numérique. Le prototype imageur a été d'abord caractérisé avec précision, puis une campagne de mesure a été conduite dans une serre climatique avec une scène 3D canonique et deux agents turbides, permettant d'adresser deux régimes de diffusion (faiblement et fortement orientée vers l'avant). Le résultat principal de cette thèse est la mise en évidence, numériquement et expérimentalement, d'une perte de l'information 3D de la scène observée quand la turbidité ou le champ de vue augmentent. La répartition transversale de la perte de contraste dépend fortement de l'agent diffusant utilisé. Ce phénomène ne peut être corrigé par aucun filtrage temporel car il a pour origine des photons faiblement déviés et faiblement retardés.

Mots-clés Imagerie laser 3D, diffusion multiple, Monte-Carlo, comptage de photon, perte de contraste, vision sous-marine

Télécharger la thèse : <https://theses.fr/2024ESAE0036>

Thierry Gaubert

Thèse soutenue le 11 juin 2024 à Toulouse

ED 173 (SDU2E) - Science de l'Univers, de l'Environnement et de l'Espace - Toulouse

Encadrement

Département Optique et techniques associées (DOTA), ONERA Toulouse

Direction de thèse : Xavier Briottet, ONERA/DOTA ;
Susan Ustin, University of California Davis/Institute of the Environment

Autres : Karine Adeline, ONERA/DOTA

Jury

David Sheeren, INP-ENSAT/Dynafor, Toulouse

María Pilar Martin, CSIC /SpecLab

Raul Lopez-Lozano, INRAE/EMMAH

Thomas Corpetti, CNRS/LETG

Margarita Huesca Martinez, UT-ITC, Twente, Pays-Bas

Mireille Paulin, Cnes

Financement Cnes, Région Occitanie

Contact karine.adeline@onera.fr

Résumé Les écosystèmes forestiers couvrent environ 10 % de la surface terrestre. Ils offrent de nombreuses fonctions écologiques et services écosystémiques de part leur importante biodiversité et leur rôle dans la régulation du climat et dans les cycles

biogéochimiques. Cependant, les changements climatiques, liés au réchauffement climatique global, mettent en péril le maintien de ces écosystèmes en plongeant les espèces végétales présentes dans des conditions pour lesquelles elles ne sont pas adaptées. Le suivi de la végétation des écosystèmes forestiers peut être réalisé par télédétection quantitative grâce à l'estimation de traits fonctionnels définis en écologie comme caractéristiques indicatrices des capacités de croissance, reproduction ou survie. Plus spécifiquement, pour les espèces végétales, certains traits fonctionnels, appelés traits foliaires, sont liés à la composition biochimique du feuillage et affectent les propriétés optiques de la végétation par des processus physiques. Au moyen de la résolution d'un problème inverse, les traits foliaires sont donc accessibles par des méthodes de télédétection aéroportée et spatiale utilisant des données hyperspectrales dans le domaine optique 0,4-2,5 μm . Des capteurs hyperspectraux, déjà lancés ou prévus dans la prochaine décennie, vont fournir des flux massifs de données, rendant possible le suivi des écosystèmes forestiers mais nécessitant des méthodes de traitement automatique. Dans ce contexte, cette thèse vise le développement d'une méthode généralisable capable de traiter l'ensemble des images d'un capteur spatial pour les forêts tempérées pour l'estimation de quatre traits foliaires : concentrations foliaires en chlorophylles (Cab), caroténoïdes (Cxc), eau (EWT) et matière sèche (LMA). Pour répondre à cet objectif, cette thèse propose de tester des méthodes d'estimation à l'échelle de la feuille puis à l'échelle de la canopée, en s'appuyant sur des données collectées sur cinq sites forestiers de Californie, couvrant plusieurs écosystèmes et différentes saisons. À l'échelle de la feuille, plusieurs méthodes d'estimation des traits sont comparées, incluant des approches physiques et statistiques, et en s'appuyant sur des échantillons de feuilles collectées sur les cinq sites. Les principaux résultats montrent que la méthode statistique basée sur la régression à partir de processus gaussien obtient les meilleures performances quel que soit le trait estimé. À l'échelle de la canopée, l'estimation des traits foliaires est réalisée par une approche statistique et une approche hybride, en s'appuyant sur des acquisitions AVIRIS réalisées sur les cinq sites. L'approche statistique consiste à entraîner des modèles de régression à partir de données hyperspectrales AVIRIS. L'approche hybride consiste à entraîner un réseau de neurones à convolution (CNN) sur une base de données synthétique générée à partir du modèle DART. Cette étape montre que les approches statistiques obtiennent de meilleures performances que l'approche hybride. Néanmoins toutes les méthodes testées se révèlent peu adaptées pour extraire les effets des traits foliaires à partir de la réflectance à l'échelle de la canopée, et les erreurs d'estimation restent trop importantes pour analyser des variations saisonnières et intra-spécifiques des traits foliaires. Afin d'améliorer les performances d'estimation, une étude plus approfondie des effets de la géométrie de la canopée et du sous-bois serait nécessaire. De plus, il serait nécessaire de tester la prédictibilité de l'état de santé des forêts à partir de la cartographie des traits foliaires pour réaliser un suivi complet.

Mots-clés Hyperspectral, apprentissage statistique, transfert radiatif, traits fonctionnels, écosystèmes forestiers

Télécharger la thèse : <https://theses.fr/2024ESAE0028>

Mahawa Cissé

Thèse soutenue le 17 décembre 2024 à Marseille

ED 352 - Physique et Science de la Matière - Aix Marseille

Encadrement

Département Optique et techniques associées (DOTA), ONERA Châtillon

Direction de thèse : Thierry Fusco, ONERA/DOTA ; Benoit Neichel, LAM

Autres : Jean-François Sauvage ONERA/DOTA

Jury

Maud Langlois, Centre de Recherche Astrophysique de Lyon

Esteban Vera Rojas, PUCV, Valparaiso, Chili

Rebecca Jensen-Clam, Université de Californie à Santa Cruz

Marcel Carbillet, Observatoire de la Côte d'Azur

Antonin Bouchez, W.M. Keck Observatory

Financement ANR, labex Focus

Contact thierry.fusco@onera.fr

Résumé Depuis 1995, des milliers d'exoplanètes ont été identifiées à l'aide de diverses techniques. Naturellement, la prochaine étape consiste à trouver une planète capable d'abriter la vie. Parmi les différentes techniques de détection, l'imagerie à haut contraste (ou imagerie directe) contribue à analyser le spectre des planètes et à identifier d'éventuels bio-marqueurs dans leurs atmosphères. Un système à haut contraste permet d'éliminer la lumière de l'étoile afin de rendre visible les planètes car leur luminosité est un million, voire un milliard de fois plus faible que celle des étoiles. Pour fonctionner de manière optimale, cet instrument doit recevoir un front d'onde dépourvu d'aberrations. Les systèmes d'optique adaptative (OA), composés d'un miroir déformable, d'un analyseur de front d'onde (ASO) et d'un calculateur temps réel, compensent la turbulence atmosphérique, améliorant ainsi la résolution de ces instruments pour l'astronomie au sol.

L'avènement des télescopes géants (de plus de 20 m de diamètre) présente de nouveaux défis pour les systèmes d'OA en matière de correction du front d'onde permettant la détection d'exoterre (exoplanète similaire à la Terre). Les miroirs primaires de la prochaine génération de télescopes seront composés de plusieurs «petits» miroirs pour atteindre la taille souhaitée : on parle alors de miroirs segmentés. Des stratégies doivent être mises en œuvre pour corriger à la fois la fragmentation de la pupille et la turbulence atmosphérique. Les ASO traditionnels, tels que le Shack-Hartmann, sont excellents pour mesurer la turbulence atmosphérique mais sont insensibles à la fragmentation de la pupille. Inversement, les pyramides non modulées ou le masque de Zernike sont plus sensibles à la fragmentation de la pupille mais moins efficaces pour mesurer la turbulence atmosphérique.

Cette thèse de doctorat porte sur les ASO de nouvelle génération qui feront partie intégrante des systèmes d'OA des télescopes géants segmentés. Ces analyseurs appartiennent à la famille des ASOs à filtrage de Fourier dont le masque de Zernike et l'analyseur pyramide en sont des exemples. Le principal objectif de mon doctorat était de développer une compréhension approfondie de la réponse non linéaire de ces analyseurs et de son impact sur l'estimation du front d'onde. J'ai alors proposé deux solutions permettant de diminuer les effets non-linéaires : une modification de l'ASO et une modification du reconstructeur utilisé pour l'estimation du front d'onde. Les solutions proposées devraient améliorer la correction fournie par le système d'OA.

Mots-clés Optique adaptative, analyseurs à filtrage de Fourier, analyseur Zernike, analyseur pyramide

Télécharger la thèse : <https://theses.fr/s375647>

Maxime Dumont

Thèse soutenue le 6 novembre 2024 à Marseille

ED 352 - Physique et Science de la Matière - Aix Marseille

Encadrement

Département Optique et techniques associées (DOTA), ONERA Châtillon

Direction de thèse : Jean-François Sauvage, ONERA/DOTA ;
Jaime Cardoso, INES TEC, Porto

Autres : Carlos Correia, FEUP, Université de Porto

Jury

Marc Ferrari, OSU Pytheas, Université Aix-Marseille

Rémi Soummer, STScI, Baltimore

Esteban Vera, Université de Valparaiso

Charlotte Bond, UK-ATC

Financement ONERA, Université de Porto

Contact jean-francois.sauvage@onera.fr

Résumé Atteindre à la fois une haute résolution angulaire et des temps de revisite fréquents pour l'observation de la Terre ou d'autres planètes depuis une orbite basse pose plusieurs défis importants. Trouver un équilibre entre la nécessité d'un plus grand diamètre de télescope et les coûts accrus et les contraintes associées nécessite de développer des solutions innovantes. AZIMOV, un prototype de charge utile pour un télescope déployable segmenté sur un CubeSat 6U actuellement en développement, aborde ce problème en utilisant un télescope segmenté déployable avec une ouverture totale de 30 cm. Ce grand miroir primaire permet d'obtenir une distance d'échantillonnage au sol de 1 mètre à la surface de la Terre dans le spectre visible. Cependant, pour des performances optimales, un alignement précis (ou phasage) des segments du miroir primaire est crucial. En raison des contraintes des CubeSats, telles que le volume, la puissance et les ressources de calcul limitées, les méthodes conventionnelles de détection de front d'onde ne conviennent pas. L'analyse de front d'onde en plan focal est la seule approche pratique pour ces petites plateformes, mais les techniques traditionnelles sont souvent itératives et nécessitent beaucoup de calculs en raison de la relation non linéaire entre la phase du champ électromagnétique et l'intensité de l'image.

Cette thèse explore l'utilisation de l'apprentissage machine pour corriger les aberrations de piston et de tip-tilt sur les quatre segments du miroir primaire à partir d'une seule image du plan focal. Nous montrons que notre approche, utilisant des réseaux de neurones convolutifs, peut atteindre des performances à la limite de diffraction lors de l'observation d'une source ponctuelle. Cette méthode d'apprentissage profond est robuste face au bruit et aux aberrations de plus hauts ordres, et elle surpasse les méthodes itératives classiques en termes de rapidité, de précision et de robustesse. Des tests sur des données expérimentales confirment l'adaptabilité des réseaux de neurones entre les données simulées et expérimentales et montrent la faisabilité de notre méthode sur des données réelles. Dans le cadre de l'observation de la Terre depuis une orbite basse, ou lors de l'imagerie d'objets étendus inconnus à la surface terrestre, notre approche, améliorée pour l'analyse des objets étendus, montre des performances pouvant atteindre la limite de diffraction, tout en soulignant les limitations de l'analyse de front d'onde en plan focal à partir d'une seule image, dues aux caractéristiques de l'objet observé.

Mots-clés Analyse de front d'onde plan-focal, *deep learning*, phasage, télescope segmenté spatial

Arseniy Kuznetsov

Thèse soutenue le 10 décembre 2024 à Marseille

ED 352 - Physique et Science de la Matière - Aix Marseille

Encadrement

Département Optique et techniques associées (DOTA), ONERA Châtillon

Direction de thèse : Thierry Fusco, ONERA/DOTA

Jury

Annie Zavagno, Laboratoire d'Astrophysique de Marseille

Laurent Jolissaint, HEIG-VD, Suisse

Jean-Pierre Véran, Herzberg Astrophysics, Canada

Jessica Lu, UC Berkeley, USA

Joël Vernet, European Southern Observatory

David Mary, Institut Mines-Télécom

Financement ESO, ONERA

Contact thierry.fusco@onera.fr

Résumé Plusieurs domaines clés de l'astronomie moderne, tels que l'étude des galaxies et du centre galactique, la détection et la caractérisation des exoplanètes, l'imagerie des corps du système solaire, et bien d'autres, dépendent fortement de la correction par optique adaptative (OA). Ces domaines de recherche exigent la plus haute résolution angulaire possible, ainsi qu'une astrométrie et une photométrie extrêmement précises. Dans ce contexte, l'OA améliore considérablement la résolution angulaire des grands observatoires terrestres modernes en compensant la turbulence atmosphérique, ce qui permet d'atteindre une résolution proche de la limite de diffraction. Pour les prochains télescopes de très grande taille, tels que l'*Extremely Large Telescope* (ELT) de l'ESO, les systèmes d'OA joueront un rôle essentiel en assistant presque toutes les observations. La qualité des résultats scientifiques est intrinsèquement liée à la qualité des images produites, qui, à son tour, dépend de la fonction d'étalement du point (PSF). Par conséquent, une connaissance précise de la fonction d'étalement du point est essentielle pour interpréter les données scientifiques et permettre des techniques avancées de post-traitement, telles que la déconvolution. Cependant, l'utilisation de l'OA introduit une structure complexe de la PSF dans le plan focal scientifique, ce qui rend une modélisation précise difficile, en particulier lorsque les PSF réelles ne sont pas disponibles pour référence dans le champ scientifique (par exemple, lors de l'observation de cibles extragalactiques). Cette thèse propose une méthode de modélisation rapide et réaliste des PSF corrigées par l'OA en utilisant une approche hybride qui combine un modèle analytique avec un composant basé sur l'apprentissage automatique. Cette approche apprend le comportement complexe du télescope et du système d'OA à partir des données qu'ils produisent, améliorant ainsi la précision de la modélisation de la PSF. Le modèle basé sur les données est entraîné sur les entrées de données fusionnées collectées à partir de sources multiples, y compris la télémétrie réduite de l'OA, les données de surveillance du site et les PSF des capteurs scientifiques / de front d'onde. La méthode est testée sur deux instruments du *Very Large Telescope* (VLT) de l'ESO : SPHERE et MUSE. Parce que la PSF accumule les effets de toutes les contributions possibles le long du chemin d'imagerie optique, elle peut être utilisée pour diagnostiquer et caractériser ces aberrations. La deuxième partie de cette thèse aborde ce problème, en complétant les conclusions et les résultats présentés dans la première partie.

Mots-clés Optique adaptative, PSF, apprentissage automatique, modélisation de PSF, prédiction de PSF, instrumentation pour les grands télescopes au sol

Yann Lucas

Thèse soutenue le 10 décembre 2024 à Paris

ED 572 (EDOM) - Ondes et Matière - Paris-Saclay

Encadrement

Département Optique et techniques associées (DOTA), ONERA Châtillon

Direction de thèse : Vincent Michau, ONERA/DSG ; Guillermo Martin, IPAG

Autres : Serge Meimon, ONERA/DOTA

Jury

Sylvestre Lacour, Observatoire de Paris

Mikhail Vorontsov, Université de Dayton

Antonella Bogoni, École Supérieure Sant'Anna, Pisa

Julien Fade, Institut Fresnel

Financement Cnes, ONERA

Contact vincent.michau@onera.fr

Résumé Les liaisons optiques représentent une solution prometteuse au besoin croissant en communication en espace libre. À la réception, l'injection du signal optique dans une fibre optique monomode permet un débit élevé en utilisant les composants déjà développés pour les communications fibrées. Néanmoins, cette injection peut être fortement perturbée par les effets de la turbulence atmosphérique. Pour s'affranchir de ces effets, l'optique adaptative (OA) est couramment utilisée. Une approche alternative, appelée ici OA-intégrée, a été récemment proposée. Elle est

basée sur un démultiplexeur spatial suivi d'un circuit photonique intégré (PIC) assurant l'injection dans la fibre après combinaison cohérente. L'OA-intégrée pourrait représenter une solution compacte et robuste s'appliquant aussi aux fortes perturbations. Sa mise en œuvre nécessite toutefois la réalisation d'un PIC complexe, avec des pertes minimales et des déphaseurs rapides pour un contrôle en temps réel. Or les PIC actuels ne répondent pas à ces besoins. Les PIC en Niobate de Lithium autorisent des déphasages très rapides mais pas une architecture complexe, alors que la technologie Silicium (Si) permet des architectures complexes, mais des déphaseurs relativement lents. Par ailleurs, les pertes sont encore élevées avec les deux technologies. Cette thèse porte sur l'analyse des performances ultimes d'une OA-intégrée en présence de turbulence atmosphérique, basée sur le développement d'une méthode de contrôle originale pour l'architecture de PIC dédiés à la combinaison cohérente.

Dans une première étape, j'ai caractérisé les propriétés des signaux à combiner. Une analyse des propriétés statistiques des amplitudes complexes en sortie du démultiplexeur spatial m'a conduit à proposer une architecture simplifiée basée sur une correction de phase suivie d'une combinaison cohérente statique. Une telle architecture réduisant significativement les pertes dans le PIC, je l'ai retenue dans la suite de ma thèse. J'ai établi une expression analytique du temps de décorrélation des amplitudes complexes en sortie du démultiplexeur spatial. En appliquant cette expression au cas d'une liaison satellite-sol, j'ai mis en évidence que la bande passante typique des déphaseurs des PIC Si est trop limitée pour permettre un contrôle classique par modulation dans le cas d'un grand nombre d'entrées. Pour surmonter cette contrainte, j'ai proposé une méthode originale pour d'estimation et de contrôle basée sur une modulation spatiale. Avec cette méthode, le PIC peut être vu comme un analyseur de surface d'onde qui permet d'estimer les phases résiduelles en une seule période de modulation. J'ai analysé le comportement de cette méthode en présence de bruit de mesure et j'ai optimisé la forme de la modulation spatiale vis-à-vis de ce critère. Le codage optimal permet à cette méthode d'atteindre la limite fondamentale de la propagation du bruit de photons des analyseurs de surface d'onde. Sur la base des conclusions précédentes (correction phase seule, temps de décorrélation, codage spatial optimisé), j'ai défini les principaux paramètres d'une OA-intégrée dédiée à une liaison satellite-sol. À partir d'une expérience numérique, j'ai montré d'une part que cette méthode de contrôle permet la fermeture de la boucle, et d'autre part que la boucle est stable en présence de bruit de mesure représentatif de conditions réalistes. J'ai également proposé une architecture légèrement modifiée pour simplifier la loi de contrôle. Finalement, j'ai mis en œuvre cette méthode de contrôle expérimentalement avec un PIC en Niobate de Lithium. J'ai montré que cette méthode est applicable à un PIC réel présentant des imperfections et mis en évidence son intérêt en comparant ses performances à celles de méthodes de modulation classique. Enfin, j'ai utilisé la caractérisation d'un PIC Si, à laquelle j'ai participé, pour définir un futur PIC avec des performances optimales.

Mots-clés Communications optiques en espace libre, turbulence atmosphérique, circuit photonique intégré, optique adaptative

Télécharger la thèse : <https://theses.fr/2024UPASP172>

Pierre Senée

Thèse soutenue le 22 novembre 2024 à Paris

ED 572 (EDOM) - Ondes et Matière - Paris-Saclay

Encadrement

Département Optique et techniques associées (DOTA), ONERA Châtillon

Direction de thèse : Serge Meimon, ONERA/DOTA ;
Michel Pâques, Hôpital des Quinze-Vingts, Paris

Autres : Pedro Mecê, Institut Langevin, CNRS

Jury

Plamann Karsten, LOA, ENSTA Paris

Steve Burns, Indiana University School of Optometry

Alexandra Fragola, ISMO, Université Paris-Saclay

Serge Charpak, Institut de la vision, INSERM

Delphine Débarre, LIPhy, CNRS

Caroline Venet, Quantel Medical

Financement CIFRE Quantel

Contact serge.meimon@onera.fr

Résumé L'œil, de par sa transparence, permet d'observer la rétine de manière non invasive aux longueurs d'onde optiques. De ce fait, il constitue un organe privilégié pour l'étude du couplage neurovasculaire, un mécanisme clé qui régule l'apport sanguin afin de satisfaire les besoins énergétiques des neurones. Ce processus,

essentiel au bon fonctionnement cérébral, peut être altéré dans certaines pathologies oculaires et systémiques. Ainsi, le développement de systèmes d'imagerie à haute résolution spatiale et temporelle du réseau vasculaire rétinien permettrait de caractériser finement le couplage neurovasculaire, et ainsi faciliter le diagnostic, la prévention et la compréhension de ces maladies. Les systèmes d'imagerie plein champ corrigés par optique adaptative (AO), tels que le banc ECURŌeil développé par l'ONERA, offrent des avantages considérables pour l'étude du couplage neurovasculaire à haute résolution. Ils permettent une imagerie à la limite de diffraction ($2 \mu\text{m}$) avec un large champ et une haute cadence d'imagerie. Toutefois, la lumière diffusée par les différentes couches de la rétine réduit le contraste des images. Tout l'enjeu de ma thèse est de trouver un moyen d'améliorer ce contraste. Une piste pour cela est venue de l'utilisation d'une matrice de micromiroirs (DMD) pour projeter une illumination par motifs dans la rétine. Il a été démontré que cette technique améliore le contraste dans les zones éclairées et révèle, par contraste de phase dans les zones non éclairées, les parois des vaisseaux sanguins ainsi que les globules rouges. En s'appuyant sur ce principe, tout en conservant une imagerie à champ large et à haute vitesse, essentielle pour l'étude du couplage neurovasculaire, j'ai contribué à l'implémentation d'un nouveau système d'imagerie haute résolution : l'AO-CRSO (Confocal Rolling Slit Ophthalmoscope). Ce système projette une fine ligne d'illumination qui est balayée sur la rétine et synchronisée avec l'obturateur (*rolling shutter*) d'une caméra. En ajustant le décalage entre l'illumination et la détection, des images à contraste de phase sans distorsion ont pu être obtenues, permettant ainsi de visualiser les vaisseaux sanguins et les globules rouges à 200 Hz sur un champ de $2,5^\circ \times 4^\circ$. Mon travail a ensuite consisté à adapter ce système pour l'étude de la dilatation des vaisseaux sanguins par couplage neurovasculaire au cours d'une stimulation lumineuse. Une voie de stimulation permettant de réaliser des tests « flicker », où une lumière visible est projetée dans l'œil pour stimuler les neurones de la rétine, a été intégrée dans le système. Ensuite, en utilisant des données empiriques acquises à la fois avec les systèmes DMD et AO-CRSO, j'ai optimisé les paramètres d'exposition et le décalage entre l'illumination et la détection, afin de maximiser le contraste des parois des vaisseaux sanguins. J'ai également développé un algorithme me permettant de traiter les images acquises pour mesurer automatiquement le diamètre des vaisseaux imagés. Cette méthode m'a permis de mesurer de manière robuste le diamètre des vaisseaux avec une précision de $0,1 \mu\text{m}$ toutes les $0,1$ secondes sur des séquences d'imagerie de plusieurs minutes. Ce protocole a été mis en œuvre dans une étude clinique réalisée sur huit sujets sains, visant à étudier le couplage neurovasculaire avec une haute résolution spatio-temporelle. J'ai observé une dilatation moyenne significative de $5,2 \%$ des artères en réponse à la stimulation lumineuse. De plus, pour la première fois, j'ai pu visualiser la dynamique de dilatation des artères sous l'action simultanée du rythme cardiaque, de la vasomotricité et du couplage neurovasculaire. Ces résultats ouvrent ainsi de nouvelles perspectives vers une caractérisation plus fine du couplage neurovasculaire in vivo.

Mots-clés Rétine, optique adaptative, couplage neurovasculaire, ophtalmologie, imagerie, système vasculaire

Télécharger la thèse : <https://theses.fr/2024UPASP130>

Clément Freslier

Thèse soutenue le 5 décembre 2024 à Saint-Étienne

ED 488 (SIS) - Science Ingénierie Santé - Université de Lyon

Encadrement

Département Optique et techniques associées (DOTA), ONERA Palaiseau

Direction de thèse : Thierry Lépine, CNRS ; Guillaume Druart, ONERA/DOTA

Autres : Alice Fontbonne, ONERA/DOTA ; Christophe Buisset, Tibor Agocs, ESA

Jury

Yvan Sortais, IOGS

Emmanuel Hugot, LAM

Vincent Nourrit, IMT Atlantique

Florence Rigal, CEA

Vladan Blahnik, Institute of Applied Physics, Jena

Financement ESA, ONERA

Contact alice.fontbonne@onera.fr

Résumé Afin de réduire les coûts et d'augmenter la fréquence de revisite des satellites pour l'observation de la Terre, le déploiement de constellations de satellites de petite taille est envisagé. Cela suppose cependant une meilleure utilisation du volume disponible pour la charge optique. Dans ce contexte, l'utilisation de télescopes hors axe permet d'éliminer les contraintes liées au chromatisme et à l'obturation centrale. L'utilisation de surfaces *freeform* permet ensuite d'améliorer la compacité des systèmes d'imagerie tout en conservant voire en améliorant les capacités d'imagerie. C'est dans ce contexte que j'ai étudié plusieurs combinaisons de miroirs *freeform* pour imageurs LWIR avec comme objectif de trouver une configuration permettant la meilleure résolution au sol (focale de 240 mm) tout en tenant dans un espace très contraint de 12 U (1 U = 10 x 10 x 10 cm³). En particulier, des systèmes avec une pupille de sortie accessible, compatibles avec l'utilisation d'un détecteur refroidi, ont été conçus. La qualité d'imagerie, la difficulté de fabrication des miroirs, la gestion de la lumière parasite et la sensibilité aux défauts de fabrication et d'alignement des solutions obtenues ont été analysées et comparées. Par ailleurs, cette thèse a démontré l'intérêt d'une description locale des surfaces *freeform* avec des *Non-Uniform Rational B-Splines (NURBS)* au lieu d'une description polynômiale pour améliorer l'uniformité de la qualité image dans le champ des systèmes. Des applications multispectrales peuvent alors être envisagées.

Mots-clés Miroirs *freeform*, imagerie infrarouge, pupille de sortie accessible, nanosatellites, NURBS

Télécharger la thèse : <https://theses.fr/2024STET0055>

Laureen Guitard

Thèse soutenue le 8 novembre 2024 à Gif-sur-Yvette

ED 572 (EDOM) - Ondes et Matière - Paris-Saclay

Encadrement

Département Optique et techniques associées (DOTA), ONERA Palaiseau

Direction de thèse : Jérôme Primot, ONERA/DOTA

Autres : Adrien Stolidi, CEA/List ; Amélie Jarnac, ONERA/DPHY

Jury

Emmanuel Brun, Université Grenoble Alpes, INSERM

Peter Moonen, Université de Pau et des Pays de l'Adour

Marco Stampanoni, Paul Scherrer Institut

Christine Espinosa, ISAE-Supaero

Yvan Sortais, Université Paris-Saclay

Matthieu Gresil, Monash University

Financement CEA, ONERA

Contact jerome.primot@onera.fr

Caractérisation qualitative et quantitative de matériaux composites foudroyés par imagerie rayons X en contraste de phase déployée sur banc de laboratoire

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 foudroieement 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 foudroieement. 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 foudroieement, 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 foudroieement 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, foudroieement, interférométrie

Télécharger la thèse : <https://theses.fr/282203885>

Jean-Baptiste Volatier

Thèse soutenue le 29 novembre 2024 à Orsay

ED 572 (EDOM) - Ondes et Matière - Paris-Saclay

Encadrement

Département Optique et techniques associées (DOTA), ONERA Palaiseau

Direction de thèse : Guillaume Druart, ONERA/DOTA

Jury

Simon Thibault, LRIO, Université de Laval, Canada

Stefan Bäumer, TNO, Pays-Bas

Marc Ferrari, LAM, Université Aix-Marseille

Marie-Anne Burcklen, IOGS, Université Paris-Saclay

Quentin Mérigot, LMO, Université Paris-Saclay

Financement ONERA

Contact guillaume.druart@onera.fr

Résumé Les progrès en fabrication et en métrologie des surfaces optiques rendent possible l'utilisation des surfaces optiques à forme libre (*freeform*) dans la conception de systèmes optiques destinés à de nombreuses applications. Les surfaces optiques *freeform* ne sont pas des formes simples telles que les sphères ou les coniques. La conception optique cherche un compromis entre des priorités contradictoires (minimiser le volume et améliorer la résolution par exemple) et les surfaces optiques *freeform* permettent de concevoir des systèmes qui offrent de meilleurs compromis que les systèmes classiques. Cependant, les surfaces optiques *freeform* requièrent l'usage d'un grand nombre de degrés de liberté pour décrire leur géométrie. Cette large dimensionalité pose problème pour les méthodes classiques de conception optique.

Dans cette thèse, j'ai étudié des méthodes différentielles pour la conception des surfaces optiques *freeform*. J'ai ainsi montré que la différentiation implicite du principe de Fermat et l'utilisation de la différentiation automatique permet de concevoir un code de conception optique totalement différentiable. La différentiabilité est nécessaire pour utiliser des méthodes d'optimisation en grandes dimensions et optimiser des représentations de surfaces *freeform* telles que les « *non-uniform rational b-splines* » (NURBS). J'ai aussi montré que le même formalisme mathématique permet de définir des méthodes de conception par construction directe des surfaces qui contournent totalement le problème de la grande dimensionalité des systèmes optiques *freeform*. Les travaux de cette thèse ont aussi eu des retombées en co-conception. En effet les algorithmes d'entraînement actuellement utilisées en IA nécessitent des modèles différentiables et ont donc bénéficié du code de calcul implémenté dans cette thèse.

Mots-clés Conception optique, optimisation, différentiation automatique, NURBS, *freeform*

Paul Colcombet

Thèse soutenue le 29 mai 2024 à Toulouse

ED 354 (EDSFA) - Sciences Fondamentales et Appliquées - Université Cote d'Azur

Encadrement

Département Physique, instrumentation, environnement, espace (DPHY), ONERA
Toulouse

Direction de thèse : Nicoleta Dinu-Jaeger, CNRS-ARTEMIS, Observatoire de la Côte
d'Azur ; Christophe Inguibert, ONERA/DPHY

Autres : Thierry Nuns, ONERA/DPHY

Jury

Olivier Gravrand, CEA-LETI

Vincent Goiffon, ISAE-Supaero

Martin Hewitson, Max Planck Institute for Gravitational Physics

Gilles Metris, CNRS-GEOAZUR, Observatoire de la Côte d'Azur

Financement CNRS, ONERA

Contact christophe.inguibert@onera.fr

Étude de photorécepteurs sous irradiation de protons pour la mission LISA

Résumé Programmée pour 2035, la mission LISA, pilotée par l'ESA, marquera une première en devenant le premier détecteur spatial d'ondes gravitationnelles (GW). Opérant dans la gamme des basses fréquences de 0,1 mHz à 1 Hz inaccessibles aux détecteurs terrestres, LISA ouvrira une nouvelle fenêtre sur notre univers et une nouvelle ère dans l'étude de la cosmologie. Le design de LISA présente trois vaisseaux formant un triangle équilatéral de 2,5 millions de km de côté, suivant la Terre dans son orbite autour du Soleil. Au cœur du fonctionnement de LISA se trouvent trois interféromètres laser de haute précision, détectant des fluctuations de distance de l'ordre d'une dizaine de picomètres entre deux masses de test en chute libre positionnées dans chaque vaisseau. Le cœur de la mesure réside dans ses QPRs, essentiels pour l'enregistrement des signaux interférométriques. Chaque QPR se compose d'une QPD In_{0.53}Ga_{0.47}As à large surface et à faible capacité couplée à un amplificateur de Trans-impédance (TIA) à faible bruit, le tout assemblé dans un boîtier mécanique. Au cours de sa durée de vie de 12,5 ans, LISA sera confrontée à divers types de rayonnements, principalement provenant du soleil. Un tel rayonnement peut dégrader les QPDs en induisant des défauts cristallins modifiant les propriétés électroniques du semi-conducteur et donc altérant les performances des QPDs.

L'objectif de cette thèse était d'étudier l'impact de l'environnement radiatif spatial de LISA sur les principaux paramètres électro-optiques des QPDs InGaAs ainsi que leurs répercussions sur les performances des QPRs et, par extension, sur les mesures interférométriques de LISA. Les composants ont été fournis par les membres du groupe de travail sur les QPRs du consortium LISA, à savoir les Pays-Bas et le Japon pour les QPDs, et l'Allemagne pour les TIAs.

Dans ce contexte, cinq montages expérimentaux ont été conçus pour évaluer les paramètres électro-optiques des QPDs, tels que le courant d'obscurité, la capacité et l'efficacité quantique, ainsi que ceux du QPR, comme le bruit de courant d'entrée, la réponse en phase et en amplitude, face à des signaux interférométriques similaires à ceux de LISA. Ces développements expérimentaux ont permis d'évaluer les QPDs et QPRs avant et après trois campagnes d'irradiation : des protons (20 et 60 MeV, 1e9 à 1e12 p/cm²) au Centre de Protonthérapie Antoine Lacassagne (CAL) à Nice, des électrons (0,5 et 1 MeV) et des rayons gamma (1 à 237 krad) au centre ONERA Toulouse. Les conditions d'irradiation maximales dépassaient environ cinq fois les exigences pour LISA.

Les résultats ont montré une bonne robustesse des composants face aux radiations, sans défaillances critiques, avec la quasi-totalité des QPDs répondant aux exigences de LISA.

Mots-clés LISA, environnement spatial, InGaAs photodiodes, photorécepteurs, dommages de déplacement

Télécharger la thèse : <https://theses.fr/2024COAZ5022>

Nathan Dintilhac

Thèse soutenue le 18 septembre 2024 à Toulouse

ED 482 (SDM) - Sciences de la Matière - Toulouse

Encadrement

Département Physique, instrumentation, environnement, espace (DPHY), ONERA
Toulouse

Direction de thèse : Éric Dantras, CIRIMAT, Université Toulouse III Paul Sabatier ;
Simon Lewandowski, ONERA/DPHY

Jury

Sébastien Pruvost, INSA Lyon

Christophe Derail, UPPA, Université de Pau et des Pays de l'Adour

Émeline Dudognon, UMET, Université de Lille

Philippe Olivier, ICA, Université Toulouse III Paul Sabatier

Laure Gevaux, Cnes

Financement Cnes, ONERA

Contact simon.lewandowski@onera.fr

Résumé Cette thèse s'inscrit dans une thématique de recherche d'optimisation de l'enveloppe structurale de ballons stratosphériques. Le premier objectif consiste à évaluer l'influence du procédé de fabrication sur la structure physico-chimique et sur les propriétés physiques d'un nouveau film de PolyÉthylène Basse Densité Linéaire (PEBDL) en le comparant avec celui actuellement utilisé sur les Ballons Stratosphériques Ouverts (BSO). Grâce à un fort bi-étirage, le film PEBDL possède une orientation isotrope de sa microstructure et de meilleures propriétés mécaniques en tension. Il est cependant plus thermosensible aux hautes températures. Le second objectif repose sur l'analyse d'une version multicouche du film PEBDL avec ajout de poly (ÉthylèneAlcool Vinylique) (EVOH) afin d'envisager son utilisation pour des enveloppes pressurisées. Pour effectuer une étude détaillée de la microstructure des films multicouches, une méthode a été développée afin d'implémenter des sondes dipolaires par irradiation gamma sur les films apolaires pour améliorer leur réponse diélectrique. Une dose absorbée de 25 kGy optimise le rapport signal/bruit pour des propriétés physiques comparables avec le film vierge. L'ajout d'EVOH diminue significativement la perméabilité à l'hélium, augmente ses propriétés mécaniques en tension et améliore sa résistance aux hautes températures. La contribution des couches de PEBDL et d'EVOH à la réponse globale du film multicouche varie selon la nature de la sollicitation étudiée (calorimétrique, mécanique ou électrique).

Mots-clés Polymères, ballons stratosphériques, polyéthylène, mobilité moléculaire

Lucas Nicolas

Thèse soutenue le 29 novembre 2024 à Toulouse

ED 323 (GEET) - Génie Électrique, Électronique, Télécommunications - Toulouse

Encadrement

Département Physique, instrumentation, environnement, espace (DPHY), ONERA
Toulouse

Direction de thèse : Thierry Paulmier, Marc Villemant, ONERA/DPHY

Jury

Cécile Arnas, Aix-Marseille Université

Sédina Tsikata, Georgia Institute of Technology

Yvette Ngnono-Ravache, Université de Caen Normandie

Laurent Garrigues, Université Toulouse III Paul Sabatier

Financement Cnes, ONERA

Contact marc.villemant@onera.fr

Prix doctorants JC2 - Journées CNES Jeunes chercheurs, 2023

Résumé Les propulseurs électriques embarqués à bord des satellites génèrent un plasma susceptible de dégrader toute surface qui y est exposée, à commencer par les propulseurs eux-mêmes, selon un mécanisme appelé érosion ionique. Il s'agit d'un processus au cours duquel les ions incidents entrent en collision avec les atomes constitutifs du matériau, ce qui met ces derniers en mouvement et en éjecte certains. Ces atomes, qualifiés de pulvérisés, sont alors susceptibles d'aller se déposer sur diverses surfaces du satellite qu'ils risquent de contaminer, dégradant leurs propriétés fonctionnelles. Cette thèse porte sur l'étude des mécanismes qui prennent place au cours du bombardement ionique. Nous avons plus particulièrement analysé l'influence de différents paramètres des matériaux (structure, état de surface) ainsi que des conditions d'essais (température, type de plasma) sur le taux d'érosion des échantillons, mais aussi sur la nature des espèces émises.

La première étape de ces travaux a consisté à mettre en place différentes méthodes expérimentales visant à quantifier le taux d'érosion de tous types de matériaux. L'une d'entre elles, qui repose sur l'utilisation de microbalances à quartz (QCM), permet en outre de mesurer le flux de particules pulvérisées et d'estimer ainsi les risques de contamination. Ces techniques ont ensuite été utilisées pour étudier la dégradation de polymères communément employés à bord des satellites (Kapton, PEEK, PTFE). Il s'est alors avéré que le bombardement de ces matériaux engendrait l'émission de fragments de chaînes macromoléculaires, qui demeurent généralement en phase gazeuse. Nous avons ainsi mis en évidence un nouveau processus de dégradation, fortement dépendant des conditions de l'essai (flux d'ions, température).

Dans un second temps, l'influence de l'état de surface sur l'érosion a été analysée par le biais de la simulation numérique. Un code a été développé afin de simuler l'érosion d'une surface rugueuse. Celui-ci, couplé à quelques mesures expérimentales, a démontré que toutes les formes de rugosité n'ont pas la même influence sur l'érosion et que le paramètre déterminant est ici l'inclinaison locale de la surface. Enfin, plusieurs protocoles ont été mis en place dans le but d'étudier expérimentalement le phénomène de synergie ions-électrons sur la vitesse de dégradation du SiO_2 . Seuls des résultats qualitatifs ont été obtenus, mais ceux-ci attestent d'un important accroissement de l'érosion dans la zone exposée aux électrons.

Mots-clés Pulvérisation ionique, propulsion électrique, contamination, polymères, QCM, rugosité

Télécharger la thèse : <https://theses.fr/s306705>

Gabriel Barreau

Thèse soutenue le 5 décembre 2024 à Palaiseau

ED 468 (MEGEP) - Mécanique, énergétique, génie civil, procédés - Institut supérieur de l'aéronautique et de l'espace, Toulouse

Encadrement

Département Physique, instrumentation, environnement, espace (DPHY), ONERA Palaiseau

Direction de thèse : Guillaume Puigt, ONERA/DMPE ;
Frédéric Alauzet, Université Paris-Saclay

Autres : François Pechereau, Philippe Lalande, ONERA/DPHY

Jury

Pierre-Henri Maire, CEA/CESTA

Jean Paillol, Université de Pau et des Pays de l'Adour

Marie-Hélène Vignal, Université Paul Sabatier

Jean-Marc Bauchire, Université d'Orléans

Financement DGAC, ONERA

Contact francois.pechereau@onera.fr

Résumé Un avion de ligne est foudroyé en moyenne une à deux fois par an. En considérant la taille des flottes d'avions dans le monde, c'est un phénomène assez fréquent. Lors du foudroiement, le courant injecté peut varier de 200 A à 200 kA. L'éclair peut alors être divisé en deux phases distinctes : la phase impulsionnelle, où l'intensité du courant peut atteindre 200 kA pendant quelques microsecondes, génère des chocs associés à un écoulement compressible. La phase continue, où l'intensité du courant de quelques centaines d'ampères est quasi constante, dure quelques centaines de millisecondes. L'écoulement autour de cette phase de l'arc présente des caractéristiques d'écoulement incompressible. La modélisation de ce phénomène en une seule simulation est très complexe, car elle fait intervenir deux types d'écoulements différents. En général, la phase continue est modélisée par des méthodes incompressibles, tandis que la phase impulsionnelle est traitée par des méthodes compressibles. Or, il n'est pas possible de résoudre des écoulements compressibles avec une méthode incompressible, et en raison de la contrainte sur le pas de temps, une méthode compressible n'est pas adaptée à la résolution d'écoulements incompressibles. Comme on souhaite modéliser un foudroiement dans son intégralité, il est nécessaire de rechercher des méthodes compressibles capables de résoudre des écoulements à faible Mach pour des valeurs de pas de temps raisonnables. Les méthodes semi-implicites, en implicitant une partie des termes des équations de conservation, permettent de réduire la contrainte sur le pas de temps et ainsi, de résoudre un écoulement à faible Mach avec un schéma compressible. Après une étude bibliographique sur les méthodes existantes, une nouvelle méthode semi-implicite traitant le gaz réel a été développée dans le cadre de cette thèse et implémentée dans le code MHD TARANIS. La prise en compte des gaz réels est possible grâce à l'utilisation de tables thermodynamiques générées par le code SETHI. Pour diminuer les contraintes sur les temps de simulation des géométries 3D, le code TARANIS est couplé à des algorithmes d'adaptation de maillage anisotrope développés à l'INRIA. Ces algorithmes permettent de générer un maillage adapté à l'écoulement, en ne maillant que les zones nécessaires. Il a donc été nécessaire d'ajuster les critères d'adaptation, initialement développés pour les calculs de mécanique des fluides, à ceux d'un plasma thermique. Pour valider la capacité du nouveau schéma à modéliser des arcs continus, une configuration d'un arc à combustion libre entre une cathode en forme de pointe et une anode en forme de plaque a été modélisée en 3D. Cette configuration permettra de démontrer la capacité du code TARANIS à modéliser des arcs continus et de montrer les avantages des algorithmes d'adaptation de maillage dans le cadre de modélisations d'écoulements plasma.

Mots-clés Mécanique des fluides, CFD, plasma, foudre, simulation 3D, MHD, adaptation de maillage anisotrope

Télécharger la thèse : <https://theses.fr/s299789>

Romain Pioch

Thèse soutenue le 26 novembre 2024 à Palaiseau

ED 626 (IPP) - Institut Polytechnique de Paris

Encadrement

Département Physique, instrumentation, environnement, espace (DPHY), ONERA Palaiseau

Direction de thèse : Pascal Chabert LPP, École polytechnique

Autres : Victor Désangles ONERA/DPHY

Jury

Stéphane Mazouffre, Icare, Université d'Orléans

Renaud Gueroult, Laplace, Université Paul Sabatier

Anne Bourdon, LPP, École polytechnique

Laure Vermare, LPP, École polytechnique

Freddy Gaboriau, Laplace, Université Paul Sabatier

Ulysse Weller, Cnes

Financement Cnes, ONERA

Contact victor.desangles@onera.fr

Résumé Au cours des dernières décennies, les moyens de propulsion des satellites ont évolué et la propulsion électrique s'est imposée face à la propulsion chimique classiquement utilisée. Les propulseurs électriques produisent, accélèrent et éjectent un gaz ionisé, appelé plasma, pour générer une force de poussée. Le propulseur ECRA est un concept de propulseur électrique développé à l'ONERA qui bénéficie d'un design simple et innovant. Le plasma est accéléré dans un champ magnétique

divergent appelé tuyère magnétique. L'objectif de cette thèse est de comprendre les phénomènes régissant l'accélération et l'éjection du plasma dans la tuyère magnétique du propulseur ECRA. Dans un premier temps, l'amélioration du diagnostic de Fluorescence Induite par Laser (LIF) a permis la mesure des deux composantes du champ de vitesse des ions dans la source du propulseur et dans les 20 premiers centimètres de la tuyère magnétique du propulseur. La solution analytique d'un modèle fluide et isotherme décrivant l'expansion d'un plasma dans une tuyère magnétique a été dérivée et comparée aux données expérimentales, et un bon accord a été trouvé entre les mesures et la théorie. Dans un second temps, pour pallier au manque de signal de LIF dans la plume du propulseur à des distances supérieures à 20 cm, un diagnostic électrostatique a été développé : la coupe de Faraday directionnelle. Grâce à un design innovant, ce diagnostic permet une sélection angulaire du flux d'ion collecté. Cette propriété directionnelle a été validée grâce à des mesures de flux en face d'une source à ions calibrée puis des mesures de flux d'ions dans la plume du propulseur ECRA. De plus, l'utilisation de ce diagnostic pour estimer la poussée du propulseur donne une erreur de 5 % par rapport à la mesure directe de poussée effectuée grâce à une balance. Ce résultat est à comparer à une erreur de plus de 20% obtenue quand une sonde de Faraday plate est utilisée, ce qui valide le niveau de courant mesuré par la coupe de Faraday directionnelle. Ce diagnostic de coupe de Faraday directionnelle a été monté sur un moteur pas à pas, permettant une rotation de la sonde autour d'un axe coupant son orifice d'entrée. Grâce à ce montage, la distribution angulaire de densité de courant des ions a pu être mesurée localement dans la plume du propulseur ECRA. Cette propriété a permis d'évaluer la direction locale du flux d'ions dans une zone s'étendant de 20 à 60 cm de la source du propulseur pour différents débits de gaz, puissances du propulseur, conditions de vide dans l'enceinte de test et topologies de tuyère magnétiques. La comparaison de la direction du flux d'ions avec la direction des lignes de champs magnétique dans la tuyère a permis de mettre en évidence plusieurs résultats. Premièrement, les ions ont une trajectoire colinéaire aux lignes de champ magnétique dans la partie centrale de la plume. Deuxièmement, les ions sont détachés des lignes de champs de la tuyère dans la partie latérale de la plume. La position de ce détachement ne dépend ni des conditions d'opérations du propulseur, ni du niveau de vide dans l'enceinte. En revanche, ces conditions ont une influence sur la trajectoire des ions détachés des lignes de champ magnétique. En effet, il est montré que les ions détachés suivent des trajectoires rectilignes. Par conséquent, les conditions d'opération du propulseur ont une influence sur l'angle que font les ions avec les lignes de champ magnétique à la position du détachement. Pour toutes les conditions testées, ce détachement est plus divergent que le champ magnétique. Enfin, il apparaît que la tuyère magnétique gouvernant la dynamique des ions résulte de la somme du champ magnétique produit par l'aimant permanent du propulseur et de la moyenne azimutale de l'influence du champ magnétique terrestre. Ce résultat inattendu pourrait être expliqué par une dynamique de rotation globale du plasma dans la tuyère magnétique du propulseur ECR.

Mots-clés Physique des plasmas, tuyère magnétique, ingénierie spatiale

Télécharger la thèse : <https://theses.fr/2024IPPAX064>

Pier-Henri Chevalier

Thèse soutenue le 19 février 2024 à Palaiseau

ED 104 (SMRE) - Sciences de la Matière, du Rayonnement et de l'Environnement - Lille

Encadrement

Département Physique, instrumentation, environnement, espace (DPHY), ONERA Palaiseau

Direction de thèse : Xavier Mercier, Université de Lille

Autres : Nelly Dorval, ONERA/DPHY ; Robin Devillers, ONERA/DMPE

Jury

Christine Rousselle, Université d'Orléans

Fabien Halter, Université d'Orléans

Bruno Renou, INSA Rouen

Olivier Orlandi, ArianeGroup

Achraf Dyani, Cnes

Financement Cnes, ONERA

Contact nelly.dorval@onera.fr

Résumé Les moteurs à propergol solide sont utilisés dans la propulsion des lanceurs spatiaux comme Ariane 6. L'aluminium est utilisé comme catalyseur de flamme afin d'améliorer l'impulsion spécifique du moteur. Sa combustion forme des résidus d'alumine dans le canal interne générant des instabilités de pression et des pertes d'écoulement diphasiques. Elles peuvent conduire à la dégradation des systèmes embarqués. Leur compréhension passe par l'amélioration de la prise en compte de la combustion de l'aluminium dans la simulation numérique de l'écoulement. La validation de modèles de combustion de l'aluminium requiert des données

Contribution à l'analyse de l'imagerie LIF sur l'aluminium à l'aide d'outils numériques pour la caractérisation de flammes de propergols solides aluminisés

expérimentales représentatives des conditions réelles de fonctionnement d'un moteur à propergol solide. Or, l'obtention de ces données à l'aide de diagnostics in situ est ardue à cause de l'ambiance qui est très hostile. Grâce aux nouvelles technologies laser couplées à des détecteurs rapides dotés de hautes résolutions spatio-temporelles, cela devient possible. L'ONERA a développé la méthode d'imagerie de fluorescence induite par laser sur l'atome Al en phase gazeuse à haute cadence d'acquisition en l'appliquant à des flammes de petits échantillons de propergols solides aluminisés à 1,0 MPa. L'analyse des images de fluorescence obtenues dans ce complexe environnement nécessite cependant de connaître les données thermo-chimiques des produits de combustion du propergol gazeux dans lequel évolue les gouttes pour déterminer leurs influences sur l'intensité et la forme du signal de fluorescence. Dans ce projet de thèse, une des démarches scientifiques suivie pour analyser les images mesurées a consisté à mettre en place un algorithme de détection et de suivi automatique des gouttes adapté. Des statistiques sur la dynamique des gouttes et sur l'évolution du signal LIF dans la flamme ont ainsi pu être obtenues. Afin d'estimer les conditions thermodynamiques de l'ambiance gazeuse dans laquelle évolue les gouttes en combustion, des simulations tridimensionnelles stationnaires monophasiques et instationnaires multiphasiques de la combustion d'un échantillon de propergol solide aluminisé dans un milieu pressurisé à l'azote ont été réalisées. Elles ont permis de montrer que la trajectoire des gouttes était rectiligne uniforme dans le jet et que leur combustion n'était pas complète lorsqu'elles sortaient du champ d'imagerie. Les vitesses calculées sont concordantes avec les vitesses mesurées pour des tailles de gouttes semblables. Les simulations ont aussi permis d'estimer l'influence de l'azote environnant sur la combustion des gouttes et de définir une région d'intérêt à privilégier pour l'analyse des images où son influence n'est pas critique. L'autre démarche consiste à confronter les images mesurées à des images simulées à partir des champs de température et de concentration des atomes Al calculés à l'aide d'un modèle de combustion de gouttes d'aluminium isolées en ambiance propergol solide développé à l'ONERA. De nouvelles expérimentations d'imagerie PLIF-Al en flammes de propergols solides jusqu'à 1,5 MPa ont été réalisées afin de perfectionner le contraste et les résolutions spatio-temporelles des images. Le couplage des imageries PLIF-Al et émission visible au moyen d'une caméra rapide a permis d'observer l'évolution des gouttes depuis la surface. Leur association permet d'enrichir les observations utiles aux méthodes d'analyses. Une simulation d'image PLIF-Al a été développée à partir des concentrations de vapeur d'aluminium et températures estimées à l'aide de simulations 2D stationnaires d'une goutte isolée en combustion dans les conditions expérimentales. La simulation LIF prend en compte l'absorption du laser et la réabsorption de la fluorescence par les atomes Al. Les images simulées ainsi obtenues ont montré une certaine concordance avec les images mesurées. Une première confrontation entre les deux est discutée, de laquelle découle des résultats prometteurs qui ouvrent des pistes futures de consolidation.

Mots-clés Aluminium, propergol solide, combustion, diagnostic optique, fluorescence, simulation

Télécharger la thèse : <https://theses.fr/2024ULILR005>

Romain Duverger

Thèse soutenue le 20 décembre 2024 à Palaiseau

ED 572 (EDOM) - Ondes et Matière - Paris-Saclay

Encadrement

Département Physique, instrumentation, environnement, espace (DPHY), ONERA Palaiseau

Direction de thèse : Sylvain Schwartz, ONERA/DPHY

Autres : Alexis Bonin, ONERA/DPHY

Jury

Igor Dotsenko, Laboratoire LCAR, Université Toulouse III

Shannon Whitlock, Laboratoire de Matière Quantique Exotique, Université de Strasbourg

Fabienne Goldfarb, Laboratoire LUMIN, Université Paris-Saclay

Kevin Weatherill, Université de Durham

Financement ONERA

Contact sylvain.schwartz@onera.fr

Prix du meilleur poster de la journée Quantum Saclay 2023

Résumé Les atomes de Rydberg sont des atomes portés dans un état de grand nombre quantique principal, et dont l'électron de valence orbite très loin du noyau. Cet éloignement confère aux atomes de Rydberg des propriétés hors normes par rapport aux atomes ordinaires et grâce auxquelles ils sont devenus le cœur de nombreux développements et applications de la physique quantique expérimentale moderne. En particulier, ils possèdent des transitions dans les domaines radiofréquence (RF) et térahertz (THz) avec de très grands éléments de matrice, qui les rendent extrêmement sensibles aux champs électromagnétiques dans ces domaines de fréquence. Cela a conduit, il y a une dizaine d'années, à l'émergence d'une nouvelle technologie de capteurs de champs RF et THz, dans lesquels l'amplitude du champ est mesurée en faisant la spectroscopie, avec un signal de transparence électromagnétiquement induite, du doublet Autler-Townes induit par l'interaction entre le champ et les états de Rydberg des atomes d'une vapeur chaude. De tels capteurs offrent plusieurs avantages intéressants parmi lesquels une très bonne sensibilité, une plus large gamme de fréquences accessibles, une taille indépendante de la fréquence du champ mesuré, un besoin en calibration fortement réduit, et la possibilité de mesurer l'amplitude, la phase et la polarisation. Tous ces avantages font des capteurs à base d'atomes de Rydberg de très bons candidats pour de nombreuses applications, notamment dans les domaines des télécommunications ou de la détection radar. Actuellement, ces capteurs font l'objet d'une multitude de travaux et d'évolutions visant à améliorer leurs performances en termes de sensibilité, d'exactitude, de bande passante de mesure, ou de résolution spatiale. L'usage d'atomes froids au lieu de vapeurs proches de la température ambiante constitue pour cela une piste prometteuse, notamment en raison de leur meilleure cohérence et de leur effet Doppler fortement réduit. La présente thèse porte sur l'étude expérimentale d'une nouvelle approche pour la métrologie de champs RF avec des atomes de Rydberg froids, basée sur la spectroscopie de déplétion de piège. Elle consiste à faire interagir avec le champ RF un ensemble d'atomes de ^{87}Rb refroidis et confinés dans un piège magnéto-optique, et à sonder le doublet Autler-Townes induit par le champ à l'aide d'un effet de déplétion du piège. Le mécanisme responsable des pertes est l'ionisation des atomes sous l'action du rayonnement de corps noir ambiant. Cette étude s'est appuyée sur la réalisation complète d'un dispositif expérimental permettant de mettre en œuvre la spectroscopie de déplétion. Malgré une faible bande passante de mesure, la méthode proposée ici a démontré une très bonne linéarité (écart inférieur à 2 %), une sensibilité de l'ordre de $250 (\mu\text{V}/\text{cm})/\text{Hz}^{1/2}$, ainsi qu'une absence de dérive sur plusieurs heures d'intégration avec une résolution de l'ordre de $5 \mu\text{V}/\text{cm}$. Elle offre également une plus grande simplicité de mise en œuvre que d'autres approches utilisant des atomes froids, et permet, en principe, de déterminer à la fois la fréquence et l'amplitude du champ. Dans cette soutenance, nous décrirons le principe, le montage et la mise en œuvre de notre dispositif expérimental, nous présenterons les résultats des mesures effectuées grâce à lui, puis nous en analyserons les performances métrologiques, les avantages et les limites.

Mots-clés Capteurs de champs RF, atomes froids, états de Rydberg, spectroscopie de déplétion, effet Autler-Townes

Télécharger la thèse : <https://theses.fr/2024UPASP154>

Noémie Marquet

Thèse soutenue le 9 décembre 2024 à Palaiseau

ED 572 (EDOM) - Ondes et Matière - Paris-Saclay

Encadrement

Département Physique, instrumentation, environnement, espace (DPHY), ONERA Palaiseau

Direction de thèse : Antoine Godard ONERA/DSD-PHY ;

Nassim Zahzam, ONERA/DPHY

Jury

Anne Louchet-Chauvet, Institut Langevin, Université Paris Sciences et Lettres

Jean-François Clément IEMN, Université de Lille

Franck Pereira Dos Santos, SYRTE, Université Paris Sciences et Lettres

Olivier Carraz, European Space Agency

Financement ESA, ONERA

Contact nassim.zahzam@onera.fr

Résumé Le but des missions spatiales de gravimétrie est de mesurer le champ de gravité avec une grande précision. Les données récoltées sont utilisées en sciences du climat, en hydrologie, en géophysique, et pour mieux comprendre le réchauffement climatique. Ces missions embarquent actuellement des accéléromètres électrostatiques avec une grande sensibilité mais dérivant à long terme. Cette dérive peut être corrigée en recalibrant l'accéléromètre électrostatique avec un accéléromètre à atomes froids ayant une plus importante stabilité. De tels accéléromètres utilisent l'interférométrie atomique pour mesurer l'accélération et, une des difficultés de la mesure spatiale vient de la rotation du satellite autour de la Terre qui impacte tant le contraste du signal que sa phase.

Lors de cette thèse, nous avons mis en place une méthode expérimentale pour limiter l'impact de la rotation sur l'interféromètre. Le dispositif expérimental est la combinaison d'un accéléromètre électrostatique et d'un interféromètre à atomes froids. Dans cette configuration originale, la masse d'épreuve de l'accéléromètre électrostatique, très bien contrôlée selon les six degrés de liberté de l'espace, est employée comme miroir de rétro-réflexion pour l'interféromètre atomique. La méthode utilisée pour limiter l'impact de la rotation consiste à tourner le miroir pour garder la direction de mesure constante pendant l'interféromètre. Avec cette méthode de compensation de la rotation, 99 % du contraste a été récupéré. De plus, la phase de l'interféromètre causée par la rotation a été mesurée et modélisée. Avec un modèle fiable et une mesure de la rotation de l'instrument par un gyromètre, cette phase supplémentaire peut être corrigée de la mesure. Finalement, les performances attendues d'un accéléromètre atomique compensé de la rotation à bord d'un satellite ont été étudiées.

Mots-clés Atomes froids, gravimétrie spatiale, capteurs inertiels, interférométrie atomique, accéléromètre, capteurs quantiques

Clément Salducci

Thèse soutenue le 12 novembre 2024 à Paris

ED 572 (EDOM) - Ondes et Matière - Paris-Saclay

Encadrement

Département Physique, instrumentation, environnement, espace (DPHY), ONERA Palaiseau

Direction de thèse : Yannick Bidel, ONERA/DPHY ; Malo Cadoret, Laboratoire Commun de Métrologie, CNAM

Jury

Isabelle Maurin, CNRS, Université Sorbonne Paris Nord

Andrea Bertoldi, Laboratoire Photonique Numérique et Nanoscience, IOGS

Jean Dalibard, Collège de France

Arnaud Landragin, Syrte, Observatoire de Paris

Elizabeth Donley, National Institute of Standards and Technology

Vince Josse, Laboratoire Charles Fabry, IOGS

Financement DGA/AID, MESR (EDOM)

Contact yannick.bidel@onera.fr

Résumé Le travail présenté porte sur la réalisation expérimentale puis l'étude d'un gyromètre à atomes froids basé sur l'interférence d'ondes de matière. Dans le cadre du développement d'un dispositif de centrale inertielle à atomes froids, des méthodes ont été proposées pour implémenter un gyromètre atomique uniaxe qui allie compacité, sensibilité et simplicité afin de pouvoir étendre ce dispositif aux autres directions de mesure du futur capteur multiaxes. En particulier, une méthode originale de lancer des atomes basée une impulsion de gradient de champ magnétique a été étudiée, démontrant une stabilité du facteur d'échelle du gyromètre de l'ordre de 700 ppm sur 24 h due aux variations de la vitesse de lancer. Cette limite n'est pas fondamentale et peut être abaissée en améliorant le dispositif expérimental. Par ailleurs, les performances du gyromètre atomique ont été analysées. En conditions statiques, le dispositif a été testé pendant 44 h d'intégration en alternant les directions de lancer afin de moyenniser certains effets systématiques. Les résultats de cette étude ont montré un biais relativement large sur la mesure de rotation de la Terre, de l'ordre de 25 %, qui pourrait provenir d'un effet combiné des aberrations de front d'onde du laser Raman et d'une dissymétrie entre les deux configurations de lancer. Le gyromètre a démontré une sensibilité aux temps courts de l'ordre de $10^{-5} \text{ rad.s}^{-1}/\sqrt{\text{Hz}}$, a priori limité par la correction non-parfaite des vibrations du sol, ainsi qu'une stabilité long terme du biais de $4.10^{-7} \text{ rad.s}^{-1}$ sur toute la plage d'intégration. L'hybridation du gyromètre à atomes froids avec un gyromètre commercial a permis d'abaisser d'un facteur 3 la dérive du biais de ce dernier. Dans un second temps, le gyromètre atomique a été testé en conditions dynamiques simulées par la mise en rotation du miroir de rétro-réflexion Raman. Sur l'entièreté de la plage dynamique de mesure limitée par la décroissance exponentielle du contraste de l'interféromètre atomique avec la vitesse de rotation, le capteur a démontré une linéarité de l'ordre du pourcent. En revanche, l'accord avec le gyromètre commercial varie entre $< 1 \%$ et 5% selon le jeu de données.

Mots-clés Atomes froids, gyromètre, interférométrie atomique, centrale inertielle, ondes de matière



Hugo Lévy

Thèse soutenue le 29 octobre 2024 à Paris

ED 564 (PIF) - Physique en Ile de France

Encadrement

Département Physique, instrumentation, environnement, espace (DPHY), ONERA Châtillon

Direction de thèse : Joël Bergé, ONERA/DPHY ;
Jean-Philippe Uzan, Institut d'Astrophysique de Paris**Jury**

Clare Burrage, Université de Nottingham

Meike List, German Aerospace Center

Philippe Brax, IPhT, CEA

Patrick Joly, UMA, ENSTA Paris

Gilles Métris, Observatoire de la côte d'Azur

Financement ONERA**Contact** joel.berge@onera.fr

Résumé Les théories tenseur-scalaires de la gravité font partie des alternatives à la Relativité Générale les plus convaincantes, résilientes, et riches en termes de phénoménologie. Les modèles encore viables aujourd'hui reposent sur des mécanismes d'écrantage afin d'être compatibles avec les tests locaux de la gravité, tout

Vers des solutions numériques bien posées et polyvalentes pour les théories tenseur-scalaires de la gravité avec écrantage : applications aux échelles sub-système solaire

en conservant une certaine pertinence physique. La recherche de ces champs scalaires hypothétiques dépend alors de notre capacité à concevoir des expériences adaptées à leur phénoménologie. Hélas, cette tâche est grandement entravée par la difficulté de modéliser suffisamment précisément les effets de cinquième force dans des configurations réalistes. En effet, cela nécessite de résoudre des équations aux dérivées partielles semi-linéaires en présence de distributions de masse non-triviales, ce pour quoi les méthodes purement analytiques ne sont que d'un usage limité. Dans cette perspective, le présent travail de thèse traite ce problème via le développement d'un outil numérique polyvalent visant à obtenir des solutions bien posées aux équations de Klein-Gordon non-linéaires qui apparaissent dans de tels modèles de gravité modifiée. L'outil en question, nommé femtoscope, s'appuie sur la méthode des éléments finis. Celle-ci permet de représenter des géométries arbitrairement complexes et des problèmes multi-échelles par le biais de raffinement locaux du maillage. Les non-linéarités sont quant à elles traitées par la méthode de Newton.

La nouveauté majeure apportée par femtoscope est sa gestion des conditions aux limites asymptotiques – i.e. lorsque le comportement du champ n'est connu qu'infiniment loin des sources – dont la prise en compte de manière appropriée est souvent essentielle en vue d'obtenir des solutions numériques pourvues de sens physique. Pour ce faire, nous utilisons la méthode des éléments finis inversés.

Nous nous appuyons ensuite sur femtoscope pour étudier la gravité tenseur-scalaire aux échelles sub-système Solaire. En utilisant un modèle réaliste de la Terre, nous traitons la question relative à la détectabilité d'une cinquième force de type caméléon, au moyen de missions de géodésie spatiale telles que GRACE-FO. L'influence de l'atmosphère terrestre ainsi que la rétroaction d'un satellite sur le champ scalaire sont toutes deux prises en compte. Nous constatons que la cinquième force a un effet supposément mesurable sur la dynamique orbitale d'un point matériel, mais que la connaissance imparfaite de la distribution de masse à l'intérieur de la Terre donne lieu à des dégénérescences qui réduisent considérablement le pouvoir contraignant de ce type de mission. Ces dégénérescences peuvent en principe être levées en réalisant l'expérience à deux altitudes différentes.

Enfin, nous ouvrons de nouvelles perspectives en explorant la possibilité de tester les théories tenseur-scalaires avec écrantage en se servant d'horloges atomiques. L'idée des expériences que nous décrivons est d'exploiter la contribution du champ scalaire sur le décalage vers le rouge gravitationnel, cette dernière étant absente en Relativité Générale. On souligne le fait que de telles expériences sont de nature profondément différente des recherches de cinquième force.

Mots-clés Gravitation, gravité tenseur-scalaire, méthode des éléments finis, mécanismes d'écrantage, géodésie spatiale, relativité générale

Télécharger la thèse : <https://theses.fr/2024UPASP119>

**Thèse de doctorat ONERA
soutenues en 2024**

**Domaine scientifique
SIMULATION NUMÉRIQUE AVANCÉE**

Selon les départements et leurs thématiques scientifiques :

AÉRODYNAMIQUE, AÉROÉLASTICITÉ, ACOUSTIQUE

MULTIPHYSIQUE POUR L'ÉNERGÉTIQUE

TRAITEMENT DE L'INFORMATION ET SYSTÈMES

Mathématiques appliquées et calcul scientifique

Kokou Dotse	Création de maillages quadrilatéraux bloc structurés à partir de champ de croix prescrit et respectant les caractéristiques physiques d'une scène de calcul	180
Julien Demange-Chryst	Nouvelles méthodes d'estimation par échantillonnage préférentiel pour l'analyse de sensibilité et l'estimation d'évènements rares	182
Maëlys Ruello	Méthodes de propagation de type <i>one-way</i> pour les équations de Navier-Stokes : vers le calcul des perturbations optimales	184

Méthodes numériques

Victor Courtin	Extension de quelques solveurs de Riemann approchés pour la simulation d'écoulements compressibles-incompressibles	186
Alexis Dorange	Développement d'une méthodologie pour la simulation haute-fidélité de l'aérodynamique des micro-drones	188
Cyril Dosne	Développement et mise en œuvre de la formulation adjointe de modèles <i>body-force</i> explicites en vue d'optimisations aéro-propulsives	190
Arthur Tételin	Reconstruction des variables vectorielles dans le cadre des méthodes volumes finis sur maillages non-structurés généraux	192

Kokou Dotse

Thèse soutenue le 12 juin 2024 à Toulouse

ED 475 (MITT) - Mathématiques Informatique Télécommunications de Toulouse

Encadrement

Département Traitement de l'information et systèmes (DTIS), ONERA Toulouse

Direction de thèse : Sébastien Pernet, Vincent Mouysset, ONERA/DTIS

Jury

Franck Ledoux, CEA

Christophe Geuzaine, Université de Liège

Hélène Barucq, INRIA-Bordeaux

Vincent Chiaruttini, Safran

Financement ONERA

Contact vincent.mouysset@onera.fr

Résumé L'objectif de cette thèse est d'apporter de nouvelles solutions pour améliorer les performances lors de la résolution numérique d'équations aux dérivées partielles en étudiant une méthode de génération de maillages quadrilatéraux basée sur des champs de croix. Notre approche repose sur l'alignement d'un champ de croix donné par rapport au bord du domaine de calcul, suivi du partitionnement de ce dernier en régions à quatre côtés que l'on maillera ensuite en quadrilatères. Cela nous permet de générer un maillage structuré par bloc tout en préservant la position des singularités du champ de croix initial. Pour ce faire, nous mettons en place une étude théorique des champs de croix nous permettant d'identifier les conditions sous lesquelles un champ de croix donné permet effectivement de partitionner et de mailler le domaine sur lequel il est défini. Cette méthode est d'abord présentée pour les domaines simplement connexes, puis généralisée aux domaines non-simplement connexes. Elle nous permet de gérer les domaines constitués de plusieurs matériaux ainsi que les points singuliers de bord qui, en pratique, permettent de délimiter des portions de la frontière du domaine pour prendre en compte des conditions aux limites mixtes dans le cadre des simulations numériques. Enfin, nous mettons en place la discrétisation de la méthode sur des maillages triangulaires, puis nous proposons une généralisation à des surfaces courbes dans l'espace.

Mots-clés Champ de croix, maillage quadrilatéral, maillage en blocs structurés, énergie de Ginzburg-Landau

Télécharger la thèse : <https://theses.fr/2024ESAE0027>

Julien Demange-Chryst

Thèse soutenue le 18 novembre 2024 à Toulouse

ED 475 (MITT) - Mathématiques Informatique Télécommunications de Toulouse

Encadrement

Département Traitement de l'information et systèmes (DTIS), ONERA Toulouse

Direction de thèse : François Bachoc, Institut de Mathématiques de Toulouse ;
Jérôme Morio, ONERA/DTIS

Jury

Sébastien Da Veiga, ENSAI

Arnaud Guyader, Sorbonne Université

Béatrice Laurent-Bonneau, INSA Toulouse

Nicolas Bousquet, EDF Paris Saclay

Erwan Scornet, Sorbonne Université

Financement MESR, ONERA

Contact jerome.morio@onera.fr

Résumé Dans de nombreux domaines scientifiques, l'évaluation de la fiabilité et plus généralement l'étude d'un système complexe sont réalisées grâce à un modèle numérique visant à simuler le plus fidèlement possible son comportement. L'intérêt d'une telle modélisation est d'être en mesure d'étudier le système de manière numérique et non expérimentale. Cette approche est particulièrement bénéfique dans le cas d'un système critique où toute défaillance peut avoir d'importantes conséquences. Mathématiquement parlant, un tel modèle est généralement considéré comme une fonction déterministe de type boîte noire et est très coûteux en temps à évaluer. Puis, le système complexe est soumis à des incertitudes aléatoires en entrées qui sont modélisées dans un cadre probabiliste par une distribution

multidimensionnelle. La prise en compte de ces incertitudes en entrées ainsi que leur propagation au travers du modèle forment la méthodologie de la quantification d'incertitudes. Dans ce contexte, nous allons dans cette thèse nous intéresser à trois questions majeures. Tout d'abord, l'analyse de sensibilité, assimilée à une propagation d'incertitudes inverse, consiste à déterminer comment l'incertitude en sortie du modèle peut être attribuée aux différentes sources d'incertitudes en entrée. Puis, l'analyse de fiabilité consiste à estimer la probabilité de la défaillance du système, qui est un évènement rare défini par des considérations physiques. Enfin, l'analyse de sensibilité fiabiliste combine les deux études précédentes et fournit une compréhension plus approfondie de la défaillance. Chacune de ces trois analyses requiert le calcul de mesures quantitatives adaptées permettant d'apporter une réponse à l'objectif de l'étude, et leur estimation précise renferme alors un enjeu majeur afin de correctement évaluer les risques du système. Des méthodes d'estimation spécifiques ont été développées dans la littérature, mais ne répondent pas à toutes les embûches qui peuvent être rencontrées en pratique. C'est pourquoi nous introduisons dans cette thèse de nouvelles méthodes par échantillonnage préférentiel visant à réduire l'erreur d'estimation des indices de sensibilité et de la probabilité de défaillance dans le cas où la défaillance est un évènement rare et/ou en grande dimension. Dans un premier temps, la procédure d'échantillonnage commune pour l'estimation des indices de Sobol pour l'analyse de sensibilité n'est pas optimale dans l'optique de réduire au maximum l'erreur de leur estimation. Notre première contribution est alors la construction de nouveaux estimateurs visant à minimiser un critère d'optimalité de manière adaptative en couplant les méthodes de réduction de variance de l'échantillonnage préférentiel et des variables de contrôle. Dans un second temps, les méthodes d'estimation de la probabilité de défaillance spécifiques à la grande dimension ne sont généralement pas très flexibles dans le sens où de fortes connaissances préalables sur le problème et la défaillance sont requises pour qu'elles soient pertinentes et permettent d'obtenir une faible erreur. Pour y remédier, nous proposons de tirer avantage de la flexibilité et de la robustesse face à la dimension d'un auto-encodeur variationnel, un modèle génératif basé sur des réseaux de neurones, en l'adaptant et en l'utilisant dans un contexte d'échantillonnage préférentiel. Dans un dernier temps, la méthode d'estimation existante des indices de Shapley pour l'analyse de sensibilité fiabiliste ne prend pas en compte les contraintes liées au fait que la probabilité de défaillance soit potentiellement très faible. Notre dernière contribution est alors de réécrire ces indices par échantillonnage préférentiel et nous montrons que les nouveaux estimateurs correspondants permettent de considérablement réduire l'erreur d'estimation lorsque la densité auxiliaire de tirage est choisie judicieusement. Pour finir, nous illustrons l'intérêt pratique de ces développements sur des cas tests académiques.

Mots-clés Quantification d'incertitudes, analyse de sensibilité, estimation d'évènements rares, échantillonnage préférentiel, auto-encodeur variationnel, indices de Shapley

Télécharger la thèse : <https://theses.fr/s297021>

Maëlys Ruello

Thèse soutenue le 11 décembre 2024 à Toulouse

ED 467 (AA) - Aéronautique Astronautique - Toulouse

Encadrement

Département Traitement de l'information et systèmes (DTIS), ONERA Toulouse

Direction de thèse : Sébastien Pernet , ONERA/DTIS ;

Jean-Philippe Brazier ONERA/DMPE

Jury

Hélène Barucq, INRIA

Jean-Christophe Robinet, ENSAM

Emmanuel Perrey-Debain, UTC

Christophe Airiau, IMFT

Financement ISAE, ONERA

Contact sebastien.pernet@onera.fr

Résumé Les approches *One-Way* sont des méthodes de simulation numérique des phénomènes de propagation d'ondes dans une direction privilégiée, qui permettent de palier le défaut (suivi d'un seul mode) des méthodes modales tout en garantissant un coût de calcul faible par rapport à une simulation directe. Bien que ces méthodes soient utilisées depuis plus de cinquante ans dans divers domaines comme l'électromagnétisme et la géophysique, leur application en mécanique des fluides est plus récente avec les travaux pionniers de T. Colonius et A. Towne en 2015. Cette thèse possédait un double objectif. Dans un premier temps, il s'agissait de développer des méthodes de simulation de type *One-Way* dans le cadre des équations de Navier-Stokes en réalisant une extension de la méthodologie proposée dans les travaux de thèse de C. Rudel pour les équations d'Euler. Dans un second temps, elles ont été exploitées pour concevoir un outil numérique dans le but de calculer la perturbation optimale d'un écoulement. L'ensemble de ces développements a été éprouvé sur différentes problématiques représentatives et en considérant des situations de complexité croissante. En particulier, le cas d'un conduit partiellement revêtu d'un liner acoustique en présence d'une instabilité de surface a été traité à l'aide d'une approche de type méthode de décomposition de domaine basée sur les solveurs *One-Way* et comparé à la fois à des données expérimentales et des résultats issus d'autres solveurs numériques. De plus, la capacité des approches *One-Way* à propager des instabilités de couches limites et leur éventuel couplage a été observée. Enfin, un algorithme de calcul de perturbations optimales, basé sur une méthode adjointe, a été utilisé pour déterminer entre autres le forçage optimal et la réponse associée d'un écoulement de couche limite bidimensionnelle à Mach 4,5.

Mots-clés Équations *One-Way*, propagation d'ondes, transition lumineuse-turbulent, écoulement de couche limite, perturbations optimales

Télécharger la thèse : <https://theses.fr/2024ESAE0061>

Victor Courtin

Thèse soutenue le 16 décembre 2024 à Meudon

ED 574 (EDMH) - Ecole Doctorale de Mathématique Hadamard - Paris-Saclay

Encadrement

Département Aérodynamique, aéroélasticité, acoustique (DAAA), ONERA Meudon

Direction de thèse : Christophe Chalons, UVSQ/LMV ;
Florent Renac, ONERA/DAAA

Autres : Jean-Christophe Boniface, Cédric Content, ONERA/DAAA

Jury

Pierre-Henri Maire, CEA/CESTA

Rémi Abgrall, Institut des Mathématiques, Université de Zurich

Marica Pelanti, ENSTA/Unité de Mécanique

Vincent Perrier, INRIA, Université de Pau et des Pays de l'Adour

Financement DGAC

Contact jean-christophe.boniface@onera.fr

Résumé Dans cette thèse, on s'intéresse à la simulation d'écoulements compressibles à l'aide de méthodes numériques implicites de type solveurs de Riemann, telles que la méthode de Roe ou le schéma HLLC. L'objectif est de développer des extensions faible nombre de Mach afin de préserver la précision des solutions discrètes dans la limite bas Mach. Ce type d'écoulement est souvent rencontré dans la simulation de configurations industrielles, caractérisées par la présence de zones plus ou moins étendues à faible vitesse. On se focalise sur la composante hyperbolique des équations de Navier-Stokes, qui constitue le cœur du problème d'analyse numérique abordé dans cette thèse, les équations d'Euler. On y expose une analyse approfondie et détaillée retraçant un sujet de recherche vieux de plusieurs décennies,

qui présente encore d'importants défis, même pour ce modèle académique. La littérature recense un grand nombre d'extensions possibles pour le schéma de Roe, qui sont généralement faciles à implémenter. Ces extensions consistent à modifier certains termes de la dissipation numérique, en amplifiant ou diminuant leur contribution dans la limite faible nombre de Mach (on parle de *rescaling* de la dissipation numérique). Elles permettent par ailleurs d'obtenir une solution discrète compressible approchant la solution analytique issue de la théorie du potentiel pour le problème incompressible, sans pour autant introduire une détérioration des résultats dans le régime compressible. La capture des ondes de choc pour les écoulements transsoniques et supersoniques reste quasiment inchangée. Cependant, il existe plusieurs études suggérant de faire preuve de vigilance quant au choix de la formulation de ce type de correction. Il est connu de la littérature que des pertes de stabilité numérique sont généralement observées, ainsi que des risques d'apparition de problèmes de découplage vitesse-pression, détériorant fortement la précision globale de la solution discrète dans les faibles vitesses. Ces travaux se fondent sur deux corrections très différentes du schéma de Roe, issues de la littérature scientifique, et qui présentent des propriétés discrètes distinctes. La première approche, proposée par C.-C. Rossow, amplifie les sauts de pression en introduisant une vitesse artificielle du son, tandis que la seconde, développée par F. Rieper, vise à uniquement atténuer les sauts de vitesse. Ces deux approches illustrent deux stratégies majeures fréquemment utilisées dans les extensions à faible nombre de Mach. Nous commençons tout d'abord par l'analyse asymptotique discrète de l'approche proposée par C.-C. Rossow non publiée dans la littérature, en abordant également la formulation de la condition de stabilité au sens de von Neumann. On montre que cette correction évite l'écueil du découplage vitesse-pression. Ensuite, nous présentons une méthode numérique, visant à construire des phases implicites exactes nécessaires à l'intégration temporelle, en utilisant la différentiation algorithmique et un solveur direct. Ces techniques nous permettent de contourner la contrainte très stricte de stabilité sur le pas de temps, et d'obtenir des solutions discrètes en quelques centaines d'itérations, et ce même pour des écoulements à très faible nombre de Mach. La généralisation de ces travaux au schéma HLLC se fait ensuite en poursuivant l'analyse de la structure d'onde faite par M. Pelanti. Ces travaux révèlent une profonde similarité entre les dissipations numériques de ces méthodes. En particulier, nous dérivons un formalisme commun entre ces deux schémas, afin de simplifier les analyses, et la transposition d'une correction d'un solveur de Riemann approché à l'autre, au sens d'une relation très claire entre les deux méthodes. Cette analyse nous permet en particulier de dériver le schéma HLLC-Rossow, mais également d'explicitier l'expression de la matrice de viscosité du schéma HLLC, qui exhibe une ressemblance intéressante avec celle du schéma Roe.

Mots-clés Mécanique des fluides numérique, écoulement compressible, régime bas-Mach, écoulement incompressible, méthode des volumes finis, stabilité au sens de von Neumann

Télécharger la thèse : <https://theses.fr/2024UPASM041>



Alexis Dorange

Thèse soutenue le 10 décembre 2024 à Meudon

ED 626 (IPP) - Institut Polytechnique de Paris

Encadrement

Département Aérodynamique, aéroélasticité, acoustique (DAAA), ONERA Châtillon

Direction de thèse : Éric Garnier, ONERA/DAAA

Autres : Christophe Benoit, ONERA/DAAA

Jury

Éric Lamballais, Université de Poitiers

Paola Cinnella, Sorbonne Université

Héloïse Beaugendre, Université de Bordeaux

François Richez, ONERA/DAAA

Financement ONERA

Contact christophe.benoit@onera.fr

Résumé Dans cette thèse, on s'intéresse à la simulation d'écoulements compressibles à l'aide de méthodes. L'objectif de cette thèse est le développement d'une méthodologie permettant la simulation haute-fidélité de tous types de géométries de micro-drones. Bien que ces véhicules soient très présents dans l'espace aérien, la physique des écoulements qu'ils induisent est encore mal connue, en outre ils sont associés à des problématiques de nuisance acoustique. L'écoulement autour de ces derniers présente des phénomènes complexes de mécanique des fluides tels que la transition laminaire-turbulent, la séparation ou encore un bulbe de décollement laminaire. La Simulation des Grandes Échelles (*Large Eddy Simulation* - LES) est mise en œuvre dans cette étude car elle permet de prendre en compte avec précision les phénomènes complexes mis en jeu dans la couche limite des hélices de drone, au contraire des approches de plus basses fidélités. Une autre problématique liée aux drones est leur géométrie complexe, qui peut grandement compliquer l'étape de génération de maillage en vue de leur simulation. Dans cette optique, les méthodes Chimère et de frontières immergées sont utilisées pour simplifier cette étape. La première permet de mailler indépendamment et plus simplement chacune des pales à l'aide de maillages structurées curvilignes, tandis que la seconde permet de s'affranchir de la génération d'un maillage conforme autour du fuselage. Un couplage entre ces deux méthodes est finalement développé pour la simulation d'éléments géométriques très proches les uns des autres. Tout d'abord, les résultats d'une simulation LES sont présentés pour un rotor dont la géométrie des pales est entièrement définie analytiquement. Cette simulation permet de mettre en évidence la présence d'un bulbe de séparation laminaire ainsi que des mécanismes de rattachements et de décollements laminaires et turbulents. Elle met également en évidence les différentes sources de bruit générées par les hélices. Par la suite, une étude sur la montée en complexité géométrique permet de mesurer l'effet de l'ajout des différentes parties du drone sur les performances du rotor. En particulier, ces simulations mettent en avant l'impact du moyeu et des bras sur les efforts aérodynamiques, ainsi que les émissions acoustiques globales. Au terme de cette thèse, un drone complet est finalement simulé à l'aide de l'ensemble des éléments méthodologiques introduits dans le cadre de ces travaux. Les efforts globaux ainsi que l'acoustique complète du drone sont analysés. Cette application représente la première simulation connue d'un drone complet réalisée à l'aide d'une approche LES.

Mots-clés Mécanique des fluides, simulation des grandes échelles, drone, méthode Chimère, méthode de frontières immergées

Télécharger la thèse : <https://theses.fr/s304169>

Cyril Dosne

Thèse soutenue le 23 juillet 2024 à Meudon

ED 602 (SPI) - Sciences pour l'Ingénieur - Centrale Nantes

Encadrement

Département Aérodynamique, aéroélasticité, acoustique (DAAA), ONERA Meudon

Direction de thèse : Jacques Peter, ONERA/DAAA

Autres : Marco Carini, ONERA/DAAA

Jury

Kyriakos Giannakoglou, National Technical University, Athens

Tom Verstraete, Von Karman Institute

Christophe Corre, Centrale Lyon

Guillaume Dufour, ISAE-Supaero

Ingrid Lepot, Cenaero, Charleroi

Raphaël Barrier, ONERA/DAAA

Sébastien Bourrasseau, ONERA/DAAA

Financement UE

Contact marco.carini@onera.fr

Développement et mise en œuvre de la formulation adjointe de modèles *body-force* explicites en vue d'optimisations aéro-propulsives

Résumé Dans l'aviation civile, les études portant sur les nouveaux systèmes propulsifs, comme les moteurs à très haut taux de dilution, et sur les architectures d'intégration motrice innovantes, tels que les systèmes à ingestion de couche limite, nécessitent une modélisation couplée de l'aérodynamique externe et du système propulsif dès les premiers stades de conception. Les modèles *body-force* se sont avérés capables de reproduire l'essentiel du couplage aéro-propulsif à un coût de calcul réduit. Cependant, ils manquent d'une formulation adjointe pour être employés dans des optimisations par gradient. Cette thèse a pour but de développer une approche adjointe pour les modèles *body-force* explicites. Ensuite, plusieurs optimisations aéro-propulsives sont menées sur une configuration académique de propulsion distribuée. Malgré la simplicité du modèle utilisé, une réduction de 10,5 % de la consommation de puissance est obtenue. Le potentiel de cette nouvelle méthode est ensuite évalué pour l'optimisation préliminaire de compresseurs, d'abord sans distorsion d'entrée d'air, à l'aide du modèle de Hall. Les gradients de forme des aubes calculés à l'aide de l'adjoint *body-force* sont comparés à ceux obtenus via des simulations de haute-fidélité, révélant une très bonne capacité de prédiction des gradients du rotor, sur une grande partie de la caractéristique du compresseur. En revanche, la précision des gradients du rotor est réduite à proximité du blocage, et n'est pas satisfaisante pour le stator. L'optimisation par adjoint *body-force* du compresseur a permis d'améliorer le rendement au point nominal, comme confirmé par des simulations de haute-fidélité. Sous distorsion radiale, la méthode adjointe *body-force* s'est à nouveau révélée capable d'améliorer les performances du compresseur. Les analyses haute-fidélité des géométries obtenues par optimisations utilisant l'adjoint *body-force* montrent une augmentation du rendement isentropique comprise entre 1,16 et 1,47 %, selon la formulation du problème d'optimisation retenue. Enfin, une optimisation du compresseur soumis à une distorsion s'étendant sur la totalité de sa circonférence a été conduite avec l'adjoint *body-force*. Ces résultats très prometteurs sont cohérents avec ceux disponibles dans la communauté scientifique et obtenus à l'aide de calculs de haute-fidélité.

Mots-clés Adjoint, *body-force*, propulsion aéronautique, optimisation par gradient, distorsions d'entrée d'air

Arthur Tételin

Thèse soutenue le 14 juin 2024 à Châtillon

ED 468 (MEGEP) - Mécanique, Énergétique, Génie civil, Procédés - Toulouse

Encadrement

Département Multiphysique pour l'Énergétique (DMPE), ONERA Châtillon

Direction de thèse : Philippe Villedieu, ONERA/DMPE

Autres : Clément Le Touze, ONERA/DMPE

Jury

Jean-Pierre Croisille, Université de Lorraine

Stéphane Clain, Coimbra Universit, Portugal

Pierre-Henri Maire, CEA/CESTA

Claire Chainais-Hillairet, Université Lille 1

Financement ONERA

Contact clement.le_touze@onera.fr

Résumé Les simulations numériques dans le domaine de l'énergétique peuvent présenter de forts gradients et des discontinuités, ainsi qu'une forte disparité d'échelles spatiales et temporelles. C'est typiquement le cas des simulations menées avec le code Cedre, développé par le département multi-physique pour l'énergétique de l'ONERA. Il est donc nécessaire de développer des méthodes numériques précises, robustes et performantes. Dans ce cadre, la reconstruction des variables aux faces des volumes de contrôle est l'un des éléments clé de la résolution des équations de conservation hyperboliques dans les approches volumes finis. Ces reconstructions permettent en effet d'améliorer la précision du calcul des flux numériques, ce qui a une influence majeure sur la précision globale du schéma. En outre, il est bien connu qu'une reconstruction linéaire ne suffit pas à assurer la stabilité du schéma dans le cas général, ce qui nécessite l'utilisation de reconstructions limitées. Si la reconstruction des variables scalaires a fait l'objet d'un grand nombre de travaux ces dernières décennies, très peu d'études se sont jusqu'à présent intéressées aux reconstructions des variables vectorielles. La plupart des approches des codes de calculs industriels comme Cedre consiste en effet à reconstruire chaque composante des vecteurs indépendamment des autres avec une approche scalaire. Néanmoins, une telle approche se révèle être dépendante du repère : la solution obtenue change en fonction du repère choisi, engendrant divers problèmes de précision ou de conservation sur des maillages présentant des frontières périodiques par rotation. L'objectif de cette thèse est donc double. Il vise dans un premier temps à étudier théoriquement la précision et la stabilité des reconstructions vectorielles, puis dans un second temps à développer une méthode de reconstruction vectorielle de type MUSCL multipente qui soit efficace, précise et robuste. Pour cela, nous introduisons les κ -schémas limités, qui permettent d'obtenir une reconstruction d'ordre 2 invariante par rotation, et facilement adaptable à n'importe quelle condition de monotonie choisie. Nous introduisons aussi la notion de reconstruction fictive afin d'obtenir une écriture du schéma mettant en évidence ses propriétés de stabilité. Nous en déduisons deux conditions de monotonie adaptées aux variables vectorielles, que nous éprouvons ensuite sur différents cas-tests numériques. Enfin, nous présentons une troisième approche, basée sur l'extension directe de la condition de monotonie du cas scalaire vers le cas vectoriel. Bien qu'aucune preuve de stabilité n'ait pu être écrite pour cette approche, elle présente tout de même le meilleur compromis entre stabilité d'une part, et précision et efficacité d'autre part.

Mots-clés Méthode MUSCL multipente, reconstruction vectorielle, méthodes volumes-finis cellule-centrée, maillages non-structurés, invariance par rotation

Télécharger la thèse : <https://theses.fr/2024ESAE0029>

**Thèse de doctorat ONERA
soutenues en 2024**

**Domaine scientifique
TRAITEMENT DE L'INFORMATION
ET SYSTÈMES**

Thèses de doctorat ONERA soutenues en 2024

Domaine TRAITEMENT DE L'INFORMATION ET SYSTÈMES

Selon les thématiques scientifiques du département

TRAITEMENT DE L'INFORMATION ET SYSTÈMES

Conception et optimisation des systèmes		
Ines Cardoso	Méthodes d'approximation pour l'analyse et l'optimisation des systèmes multidisciplinaires partitionnés : application au couplage aéroélastique en conception avion	198
Luiz Fernando Tiberio Fernandez	Optimisation multidisciplinaire intégrant la contrôlabilité pour la conception de drones à décollage et atterrissage verticaux	200
Paul Saves	Optimisation multi-disciplinaire en grande dimension pour l'éco-conception avion avant projet	202
Identification et commande des systèmes		
Périclès Cocaul	Détermination de lois de commande sans modèle pour le pilotage automatique de lanceurs : approches automatiques et apprentissage profond par renforcement	204
Jules Gibart	Stabilité non-linéaire d'un moteur fusée régulé en boucle fermée	206
William Jussiau	Lois de commande pour le contrôle des écoulements oscillateurs	208
Guido Magnani	Stratégies avancées pour le contrôle d'attitude des satellites avec contraintes d'actionnement et sujet à différentes sources de perturbations	210
Pelin Sekercioglu	Commande de systèmes multi-agents sous contraintes par des interactions coopératives et antagonistes	212
Franca Somers	Nouveaux outils probabilistes pour améliorer la vérification et la validation des systèmes de contrôle spatiaux	214
Maxime Zagar	Estimation ensembliste et commande distribuée de flotte coopérative pour la recherche et le suivi de cibles	216

Ingénierie cognitive et interaction homme-système		
Emmanuelle Bonnet	L'action dans la perception temporelle et visuelle : une étude de la modulation des prédictions sensorielles et de la causalité sur la perception	218
Nicolas Pelegrin	Perception du mouvement par la modalité tactile	220
Kelly Steiner	Étude des mécanismes du contrôle sensorimoteur pour la spécification de nouvelles métriques d'évaluation du coût cognitif	222
Ingénierie des systèmes et des logiciels		
Iryna de Albuquerque Silva	Implantation certifiable et efficace de réseaux de neurones sur des systèmes embarqués temps-réel critiques	224
Antoine Aubé	Comprendre la migration infonuagique : exigences et estimation des coûts d'exploitation	226
Anouck Chan	Co-conception d'un produit et de son système industriel : Une approche ingénierie des exigences pour l'aérospatial	228
Damien Guidolin-Pina	Évaluation de performance pire-cas de niveau système en <i>Network Calculus</i>	230
Intelligence artificielle et décision		
Pol Labarbarie	Attaques par patch transférables : une menace potentielle pour les algorithmes de vision par ordinateur opérant dans le monde réel	232
Adrien Le Coz	Caractérisation d'un domaine de fiabilité des classifieurs d'images	234
Perception et traitement de l'information		
Thomas Delaite	Détection et pistage multi-capteur pour la surveillance de l'espace	236
Thomas Di Martino	Apprentissage profond non-supervisé pour le suivi de végétation à partir de séries temporelles SAR en bande C : de l'agriculture aux forêts boréales	238
Marius Dufraisse	Co-conception capteur-traitement par réseau de neurones	240
Kevin Helvig	Apprentissage multi-capteurs pour le contrôle non destructif de matériaux	242
Nathan Letheule	Apports de l'apprentissage profond pour la simulation d'images SAR	244
Robotique et Autonomie		
Quentin Serdel	Navigation sémantique pour robot terrestre autonome en environnement non structuré	246
Sûreté et sécurité des systèmes cyber-physiques		
Iban Guinebert	Méthodologie pour l'intégration d'IP de réseaux de neurones dans une puce avec une assurance de sûreté	248
Timothé Krauth	Modèle génératif profond pour l'estimation de probabilité de collision en vol	250
Renato Murata	Détection et localisation de défauts pour une baie multi-moteurs de lanceur réutilisable	252

Inês Cardoso

Thèse soutenue le 4 décembre 2024 à Toulouse

ED 467 (AA) - Aéronautique Astronautique - Toulouse

Encadrement

Département Traitement de l'information et systèmes (DTIS), ONERA Toulouse

Direction de thèse : Christian Gogu, ISAE-Supaero ;
Sylvain Dubreuil, ONERA/DTIS

Jury

Rodolphe Le Riche, Limos

David Néron, ENS Paris-Saclay

Joaquim R.R.A Martins, University of Michigan

Pierre-Alain Boucard, ENS Paris-Saclay

Mathilde Chevreuil, Université de Nantes

Frédérico Afonso, Université de Lisbonne

Nathalie Bartoli, ONERA/DTIS

Michel Salaün, ISAE-Supaero

Financement ISAE, ONERA

Contact sylvain.dubreuil@onera.fr

Méthodes d'approximation pour l'analyse et l'optimisation des systèmes multidisciplinaires partitionnés : application au couplage aéroélastique en conception avion

Résumé L'analyse et l'optimisation multidisciplinaire (MDAO) est un outil couramment utilisé dans les études préliminaires de conception d'aéronefs. Cependant, la plupart de ces études sont menées à l'aide de modèles de basse-fidélité associés aux différentes disciplines du système. Ces modèles, basés sur des données expérimentales, ne sont plus valables lors de l'étude de nouvelles configurations d'aéronefs pour lesquelles peu d'informations sont disponibles. Il est donc nécessaire de recourir à des modèles de haute-fidélité. Néanmoins, l'utilisation de solveurs haute-fidélité dans un contexte MDAO reste rare, du fait de leur coût de calcul et du manque d'information concernant les dérivées disciplinaires. Pour résoudre ce problème, les approches d'optimisation bayésienne, où l'optimisation est effectuée à l'aide des modèles de substitution, sont apparues comme des approches moins coûteuses qui ne nécessitent pas de connaître les dérivées du système. L'algorithme EGMDO (*Efficient Global Multidisciplinary Design Optimization*) est l'une de ces approches. EGMDO réduit le coût de calcul du problème d'optimisation multidisciplinaire en remplaçant les solveurs disciplinaires par des modèles de substitution basés sur les processus gaussiens (GP) enrichis de manière adaptative. Bien qu'EGMDO réduise avec succès le coût de calcul, il ne possède pas de stratégie de traitement des contraintes et n'est donc pas directement utilisable pour la plupart des études préliminaires. De plus, l'utilisation de modèles de substitution dans le cadre de solveurs haute-fidélité peut entraîner des difficultés supplémentaires. En effet, la sortie de ces solveurs est généralement une quantité discrétisée sur un maillage, pour laquelle des modèles de substitution ne peuvent pas être directement construits. Les stratégies de réduction d'ordre de modèle constituent une piste possible pour surpasser cette difficulté, car elles permettent de représenter les sorties disciplinaires à haute dimension dans un espace de plus faible dimension. La stratégie *Disciplinary Proper Orthogonal Decomposition and Interpolation* (DPOD+I) a développé cette idée en combinant des bases POD globales avec l'interpolation par GP des coordonnées généralisées. Mais bien que la stratégie DPOD+I ait permis l'utilisation de méta modèles avec des solveurs de haute-fidélité, sa performance est significativement diminuée pour les problèmes où le nombre de vecteurs de base requis pour obtenir une petite erreur de projection est important. Cette thèse propose d'aborder les défis rencontrés par les méthodes EGMDO et DPOD+I en développant une extension de l'algorithme EGMDO aux problèmes d'optimisation sous contraintes et en proposant une stratégie de réduction de modèle basée sur l'interpolation de bases POD locales. Nous explorons également l'optimisation basée sur les gradients en exploitant les dérivées analytiques des métamodèles disciplinaires. L'application des développements proposés au couplage aéroélastique d'une aile d'avion montre que l'approche proposée est capable de réduire le coût de calcul des problèmes d'analyse et d'optimisation multidisciplinaires souvent rencontrés lors des études préliminaires de conception d'aéronefs.

Mots-clés Analyse et optimisation multidisciplinaire, méta-modèle, processus gaussien, réduction d'ordre de modèle, conception avion avant-projet

Télécharger la thèse : <https://theses.fr/2024ESAE0057>

Luiz Fernando Fernandez Tiberio

Thèse soutenue le 18 décembre 2024 à Toulouse

ED 467 (AA) - Aéronautique Astronautique - Toulouse

Encadrement

Département Traitement de l'information et systèmes (DTIS), ONERA Toulouse

Direction de thèse : Nathalie Bartoli, ONERA/DTIS ;
Murat Bronz, ENAC

Autres : Thierry Lefebvre, ONERA/DTIS

Jury

Melike Nikbay, Istanbul Technical University

Mark Voskuil, Faculté Militaire Wetenschappen

Jean-Marc Moschetta, ISAE-Supaero

John Jasa, National Renewable Energy Laboratory

Financement Région occitanie, ONERA

Contact thierry.lefebvre@onera.fr

**1^{er} prix concours "vol réel" et le 2^e prix "simulation" lors de l'école d'été IEEE
Multi-Robot System, Prague, 2022**

**Package Delivery Challenge Winner (équipe), International Micro Air Vehicle
Conference IMAV 2022**

Résumé Les améliorations constantes dans l'électronique embarquée, les commandes de vol et la fabrication additive ont permis la prolifération de petits drones, qui sont couramment utilisés à des fins commerciales, récréatives ou militaires. Les multicoptères sont les plus répandus en raison de leur simplicité d'utilisation.

Ils conviennent aux applications nécessitant une grande dextérité en vol, comme l'enregistrement vidéo, la manipulation et les tâches d'itération homme-robot. Cependant, ils présentent souvent une capacité de charge, un rayon d'action et une endurance limitée. Les véhicules à voilure fixe sont mieux adaptés aux vols de longue durée, car leur poids est équilibré par la portance générée par les ailes, améliorant ainsi l'efficacité du vol et la capacité de charge utile. Cependant, ils sont plus difficiles à contrôler et nécessitent une piste d'atterrissage spécifique. Les véhicules hybrides, caractérisés par la présence d'ailes et la capacité de décoller et d'atterrir verticalement, ont attiré l'attention de la communauté de la robotique aérienne. Les robots à décollage et atterrissage verticaux (VTOL) représentent une solution intermédiaire, capable de parcourir de longues distances avec une charge utile tout en conservant un fonctionnement simplifié. Leur application dans des scénarios réels est encore rare, et des défis techniques doivent être résolus pour permettre leur application à grande échelle. La principale contribution de ce travail est la formulation d'une méthodologie de conception de véhicules pour les robots aériens VTOL. La thèse commence par identifier les principales lacunes liées à la conception du véhicule, à la modélisation disciplinaire et au contrôle. Ensuite, elle présente une procédure de conception multidisciplinaire et d'optimisation basée sur trois disciplines : l'aérodynamique, la masse, et la mission. Cette méthodologie est utilisée pour concevoir un véhicule pour une compétition de drones, testé avec des campagnes d'essais en soufflerie et en vol, entraînant des modifications dans la conception. La deuxième version du véhicule est évaluée en compétition et par d'autres essais en vol, démontrant une endurance proche du niveau souhaité. Grâce à cette expérience, la nécessité de prendre en compte d'autres disciplines, notamment les performances de l'hélice et la dynamique du vol, est validée. Ces études sont progressivement ajoutées au problème d'optimisation. Diverses méthodes existantes pour évaluer les performances des hélices dans un écoulement oblique sont étudiées et comparées aux résultats expérimentaux, permettant de sélectionner la plus appropriée et de l'intégrer dans le processus de conception. Une méthode semiautomatique pour la génération de modèles de véhicules en 3D est présentée, améliorant la prédiction de la masse et de l'inertie tout en réduisant le temps entre la conception et les essais en vol. Les drones sont sujets aux perturbations atmosphériques, et le manque de robustesse du premier véhicule conçu confirme cette hypothèse. Pour résoudre ce problème, une analyse de la dynamique de vol en boucle fermée est ajoutée au problème d'optimisation. Cet ajout permet d'utiliser l'erreur de suivi de trajectoire comme contrainte, conduisant le processus de conception vers un véhicule plus robuste. Grâce à cette nouvelle composante, l'erreur de trajectoire en cas de vent est réduite et reste dans les limites définies. Enfin, la mission peut être modifiée et un problème d'optimisation qui associe à la fois la conception, le contrôle et la trajectoire est présenté. Un tel processus de conception intégré, ainsi que l'étude concernant l'analyse disciplinaire et la fabrication du véhicule, pourraient être utiles pour la conception automatique de robots VTOL adaptés à la mission.

Mots-clés Conception d'aéronefs, MDO, systèmes de contrôle, mécanique du vol

Télécharger la thèse : <https://theses.fr/2024ENAC0008>

Paul Saves

Thèse soutenue le 19 janvier 2024 à Toulouse

ED 467 (AA) - Aéronautique Astronautique - Toulouse

Encadrement

Département Traitement de l'information et systèmes (DTIS), ONERA Toulouse

Direction de thèse : Nathalie Bartoli, ONERA/DTIS ;
Youssef Diouane, Polytechnique Montréal

Jury

Emmanuel Vazquez, Centrale Supélec

Sébastien Da Veiga, CREST-ENSAI

Joseph Morlier, ISAE-Supaero

Julien Pelamatti, EDF R&D

Olivier Roustant, INSA Toulouse

Delphine Sinoquet, IFPEN

Financement ONERA, ISAE

Contact nathalie.bartoli@onera.fr

2022 AIAA Multidisciplinary Design Optimization Best Paper

Prix de thèse de la fondation ISAE-Supaéro, 2024

Résumé De nos jours, un intérêt significatif et croissant pour améliorer les processus de conception de véhicules s'observe dans le domaine de l'optimisation multidisciplinaire grâce au développement de nouveaux outils et de nouvelles techniques. Concrètement, en conception aérostructure, les variables aérodynamiques et structurelles s'influencent mutuellement et ont un effet conjoint sur des quantités d'intérêt telles que le poids ou la consommation de carburant. L'optimisation multidisciplinaire se présente alors comme un outil puissant pouvant effectuer des compromis interdisciplinaires. Dans le cadre de la conception aéronautique, le processus multidisciplinaire implique généralement des variables de conception mixtes, continues et catégorielles. Par exemple, la taille des pièces structurelles d'un avion peut être décrite à l'aide de variables continues, le nombre de panneaux est associé à un entier et la liste des sections transverses ou le choix des matériaux correspondent à des choix catégoriels. L'objectif de cette thèse est de proposer une approche efficace pour optimiser un modèle multidisciplinaire boîte noire lorsque le problème d'optimisation est contraint et implique un grand nombre de variables de conception mixtes (typiquement 100 variables). L'approche d'optimisation bayésienne utilisée consiste en un enrichissement séquentiel adaptatif d'un métamodèle pour approcher l'optimum de la fonction objectif tout en respectant les contraintes. Les modèles de substitution par processus gaussiens sont parmi les plus utilisés dans les problèmes d'ingénierie pour remplacer des modèles haute fidélité coûteux en temps de calcul. L'optimisation globale efficace est une méthode heuristique d'optimisation bayésienne conçue pour la résolution globale de problèmes d'optimisation coûteux à évaluer permettant d'obtenir des résultats de bonne qualité rapidement. Cependant, comme toute autre méthode d'optimisation globale, elle souffre du fléau de la dimension, ce qui signifie que ses performances sont satisfaisantes pour les problèmes de faible dimension, mais se détériorent rapidement à mesure que la dimension de l'espace de recherche augmente. Ceci est d'autant plus vrai que les problèmes de conception de systèmes complexes intègrent à la fois des variables continues et catégorielles, augmentant encore la taille de l'espace de recherche. Dans cette thèse, nous proposons des méthodes pour réduire de manière significative le nombre de variables de conception comme, par exemple, des techniques d'apprentissage actif telles que la régression par moindres carrés partiels. Ainsi, ce travail adapte l'optimisation bayésienne aux variables discrètes et à la grande dimension pour réduire le nombre d'évaluations lors de l'optimisation de concepts d'avions innovants moins polluants comme la configuration hybride électrique «DRAGON».

Mots-clés Optimisation de concepts multidisciplinaires, optimisation sur modèles de substitution, processus gaussien, variables mixtes catégorielles, variables hiérarchiques, conception d'avions écologiques

Télécharger la thèse : <https://theses.fr/2024ESAE0002>

Périclès Cocaul

Thèse soutenue le 22 novembre 2024 à Palaiseau

ED 580 (STIC) - Sciences et Technologies de l'Information et de la Communication - Paris-Saclay

Encadrement

Département Traitement de l'information et systèmes (DTIS), ONERA Palaiseau

Direction de thèse : Hélène Piet-Lahanier, ONERA/DTIS

Autres : Sylvain Bertrand, ONERA/DTIS ; Martine Ganet, Astrium

Jury

Daniel Alazard, ISAE Supaero

Benoit Clément, ENSTA

Mohammed Chadli, Université Paris Saclay

Ionela Prodan, LCIS

Mayank Shekhar Jha, CRAN

Pedro Simplicio, ESA

Financement ArianeGroup

Contact helene.piet-lahanier@onera.fr

Résumé Les nouveaux défis posés par les missions spatiales et la conception de nouveaux lanceurs impliquent de mettre l'accent sur des stratégies de contrôle innovantes. Dans ce contexte, la gestion du mouvement des ergols liquides dans les réservoirs, connu sous le nom de « ballottements », constitue un défi majeur qui peut avoir un impact significatif sur la stabilité et le pilotage du lanceur. La complexité de

Détermination de lois de commande sans modèle pour le pilotage automatique de lanceurs : approches automatiques et apprentissage profond par renforcement

ce phénomène rend laborieuse l'obtention d'une modélisation précise et donc d'une représentation complète du lanceur. De plus, certaines informations nécessaires à la formulation de ce modèle peuvent être soumises à la confidentialité industrielle, ce qui rend la conception de lois de commandes difficile. Les méthodes automatiques traditionnelles de pilotage ont montré leur efficacité pour contrôler les systèmes avec une représentation complète ou partielle du modèle, mais rencontrent des obstacles lorsque le modèle est inconnu, incomplet ou inaccessible. Cette étude se concentre sur des approches de contrôle sans modèle, basées sur des données directement générées par le système. Le comportement dynamique est alors évalué, assurant une robustesse face aux incertitudes et perturbations non modélisées. Cette approche identifie des lois de commande plus efficaces, étend le domaine de vol et améliore les performances dans les cas nominaux et dégradés par rapport aux méthodes classiques. Une approche automatique utilisant le *Model-Free Control* est d'abord envisagée pour éviter de dépendre de la dynamique du système. Cette méthode ajuste les entrées de contrôle sur la base du comportement observé en estimant la dynamique non modélisée en temps réel. Cette approche est ensuite comparée à une approche de contrôle robuste largement utilisée dans l'industrie : la synthèse structurée H_∞ . Cette méthode de contrôle robuste utilise un modèle de système bien défini pour concevoir des lois de commande qui minimisent les perturbations dans les pires scénarios. Le MFC fournit une solution flexible et adaptative, ce qui en fait une méthode viable sans modèle avec des performances comparables à celles de la synthèse H_∞ . Cependant, certaines limitations rencontrées avec cette méthode, nous ont poussés à explorer l'apprentissage par renforcement profond en tant qu'alternative performante basée sur les données. Cependant, l'application de pilotes basés sur l'apprentissage automatique à des systèmes critiques en termes de sécurité pose toujours le défi majeur de garantir la stabilité et la sécurité. Une perspective prometteuse consiste alors à combiner des éléments de la théorie du contrôle et de l'apprentissage automatique afin de mêler les avantages des deux domaines, tels que les garanties théoriques et l'efficacité numérique. Plus précisément, la certification de la stabilité et de la sécurité peut être obtenue en exploitant les *Control Lyapunov Functions* et les *Control Barrier Functions* développées dans les approches de la théorie du contrôle. Les pilotes appris par apprentissage qui en résultent sont testés sur un système du second ordre et le cartpole. Ils sont ensuite appliqués à un simulateur de lanceur dont la dynamique est tirée de la littérature soumis à des incertitudes dynamiques, à des perturbations causées par les effets de ballottement ainsi qu'à des retards temporels liés au système d'actionnement. Une analyse de robustesse, réalisée à l'aide de simulations de Monte Carlo, évalue les performances du contrôleur dans diverses conditions. Enfin, le contrôleur est validé dans un environnement complexe inconnu qui reproduit fidèlement la dynamique d'un lanceur soumis au ballottement. Bien qu'il n'ait pas été entraîné sur ce simulateur industriel, le contrôleur atteint les objectifs de pilotage prédéfinis, ce qui démontre à la fois la robustesse et la performance de l'approche proposée.

Mots-clés Apprentissage par renforcement, pilotage, lanceurs

Thèse disponible à partir du 30/11/2029 : <https://theses.fr/2024UPASG088>

Jules Gibart

Thèse soutenue le 9 octobre 2024 à Palaiseau

ED 580 (STIC) - Sciences et Technologies de l'Information et de la Communication - Paris-Saclay

Encadrement

Département Traitement de l'information et systèmes (DTIS), ONERA Palaiseau

Direction de thèse : Hélène Piet-Lahanier, ONERA/DTIS

Autres : François Farago, Cnes

Jury

Sihem Tebbani, L2S, Université Paris-Saclay

Bernhard Maschke, LAGEPP, CNRS

Günther Waxenegger-Wilfing, Université de Würzburg

Denis Matignon, ISAE-Supaero

Financement Cnes, ONERA

Contact Helene.Piet-Lahanier@onera.fr

Stabilité non-linéaire d'un moteur fusée régulé en boucle fermée

Résumé L'essor des lanceurs réutilisables nécessite de devoir développer des lois de commande en boucle fermée pour la régulation des moteurs fusée, ce qui est devenu accessible avec l'utilisation des actionneurs de vannes électriques. Compte tenu de la complexité du système multi-physique que constitue un moteur fusée, le développement des lois de commande s'avère particulièrement ardu. Il est également très difficile de fournir une analyse de la stabilité de la boucle fermée sur le domaine de variations considéré bien que cet aspect soit essentiel.

L'objectif de cette thèse est de développer une méthode d'analyse/synthèse de commande pour garantir la stabilité d'un moteur de fusée pour plusieurs points de fonctionnement distincts et suivant les trajectoires de transition entre ces points. Pour cela, nous avons développé une nouvelle modélisation d'un moteur sous la forme d'un système Port-Hamiltonien, dérivé des interactions entre les différents domaines physiques du système. Cette modélisation a permis en premier lieu de définir un critère de stabilité mettant en évidence la passivité du système bouclé, puis de dériver une loi de commande basée sur la passivité à partir du critère de stabilité obtenu. La problématique de stabilisation vers une référence des trajectoires de transition entre deux points de fonctionnement a été quant à elle abordée par le biais de la théorie de la contraction, ce qui a permis de développer une seconde loi de commande. Ces deux lois ont été validées sur des simulations réalistes d'un moteur fusée à propergol liquide dans des scénarios atteignant les limites de stabilité afin d'illustrer leurs propriétés stabilisantes. Leurs performances ont été comparées à celles obtenues avec des approches plus classiques.

Mots-clés Stabilité des systèmes non-linéaires, automatique, Port-Hamiltonien, moteur fusée

William Jussiau

Thèse soutenue le 3 juillet 2024 à Toulouse

ED 309 (EDSYS) - Systèmes - Toulouse

Encadrement

Département Traitement de l'information et systèmes (DTIS), ONERA Toulouse

Direction de thèse : Pierre Apkarian, Fabrice Demourant, ONERA/DTIS

Autres : Colin Lelercq, ONERA/DAAA

Jury

Édouard Laroche, Université de Strasbourg

Gérard Scorletti, École Centrale de Lyon

Philippe Feyel, Safran Electronics & Defense, Canada

Christophe Airiau, Institut de Mécanique des Fluides de Toulouse

Taraneh Sayadi, Conservatoire National Arts et Métiers

Financement ONERA

Contact fabrice.demourant@onera.fr

Résumé Cette thèse porte sur la synthèse de lois de commande pour les écoulements oscillateurs à faible nombre de Reynolds. Nous y étudions deux configurations canoniques en 2D : l'écoulement autour d'un cylindre, et l'écoulement au-dessus d'une cavité ouverte. Ces deux cas d'étude présentent un équilibre stationnaire instable, et un régime d'oscillations auto-entretenues – respectivement, un cycle limite et un attracteur torique. L'objectif principal est la synthèse de lois de commande pour supprimer complètement le régime oscillatoire, pour réduire la traînée moyenne, les vibrations structurelles ou le rayonnement acoustique tonal. En pratique, la synthèse de lois de commande pour ces systèmes est rendue difficile par la diversité des phénomènes dynamiques émergeant des équations de Navier-Stokes, non-linéaires et de dimension infinie. Dans cette thèse, nous proposons trois méthodes distinctes pour la synthèse de correcteurs adaptés à ces systèmes, utilisant des hypothèses de moins en moins restrictives. La première méthode utilise conjointement une paramétrisation des correcteurs stabilisant l'équilibre, un algorithme d'optimisation sans dérivée et les données de simulation non-linéaire. La seconde méthode exploite la bifurcation de Hopf supercritique pour construire des correcteurs à partir de simulations non-linéaires seulement. La troisième méthode se base sur le formalisme de la résolvante moyenne pour construire itérativement une loi de commande LTI par morceaux à partir de données entrée-sortie uniquement.

Mots-clés Contrôle d'écoulements, mécanique des fluides numérique, correcteurs linéaires temps-invariants, commande robuste

Télécharger la thèse : [delaité](#)

Guido Magnani

Thèse soutenue le 25 novembre 2024 à Toulouse

ED 309 (EDSYS) - Systèmes - Toulouse

Encadrement

Département Traitement de l'information et systèmes (DTIS), ONERA Toulouse

Direction de thèse : Jean-Marc Biannic, Mario Cassaro, ONERA/DTIS

Autres : Hélène Evain, Cnes

Jury

Manuela Battipede, Politecnico di Torino,

Guillaume Sandou, CentraleSupélec

Alexandre Falcoz, Airbus Defence and Space

Luca Zaccarian, LAAS-CNRS

Financement Cnes, ONERA

Contact mario.cassaro@onera.fr

Résumé Dans un scénario de satellites géostationnaires hautement autonomes, dotés de capacités d'auto-assemblage et d'auto-maintenance, les perturbations des bras manipulateurs couplées à la dynamique de ballotement du carburant représentent un risque significatif de dégradation des performances du système de contrôle d'attitude et d'orbite du satellite. Bien que des solutions passives existent pour amortir le ballotement du carburant et compenser les perturbations des bras manipulateurs, il manque une solution de contrôle actif unique capable de compenser ces perturbations tout en évitant de manière optimale la saturation des actionneurs. Cette lacune suscite un grand intérêt dans l'industrie spatiale en raison de ses implications potentielles dans la réduction du poids, des coûts et de la complexité de la fabrication. Cette étude explore l'intégration de techniques de contrôle robuste basées sur la synthèse H_∞ et de techniques de contrôle adaptatif par modèle de référence avec des schémas de référence gouvernés. L'objectif est de proposer une solution de contrôle unique garantissant un contrôle précis de l'attitude du satellite en présence de perturbations non modélisées et de contraintes des actionneurs. Les avancées théoriques de cette recherche s'étendent également à des scénarios tels que la gestion des défaillances de propulseur dans les quadricoptères sous contraintes d'état et d'entrée, ainsi qu'à l'optimisation de la conception des modes de guidage pour des missions satellitaires telles que la mission Microcarb du Cnes.

Mots-clés Contrôle d'attitude de satellite, ballotement, contrôle non linéaire, rejet de perturbation, contrôle adaptatif non linéaire robuste, contraintes de saturation

Télécharger la thèse : <https://theses.fr/2024ESAE0046>

Pelin Sekercioglu

Thèse soutenue le 5 novembre 2024 à Palaiseau

ED 580 (STIC) - Sciences et Technologies de l'Information et de la Communication - Paris-Saclay

Encadrement

Département Traitement de l'information et systèmes (DTIS), ONERA Palaiseau

Direction de thèse : Antonio Loria, CNRS ; Julien Marzat, ONERA/DTIS

Autres : Ioannis Sarras, ONERA/DTIS

Jury

Cristina Stoicar, CentraleSupélec/L2S,

Claudio Altafani, Linköping University

Ming Cao, University of Groningen

Maria Elena Valcher, University of Padova

Financement ONERA

Contact ioannis.sarras@onera.fr

Résumé Dans cette thèse, nous abordons des problèmes de commande de systèmes multi-agents sous contraintes, avec des interactions coopératives et compétitives, en présence de leaders multiples. Certaines de nos contributions traitent des problèmes de consensus biparti pour des systèmes linéaires de premier et de second ordre sur des réseaux contenant plusieurs leaders ou sous contraintes inter-agents, ainsi que pour des systèmes non linéaires, par exemple des robots manipulateurs sous contraintes et avec des perturbations. Nous utilisons la théorie des graphes signés pour traiter la présence d'interactions compétitives. Concernant les réseaux signés contenant plusieurs leaders ou soumis à des contraintes, nous étudions le problème de suivi de confinement biparti pour des systèmes de premier et de second ordre. L'originalité de ce travail repose sur le développement d'une nouvelle analyse de stabilité pour les systèmes multi-agents contenant des interactions coopératives et compétitives, plusieurs leaders et avec des perturbations. L'analyse de stabilité repose sur la théorie de Lyapunov, et nous établissons des propriétés de stabilité et de robustesse, au sens de la stabilité exponentielle et de la stabilité entrée-sortie, via la construction de fonctions de Lyapunov strictes. Nous considérons ensuite des réseaux signés soumis à des contraintes d'évitement des collisions et de maintien d'une distance maximale ou de la connectivité. Tout d'abord, nous concevons un nouveau contrôleur basé sur le gradient d'une fonction de Lyapunov barrière garantissant le respect des contraintes imposées pour les systèmes du premier et du second ordre afin de résoudre le problème de la formation bipartie. Ensuite, nous considérons des robots manipulateurs modélisés par des systèmes d'Euler-Lagrange et nous traitons le problème de la formation bipartie des effecteurs terminaux sous des contraintes inter-agents et des perturbations. Nous utilisons une approche basée sur le modèle interne pour compenser les perturbations. Nous considérons ensuite un réseau de satellites soumis à des contraintes d'évitement des collisions et de maintien de la connectivité. Dans les deux cas, nous établissons la stabilité asymptotique du système en boucle fermée.

Mots-clés Véhicules autonomes, automatique, robotique, coordination

Télécharger la thèse : <https://theses.fr/2024UPAST130>

Franca Somers

Thèse soutenue le 29 novembre 2024 à Toulouse

ED 309 (EDSYS) - Systèmes - Toulouse

Encadrement

Département Traitement de l'information et systèmes (DTIS), ONERA Toulouse

Direction de thèse : Clément Roos, ONERA/DTIS,
Francesco Sanfedino, ISAE-Supaero ;

Autres : Valentine Preda, ESA-Estec

Jury

Gérard Scoletti, École Centrale de Lyon

Harald Pfifer, Universitat Dresde, Allemagne

Marc Jungers, CRAN

Dimitri Peaucelle, LAAS-CNRS

Hélène Evain, Cnes

Financement ESA, ONERA

Contact clement.roos@onera.fr

Résumé Les activités actuelles de vérification et validation (V&V) dans l'industrie aérospatiale reposent principalement sur des outils de simulation qui prennent beaucoup de temps. Ces approches classiques de type Monte-Carlo sont largement utilisées depuis des décennies pour évaluer les performances des systèmes de guidage, de navigation et de contrôle (GNC) et des systèmes de contrôle d'attitude et d'orbite (SCAO) contenant de multiples paramètres incertains. Elles permettent de quantifier la probabilité d'occurrence de phénomènes suffisamment fréquents, mais peuvent échouer dans la détection de combinaisons rares, mais critiques, de paramètres. Au fur et à mesure que la complexité des systèmes spatiaux modernes augmente, cette limitation joue un rôle de plus en plus important. Ces dernières années, les méthodes d'analyse des pires cas basées sur des modèles ont atteint un bon niveau de maturité. Sans avoir recours à des simulations, ces outils peuvent explorer l'espace de toutes les combinaisons possibles de paramètres incertains et fournir des limites mathématiques garanties sur les marges de stabilité robustes et les niveaux de performance pire-cas. Les configurations problématiques, identifiées à l'aide de ces méthodes, peuvent être utilisées pour guider les campagnes Monte-Carlo finales, ce qui raccourcit considérablement le processus V&V standard. L'une des limites des méthodes classiques d'analyse pire-cas basées sur des modèles est qu'elles supposent que les paramètres incertains peuvent prendre n'importe quelle valeur dans un intervalle donné avec une probabilité égale. La probabilité d'occurrence d'une combinaison de paramètres pire-cas n'est donc pas mesurée et la conception d'un système peut ainsi être rejetée sur la base d'un scénario très rare et extrêmement improbable. Cette recherche se concentre sur μ -analyse probabiliste pour développer de nouveaux outils efficaces et fiables afin d'améliorer la caractérisation d'événements rares mais néanmoins possibles. Ceci permet de resserrer l'écart d'analyse V&V ci-dessus entre les méthodes basées sur la simulation et les approches pire-cas déterministes basées sur des modèles.

Mots-clés Vérification et validation, M-analyse probaliste, algorithmes *branch-and-bound*, marges de stabilité et performance robustes, synthèse probabiliste de contrôleurs robustes, algorithmes, statistiques robustes, vérification de modèles informatique, mesures de probabilités

Télécharger la thèse : <https://theses.fr/2024ESAE0054>



Maxime Zagar

Thèse soutenue le 4 décembre 2024 à Palaiseau

ED 580 (STIC) - Sciences et Technologies de l'Information et de la Communication - Paris-Saclay

Encadrement

Département Traitement de l'information et systèmes (DTIS), ONERA Palaiseau

Direction de thèse : Michel Kieffer, Université Paris-Saclay ;
Hélène Piet-Lahannier, ONERA/DTIS

Autres : Luc Meyer, ONERA/DTIS

Jury

Philippe Bonnifait, Université de Technologie de Compiègne

Ouiddad Labbani-Igbida, Université de Limoges

Sylvie Le Hegarat, Université Paris-Saclay

Simon Lacroix, LAAS-CNRS/INSA Toulouse

Fabio Morbidi, Université de Picardie Jules Verne

Financement ENS

Contact luc.meyer@onera.fr

Best Student Paper Award, IFAC Automatic Control in Aerospace, 2022, Mumbai

Résumé Cette thèse aborde le problème de la recherche et du suivi d'un nombre inconnu de cibles mobiles réparties dans une région d'intérêt (Rdl) inconnue à l'aide d'une flotte coopérative de robots aériens sans pilote (UAV). Ce problème de recherche, d'acquisition et de suivi coopératif (CSAT) apparaît dans des contextes militaires, notamment, pour trouver et suivre des véhicules ennemis, ou dans des

applications civiles, par exemple, pour rechercher des personnes perdues à la suite d'une catastrophe. Pour résoudre ce problème, chaque drone embarque un système de vision par ordinateur (CVS) composé d'une caméra et d'algorithmes de traitement d'images qui fournissent des mesures liées à la Rdl. Les mesures fournies par le CVS consistent en des images avec des pixels labellisés, des cartes de profondeur et des boîtes contenant des pixels associés aux cibles qui ont été identifiées. Cette thèse considère une approche ensembliste pour aborder le problème CSAT. Par rapport à d'autres approches reposant sur des hypothèses stochastiques sur le bruit de mesure, les approches ensemblistes supposent que le bruit de mesure est borné avec des bornes connues. Ces approches peuvent alors caractériser des ensembles qui contiennent de manière certaine la position des cibles, à condition que les hypothèses sur les modèles de mesure et les bornes du bruit soient respectées. Très peu de travaux antérieurs exploitent directement les mesures CVS à l'aide d'une approche ensembliste. Cela s'explique principalement par le fait qu'il est difficile d'obtenir des modèles de mesure pour un CVS employant des algorithmes d'apprentissage. Pour résoudre ces problèmes, nous introduisons plusieurs hypothèses pour relier les mesures CVS aux cibles et aux obstacles présents dans la Rdl en utilisant une approche géométrique. À partir de ces hypothèses, nous proposons un nouvel estimateur ensembliste qui exploite directement les mesures CVS pour caractériser des ensembles contenant la position de chaque cible identifiée. Les mesures CVS sont également exploitées pour évaluer les ensembles qui ne contiennent aucune cible. Un processus de prédiction-correction similaire au filtre de Kalman a été proposé pour tenir compte de l'échange d'informations entre les drones. La correction se fait via les mesures CVS acquises par chaque drone et les estimées transmises par les drones voisins. Plusieurs sources d'incertitude supplémentaires peuvent être prises en compte dans l'approche proposée. Nous nous sommes concentrés sur la manière de prendre en compte l'incertitude de l'état des drones. Comme la Rdl est encombrée d'obstacles inconnus, chaque drone établit une carte d'occupation et d'élévation pendant la recherche et le suivi des cibles à l'aide des mesures CVS. Cette carte fournit une description approximative de l'emplacement, de la hauteur, et de la forme des obstacles. La carte peut être exploitée pour éviter les obstacles. Dans cette thèse, elle est utilisée pour prédire la portion du champ de vue de la caméra de chaque drone qui est masquée par un obstacle. Cette information est déterminante dans la conception d'un algorithme par commande prédictive (MPC) pour déterminer la trajectoire de chaque drone, en minimisant l'incertitude de localisation des cibles identifiées et en réduisant la taille de l'ensemble contenant les cibles potentiellement non détectées. Si les cibles sont plus nombreuses que les UAVs, un compromis entre la recherche de nouvelles cibles et le suivi des cibles déjà identifiées afin de réduire l'incertitude de la localisation doit être trouvé. Des simulations réalisées avec Webots illustrent les performances de l'estimateur et de la loi de guidage en évaluant l'efficacité des drones coopératifs pour explorer l'environnement, trouver et identifier les cibles, et maintenir une estimation précise de leur position.

Mots-clés Estimation ensembliste, estimation distribuée, vision par ordinateurs, commande prédictive, Flottes de drones.

Télécharger la thèse : <https://theses.fr/2024UPAST164>

Emmanuelle Bonnet

Thèse soutenue le 2 février 2024 à Marseille

ED 062 - Sciences de la Vie et de la Santé - Aix-Marseille

Encadrement

Département Traitement de l'information et systèmes (DTIS), ONERA Salon de Provence

Direction de thèse : Guillaume Masson, Institut de Neurosciences de la Timone ; Andrea Desantis, ONERA/DTIS

Jury

Valérian Chambon, CNRS

Lionel Brunel, Université Paul-Valéry Montpellier

Iria San Miguel, University of Barcelona

Simone Schütz-Bosbach, LMU Munich

Financement ANR

Contact andrea.desantis@onera.fr

Résumé L'agentivité est définie comme notre capacité à contrôler des actions ainsi que leurs conséquences sensorielles. Il a été mis en évidence notamment que les stimuli produits par soi-même sont perçus différemment comparés aux mêmes stimuli générés par une cause externe. Par exemple, les événements causés des actions volontaires sont perçus comme se produisant plus tôt (liage intentionnel) et avec moins d'intensité (atténuation sensorielle). Ma thèse de doctorat explore les mécanismes sous-jacents à ces différences dans le traitement sensoriel, et examine l'influence de l'action, des prédictions, et de la causalité sur la perception temporelle et visuelle. Avec trois expériences, j'ai examiné comment le fait de causer l'apparition d'un stimulus (expérience 3) et la capacité d'en prédire l'identité (expériences 1, 2 et 3) façonnent l'ordre temporel perçu des actions et des conséquences sensorielles. J'ai observé que le simple fait d'agir, comparé à observer affecte la perception du temps de manière similaire au liage intentionnel. De plus, prédire l'identité d'un stimulus n'affecte pas la perception temporelle, mais modifie les jugements de causalité. Notamment, les individus ont la tendance à considérer un événement comme généré par leurs actions lorsqu'il est en cohérence avec leur prédiction, même s'il précède temporellement leurs actions. Dans le contexte de la perception visuelle, mes deux expériences ont révélé que les stimuli causés par des actions sont mieux encodés et perçus que les stimuli générés de façon externe (expérience 4). De plus, le degré de contrôle exercé par un individu sur le mouvement d'un stimulus visuel facilite sa détection (expérience 5). En résumé, mes recherches mettent en lumière une influence constante de l'action sur la perception temporelle et visuelle. Les stimuli activement générés par nos actions sont mieux discriminés et perçus plus rapidement que ceux générés de manière externe. L'effet de l'action sur la perception du temps semble indépendant de notre capacité à prédire les conséquences de l'action, tandis que la capacité à prédire l'identité d'une conséquence sensorielle se révèle être l'un des facteurs critiques pour l'expérience de la causalité.

Mots-clés Agentivité, prédictions d'identité, perception du temps, sensibilité visuelle, traitement sensoriel, psychophysique, EEG

Nicolas Pélegrin

Thèse soutenue le 29 mars 2024 à Salon-de-Provence

ED 391 (SMAER) - Sciences Mécaniques, Acoustique, Électronique & Robotique - Sorbonne Université

Encadrement

Département Traitement de l'information et systèmes (DTIS), ONERA Salon de Provence

Direction de thèse : Jean-Christophe Sarrazin, ONERA/DTIS

Jury

Frédéric Alexandre, INRIA Bordeaux

Maud Marchal, Université de Rennes, INSA/IRISA

Jean Blouin, CNRS Aix-Marseille Université/LNC

David Gueorguiev, CNRS, Sorbonne Université/ISIR

Christophe LOPEZ, CNRS, Aix-Marseille Université/LNC

Financement DGA/AID, ONERA

Contact jean-christophe.sarrazin@onera.fr

Résumé La gestion rigoureuse des risques dans l'industrie aéronautique a mené à d'importantes innovations, en particulier dans la conception des cockpits. Ces derniers, dotés d'équipements de commande et d'affichage avancés, ont évolué depuis les débuts de l'aviation, passant d'une dépendance à la vision directe à des configurations plus complexes pour le vol de nuit ou par mauvais temps. Cependant, la perception par le pilote du mouvement de l'appareil dans le référentiel terrestre demeure un défi, les phénomènes de désorientation spatiale étant une cause majeure d'accidents. De nouvelles technologies vibro-tactiles visent à réduire ce risque en fournissant des informations cutanées spatio-temporelles. Néanmoins, aujourd'hui encore, l'interprétation correcte du mouvement par le biais de ces données tactiles reste insatisfaisante. Nous faisons l'hypothèse que ces difficultés

sont dues à une compréhension insuffisante des mécanismes cognitifs de perception du mouvement. L'objectif scientifique de cette thèse visait à étudier le rôle de la motricité dans la perception tactile du mouvement et plus particulièrement (1) à identifier un mécanisme d'intégration du mouvement prédit (basé sur un principe mnésique d'attribution de mouvement) d'une part, à l'erreur de prédiction (basée sur le traitement des réafférences sensorielles courantes) d'autre part, (2) à mieux comprendre comment la temporalité de ce processus d'intégration participe à la définition du contenu de l'expérience perceptuelle tactile, et (3) à formaliser comment les mesures métacognitives de confiance révèlent le degrés d'accessibilité des informations utilisées pour définir le percept. Pour répondre à cet objectif, par trois expériences, nous avons exploré les dépendances espace-temps et leur influence sur la perception tactile d'objets en mouvement. Notre investigation s'est focalisée sur la manière dont le niveau de cohérence biologique entre espace et temps influence la perception tactile. Nous avons conçu une expérience où des participants ont été stimulés sur la paume de la main droite avec des motifs tactiles décrivant un mouvement ambigu (conditions incongruentes) ou non ambiguë (congruentes) vis-à-vis d'une loi biologique du mouvement (loi de puissance deux tiers), et ont été invités à reporter la forme perçue ainsi que leur niveau de confiance associé. Nos résultats montrent (1) que l'introduction de motifs tactiles ambigus réduit significativement la performance de discrimination tactile, suggérant que notre système perceptif implique un mécanisme d'attribution de mouvement de prédiction des conséquences sensorielles tactiles, (2) que l'impact de ce mécanisme d'attribution de mouvement sur la définition du percept fonctionne à court terme, de sorte qu'avec le temps le contenu de l'expérience tactile est d'avantage déterminé par l'intégration des réafférences sensorielles que par une influence prédictive d'attribution de mouvement, (3) que l'ambiguïté informationnelle détériore la confiance des participants dans leurs réponses, révélant un degré d'accessibilité plus limité des réafférences sensorielles utilisées pour déterminer la représentation consciente du percept tactile. Une analyse basée sur le modèle *Hierarchical Drift Diffusion Model* a révélé la sensibilité du processus d'accumulation d'évidences l'ambiguïté informationnelle que véhicule le stimulus et permet d'appréhender la perception tactile selon une dynamique prédictive de réduction de l'incertitude. Ces découvertes enrichissent notre compréhension des mécanismes sous-jacents à la perception tactile, renforcent l'importance des prédictions dans le traitement des informations sensorielles, et mettent l'accent sur le rôle du temps dans le processus de définition du percept. Sur le plan applicatif, cette recherche souligne l'importance de la compréhension des mécanismes cognitifs dans la perception tactile du mouvement pour améliorer la sécurité aéronautique. Les résultats indiquent la façon dont le système nerveux ajuste la perception tactile en fonction des connaissances motrices organisées en mémoire, influençant ainsi la manière dont les pilotes interagissent avec leur environnement. Ces résultats ouvrent de nouvelles perspectives pour le développement de fonctions d'assistance tactile plus efficaces, contribuant à réduire les erreurs de perception et à renforcer la sécurité des vols.

Mots-clés Neurosciences cognitives, perception tactile, schéma moteur, temporalité, prise de décision

Télécharger la thèse : <https://theses.fr/s384942>

Kelly Steiner

Thèse soutenue le 18 mars 2024 à Salon-de-Provence

ED 391 (SMAER) - Sciences Mécaniques, Acoustique, Électronique & Robotique - Sorbonne Université

Encadrement

Département Traitement de l'information et systèmes (DTIS), ONERA Salon de Provence

Direction de thèse : Jean-Christophe Sarrazin, ONERA/DTIS ;
Sinan Haliyo, Sorbonne Université ISIR

Jury

Frédérique Hintzy, Université Savoie Mont-Blanc

Alexandre Zénon, Neurocampus, Université de Bordeaux

Agnès Roby-Brami, ISIR, Sorbonne Université

Jérémy Gaveau, Université de Bourgogne

Vincent Padois, Université Bordeaux, INRIA

Financement ANR, ONERA

Contact jean-christophe.sarrazin@onera.fr

Étude des mécanismes du contrôle sensorimoteur pour la spécification de nouvelles métriques d'évaluation du coût cognitif

Résumé Dans de nombreuses phases de travail, le pilotage d'un hélicoptère nécessite une activité sensorimotrice continue ce qui le rend exigeant sur le plan des ressources cognitives et implique de fortes variations de la charge cognitive. Par conséquent, l'évaluation du coût cognitif inhérent à l'activité du pilote est un critère déterminant pour la conception des éléments du cockpit (commandes de vols, assistances au pilotage). Il existe de nombreuses mesures du coût cognitif, la majorité sont de nature subjective, et très peu sont issues d'une analyse de l'activité sensorimotrice du pilote.

Pour établir une mesure du coût cognitif à partir d'une analyse sensorimotrice de l'activité de pilotage, il est nécessaire d'avoir une compréhension détaillée et à plusieurs niveaux de description des mécanismes de contrôle de l'action. L'objet de cette thèse vise à fournir de nouvelles mesures du coût cognitif basées sur la caractérisation et la modélisation des mécanismes de contrôle moteur. Dans ce cadre, le paradigme de la loi de Fitts constitue un ensemble d'outils permettant d'étudier le comportement moteur (sa performance, son optimalité) dans des conditions standardisées de manipulation de la difficulté de la tâche.

Une série d'expériences a été menée afin d'étudier un ensemble de relations entre des mesures du contrôle de l'action, décrite à différents niveaux (cinématique, électromyographique), et des mesures de la charge travail (NASA-TLX, DIMSS-PM) largement utilisées dans le domaine de l'ergonomie et en conception système. Afin d'évaluer la sensibilité de ces relations au niveau d'expertise des participants, ces expérimentations ont été réalisées auprès de participants civils et de pilotes.

Les résultats de cette série d'expériences montrent qu'une analyse sensorimotrice du mouvement humain permet de constituer un ensemble de métriques d'optimalité du contrôle de l'action et que ces métriques sont positivement corrélées au coût cognitif évalué par le NASA TLX. En revanche, les résultats révèlent que le DIMSS-PM n'évalue que la dimension physique de l'activité et reste insensible aux aspects mentaux de la charge de travail. Par ailleurs, les résultats obtenus sont sensiblement les mêmes pour les deux populations de participants (naïfs et pilotes) ce qui souligne leur robustesse.

Enfin, afin d'évaluer la pertinence de ces nouvelles mesures sensorimotrices dans un cadre applicatif, une campagne d'essais en vol hélicoptère a été réalisée avec la participation de DGA-EV. Les résultats ouvrent de nouvelles perspectives quant à l'intérêt d'associer ces nouvelles mesures dans les dispositifs d'évaluation des qualités de vol inhérents au processus de certification des futurs appareils.

Mots-clés Charge cognitive, contrôle moteur, cinématique, EMG, aéronautique, métriques

Télécharger la thèse : <https://theses.fr/2024SORUS064>

Iryna de Albuquerque Silva

Thèse soutenue le 16 juillet 2024 à Toulouse

ED 475 (MITT) - Mathématiques Informatique Télécommunications de Toulouse

Encadrement

Département Traitement de l'information et systèmes (DTIS), ONERA Toulouse

Direction de thèse : Claire Pagetti, ONERA/DTIS ; Thomas Carle, IRIT

Adrien Gauffriau, Airbus

Jury

Isabelle Puaut, IRISA, Université de Rennes

Liliana Cucu, INRIA

Pierre-Emmanuel Hladik,

Albert Henri Cohen, Centrale Nantes

Tomasz Kloda, CNRS/LAAS

Victor Jégu, Airbus France Engineering

Financement ONERA

Contact claire.pagetti@onera.fr

Résumé Le monde de l'aéronautique envisage l'utilisation d'algorithmes d'apprentissage automatique, et en particulier de réseaux de neurones, pour faciliter et améliorer des tâches telles que la navigation, la maintenance prédictive et le contrôle du trafic aérien. Toutefois, leur utilisation dans des systèmes critiques soulève de nombreuses questions de sécurité et de conformité aux exigences de certification. Ces dernières visent à garantir la correction de la conception jusqu'à l'implantation de la fonction attendue. Récemment de nouvelles directives, telles que le standard ARP6983 [152], sont en cours d'écriture pour compléter les textes

réglementaires existant afin de permettre l'introduction d'algorithmes d'apprentissage automatique dans des systèmes avioniques. Ces directives complètent notamment la DO-178C [67], le standard de référence pour le développement de logiciels. Cette thèse étudie l'implantation en temps réel et en toute sécurité de réseaux de neurones feed-forward sur des systèmes avioniques embarqués. En particulier, nous nous concentrons sur le modèle de réseau neuronal entraîné et vérifié hors ligne, appelé modèle d'inférence. L'objectif est de définir une approche de développement logiciel de modèles d'inférence en conformité avec exigences de l'avionique. Approche. Nous avons défini un certain nombre d'objectifs nécessaires pour garantir l'implantation sûre et correcte d'un modèle d'inférence. Ces objectifs sont un sous-ensemble de ceux listés dans les normes de certification, mais ont été identifiés comme difficiles à atteindre pour le processus traditionnel de développement de logiciels d'apprentissage automatique et sont cohérents avec les directives en cours d'élaboration, à savoir les feuilles de route de l'EASA et la norme ARP6983. Plus précisément, les objectifs sélectionnés dans la thèse sont (i) la description précise et non ambiguë de la fonctionnalité du modèle d'inférence, (ii) la préservation de la sémantique et la traçabilité de la description du modèle d'inférence jusqu'à l'exécutable final, (iii) la prédictibilité temporelle de l'implantation, et (iv) une utilisation efficace des ressources disponibles. Contributions. Pour implanter correctement un modèle d'inférence, il est important de définir formellement sa sémantique. Cela correspond à la première contribution de la thèse et nous avons formalisé chaque couche du modèle d'inférence sous forme de fonctions mathématiques. Ensuite, nous avons développé ACETONE, de l'anglais *Avionics C code generator for Neural Networks*. ACETONE est un framework qui, à partir de la description d'un modèle d'inférence, génère automatiquement un code C sémantiquement équivalent et prédictible. Nous avons évalué le framework sur un ensemble réaliste de cas d'utilisation pour valider l'approche en regard des objectifs de certification choisis. En outre, nous avons comparé l'approche à des outils de l'état de l'art. Une fois le framework défini et disponible sur GitHub, nous avons choisi un axe d'amélioration et d'optimisation de code pour accélérer les temps de calcul. Plus précisément nous nous sommes concentrés sur les convolutions. L'idée est de reprendre les travaux classiques qui transforment une convolution en une multiplication matricielle. Cependant, les routines d'algèbre linéaire disponibles sur étagère ne sont pas compatibles avec les exigences de l'avionique. C'est la raison pour laquelle, nous avons proposé notre propre implantation prédictive, traçable et efficace d'un algorithme de multiplication matrice-matrice (GEMM) par blocs. Nous avons montré comment configurer un tel algorithme pour une cible donnée tout en proposant une méthode formelle de calcul du nombre d'accès à la mémoire et du nombre de cache misses, ce qui ouvre la voie à une analyse statique du WCET.

Mots-clés Apprentissage automatique, systèmes embarqués, certification

Télécharger la thèse : <https://theses.fr/2024ESAE0033>

Antoine Aubé

Thèse soutenue le 29 mai 2024 à Toulouse

ED 475 (MITT) - Mathématiques Informatique Télécommunications de Toulouse

Encadrement

Département Traitement de l'information et systèmes (DTIS), ONERA Toulouse

Direction de thèse : Thomas Polacsek, ONERA/DTIS

Jury

Selmin Nurcan, Université Paris 1 Panthéon Sorbonne

Philippe Collet, Université Côte d'Azur

Iulian Ober, ISAE-Supaero

Frédéric Volpi, Stack Labs

Financement CIFRE Stack-Lab

Contact thomas.polacsek@onera.fr

Résumé Le choix d'un hébergement d'un système d'information est lourd d'enjeux pour une organisation. En effet, de cette décision dépendent notamment ses dépenses pour l'exploitation de ce système, la main-d'œuvre allouée à cette exploitation, et la qualité de service rendu par le système d'information. Si, classiquement, cet hébergement était réalisé par les organisations dans leurs locaux, l'émergence d'hébergeurs tiers a initié un changement des pratiques, une migration des systèmes d'information vers l'infrastructure d'une autre organisation. L'informatique en nuage est un tel modèle de délégation de l'infrastructure à un tiers. Ce dernier fournit un nuage informatique, c'est-à-dire un ensemble de services configurables pour mettre à disposition des ressources informatiques. Dans ce contexte de migration vers un nuage informatique (ou migration infonuagique), de nouvelles problématiques apparaissent pour constituer l'hébergement du système d'information, nommé ici environnement infonuagique. Notamment, les problématiques liées à la récurrence et la variété des coûts opérationnels sont bien connues dans l'industrie.

Dans ces travaux, nous cherchons à identifier les critères de sélection d'un environnement infonuagique lors d'une migration, et comment il nous est possible d'évaluer la satisfaction des exigences liées à ces critères. À ces fins, nous avons d'abord mené une enquête qualitative auprès d'industriels afin d'identifier les exigences récurrentes des environnements infonuagiques dans l'industrie. Puis, nous nous sommes concentrés sur l'estimation des coûts opérationnels de ces environnements, qui sont très fréquemment évoqués comme un critère à minimiser et qui sont souvent mal compris, étant donné la variété des modèles de tarification de l'informatique en nuage. Ainsi, nous avons développé un modèle conceptuel permettant l'estimation de ces coûts, puis un outil qui implémente ce modèle conceptuel afin d'automatiser cette estimation.

Mots-clés Informatique en nuage, migration infonuagique, ingénierie des exigences, modélisation, estimation des coûts d'exploitation

Anouck Chan

Thèse soutenue le 13 novembre 2024 à Toulouse

ED 475 (MITT) - Mathématiques Informatique Télécommunications de Toulouse

Encadrement

Département Traitement de l'information et systèmes (DTIS), ONERA Toulouse

Direction de thèse : Thomas Polacsek, Stéphanie Roussel, ONERA/DTIS

Jury

Jolita Ralyté, Université de Genève

Óscar Pastor, Universitat Politècnica de València

Jelena Zdravkovic, Stockholm University

Franck Ravat, Université Toulouse Capitole

François Boussière, Airbus

Financement BPI

Contact stephanie.roussel@onera.fr

Prix de thèse du congrès INFORSID 2025, Pau

Prix de thèse (accessit) du Groupement de Recherche Génie de la Programmation
et du Logiciel (GDR GPL)

Best Application Paper Award à la 30^e conférence CP - Principles and Practice
of Constraint Programming, Gérone, 2024

Best Paper Award, 16^e conférence internationale DB&IS, Vilnius, 2024

Résumé Comment co-concevoir un produit aérospatial et son système industriel tout en satisfaisant les objectifs de chacune des deux parties ?

La création d'un produit complexe, comme un nouveau design d'avion ou une constellation de satellites, implique non seulement la conception du produit lui-même, mais aussi celle de son moyen de production. Deux principaux facteurs motivent cette double conception. Tout d'abord, les choix de design du produit conditionnent le moyen de production. Ensuite, le produit et son système industriel possèdent des objectifs pouvant s'influencer entre eux de manière positive ou négative. De même, certaines exigences du produit et de son système industriel peuvent s'avérer incompatibles. Dans de telles situations, des compromis doivent être effectués afin d'obtenir un ensemble d'exigences cohérent et satisfaire au mieux les objectifs des deux parties.

Dans cette thèse nous nous intéressons à l'utilisation de l'ingénierie des exigences dans le contexte de la co-conception de produits complexes aérospatial. Nous nous étudions plus particulièrement les interactions, potentiellement conflictuelles, entre les objectifs des différents acteurs impliqués dans la co-conception. En s'appuyant sur des modèles d'ingénierie des exigences orientés buts et des outils d'optimisation, nous développons une méthodologie pour éliciter, raffiner, structurer, assigner puis évaluer les objectifs des acteurs de la co-conception. La méthode est validée aux travers de plusieurs applications sur des données réelles fournies par différents acteurs aérospatiaux.

Mots-clés Co-conception, ingénierie des exigences, optimisation, modélisation par buts, industrie aérospatiale

Télécharger la thèse : <https://theses.fr/s263635>

Damien Guidolin-Pina

Thèse soutenue le 13 novembre 2024 à Toulouse

ED 475 (MITT) - Mathématiques Informatique Télécommunications de Toulouse

Encadrement

Département Traitement de l'information et systèmes (DTIS), ONERA Toulouse

Direction de thèse : Marc Boyer, ONERA/DTIS

Jury

Emmanuel Groleau, ISAE-Ensm

Giovani Stea, Université de Pise

Ahlem Mifdaoui, ISAE-Supaero

Ludovic Thomas, CNRS, Loria

Jean-Luc Scharbarg, ENSEEIHT

Jean-Yves Le Boudec, EPFL

Jorn Migge, RealTime-at-work

Financement CIFRE RTaW

Contact marc.boyer@onera.fr

Best Paper Award à la conférence Junior Researcher Workshop on Real-Time Computing, RTNS 2023, Dortmund

Résumé Cette thèse porte sur l'évaluation de performance pire-cas de niveau système en *Network Calculus* (NC). L'objectif était de développer la configuration et l'analyse temporelle des systèmes cyber-physiques temps réel. Les travaux ont donc porté sur ces deux axes, qui forment chacun une partie du manuscrit. Dans la partie

configuration, nous nous sommes intéressés à *Cyclic Queuing and Forwarding* (CQF), un mécanisme issu des normes *Time Sensitive Networking* (TSN). Brièvement, ce mécanisme divise le temps en intervalles (ou cycles) de durée T (appelé temps de cycle). Tous les messages qui arrivent pendant un cycle sont transmis au cycle suivant. Ainsi, un message traversant h éléments implémentant CQF subit un délai de bout-en-bout compris entre $(h-1)T$ et $(h+1)T$. Afin de compenser les imperfections de synchronisation, un temps de garde S empêche l'émission de tous messages à la fin et au début de chaque cycle. Pour un fonctionnement correct et conforme au standard, il faut donc bien configurer ces deux paramètres. Après avoir proposé un modèle mathématique pour capturer le comportement de CQF, nous avons donné les conditions nécessaires et suffisantes pour calculer les valeurs possibles du temps de garde et de cycle. Aussi, nous avons réalisé un ensemble d'expérimentations afin de montrer l'importance de la configuration de ces paramètres. Enfin, nous avons proposé une méthode pour calculer chacun des paramètres en respectant des propriétés qu'un designer pourrait souhaiter, comme avoir un temps de traversée minimisé. Ces travaux permettent donc une configuration de CQF automatique et efficace, nécessaire pour son adoption. Il serait intéressant par la suite de comparer ses performances avec celles d'autres mécanismes pour en déduire son domaine d'application. La partie analyse s'intéresse à un exemple industriel de système cyber-physique temps réel. Afin de garantir des contraintes temporelles, il est primordial de pouvoir calculer des délais de bout-en-bout des actions du système. Cependant, la complexité du système et notamment la pluralité des éléments rend la tâche difficile. Notre système comportant un réseau TSN, nous avons privilégié l'utilisation du NC car cette théorie est aujourd'hui une des meilleures pour l'analyse de ces réseaux. Nous avons d'abord envisagé de combiner plusieurs théories afin de considérer le meilleur de chacune. Nous avons donc amélioré la compatibilité du NC pour pouvoir utiliser ses résultats sur les réseaux et les combiner avec d'autres théories pour analyser les autres parties du système. Cette amélioration consiste à travailler sur la continuité des courbes de base du NC. Ensuite, nous avons aussi proposé des améliorations au NC afin de pouvoir analyser des parties du système avec une seule théorie, réduisant ainsi les problèmes d'Interfaçage pour passer d'une théorie à une autre. Ces améliorations incluent une formalisation du modèle de tâches et de chaînes de tâches déclenchées (i.e., les séquences de tâches où la tâche suivante est réveillée par la précédente) en NC, et un moyen d'analyser ce modèle c'est-à-dire de calculer des bornes sur les délais. Enfin, nous nous sommes concentrés sur l'analyse temporelle des tâches hébergées sur des hyperviseurs statiques. Ce sont des mécanismes qui créent et exécutent des partitions (ou machines virtuelles). Pour ce faire, nous avons proposé un modèle générique et un moyen de l'analyser. Ces travaux permettent l'analyse non seulement des hyperviseurs mais aussi d'éléments du système qui y ressemblent, comme le mécanisme *Time Aware Shaper* de TSN. Une série d'expérimentations a été menée pour montrer la précision des bornes. Tous ces travaux devraient permettre l'analyse de systèmes cyber-physiques temps réel, mais des évaluations numériques restent à mener sur un système tel que celui qui a guidé cette thèse.

Mots-clés Réseaux embarqués, systèmes temps réel, TSN, calcul réseau

Télécharger la thèse : <https://theses.fr/s296546>

Pol Labarbarie

Thèse soutenue le 18 décembre 2024 à Palaiseau

ED 580 (STIC) - Sciences et Technologies de l'Information et de la Communication - Paris-Saclay

Encadrement

Département Traitement de l'information et systèmes (DTIS), ONERA Palaiseau

Direction de thèse : Stéphane Herbin, ONERA/DTIS

Autres : Adrien Chan Hon Tong ONERA/DTIS ;
Milad Leyli-Abadi IRT SystemX

Jury

Julien Rabin, ENSI de Caen

William Puech, Université de Montpellier, CNRS/LIRMM

Anissa Mokraoui, Université Sorbonne Paris Nord

Stéphane Canu, INSA de Rouen

Financement IRT SystemX, programme confiance.ai

Contact adrien.chan_hon_tong@onera.fr

Résumé Les réseaux de neurones profonds offrent aujourd'hui des performances inégalées notamment pour les fonctions de vision par ordinateur comme par exemple la classification d'images, la détection d'objets et la segmentation sémantique. Malgré ces avancées, les modèles d'apprentissage profond présentent des vulnérabilités qui peuvent être exploitées par des agents malveillants pour provoquer des comportements dangereux de la part des modèles d'IA. Une des

Attaques par patch transférables : une menace potentielle pour les algorithmes de vision par ordinateur opérant dans le monde réel

menaces, appelée attaque par patch, consiste à introduire dans la scène un objet texturé pour duper le modèle. Par exemple, un patch placé sur un panneau stop peut amener le réseau à le classer à tort comme étant un panneau de limitation de vitesse. Ce type d'attaque soulève d'importants problèmes de sécurité pour les systèmes de vision par ordinateur opérant dans le monde physique. Dans cette thèse, nous étudions si un tel patch peut perturber un système physique dans des conditions d'attaque réalistes, i.e., sans connaissance préalable sur le système ciblé.

Bien que de nombreuses attaques par patch aient été proposées dans la littérature, il n'existe pas, à notre connaissance, de travail qui décrive les caractéristiques essentielles qualifiant une attaque par patch de critique. L'une de nos contributions est la définition de ce que serait une telle criticité. Pour être qualifié de critique, une attaque par patch doit vérifier deux propriétés essentielles. Tout d'abord, le patch doit être robuste à des transformations physiques, ce qui est exprimé par la notion de physicalité du patch. Ensuite, le patch doit être transférable, c'est-à-dire que le patch a la capacité de duper avec succès un réseau sans posséder aucune connaissance préalable sur celui-ci. La transférabilité de l'attaque est un facteur clé, car les systèmes physiques déployés par les entreprises sont souvent opaques ou inconnus. Bien que la physicalité des patches ait été développée et améliorée par de nombreux travaux, leur transférabilité reste faible et peu de méthodes permettent de l'améliorer

Afin de créer une attaque par patch transférable pour une grande variété de classifieurs d'images, nous proposons une nouvelle méthode de conception. Elle repose sur l'utilisation de la distance de Wasserstein, distance définie entre deux mesures de probabilité. Notre patch est appris en minimisant cette distance de Wasserstein entre la distribution des caractéristiques des images corrompues par un patch et la distribution des caractéristiques d'images d'une classe cible préalablement choisie. Une fois appris et placé dans la scène, le patch conduit plusieurs réseaux à prédire la classe de la distribution ciblée. Nous montrons qu'un tel patch est transférable et peut être implémenté dans le monde physique afin de perturber des classifieurs d'images sans aucune connaissance de leur nature.

Afin de mieux caractériser la potentielle menace des attaques par patch, nous proposons d'étudier leur transférabilité quand ceux-ci sont développés pour duper des détecteurs d'objets. Les détecteurs d'objets sont des modèles plus complexes que les classifieurs d'objets et sont souvent plus utilisés dans les systèmes opérant dans le monde physique. Nous étudions plus particulièrement les attaques par patch dites cape d'invisibilité, un type particulier de patches conçus pour inhiber la détection d'objets lorsqu'ils leur sont appliqués dessus. Nos résultats révèlent que le protocole d'évaluation utilisé dans la littérature comporte plusieurs problèmes rendant l'évaluation de ces patches incorrecte. Pour y remédier, nous introduisons un problème de substitution qui garantit que le patch produit supprime bien la bonne détection de l'objet que nous souhaitons attaquer. En utilisant ce nouveau processus d'évaluation, nous montrons que les attaques par patch de la littérature ne parviennent pas à inhiber la détection d'objets, limitant ainsi leur criticité.

Mots-clés Intelligence artificielle, fiabilité de l'IA, apprentissage profond

Télécharger la thèse : <https://theses.fr/2024UPASG084>

Adrien Le Coz

Thèse soutenue le 19 décembre 2024 à Palaiseau

ED 580 (STIC) - Sciences et Technologies de l'Information et de la Communication - Paris-Saclay

Encadrement

Département Traitement de l'information et systèmes (DTIS), ONERA Palaiseau

Direction de thèse : Stéphane Herbin, ONERA/DTIS

Autres : Faouzi Adjed, IRT SystemX

Jury

Ahmed Samet, INSA Strasbourg

Liming Chen, Centrale Lyon

Frédéric Jurie, Université de Caen

Mathilde Mougeot, ENSIIE et ENS Paris-Saclay

Financement IRT SystemX

Contact stephane.herbin@onera.fr

Résumé Les réseaux de neurones profonds ont révolutionné le domaine de la vision par ordinateur. Ces modèles apprennent une tâche de prédiction à partir d'exemples. La classification d'images consiste à identifier l'objet principal présent dans l'image. Malgré de très bonnes performances des réseaux de neurones sur cette tâche, il arrive fréquemment qu'ils se trompent de façon imprévue. Cette limitation est un frein à leur utilisation pour de nombreuses applications. L'objectif de cette thèse est d'explorer des moyens de définir un domaine de fiabilité qui expliciterait les conditions pour lesquelles un modèle est fiable. Trois aspects ont été considérés. Le premier est qualitatif : générer des exemples extrêmes synthétiques permet d'illustrer les limites d'un classifieur et de mieux comprendre ce qui le fait échouer. Le second aspect est quantitatif : la classification sélective permet au modèle de s'abstenir en cas de forte incertitude, et la calibration permet de mieux quantifier l'incertitude de prédiction. Enfin, le troisième aspect est d'inclure de la sémantique : des modèles multimodaux qui associent images et texte sont utilisés pour décrire textuellement les images susceptibles de provoquer de mauvaises, ou inversement, de bonnes prédictions.

Mots-clés Intelligence artificielle, apprentissage profond, vision par ordinateur, IA de confiance, mesures de sécurité

Thomas Delaite

Thèse soutenue le 11 décembre 2024 à Palaiseau

ED 575 (EOBE) - Electrical, Optical, Bio-physics and Engineering - Paris-Saclay

Encadrement

Département Traitement de l'information et systèmes (DTIS), ONERA Palaiseau

Direction de thèse : Frédéric Cassaing, ONERA/DTIS

Autres : Laurent Mugnier, ONERA/DOTA ;

Jocelyn Couetdic, Baptiste Levasseur, ONERA/DTIS

Jury

Caroline Kulcsár, IOGS

Loïc Denis, Laboratoire Hubert Curien, Université de Saint-Étienne

François Mignard, Observatoire de la Côte d'Azur

Maud Langlois, Centre de Recherche Astrophysique de Lyon

Florent Deleflie, Observatoire de Paris

Christophe Guilmart, Agence Innovation Défense

Financement DGA/AID, ONERA

Contact laurent.mugnier@onera.fr

Résumé La détection et le suivi des objets en orbite terrestre sont essentiels, notamment pour éviter les collisions. Les télescopes optiques sont utilisés pour observer les objets à plus de 2 000 km d'altitude. L'objectif de la thèse est d'améliorer la sensibilité et la précision des méthodes nécessaires au suivi optique des objets spatiaux grâce aux avancées astrométriques et technologiques.

La thèse développe une méthode pour fusionner de manière optimale l'information de séquences d'images à court temps d'exposition. L'utilisation d'un temps de pose adapté optimise le rapport signal/bruit et la précision. Un modèle de mesure est développé pour relier la position réelle des objets à leurs observations et prend en compte des biais introduits par la traversée de l'atmosphère. Les méthodes sont implémentées et validées sur le prototype CICLOPE, équipé d'un télescope de 35 cm, d'une caméra sCMOS de dernière génération avec un pixel de largeur 2,6 secondes d'arc. Des objets, qui seraient noyés dans le bruit de fond via des méthodes plus classiques, sont détectés. Les résultats expérimentaux montrent une précision exceptionnelle de 50 millisecondes d'arc, démontrant le potentiel du système et des méthodes proposées pour améliorer la détermination d'orbites.

Mots-clés Astrométrie, traitement d'image, surveillance de l'espace

Thomas Di Martino

Thèse soutenue le 16 janvier 2024 à Palaiseau

ED 575 (EOBE) - Electrical, Optical, Bio-physics and Engineering - Paris-Saclay

Encadrement

Département Traitement de l'information et systèmes (DTIS), ONERA Palaiseau

Direction de thèse : Régis Guinvarc'H, SONDRRA

Autres : Élise Colin, ONERA/DTIS, Laetitia Thirion Lefevre, SONDRRA ;

Jury

Jordi Inglada, CESBIO

Jérémie Sublime, ISEP

Robert Treuhaff, JPL, NASA

Nicolas Baghdadi, INRAE

André Baudoin

Financement SONDRRA, ONERA

Contact elise.colin@onera.fr

Apprentissage profond non-supervisé pour le suivi de végétation à partir de séries temporelles SAR en bande C : de l'agriculture aux forêts boréales

Résumé L'imagerie satellite SAR (*Synthetic Aperture Radar*) est un outil critique pour le suivi des forêts boréales. Ces dernières souffrent d'une couverture nuageuse la plupart du temps de l'année, impactant les technologies optiques de surveillance, mais pas les technologies SAR. Cependant, ces mêmes forêts représentent un milieu complexe, notamment pour le SAR ; leur étude requiert donc des outils complexes, comme l'apprentissage profond. Une masse de données est alors nécessaire pour cette pratique. De part leur couverture globale, et leur régularité temporelle, les satellites SAR Sentinel-1 sont donc idéaux. Cependant ces séries temporelles sont pour beaucoup dépourvues d'étiquettes, nécessitant alors une approche non-supervisée. Le réseau de neurones profond autoencodeur est alors un outil de choix. Son usage dans un contexte de séries temporelles SAR est inédit : une adaptation du modèle classique au traitement de donnée temporelle fut requise. De plus, son application directe au cas forestier reste difficile. Un premier essai est alors fait sur de la classification non-supervisée agricole, mené avec succès. Une détection et correction d'erreurs de label est même possible. Sa généralisation au cas forestier s'ensuit alors, avec la classification non-supervisée de couverture forestière, et la détection non-supervisée de feu de forêts. Egalement fructueuse, ces applications donnent alors lieu à la prédiction de paramètres forestiers, à partir de séries temporelles. La comparaison est d'abord faite avec des mesures parcellaires, puis LiDAR. Leur succès pousse à l'étude de la corrélation des variations temporelles de Sentinel-1 avec la physiologie des forêts observées, le tout lié à la température, et une relation est établie.

Mots-clés Séries temporelles SAR, apprentissage non-supervisé, forêts boréales

Marius Dufraisse

Thèse soutenue le 10 octobre 2024 à Palaiseau

ED 580 (STIC) - Sciences et Technologies de l'Information et de la Communication - Paris-Saclay

Encadrement

Département Traitement de l'information et systèmes (DTIS), ONERA Palaiseau

Direction de thèse : Frédéric Champagnat, ONERA/DTIS

Autres : Pauline Trouvé-Peloux, ONERA/DTIS ;
Jean-Baptiste Volatier, Constellr

Jury

Christine Guillemot, INRIA

Loïc Denis, Université Jean Monnet, Saint-Étienne

Marie-Anne Burcklen, Institut d'Optique Graduate School

Pierre Weiss, CNRS

Simon Thibault, Université de Laval, Canada

Financement DGA/AID, ONERA

Contact pauline.trouve@onera.fr

Best Paper at the Workshop Physics Based vision meets Deep Learning, Seattle, PBDL 2024

Résumé Dans cette thèse nous étudions l'optimisation simultanée d'une optique et d'un réseau de neurones, appelée co-conception, pour obtenir une optique adaptée à un traitement plutôt qu'ayant la meilleure qualité image. À partir d'un modèle de tracé de rayons, nous avons implémenté une simulation dérivable de l'image produite par une optique et un capteur. Nous simulons l'influence de l'ouverture, sur les aberrations et sur la luminosité. Nous illustrons l'importance de ce paramètre pour l'extension de la profondeur de champ. Nous avons appliqué ces outils à la conception d'une caméra RGB-D qui combine deux tâches : l'estimation de profondeur grâce au flou de défocalisation et l'extension de la profondeur de champ qui vise à minimiser ce flou. La co-conception aboutit à un compromis entre les deux tâches mais nous montrons qu'une collaboration entre ces deux tâches contradictoires peut être bénéfique. Nous prenons en compte les aberrations de champ lors du traitement afin d'améliorer l'homogénéité de la restauration. La deuxième application concerne la conception d'une optique dont les images sont assez floues pour protéger la vie privée mais restent adaptées à un traitement de segmentation sémantique. La figure illustre l'intérêt d'une protection garantie par l'optique. Notre méthode empêche la déconvolution en amont d'un traitement nuisible : elle n'est donc pas liée à une attaque spécifique et ne nécessite pas d'annotations pour protéger l'anonymat.

Mots-clés Optique photographique, apprentissage profond, co-conception, optique, réseau de neurones

Kevin Helvig

Thèse soutenue le 27 novembre 2024 à Palaiseau

ED 580 (STIC) - Sciences et Technologies de l'Information et de la Communication - Paris-Saclay

Encadrement

Département Traitement de l'information et systèmes (DTIS), ONERA Palaiseau

Direction de thèse : Pauline Trouvé-Peloux ; Christophe Pradère, I2M

Autres : Baptiste Abeloos, ONERA/DTIS ; Jean-Michel Roche, Ludovic Gavérina, ONERA/DMAS

Jury

Yannick Le Maout, Institut Mines-Télécom

Olivier Aubreton, Université de Bourgogne

Thomas Corpetti, Université de Rennes

Sylvie Le Hégarat, Université Paris-Saclay

Thierry Sentenac, Institut Mines-Télécom

Loïc Cudennec, AMIAD

Financement DGA/AID, ONERA

Contact pauline.trouve@onera.fr

Prix du meilleur article étudiant de la conférence SPIE Thermosense 2024, National Harbor, Maryland, United States

Prix des doctorants ONERA Traitement de l'information et systèmes 2024

Résumé La détection de défauts dans les structures aéronautiques et spatiales est cruciale, tant pour la fabrication que pour la maintenance. Les méthodes de contrôle non-destructif doivent être rapides, précises, fiables, économiques et de plus en plus automatisées. La complémentarité des différentes techniques d'inspection suggère leur utilisation simultanée pour renforcer la fiabilité des informations ou permettre une détection automatique difficile avec une seule technique. Dans ce travail de thèse, nous explorons l'utilisation des méthodes d'apprentissage profond et de synthèse d'images pour la détection et la localisation de fissures par thermographie infrarouge laser *Flying Spot* sur des matériaux métalliques. Notre première contribution se concentre sur la collecte de données sur banc d'essai et la génération d'images synthétiques utilisant des modèles de diffusion pour augmenter la quantité et la diversité d'images thermographiques disponibles. La deuxième contribution concerne l'utilisation ces jeux de données au travers de protocoles d'entraînement progressif et de transfert de caractéristiques afin d'améliorer la capacité des réseaux de neurones à discriminer et localiser les endommagements sur les images thermiques *Flying Spot*. Enfin, notre troisième contribution porte sur la construction d'une nouvelle architecture d'apprentissage profond pour la fusion multi-spectrale infrarouge-visible et sa mise en œuvre pour la détection de défauts sur des données couplées thermographiques et visibles. Cette thèse illustre le bénéfice de la fusion multi-spectrale au travers des méthodes d'apprentissage profond, en particulier dans le cadre de la thermographie laser.

Mots-clés Apprentissage automatique, fusion de données, contrôle non-destructif, *deep learning*

Nathan Letheule

Thèse soutenue le 11 avril 2024 à Palaiseau

ED 575 (EOBE) - Electrical, Optical, Bio-physics and Engineering - Paris-Saclay

Encadrement

Département Traitement de l'information et systèmes (DTIS), ONERA Palaiseau

Direction de thèse : Élise Colin, ONERA/DTIS

Autres : Flora Weissgerber, ONERA/DTIS ; Sylvain Lobry, LIPADE

Jury

Samia Ainouz, INSA Rouen/LITIS

Alin Achim, Université de Bristol

Clément Rambour, CNAM

Guillaume Quin, MBDA Systems

Jean-Baptiste Moissinac-Massenat, DGA

Financement DGA/AID, ONERA

Contact flora.weissgerber@onera.fr

Résumé La simulation est un outil précieux pour de nombreuses applications d'imagerie SAR, cependant, les images simulées de grandes tailles ne sont pas encore assez réalistes pour tromper un expert en images radar. Cette thèse propose d'évaluer dans quelle mesure l'utilisation des avancées récentes en matière d'apprentissage profond peut permettre d'améliorer la qualité des simulations. Dans un premier temps, nous proposons de définir une méthode de mesure de réalisme des images SAR simulées en les comparant à des images réelles. Les métriques ainsi établies serviront ensuite à l'évaluation des résultats de simulation. Dans un second temps, deux cadres de simulation basés sur l'apprentissage profond sont proposés, avec des philosophies différentes. Le premier ne prend pas en compte la connaissance physique de l'imagerie, et propose d'apprendre la transformation d'une image optique vers une image radar à l'aide d'une architecture cGAN. Le second s'appuie sur un simulateur physique développé à l'ONERA (EMPRISE), et utilise la génération automatique d'entrées à partir d'une segmentation sémantique d'une image optique de la scène, via l'apprentissage profond. Pour cette dernière piste prometteuse, une réflexion est menée sur la description de l'entrée et son impact sur le résultat final de simulation. Enfin, des pistes d'enrichissement par apprentissage profond des images générées par le simulateur physique seront proposées, notamment à travers des réseaux de diffusion, et des approches text-to-image.

Mots-clés SAR (*Synthetic Aperture Radar*), simulation, apprentissage profond, segmentation, réseaux de diffusion, cGAN, *transformers*

Quentin Serdel

Thèse soutenue le 22 novembre 2024 à Palaiseau

ED 580 (STIC) - Sciences et Technologies de l'Information et de la Communication - Paris-Saclay

Encadrement

Département Traitement de l'information et systèmes (DTIS), ONERA Palaiseau

Direction de thèse : Julien Marzat, ONERA/DTIS

Autres : Julien Moras, ONERA/DTIS

Jury

Simon Lacroix, CNRS

Vincent Creuze, LIRMM, Université de Montpellier

Cindy Cappelle, CRISTAL

Éric Lucet, CEA, Université Paris Saclay

Financement ONERA

Contact julien.moras@onera.fr

Résumé Cette thèse porte sur la navigation autonome de robots terrestres dans des environnements non structurés et dépourvus de télécommunications. Afin d'employer des robots mobiles pour effectuer des tâches complexes telles que l'exploration planétaire ou des opérations de sauvetage, ils doivent bénéficier d'une autonomie complète, notamment pour leur navigation sans carte préalable.

Les dernières avancées dans le domaine de l'apprentissage profond permettent l'extraction d'informations sémantiques à partir des données capteurs d'un robot. L'exploitation de ces informations, relatives à la nature des éléments de l'environnement du robot, est une piste prometteuse pour l'amélioration de la sécurité et de l'autonomie des systèmes de navigation. Leur intégration dans un processus de cartographie en ligne et l'exploitation de la représentation produite pour la planification de chemins sont abordées via la notion de traversabilité du terrain. La complexité de calcul et la robustesse aux données bruitées sont des aspects cruciaux à prendre en compte. De nouvelles méthodes sont proposées pour la construction de telles représentations et leur exploitation pour la planification de trajectoires. Elles ont été intégrées dans un système complet de navigation robotique et utilisées avec succès dans un scénario réel.

Mots-clés Robots mobiles, navigation autonome, cartographie sémantique, planification du mouvement, conditions extrêmes

Iban Guinebert

Thèse soutenue le 2 décembre 2024 à Toulouse

ED 475 (MITT) - Mathématiques Informatique Télécommunications de Toulouse

Encadrement

Département Traitement de l'information et systèmes (DTIS), ONERA Toulouse

Direction de thèse : Claire Pagetti, ONERA/DTIS

Autres : Kévin Delmas, ONERA/DTIS

Jury

Katell Morin-Allory, INP Grenoble

Guy Gogniat, Université Bretagne

Angeliki Kritikakou, Université de Rennes

Sébastien Pillement, Université de Nantes

Daniela Dragomirescu, INSA Toulouse,

Andres Barrilado, NXP Semiconductors

Financement ANITI

Contact claire.pagetti@onera.fr

Résumé L'intelligence artificielle basée sur les réseaux de neurones profonds (DNN) est de plus en plus importante dans de multiples domaines d'application, en particulier dans les systèmes critiques où ces algorithmes pourraient être utilisés pour la prise de décision dans des systèmes automatisés voire autonomes. Cependant, pour envisager cette intégration, les réseaux neuronaux ainsi que les composants matériels qui les exécutent doivent répondre à un haut niveau de garanties pour assurer la sécurité des utilisateurs et de l'environnement. L'injection de fautes est une technique largement utilisée pour vérifier et valider un composant qui doit fournir des garanties de sécurité (selon des normes telles que l'ISO 26262).

Ce travail se place dans le contexte de l'injection de fautes pour les accélérateurs matériels dédiés à l'exécution de réseaux neuronaux. L'objectif est de fournir un formalisme 1) pour raisonner sur la propagation des données dans un accélérateur matériel, et finalement 2) pour proposer des campagnes d'injection de fautes précises avec un ensemble limité d'expériences. Nous avons défini une méthodologie basée sur la modélisation formelle de l'architecture matérielle qui identifie les instants et les données vulnérables aux corruptions pendant l'inférence d'un DNN. Cette modélisation permet de tracer dans l'architecture la propagation des corruptions silencieuses des données (SDC) causées par des fautes permanentes de type *stuck-at* ou des fautes transitoires de type *bit-flip*. Elle permet également d'identifier les fautes ayant le même effet sur le système, ce qui aide à construire une relation d'équivalence. Les classes d'équivalence de fautes associées sont utilisées pour calculer une métrique de couverture par rapport à une stratégie d'injection de fautes exhaustive. Le modèle proposé permet d'évaluer les stratégies d'injection de fautes en fonction de leur couverture, afin de déterminer si ces stratégies sont capables de tester toutes les défaillances du système qui pourraient entraîner des pannes dangereuses.

Un outil appelé FIXME (*Flows Inspector X Modelling hardware Errors*) a été développé en SCALA pour calculer efficacement des ensembles de fautes ayant un effet équivalent pour une architecture, ainsi que le taux de couverture des stratégies d'injection.

Cette méthode est évaluée sur un type d'accélérateurs de réseaux neuronaux appelés streaming qui implémente chaque couche d'une topologie de réseau donnée en tant que composant matériel. Les résultats illustrent l'efficacité de la méthode pour identifier précisément les fautes matérielles qui peuvent avoir un effet sur le calcul, et pour calculer efficacement la couverture de n'importe quelle stratégie d'injection de fautes. Cela ouvre la voie à une méthodologie plus avancée pour identifier les composants matériels qui sont cruciaux pour l'exécution d'un réseau de neurones.

Mots-clés Réseaux de neurones, sûreté de fonctionnement, micro-électronique numérique

Timothé Krauth

Thèse soutenue le 5 avril 2024 à Toulouse

ED 475 (MITT) - Mathématiques Informatique Télécommunications de Toulouse

Encadrement

Département Traitement de l'information et systèmes (DTIS), ONERA Toulouse

Direction de thèse : Jérôme Morio, Xavier Olive, ONERA/DTIS

Autres : Michael Felux, ZHAW

Jury

Bertrand Michel, École Centrale de Nantes

R. John Hansman, Massachusetts Institute of Technology, USA

Nathalie Bartoli, ONERA/DTIS

Junzi Sun, TU Delft

Financement ZHAW

Contact xavier.olive@onera.fr

Résumé Il est essentiel de calculer la probabilité de collisions aériennes pour optimiser le trafic aérien tout en maintenant de hauts standards de sécurité. Cette nécessité s'est accentuée dans les années 1960 avec l'augmentation du trafic aérien commercial transatlantique. Initialement, les modèles analytiques tels que ceux de Reich et Anderson-Hsu étaient les références pour évaluer les risques de collision en vol, mais s'avèrent peu adaptés aux espaces aériens complexes autour des aéroports. Les méthodes basées sur les données, et en particulier les simulations de Monte-Carlo, sont devenues une alternative prometteuse pour l'évaluation du risque de collision. Elles offrent une grande flexibilité grâce à des hypothèses simplifiées,

les rendant adaptables à divers contextes. Toutefois, les simulations de Monte-Carlo classiques se révèlent peu efficaces pour estimer les probabilités d'événements rares, nécessitant un grand nombre de trajectoires d'avions et des ressources computationnelles importantes. Cette thèse propose un modèle de risque de collision basé sur les simulations de Monte-Carlo, utilisant un modèle de génération de trajectoires pour pallier ces limitations dues aux événements rares. Ces méthodes génératives reproduisent fidèlement les distributions de trajectoires observées tout en intégrant les incertitudes dues à des facteurs externes. Trois axes de recherche principaux sont définis : (i) le développement d'une méthode de génération de trajectoires, (ii) la construction d'un modèle de risque de collision basé sur les méthodes de Monte-Carlo utilisant des trajectoires synthétiques, et (iii) l'amélioration de l'interprétabilité des estimations du risque de collision. La génération d'échantillons synthétiques nécessite l'estimation de la distribution des données observées pour garantir une distribution identique des nouveaux échantillons. C'est particulièrement important pour les trajectoires aériennes, où le modèle doit refléter les incertitudes causant des écarts par rapport aux trajectoires nominales. Nous avons d'abord utilisé des méthodes d'apprentissage statistique traditionnelles pour estimer des trajectoires aériennes complexes en deux dimensions. Malgré la réduction de la dimensionnalité du problème, les méthodes conventionnelles peinent à estimer les distributions en grande dimension. Nous avons alors exploré l'utilisation des autoencodeurs variationnels pour une estimation plus fine de la densité de probabilité. Convenablement adaptés aux applications de séries temporelles multivariées, les autoencodeurs variationnels se révèlent efficaces pour estimer la distribution de trajectoires aériennes complexes. En utilisant la méthode de génération développée, nous estimons alors le risque de perte de séparation induit par les procédures de décollage et d'atterrissage de l'aéroport de Paris-Orly à l'aide de simulations de Monte-Carlo. L'emploi d'une méthode de génération de trajectoires se révèle prometteur, permettant de créer l'équivalent de 20 ans de trajectoires aériennes à partir de seulement deux mois d'observations. Toutefois, les contraintes inhérentes aux méthodes classiques de Monte-Carlo ne sont pas réellement surmontées mais simplement différées par la production d'un ensemble de trajectoires de taille arbitrairement grande. Le travail final de cette thèse unifie les cadres de l'autoencodeur variationnel et de la quantification de l'incertitude. Il démontre comment les autoencodeurs variationnels peuvent construire des distributions d'entrée adaptées pour les algorithmes de quantification de l'incertitude, améliorant la fiabilité des simulations de Monte-Carlo grâce au subset simulation et l'explicabilité de l'estimation de la probabilité de collision en vol par l'analyse de sensibilité. Plus généralement, nous avons montré que l'autoencodeur variationnel représente un outil prometteur à associer aux problèmes de quantification d'incertitudes.

Mots-clés Probabilité d'événements rares, méthodes de Monte-Carlo, modèles génératifs profonds, quantification de l'incertitude, autoencodeurs variationnels, gestion du trafic aérien

Télécharger la thèse : <https://theses.fr/2024ESAE0018>

Renato Murata

Thèse soutenue le 14 novembre 2024 à Palaiseau

ED 580 (STIC) - Sciences et Technologies de l'Information et de la Communication - Paris-Saclay

Encadrement

Département Traitement de l'information et systèmes (DTIS), ONERA Palaiseau

Direction de thèse : Julien Marzat, ONERA/DTIS

Autres : Héléne Piet-Lahanier, ONERA/DTIS ;
Pierre Belleoud, Sandra Boujnah, Cnes

Jury

Jérôme Cieslak, Université de Bordeaux

Louise Travé-Massuyés, LAAS, CNRS

Didier Theilliol, Polytech Nancy, Université de Lorraine

Dalil Ichlal, Université d'Évry-Val-d'Essonne

Financement Cnes, ONERA

Contact julien.marzat@onera.fr

Résumé Les systèmes de détection et de localisation des défauts (FDI) ont pris de l'importance avec le développement des lanceurs réutilisables au milieu des années 2010. Ces lanceurs sont équipés d'une baie multi-moteurs pour répondre à une large plage de poussée. La redondance fournie par une baie de propulsion composée de plusieurs moteurs permet des stratégies d'atténuation des défauts plus complexes. Ces stratégies nécessitent un système FDI complexe et précis. Cette thèse s'intéresse au développement d'un FDI à base de modèle pour une baie de propulsion multi-moteurs capable de détecter et de localiser les défauts sur les capteurs et actionneurs. Le modèle d'une baie de propulsion composée de trois moteurs-fusées à ergols liquides (LPRE) identiques a été développé. Les principaux composants de la baie sont les réservoirs d'ergols, les lignes d'alimentation et les LPREs. Afin de détecter et de localiser les fuites dans les lignes d'alimentation, la performance de trois schémas d'observateurs - basés sur l'Observateur de Luenberger, l'Observateur à Entrées Inconnues (UIO) et l'Observateur Grand Gain (HGO) - est comparée à l'aide de simulations de Monte Carlo. Pour détecter et isoler les défauts des capteurs et actionneurs sur l'ensemble des composants de la baie (réservoir, lignes d'alimentation et LPREs), l'analyse structurelle est utilisée. Tout d'abord, le modèle structurel est obtenu à partir du modèle analytique de la baie. Le modèle structurel est ensuite utilisé pour déterminer la faisabilité de FDI dans différents scénarios de mesure et pour identifier des candidats à générateurs de résidus. Un nombre intraitable de candidats est obtenu, et un algorithme de sélection des résidus est proposé pour construire des sous-ensembles de générateurs de résidus capables de détecter et d'isoler tous les défauts avec une cardinalité minimale. Des centaines de sous-ensembles avec la même cardinalité minimale sont obtenus, et une méthode pour analyser numériquement le signal de résidu de chaque candidat est présentée. En utilisant la sensibilité numérique des résidus formant un sous-ensemble, un indice de sensibilité du sous-ensemble (SSI) est calculé. Les sous-ensembles ayant le SSI le plus élevé devraient ainsi être plus sensibles aux défauts et offrir les meilleures performances en matière de FDI. Des simulations de Monte Carlo sont effectuées pour analyser la corrélation entre le SSI et les taux de détection et d'isolation des défauts.

Mots-clés Détection et isolation des défauts à base de modèle, baie multi-moteurs, analyse structurelle, sélection des résidus

HDR
Habilitations à diriger
des recherches
soutenues en 2024

Thomas Gheno

Habilitation à diriger des recherches soutenue le 14 mai 2024 à Châtillon

Université Paris-Saclay

Environnement

Département Matériaux et structures (DMAS), ONERA Châtillon

Jury

Olivier Dezellus, Université Lyon 1

Marie-Laurence Giorgi, CentraleSupélec

Michel Vilasi, Université de Lorraine

Dominique Mangelinck, IM2NP, Marseille

Laure Martinelli, CEA Saclay

Daniel Monceau, CIRIMAT Toulouse

Michel Perez, Université Lyon 1

Contact Thomas.Gheno@onera.fr

Résumé Mes travaux visent à mieux comprendre les évolutions chimiques et microstructurales associées à la corrosion des matériaux métalliques à haute température, et à fournir des outils à même d'anticiper ces évolutions. Après une présentation de mon parcours, le manuscrit illustre mes contributions à ce domaine d'étude par le dialogue essais-calculs à travers trois sujets. Le premier chapitre concerne la corrosion d'alliages NiCoCrAlY sous des dépôts contenant des oxydes, des silicates et des sulfates. On analyse les modes de dégradation associés aux constituants des dépôts, et la manière dont la réaction de l'alumine thermique pour former des aluminates et sa dissolution dans des silicates fondus affectent la consommation de l'aluminium. Le deuxième chapitre traite du rôle de la microstructure des matériaux dans leur capacité à former une couche d'oxyde protectrice. Les cinétiques d'appauvrissement en chrome liées à son oxydation sélective sont étudiées dans les cas de polycristaux lamellaires et d'alliages écrouis. Le troisième chapitre est consacré à l'étude de l'interdiffusion dans les solutions solides. Nos travaux précisent les mécanismes de développement de la porosité Kirkendall et permettent d'évaluer les forces de puits associées à la montée de dislocation en combinant simulations et mesures de déformation du réseau. Enfin, une dernière partie présente mes perspectives de recherche à court et moyen terme. Celles-ci concernent le développement d'outils de simulation dans les domaines de la diffusion multicomposants (couplage diffusion-équilibres de phases, optimisation des données de mobilité) et de la diffusion dans les polycristaux (effet de la morphologie des grains, recristallisation). Des applications sont présentées en lien avec le développement de revêtements protecteurs et avec l'étude de phénomènes de fragilisation impliquant des couplages corrosion-mécanique.

Mots-clés Oxydation, diffusion, thermodynamique, microstructure, matériaux métalliques

Joël Dupays

Habilitation à diriger des recherches soutenue le 29 novembre à Gif-sur-Yvette

Université Paris-Saclay

Environnement

Département Multiphysique pour l'énergétique (DMPE), ONERA Palaiseau

Jury

Laurent Catoire, Institut Polytechnique de Paris

Éric Daniel, Université Aix-Marseille

Vincent Giovangigli, CMAP, École polytechnique

Grégoire Casalis, ISAE-Supaero

Frédéric Plourde, CNRS, ISAE-Ensma/Pprime

Aymeric Vié, Université Paris-Saclay

Catherine Weisman, Sorbonne Université

Contact Joel.Dupays@onera.fr

Résumé Une restitution ou une prévision correcte des différentes phases de fonctionnement d'un moteur à propergol solide ou des caractéristiques du jet et des conditions au culot nécessite une description de phénomènes multiphysiques complexes qui se laissent difficilement caractériser. Parmi eux citons les mécanismes de dégradation et de décomposition du chargement, la nature et la structure de l'écoulement diphasique résultant de la décomposition ou encore la réponse du propergol aux variations des conditions ambiantes pilotées par l'écoulement. Ce document présente l'effort de modélisation entrepris pour répondre à ces besoins en faisant le choix de construire des modèles basés sur une représentation globale mais rigoureuse de la physique, donc capables également de s'insérer à moindres coûts dans une démarche de calcul de configurations industrielles. C'est le cas des modèles d'échanges à l'échelle locale comme le modèle de combustion d'une goutte d'aluminium avec formation des résidus et fumées d'alumine ou du modèle de solidification et de cristallisation de l'alumine. C'est le cas aussi des modèles de chauffage, d'allumage, de combustion et de réponse instationnaire du propergol qui sont en outre basés sur une description géométrique simplifiée, i.e. unidimensionnelle, des transferts de masse et d'énergie pour faciliter leur utilisation en condition limite d'un calcul d'écoulement et donc favoriser le couplage entre les deux physiques. Suivant la même logique de rationalité et d'optimisation, le choix a été fait d'introduire l'ensemble des modèles dans une formulation eulérienne sectionnelle spécifiquement adaptée au caractère multicomposant et polydispersé de la phase dispersée.

Mots-clés Allumage et combustion des propergols, réponse instationnaire, combustion de l'aluminium, solidification et cristallisation de l'alumine, goutte multicomposant, écoulement diphasique à phase dispersée, méthodes de moments, approche sectionnelle

Mikaël Orain

Habilitation à diriger des recherches soutenue le 28 mai 2024 à Chasseneuil

Université de Poitiers

Environnement

Département Multiphysique pour l'énergétique (DMPE), ONERA Fauga-Mauzac

Jury

Christine Rousselle, PRISME, Université d'Orléans

Julien Sotton, PPRIME, ENSMA

Jean-Philippe Matas, LMFA, Université Claude Bernard Lyon I

Céline Morin LAMIH, Université Polytechnique Hauts-de-France

Fabien Halter, ICARE, Université d'Orléans

Éric Therssen, PC2A, Université de Lille

Marc Bellenoue, PPRIME, ENSMA

Contact Mikael.Orain@onera.fr

Résumé Ces travaux portent sur le développement de diagnostics optiques pour la caractérisation d'écoulements diphasiques rencontrés dans le domaine aérospatial. Trois thématiques sont abordées. Le premier axe concerne la mesure de l'émission de chimiluminescence de différentes espèces formées dans les flammes pour déterminer la richesse et le taux de dégagement de chaleur. La technique a été développée sur un brûleur académique et appliquée ensuite à des configurations réalistes de foyers industriels. Le second axe concerne la caractérisation des phases vapeur et liquide de brouillards de gouttes de carburant à l'aide de l'imagerie de fluorescence induite par laser (PLIF). Des études spectroscopiques sur le kérosène et des traceurs fluorescents ont été menées sur des expériences académiques. Des stratégies de mesure de richesse et de température ont ainsi été définies pour être ensuite appliquées sur des géométries d'injecteurs typiques des foyers aéronautiques, en conditions représentatives (haute température – haute pression, ou déprimé froid). Le dernier axe s'intéresse à la détection par PLIF d'espèces polluantes (CO et NO) formées lors de la combustion, ainsi qu'à la modélisation de leur fluorescence. Des expériences académiques ont été réalisées fournissant ainsi des données de validation pour les simulations numériques de spectres développées en parallèle, en particulier pour CO.

Mots-clés Diagnostics optiques, fluorescence induite par laser, spectroscopie, milieux diphasiques, combustion, évaporation, mesure de richesse, émissions polluantes

Laurent Artola

Habilitation à diriger des recherches soutenue le 28 mai 2024 à Chasseneuil

Université de Toulouse

Environnement

Département Physique, instrumentation, environnement, espace (DPHY), ONERA Toulouse

Jury

Jean-Luc Autran, Université de Rennes

Frédéric Saigne, Université de Montpellier

Olivier Sentey, INRIA

Patrick Austin, LAAS, CNRS, Université de Toulouse

Rosine Coq Germanicus, Université de Caen

Rodrigo Possamai Bastos, Université de Grenoble

Contact Laurent.Artola@onera.fr

Étude des mécanismes des effets des radiations et leur modélisation dans les technologies CMOS

Résumé L'environnement spatial est riche en particules énergétiques issues du soleil et d'étoiles lointaines. Elles peuvent pénétrer dans les satellites et perturber leur fonctionnement, soit par des dégradations progressives, soit par des événements ponctuels plus ou moins critiques pour la fiabilité des composants embarqués au sein du satellite. On distingue trois types d'effets dans les composants électroniques. Les effets singuliers (*SEE, Single Event Effects*) sont induits par une seule particule qui provoque une ionisation intense dans le composant. La conséquence au niveau du composant peut aller d'une simple perturbation transitoire sans gravité à une destruction complète.

L'approche retenue au cours de ces activités de recherche a reposé sur la mise en place d'un lien entre la phénoménologie des effets des radiations sur un composant électronique et la roadmap technologique associée aux composants électroniques embarqués. C'est au travers de ce prisme que l'ensemble des activités scientifiques a été structuré.

Les premiers travaux de recherche ont été menés en thèse dans le cadre d'un co-financement ONERA-Cnes (2008-2011). L'objectif de ces travaux a été de développer un ensemble de nouveaux modèles physiques capables de rendre compte des mécanismes d'occurrence des événements de types SET (*Single Event Transient*) et SEU (*Single Event Upset*) en prenant en considération les paramètres technologiques et de designs (et leur évolution avec le temps) induits par l'environnement radiatif naturel (spatial et atmosphérique) dans l'électronique moderne. Ces modèles physiques génériques ont par la suite été adaptés et intégrés dans l'outil de Monte Carlo (MC) de l'ONERA, MUSCA SEP3, afin de permettre une analyse fine des phénomènes d'erreurs transitoires.

Afin d'étendre l'expertise SEE aux composants de type ASIC, un outil spécifique d'injection de fautes, appelé TERRIFIC, a été développé. Cet outil a permis l'étude et l'analyse de l'impact de la propagation des erreurs transitoires (*Single Event Transient, SET*) au sein des circuits numériques, aussi bien pour des activités amont (thèses, projets de recherche internes ONERA) que pour des activités contractuelles (études R&T Cnes, contrat ESA, industrielles, etc.).

Ces travaux de recherche ont été réalisés dans le cadre de projets de recherche ONERA, de contrats avec les agences nationales ou européennes, (Cnes, DGA, ESA, UE) mais également avec des industriels. De plus, ces études ont été l'opportunité de développer des collaborations structurantes avec d'autres laboratoires de recherche de niveau international (CEA, IMEC, CERN, Université de Singapour, Université de Porto Alegre au Brésil, Université de Vanderbilt, le Naval Research Lab et la Sandia aux USA), des industriels du spatial (ADS, CAELESTE, IROC, TRAD) et des fabricants de composants semi-conducteurs (Microchip, Lynred, STMicroelectronic).

Mots-clés Environnement spatial, physique, radiation, modélisation, effets ionisants, microélectronique

Télécharger la thèse : <https://hal.science/tel-04880031v1>

Pierre-Yves Foucher

Habilitation à diriger des recherches soutenue le 13 mars 2024 à Toulouse

Université de Toulouse

Environnement

Département Optique et techniques associées (DOTA), ONERA Toulouse

Jury

Gaëlle Dufour, Laboratoire Interuniversitaire des Systèmes Atmosphériques

Sébastien Payan, Sorbonne Université

Yevgeny Derimian, LOA, Université de Lille

Jean-François Léon, Laboratoire d'Aérodynamique, Observatoire Midi-Pyrénées

Nadège Allegri-Martiny, Université Bourgogne Europe

Xavier Briottet, ONERA/DOTA

Contact Pierre-Yves.Foucher@onera.fr

Résumé La caractérisation à distance des rejets dus aux activités humaines tant dans l'atmosphère sous forme de gaz ou d'aérosols que sur les surfaces marines ou continentales est un enjeu majeur pour assurer le suivi et le maintien de notre environnement.

La télédétection par imagerie spectrale dans le domaine optique permet de fournir sur une gamme étendue de longueurs d'ondes allant du visible (oeil humain autour de $0,5 \mu\text{m}$) à l'infrarouge thermique (autour de $10 \mu\text{m}$) des informations complémentaires d'une même scène observée. L'analyse physique de ces différents plans images permet alors de mettre en relief les anomalies liées aux activités humaines : panaches de particules ou de gaz issus d'une source industrielle, effluents hydrocarbures ou chimiques déversés en mer ou sur les sols continentaux de façon accidentelle ou chronique. Au cours de cette soutenance de HDR, je présenterai différents travaux de recherche en imagerie spectrale que j'ai pu mener au Département d'Optique et Technique Associées (DOTA) de l'Onera, depuis 2009. La présentation abordera trois domaines scientifiques principaux (télédétection optique, imageurs spectraux et hyperspectraux, et traitement de l'information), et illustrera plusieurs avancées obtenues, en particulier dans les domaines de la cartographie et de la quantification de rejets de méthane dans l'atmosphère à différentes échelles spatiales et temporelles par mesures sol, drone et satellite. J'exposerai également les perspectives futures de mes travaux de recherche.

Mots-clés Télédétection optique, imagerie spectrale, imagerie hyperspectrale, panache, gaz, aérosols, pollution marine

Télécharger la thèse : <https://theses.fr/>

Olivier Rabaste

Habilitation à diriger des recherches soutenue le 21 mai 2024 à Gif-sur-Yvette

Université Paris-Saclay

Environnement

Département Électromagnétisme et radar (DEMR), ONERA Palaiseau

Jury

Laurent Ferro-Famil, ISAE-Supaero/DEOS

Guillaume Ginolhac, Université Savoie Mont-Blanc/LISTIC

Jean-Yves Tournet, Institut National Polytechnique de Toulouse

Stéphanie Bidon, ISAE-Supaero/DEOS

Philippe Forster, Université Paris-Nanterre et laboratoire SATIE, ENS Paris Saclay,

Sylvie Marcos, CNRS, CentraleSupélec/L2S

Contact Olivier.Rabaste@onera.fr

Résumé Cette soutenance présente une synthèse des travaux de recherche en traitement du signal radar que j'ai menés pendant quinze ans au sein du département Électromagnétisme et radar de l'ONERA (DEMR). Ces travaux ont contribué à tenter de résoudre, en l'attaquant sous différents angles, un même problème : la détection de cibles faibles en environnement complexe dans les applications radar, c'est-à-dire des cibles difficiles à détecter soit en raison de leur faible niveau énergétique, soit en raison de la complexité de leur environnement. Plusieurs axes de travaux ont été considérés. Premièrement les propriétés géométriques des détecteurs classiquement utilisés en radar ont été étudiées. Cela a permis de comprendre en profondeur leur fonctionnement et leurs limitations, et de proposer certaines solutions nouvelles, notamment dans le cadre particulier des erreurs de modèle liées aux cibles hors-grille. Deuxièmement, la problématique des lobes secondaires liés aux formes d'onde utilisées et aux traitements employés a été considérée. Les solutions proposées passent par l'optimisation des formes d'onde et l'optimisation des traitements pour minimiser les niveaux des lobes secondaires, ou l'application de méthodes de réjection. Troisièmement, des techniques fondées sur l'exploitation d'informations multiples ont été considérées pour détecter et localiser des cibles dans deux applications particulièrement complexes : la poursuite de cible en contexte *Track-Before-Detect* et la localisation de cible en radar *Around-the-Corner*.

Contrats post-doctoraux ONERA terminés en 2024

Gabriel Frank Bouobda Moladje

Étude du champ de phase de la fissuration assistée
par hydrogène

Contrat de post-doc terminé le 30 juin 2024

Département Matériaux et structures (DMAS), ONERA Châtillon

Responsable, tuteur : Antoine Ruffini, ONERA/DMAS:

Financement ONERA

Contact Antoine.Ruffini@onera.fr

Résumé Ce travail a consisté à développer un modèle champ de phases pour décrire le phénomène de fissuration assisté par hydrogène. Le champ d'endommagement associé aux fissures a été couplé au champ de concentration de l'hydrogène par une approche thermodynamiquement rigoureuse qui permet de reproduire de façon contrôlée la ségrégation de l'hydrogène en lèvres de fissure et sur des joints de grain. Dans un système simple, nous avons montré que cette ségrégation chimique induit naturellement un abaissement de la ténacité favorisant la propagation de la fissure. Dans un système polycristallin de nickel à deux dimensions, nous avons montré que ce modèle permet de décrire des régimes de fissuration intergranulaires ou transgranulaires en lien avec des énergies de ségrégation réalistes données dans la littérature.

Mots-clés Fragilisation par hydrogène, champ de phases, ségrégation chimique, polycristal

Jad Doghman

Simulation haute performance de l'évolution
microstructurale à chaud des métaux par une approche
couplée milieux généralisés et champ de phase

Contrat de post-doc terminé le 15 mai 2024

Département Matériaux et structures (DMAS), ONERA Châtillon

Responsable : Anna Ask, Christophe Bovet, ONERA/DMAS

Tuteur : Serge Kruch (DR1)

Financement : ANR

Contact Anna.Ask@onera.fr

Résumé Ce postdoc s'inscrit dans le projet ANR JCJC MOOMIN qui vise à améliorer les modèles de prédiction de l'évolution microstructurale des matériaux métalliques lors de la traitement thermomécanique. Cela est possible grâce à une combinaison d'un modèle mécanique en milieu généralisé type Cosserat pour la déformation du matériau, et un modèle champ de phase pour la migration des joints de grains. Il s'agit des modèles hautement non-linéaires qui sont lourds à résoudre numériquement, ce qui nécessite l'utilisation des méthodes de calcul haut performance. Notamment, dans ce postdoc, un modèle couplé Cosserat et champ de phase a été implémenté dans le logiciel Z-set. Le temps de calcul est optimisé grâce aux solveurs parallèles de type AMPFETI et un schéma de résolution alterné.

Alessandro Bongarzone

Analyse de résolvente moyenne d'un jet périodique

Contrat de post-doc terminé le 30 novembre 2024

Département Aérodynamique, aéroélasticité, acoustique (DAAA), ONERA Meudon

Responsables : Colin Leclercq, Cédric Content, ONERA/DAAA

Tuteur : Denis Sipp (HDR)

Financement ONERA

Contact Colin.Leclercq@onera.fr

Résumé Ce projet postdoctoral a permis de développer des méthodes numériques pour caractériser la réponse linéaire moyenne des écoulements périodiques (en temps) et soumis à un forçage externe de faible amplitude. Le projet a permis d'introduire une reformulation harmonique de l'opérateur résolvente moyenne pour les écoulements périodiques, puis de proposer un algorithme de projection permettant d'extraire efficacement les modes dominants de forçage et de réponse. Ces développements ont été testés sur un cas modèle de jet laminaire axisymétrique forcé. Le projet a permis de mieux comprendre les limites des approches basées sur la linéarisation autour d'un champ moyen, et ouvre des perspectives pour étendre ce type d'analyse à des écoulements plus complexes.

Mots-clés Contrôle des écoulements, dynamique des jets, analyse de résolvente

Clément Caillaud

Simulations numériques directes (DNS) de transition laminaire-turbulent en régime hypersonique

Contrat de post-doc terminé le 4 mars 2024

Département Aérodynamique, aéroélasticité, acoustique (DAAA), ONERA Meudon

Responsable, tuteur : Mathieu Lugin, ONERA/DAAA

Financement : CEA

Contact Mathieu.Lugin@onera.fr

Résumé Le post-doctorat s'est déroulé sur une période de 15 mois (Sept. 2022-Dec. 2023). Le projet scientifique en collaboration avec le CEA-CESTA portait sur l'étude des mécanismes de transition à la turbulence autour de la géométrie CCF12. Les objectifs initiaux de l'étude numérique comprenaient une analyse de stabilité linéaire globale de la géométrie CCF12 avec l'outil BROADCAST nouvellement développé par l'ONERA puis la réalisation de simulations DNS. Le projet a été réorienté à mi-parcours en une étude plus complète, à la fois numérique et expérimentale avec la participation active à la campagne d'essai CCF12-2023 dans la soufflerie R2Ch.

Raphël Chassagnoux

Développement d'un éclateur à gaz de type *pseudospark* pulsé et répétitif pour la commutation rapide de puissance

Contrat de post-doc terminé le 11 juin 2024

Département Physique, instrumentation, environnement, espace (DPHY), ONERA Palaiseau

Responsable, tuteur : Paul-Quentin Elias, ONERA/DPHY

Financement ONERA

Contact Amelie.Jarnac@onera.fr

Résumé Ce projet a porté sur le développement d'un commutateur à pseudo-spark à haute cadence, déclenché par un dispositif d'émission électronique par effet ferroélectrique. Ce dispositif a un fort potentiel pour la commutation répétitive de forts courants, mais également pour la génération de faisceaux d'électrons. Dans un premier temps, une étude a permis de caractériser le comportement du commutateur avec deux types de matériaux ferroélectriques. Ensuite, une analyse paramétrique a permis de définir le délai et le jitter de la déclenche, montrant en particulier que l'augmentation de la tension de déclenchement permet de réduire significativement le délai de commutation (autour de 200 ns). L'étude a également montré la possibilité de déclenche répétitive, avec des fréquences de répétition maximales de 400 Hz (limitée par la puissance d'alimentation disponible). Enfin, une maquette de pseudo-spark a été modifiée pour montrer la possibilité d'extraire des électrons lors de la commutation, ouvrant la voie à l'application de ce dispositif à la génération de faisceaux d'électrons pulsés.

Mots-clés Pseudo-spark, commutateur, faisceau d'électrons, ferroélectrique, haute-tension

Luca Chiabdo

Modélisation Monte-Carlo des phénomènes d'érosion dans le cadre de la fusion par confinement magnétique et de la propulsion plasma

Contrat de post-doc terminé le 31 juillet 2024

Département Physique, instrumentation, environnement, espace (DPHY), ONERA Toulouse

Responsable, tuteur : Thierry Paulmier, ONERA/DPHY

Financement ONERA

Contact Thierry.Paulmier@onera.fr

Résumé La recherche a porté sur l'amélioration de CSiPI (Code de Simulation de la Pulvérisation Ionique), un code Monte-Carlo simulant les interactions ions-matériaux selon le modèle d'approximation des collisions binaires. Les améliorations incluent le calcul des pertes inélastiques et la correction de l'intégrale temporelle pour des trajectoires plus réalistes. La parallélisation du code a significativement optimisé les performances. Des simulations extensives ont validé le code par rapport aux résultats analytiques, numériques et expérimentaux. Le couplage avec SPIS a permis d'analyser la réponse des matériaux sous bombardement ionique dans des scénarios pertinents pour les missions spatiales.

Mots-clés Interaction plasma-matériau, pulvérisation ionique, simulation de Monte-Carlo, approximation des collisions binaires

Moustapha Diaw

Détection de structures souterraines par imagerie radar aéroportée

Contrat de post-doc terminé le 31 août 2024

Département Électromagnétisme et radar (DEMR), ONERA Salon de Provence
Responsable, tuteur : Jean-Philippe Ovarlez, ONERA/DEMR

Financement ONERA

Contact Jean-Philippe.Ovarlez@onera.fr

Résumé *Change detection remains a classic but essential problem in Synthetic Aperture Radar (SAR) imagery. When designing statistical change detection schemes, SAR data are typically modelled as Gaussian random vectors, and the corresponding tests have been designed using Gaussian distributions. Given the heterogeneous nature of SAR images, SAR data were then extended to a mixture of scaled Gaussian distributions where the unknown scaling parameter (usually called texture) acts in the model on the whole information vector. This paper proposes to extend the conventional model by designing a new robust detector based on the generalized likelihood ratio test (GLRT) technique for multiband change detection, in which different textures are taken into account on the bands. The behaviour of the constant false alarm rate (CFAR) has been analysed, and both simulation and experimental SAR data show promising results. The applications concern the detection of underground structures, the detection of buried mines, etc.*

Mots-clés *Change Detection, GLRT, Mixture of Scaled Gaussian Distributions, Robust Estimation*

Renaud Ferrand

Mesure non-intrusive de l'impédance plasma d'un propulseur ECRA

Contrat de post-doc terminé le 16 janvier 2024

Département Physique, instrumentation, environnement, espace (DPHY), ONERA Palaiseau

Responsable : Victor Désangles, ONERA/DPHY

Tuteur : Jean-François Roussel (MR2)

Financement ONERA

Contact Victor.Desangles@onera.fr

Résumé Le post-doctorat s'est concentré sur le développement d'une méthode originale et généralisable permettant la mesure directe de l'impédance complexe d'une source plasma micro-onde en fonctionnement. Une telle source nécessite d'être alimentée par une unité de puissance externe et un analyseur de réseau ne peut pas être utilisé directement pour mesurer l'impédance en fonctionnement. La mesure d'impédance s'est donc appuyée sur un dispositif de couplage bidirectionnel pour instrumenter la décharge plasma avec un analyseur de réseau vectoriel [1]. L'ensemble des résultats sont à retrouver dans une publication scientifique dans Physics of Plasmas parue en Mars 2024 [2].

Mots-clés Propulsion électrique de satellite, propulsion plasma, source micro-onde

Références [1] V Désangles et al., "ECRA thruster advances: 30W and 200W prototypes latest performances", Journal of Electric Propulsion, 2:10 (2023), doi: 10.1007/s44205-023-00046-x ; [2] R. Ferrand, V. Desangles and P. Q. Elias, "Non-intrusive measurements of plasma impedance in an electron-cyclotron resonance thruster", Physics of Plasmas, 31, 053504 (2024), doi: 10.1063/5.0191658

Alice Fontbonne

Co-conception optique traitement pour l'extension de profondeur de champ en infrarouge

Contrat de post-doc terminé le 28 février 2024

Département Optique et techniques associées (DOTA), ONERA Palaiseau

Responsable : Pauline Trouvé-Peloux, ONERA/DTIS

Tuteur : Guillaume Druart (DR2)

Financement Divers

Contact Pauline.Trouve@onera.fr

Résumé Alice Fontbonne a travaillé sur la thématique d'augmentation de la profondeur de champ de caméras infrarouges pour des applications liées à l'automobile autonome. L'objectif était de voir des objets nets sur une plage de distance plus grande, ou de réduire les coûts de fabrication en augmentant la tolérance concernant la position du capteur. Son travail était en lien avec le projet OSMOSIS2 en collaboration entre l'ONERA et Lynred. L'extension de profondeur de champ repose dans l'état de l'art sur l'optimisation conjointe d'un composant optique (généralement un masque de phase) et d'une étape de traitement numérique avec un support de déconvolution infini ou un réseau neuronal. Dans son travail, Alice Fontbonne a investigué l'impact de l'emploi d'un traitement embarqué avec une seule convolution et une taille de noyau finie et a proposé une méthode pour dimensionner leurs tailles avant une optimisation conjointe. Ce travail a fait l'objet d'un article dans le journal Sensor en 2023, vol. 23, no 23. Par ailleurs, elle a pris en main le logiciel Formidable conçu au DOTA pour développer de nouvelles approches d'optimisation conjointe de composants optiques et de traitement en utilisant ce modèle optique différentiable. Le DTIS a bénéficié de son expertise sur ce logiciel pour développer des outils d'optimisation conjointe optique/réseau de neurones.

Quentin Marolleau

Quantum metrology with cold Rydberg atoms

Contrat de post-doc terminé le 30 août 2024

Département Physique, instrumentation, environnement, espace (DPHY), ONERA Palaiseau

Responsable : Alexis Bonnin, ONERA/DPHY

Tuteur : Sylvain Schwartz (DR2)

Financement ANR

Contact Alexis.Bonnin@onera.fr

Résumé Quentin Marolleau a notamment contribué au développement d'une méthode originale pour reconstituer la fréquence et l'amplitude d'un champ micro-onde à partir des données fournies par le dispositif expérimental développé dans le cadre de la thèse de Romain Duverger (thèse dont il a également contribué à l'encadrement). Ces travaux ont fait l'objet d'une publication dans la revue Physical Review Applied [1]. A l'issue de son postdoc, Quentin a rejoint en tant qu'ingénieur la société QBLOX, qui produit des dispositifs électroniques de contrôle pour les technologies quantiques.

Mots-clés Technologies quantiques, atomes de Rydberg, capteurs de champs électromagnétiques, atomes froids

Référence [1] Duverger, R., Bonnin, A., Granier, R., Marolleau, Q., Blanchard, C., Zahzam, N., Bidet, Y., Cadoret, M., Bresson, A., Schwartz, S. (2024). *Metrology of microwave fields based on trap-loss spectroscopy with cold Rydberg atoms*. Physical Review Applied, 22(4), 044039.

Youssef Metayrek

Imagerie térahertz multispectrale par transduction thermique vers l'infrarouge

Contrat de post-doc terminé le 1er janvier 2024

Département Optique et techniques associées (DOTA), ONERA Palaiseau

Responsable : Baptiste Fix, ONERA/DOTA

Tuteur : Patrick Bouchon (DR2)

Contact Baptiste.Fix@onera.fr

Financement AID (RAPID)

Résumé Lors de son post-doc à l'ONERA, Youssef Metayrek a étudié des metasurfaces THz permettant de transformer une caméra thermique en spectromètre THz. La metasurface est composée d'une assemblée de nano-antennes métalliques de neuf différentes dimensions sur un substrat en silice fondue. Chaque dimension d'antenne présente une résonance optique d'absorption de grand facteur de qualité à une longueur d'onde différente. Ainsi, sous illumination, certaines antennes vont absorber la lumière, s'échauffer et donc émettre dans le domaine infrarouge. En imageant cette membrane par une caméra infrarouge et en relevant les antennes qui s'échauffe, il est donc possible de connaître la longueur d'onde du faisceau THz incident.

Mots-clés Metasurface, spectrométrie, THz, membrane, microstructure, couplage thermique-optique.



Romuald Tapimo

Méthode de transfert radiatif rapide pour la prise en compte de mélanges de gaz atmosphériques et de situations hors équilibre thermodynamique local

Contrat de post-doc terminé le 30 novembre 2024

Département Optique et techniques associées (DOTA), ONERA Palaiseau

Responsable, tutrice : Laurence Croizé, ONERA/DOTA

Contact Laurence.Croize@onera.fr

Financement ANR

Résumé

Pour faire face à l'explosion des données produites par les sondeurs atmosphériques, il est nécessaire de développer des méthodes rapides et précises de propagation du rayonnement dans l'atmosphère. Ces modèles sont en effet utilisés pour restituer les observables géophysiques à partir de luminances spectrales. C'est dans ce contexte qu'un nouveau modèle de transfert radiatif a été développée dans le cadre de l'ANR ASGARD (*Advanced Spectral models of GAs RaDiation*), en collaboration avec le CETHIL. Cette approche, baptisée méthode des L-distributions modifiées, offre une réduction significative des temps de calcul (facteur 30) et une précision accrue (facteur 2,5) par rapport aux méthodes standards.



Cécile Bouvet

LEXIKHUM : Étude du canal kinesthésique comme moyen de communication

Contrat de post-doc terminé le 31 mai 2023

Département Traitement de l'information et systèmes (DTIS), ONERA Salon de Provence
Responsable, tuteur : Bruno Berberian (DR2), ONERA/DTIS

Contact cecile.bouvet@onera.fr

Financement ANR

Résumé Cécile Bouvet a participé à l'initiation du projet LEXIKHUM (Lexique d'Interaction Kinesthésique Humain-Machine) dont l'objectif est de réduire l'ambiguïté des systèmes automatiques avec l'utilisation du canal kinesthésique dans le pilotage d'hélicoptère. En collaboration avec des chercheurs en linguistique, robotique, science cognitive et ergonomie, elle a participé à la définition d'un cadre théorique de la communication Kinesthésique et a défini des protocoles expérimentaux permettant d'évaluer des unités de communication.

Cécile Bouvet a également pris en charge la suite du projet MetaStress, en mettant en place une expérience comportementale s'intéressant à l'impact d'un Stress aigu sur l'efficacité Métacognitive. En contrastant les performances des participants exposés à un environnement de réalité virtuelle contenant un ensemble de stressseurs (groupe Stress) ou non (groupe Contrôle), induisant un stress perçu subjectivement (STAI Trait) et objectivement (dosages de cortisol), elle s'intéresse aux évolutions de jugement de confiance dans une décision forcée de perception visuelle.



Claire Deshayes

Impact de la fatigue cognitive sur les processus de surveillance : applications à la supervision des drones

Contrat de post-doc terminé le 14 juin 2024

Département Traitement de l'information et systèmes (DTIS), ONERA Salon de Provence
Responsable : Stefania Ficarella

Tuteur : Bruno Berberian (DR2)

Contact Stefania.Ficarella@onera.fr

Financement AID

Résumé Claire Deshayes a abordé le problème de la détection de la fatigue cognitive lors de la supervision de drones avec une étude de laboratoire qui permet d'obtenir des données subjectives et objectives dans des conditions expérimentales contrôlées. Pour cela, Claire Deshayes a réalisé une étude de neurophysiologie, comprenant des techniques d'enregistrement non invasif de l'activité cérébrale et corporelle humaines, telles que l'électroencéphalographie, l'oculométrie, la conductance électrodermale et l'électrocardiographie. En testant l'effet de l'induction d'une charge cognitive (faible vs. élevée, induite avec la MATB-II) répétée au cours du temps (*Time on Task*) sur trois tâches cognitives qui sont représentatives des fonctions cognitives nécessaires pour l'activité de supervision de multiples drones en parallèle (tâche de Simon : contrôle inhibiteur; tâche de switching : flexibilité cognitive; n-back task : mémoire de travail), Claire Deshayes a pu identifier un marqueur neurophysiologique tâche-indépendant de la fatigue cognitive. L'article scientifique qui résume ses découvertes scientifiques est en cours d'écriture.



Jossué Cariño Escobar

Capacités de navigation autonome pour un robot
quadrupède

Contrat de post-doc terminé le 30 mars 2024

Département Traitement de l'information et systèmes (DTIS), ONERA Toulouse

Responsable : Christophe Grand, ONERA/DTIS

Tuteur : Charles Lesire (DR2)

Contact Christophe.Grand@onera.fr

Financement ONERA



Alexis Robbes

Optimisation du partage des ressources d'une
constellation de satellites d'observation

Contrat de post-doc terminé le 12 mars 2024

Département Traitement de l'information et systèmes (DTIS), ONERA Toulouse

Responsable, tuteur : Gauthier Picard (DR2), ONERA/DTIS

Contact Gauthier.Picard@onera.fr

Financement BPI France

Résumé Ce travail concerne le partage du temps satellite d'une constellation pour surveiller de grandes zones. Les utilisateurs peuvent réserver des portions d'orbites pour leur usage privé et observer la Terre librement. La nature exacte des observations reste confidentielle. Pour partager efficacement le temps satellite, le gestionnaire demande un minimum d'informations sur les besoins des utilisateurs. Celles-ci sont formulées via des requêtes de réactivité sur grandes zones (ex : observer la région Hauts-de-France dans un délai de 2 heures). Chaque requête est définie par une zone géographique, une réactivité et un horizon de planification. La surveillance peut être motivée par le suivi de catastrophes naturelles ou des raisons confidentielles. Ce problème a déjà été exploré pour des requêtes périodiques, mais celles-ci offrent moins de confidentialité et de flexibilité. D'autres types de requêtes ont également été étudiés, mais sans aborder la notion de partage entre utilisateurs. Cette approche vise à équilibrer les besoins individuels avec l'optimisation du temps satellite disponible.

Mots-clés Observation de la Terre, constellation de satellites, partage d'orbites, réactivité, grandes zones



Index des auteurs

Aguilar, Boris	Thèse de doctorat	MFE	92
Airiau, Magdeleine	Thèse de doctorat	MFE	80
Alary, Thomas	Thèse de doctorat	MFE	94
Aleau, Killian	Thèse de doctorat	PHY	128
Artola, Laurent	HDR	PHY	262
Aubé, Antoine	Thèse de doctorat	TIS	226
Barreau, Gabriel	Thèse de doctorat	PHY	162
Bertrand, Pierre	Thèse de doctorat	MAS	32
Bongarzone, Alessandro	Post-Doc	MFE	272
Bonnet, Emmanuelle	Thèse de doctorat	TIS	218
Borius, Zoé	Thèse de doctorat	MAS	22
Bouobda Moladje, Gabriel Frank	Post-Doc	MAS	270
Bouvet, Cécile	Post-Doc	TIS	282
Caillaud, Clément	Post-Doc	MFE	273
Cardoso, Ines	Thèse de doctorat	TIS	198
Chan, Anouck	Thèse de doctorat	TIS	228
Chassagnoux, Raphaël	Post-Doc	PHY	274
Chevalier, Pier-Henri	Thèse de doctorat	PHY	166
Chiabdo, Luca	Post-Doc	PHY	275
Chirouf, Abdelhalim	Thèse de doctorat	MAS	38
Ciocarlan, Alina	Thèse de doctorat	PHY	130
Cissé, Mahawa	Thèse de doctorat	PHY	140
Cocaul, Périclès	Thèse de doctorat	TIS	204
Colcombet, Paul	Thèse de doctorat	PHY	156
Courtin, Victor	Thèse de doctorat	SNA	186
De Albuquerque Silva, Iryna	Thèse de doctorat	TIS	224
De Oliveira Cabral Junior, Alessandro	Thèse de doctorat	PHY	106
Decker, Thomas	Thèse de doctorat	MFE	72
Delacroix, Bastien	Thèse de doctorat	MFE	96
Delaite, Thomas	Thèse de doctorat	TIS	236
Demange-Chryst, Julien	Thèse de doctorat	SNA	182
Deshayes, Claire	Post-Doc	TIS	283
Di Martino, Thomas	Thèse de doctorat	TIS	238
Diaw, Moustapha	Post-Doc	PHY	276
Dintilhac, Nathan	Thèse de doctorat	PHY	158
Doghman, Jad	Post-Doc	MAS	271
Dorange, Alexis	Thèse de doctorat	SNA	188
Dosne, Cyril	Thèse de doctorat	SNA	190
Dotse, Kokou	Thèse de doctorat	SNA	180
Dufraisse, Marius	Thèse de doctorat	TIS	240
Dumont, Maxime	Thèse de doctorat	PHY	142
Dupays, Joël	HDR	MFE	258
Duverger, Romain	Thèse de doctorat	PHY	168
Égreteau, Baptiste	Thèse de doctorat	MFE	58
Escobar, Jossué Cariño	Post-Doc	TIS	284
Etchebarne, Benjamin	Thèse de doctorat	MFE	82

Farjon, Philippe	Thèse de doctorat	MFE	84
Fernandez Tiberio , Luiz Fernando	Thèse de doctorat	TIS	200
Ferrand, Renaud	Post-Doc	PHY	277
Fontbonne, Alice	Post-Doc	PHY	278
Foucher, Pierre-Yves	HDR	PHY	264
Freslier, Clément	Thèse de doctorat	PHY	150
Garcia, Sébastien	Thèse de doctorat	MFE	50
Gaubert, Thierry	Thèse de doctorat	PHY	138
Geiger, Leonardo	Thèse de doctorat	MFE	86
Gheno, Thomas	HDR	MAS	256
Gibart, Jules	Thèse de doctorat	TIS	206
Giehler, Julian	Thèse de doctorat	MFE	60
Gorée, Joris	Thèse de doctorat	PHY	120
Goron, Mathieu	Thèse de doctorat	MAS	26
Guidolin-Pina, Damien	Thèse de doctorat	TIS	230
Guinebert, Iban	Thèse de doctorat	TIS	248
Guitard, Laureen	Thèse de doctorat	PHY	152
Gureghian, Clément	Thèse de doctorat	PHY	122
Hamadouche, Ines	Thèse de doctorat	MAS	16
Hellard, Pierre	Thèse de doctorat	MFE	74
Helvig, Kevin	Thèse de doctorat	TIS	242
Huret, Thomas	Thèse de doctorat	MFE	54
Husson, Julien	Thèse de doctorat	MFE	62
Jussiau, William	Thèse de doctorat	TIS	208
Kergosien, Nina	Thèse de doctorat	MAS	24
Kirov, Nikolay	Thèse de doctorat	MFE	70
Klein, Jean-Michel	Thèse de doctorat	MFE	76
Krauth, Timothé	Thèse de doctorat	TIS	250
Kuznetsov, Arseniy	Thèse de doctorat	PHY	144
Labarbarie, Pol	Thèse de doctorat	TIS	232
Lammens, Bastien	Thèse de doctorat	MAS	34
Lantelme, Melissa	Thèse de doctorat	MFE	98
Le Coz, Adrien	Thèse de doctorat	TIS	234
Lecler, Simon	Thèse de doctorat	MFE	64
Lenglet, Manon	Thèse de doctorat	MAS	36
Letheule, Nathan	Thèse de doctorat	TIS	244
Levy, Hugo	Thèse de doctorat	PHY	174
Lucas, Yann	Thèse de doctorat	PHY	146
Magand, Dimitri	Thèse de doctorat	MAS	12
Magnani, Guido	Thèse de doctorat	TIS	210
Maillard, Martin	Thèse de doctorat	MFE	52
Majnoni d'Intignano, Xavier	Thèse de doctorat	MAS	18
Marolleau, Quentin	Post-Doc	PHY	279
Marquet, Noémie	Thèse de doctorat	PHY	170
Mastromatteo, Loïc	Thèse de doctorat	MAS	28
Matha, Robin	Thèse de doctorat	PHY	132

Matthia, Tomasz	Thèse de doctorat	PHY	124
Mazzolo, Lisa-Marie	Thèse de doctorat	PHY	108
Metayrek, Youssef	Post-Doc	PHY	280
Milu-Vaideseagan, Sebastian	Thèse de doctorat	MFE	78
Murata, Renato	Thèse de doctorat	TIS	252
Muzeau, Max	Thèse de doctorat	PHY	110
Nicolas, Lucas	Thèse de doctorat	PHY	160
Orain, Mikaël	HDR	MFE	260
Paggi, Laura	Thèse de doctorat	PHY	126
Pantel, Hugues	Thèse de doctorat	MFE	66
Patiño, William	Thèse de doctorat	PHY	134
Pélegrin, Nicolas	Thèse de doctorat	TIS	220
Pham, Ba-Huy	Thèse de doctorat	PHY	116
Pioch, Romain	Thèse de doctorat	PHY	164
Plath, Matthias	Thèse de doctorat	MAS	14
Rabaste, Olivier	HDR	PHY	266
Ritzenthaler, Valentin	Thèse de doctorat	PHY	114
Riveiro Moreno, Carmen	Thèse de doctorat	MFE	46
Robbes, Alexis	Post-Doc	TIS	285
Romanelli, Michele	Thèse de doctorat	MFE	88
Ruello, Maëlys	Thèse de doctorat	SNA	184
Salducci, Clément	Thèse de doctorat	PHY	172
Salmon, Mathieu	Thèse de doctorat	MFE	48
Saves, Paul	Thèse de doctorat	TIS	202
Sekercioglu, Pelin	Thèse de doctorat	TIS	212
Senée, Pierre	Thèse de doctorat	PHY	148
Serdel, Quentin	Thèse de doctorat	TIS	246
Serrano-Richaud, Elisa	Thèse de doctorat	MAS	40
Somers, Franca	Thèse de doctorat	TIS	214
Steiner, Kelly	Thèse de doctorat	TIS	222
Stragiotti, Enrico	Thèse de doctorat	MAS	30
Suquet, Étienne	Thèse de doctorat	PHY	112
Taguema, Ludovic	Thèse de doctorat	MFE	68
Tapimo, Romuald	Post-Doc	PHY	281
Tételin, Arthur	Thèse de doctorat	SNA	192
Torre, Anthony	Thèse de doctorat	PHY	118
Valentin, Johan	Thèse de doctorat	MFE	56
Vernozy, Charlotte	Thèse de doctorat	MAS	20
Volatier, Jean-Baptiste	Thèse de doctorat	PHY	154
Walcarius, Kevin	Thèse de doctorat	PHY	136
Walter, Léo	Thèse de doctorat	MFE	90
Zagar, Maxime	Thèse de doctorat	TIS	216

L'ONERA intervient en amont des grands programmes
d'aéronautique, d'espace et de défense.

Avions
Hélicoptères
Propulsion des aéronefs
Transport spatial
Systèmes orbitaux
Missiles
Drones
Systèmes de défense
Sécurité



6 CHEMIN DE LA VAUVE AUX GRANGES – 91120 PALAISEAU – FRANCE – TEL. : +33 (0)1 80 38 60 60

www.onera.fr