

Préparer le futur

FORMATION PAR LA RECHERCHE
THÈSES DE DOCTORAT **2023**
HDR & POST-DOCS

Formation par la recherche à l'ONERA

Chiffres clés 2023

Doctorants 376

Post-doctorants 16

HDR 122

Thèses soutenues en 2023 120

Soutenances HDR en 2023 6

Post-docs terminés en 2023 11

Thèses de doctorat, post-docs et HDR

Année 2023

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.

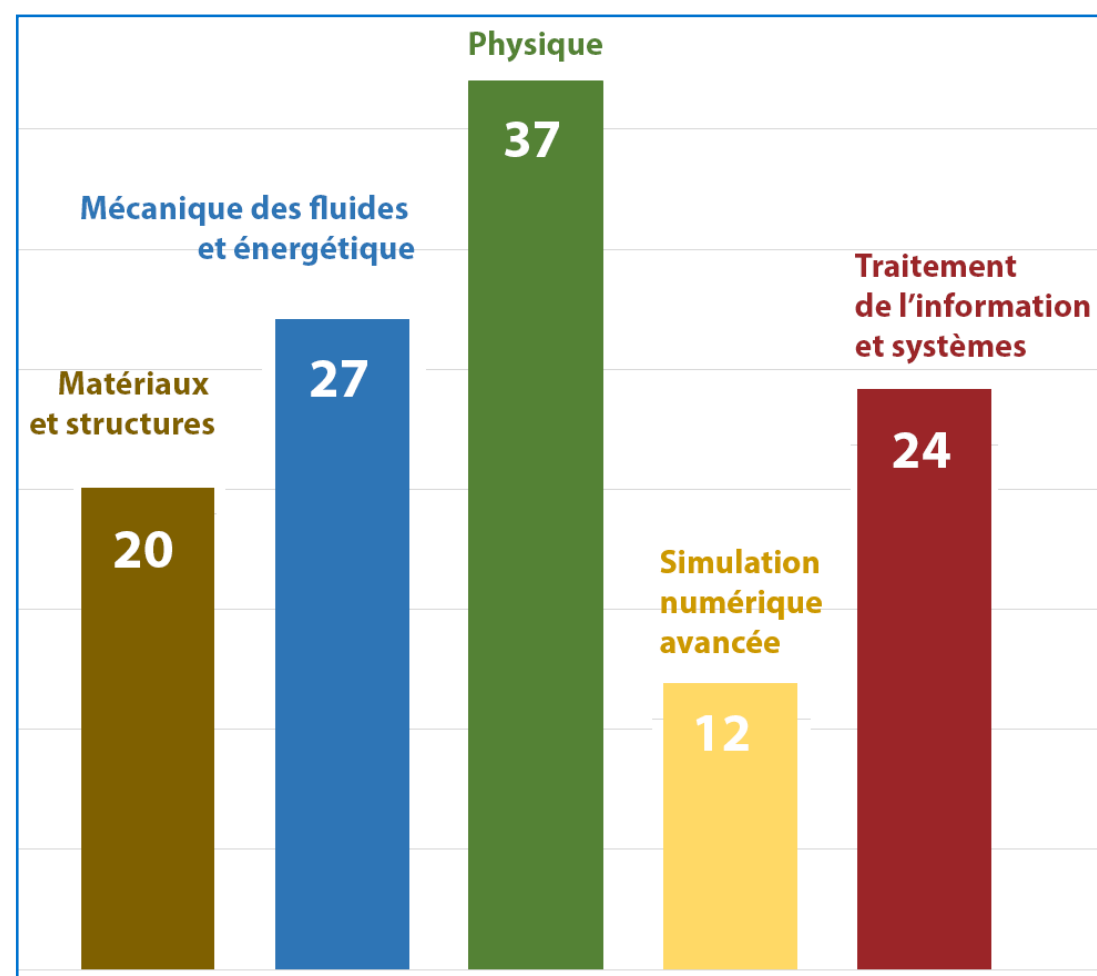
Au-delà de cette mission de formation, les doctorantes et doctorants sont la force vive de la politique scientifique de l'ONERA en apportant la diversité culturelle et la disponibilité intellectuelle indispensables pour faire émerger ou fructifier des idées originales et innovantes. Ils participent à 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. L'HDR est d'abord un diplôme qui couronne un parcours académique, et c'est aussi une marque de reconnaissance du haut niveau scientifique de nos chercheuses et chercheurs, ainsi que de leur participation active à l'animation et au développement de l'écosystème international de la recherche.

Pour chaque thèse et HDR, un contact ONERA a été indiqué. N'hésitez pas à échanger avec lui, pour obtenir plus d'information ou une publication, voire entamer une collaboration.

Riad Haidar
Directeur Scientifique Général

120 thèses soutenues en 2023



La formation par la recherche à l'ONERA



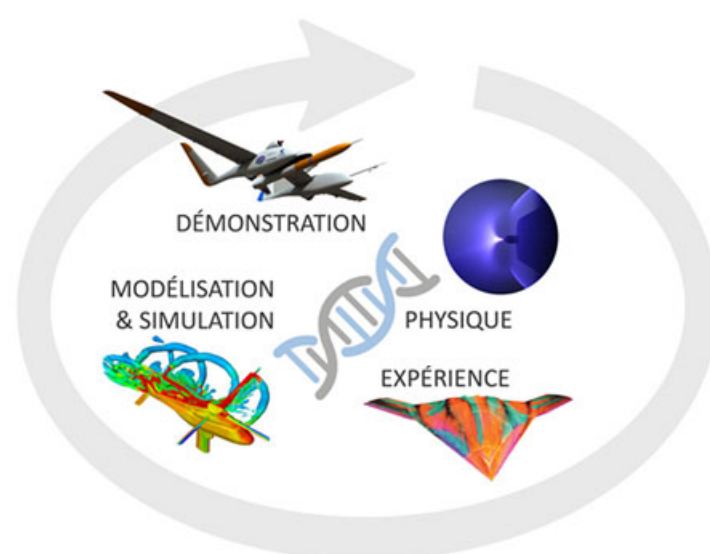
Les thèses de doctorat ont lieu dans l'environnement de recherche des départements scientifiques de l'ONERA. Nos doctorants sont toujours encadrés sur place d'au moins un personnel ONERA spécialiste de la thématique scientifique de la thèse.

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

La thèse, de la proposition initiale du sujet jusqu'à la soutenance en passant par le recrutement du doctorant et le montage du dossier avec les éventuels partenaires, est gérée 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 qui ont leur thèse en cours.

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.

L'ADN de l'ONERA



[Cristina Rotaru](#)

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

LA FORMATION PAR LA RECHERCHE À L'ONERA 2023

Thèses soutenues

- Matériaux et structures 9
- Mécanique des fluides et énergétique 55
- Physique 117
- Simulation numérique avancée 197
- Traitement de l'information et systèmes 225

HDR soutenues 277

Post-docs terminés 291

Index des auteurs 305

**Thèses de doctorat ONERA
soutenues en 2023**

**DOMAINE SCIENTIFIQUE
MATÉRIAUX ET STRUCTURES**

Thèses de doctorat ONERA soutenues en 2023

DOMAINE MATÉRIAUX ET STRUCTURES

Selon les départements et leurs thématiques scientifiques :

MATÉRIAUX ET STRUCTURES

Structures de basse dimension

Grégoire Breyton	Structure et dynamique de nanoparticules bimétalliques dans un environnement réel	12
Matteo Erbi	Propriétés structurales de nanoparticules HEA sous contraintes	14
Sébastien Roux	Étude par spectroscopies de luminescence et d'absorption des propriétés optiques d'hétérostructures de matériaux 2D	16
Laure Tailpied	Synthèse par CVD d'hétérostructures à base de feuillets de graphène et de nitrure de bore aux propriétés optimisées pour dispositifs	18

Matériaux structuraux innovants

Thibaut Armanni	Conception d'alliages de titane pour applications aéronautiques hautes températures	20
Lisa Audouard	Conception et caractérisation de matériaux ultra-haute température à gradient de propriétés	22
Nathan Brard	Céramiques nanocomposites MgO-Y2O3 pour les applications de fenêtres infrarouges aérospatiales à faible émissivité	24
Gwenaëlle Chebil	Optimisation d'alliages Al pour la fabrication additive LBM	26
Camille Salsi	Étude de l'interdiffusion et de l'effet Kirkendall dans les alliages métalliques à base de nickel	28

Matériaux architecturés et multifonctionnels

Thibaut Froeliger	Étude de l'élaboration par fabrication additive d'alliages à base de cobalt à durcissement structural	30
--------------------------	---	----

Modélisation et caractérisation multi-échelle et multi-physique des matériaux

Grégoire Brot	Caractérisation accélérée de la fatigue à grand nombre de cycles de pièces de fabrication additive par essais d'autoéchauffement et par machine ultrasonique de fatigue	32
----------------------	---	----

Guillaume Fourier	Modèle mésoscopique de prévision de l'évolution de l'endommagement de matériaux tissés sains et en présence de défauts	34
--------------------------	--	----

Modélisation des phénomènes macroscopiques complexes

Claire Fougerouse	Caractérisation et modélisation de l'endommagement dans les composites stratifiés à matrice thermoplastique avec prise en compte des défauts initiaux	36
Zakia Karoui	Approches variationnelles de la rupture pour la modélisation de la fissuration matricielle dans les stratifiés unidirectionnels	38
Clément Labouffie	Gestion de incertitudes pour l'identification des lois de comportement composites	40
Matthieu Nicol	Compréhension et modélisation de l'influence de la séquence d'empilement sur le scénario d'endommagement dans un composite stratifié de plis unidirectionnels	42
Maxime Nutte	Modélisation de la fatigue d'assemblages métalliques par une approche locale	44
Stacy Patti	Prévision de la durée de vie de pièces en composite stratifiés d'unidirectionnels en utilisant un modèle d'endommagement incrémental à variables observables	46
Jean-David Thoby	Développement d'une méthode de conception d'essais innovante pour la caractérisation de comportements mécaniques anisotropes par la Méthode des Champs Virtuels	48

Mécanique structurale, conception et optimisation des structures

Lander Vertonghen	Développement d'une stratégie de conception optimale de pièces aéronautiques composites	50
--------------------------	---	----

AÉRODYNAMIQUE, AÉROÉLASTICITÉ, ACOUSTIQUE

Aéroélasticité

Étienne Tixadou	Optimisation du comportement aéro-élastique de pales d'hélicoptère innovantes	52
------------------------	---	----

Grégoire Breyton

Thèse soutenue le 15 décembre 2023 à Châtillon

ED 564 (PIF) - Physique en Ile de France - Université Paris Cité

Encadrement

Département Matériaux et structures, ONERA, Châtillon

Directeurs de thèse : Christian Ricolleau, MPQ, Univ. Paris Cité ;
Hakim Amara, LEM, ONERA/DMAS-CNRS

Jury

Claude Henry, CINaM, Aix-Marseille Université

Christine Goyhenex, IPCMS, Université de Strasbourg

Pascale Bayle-Guillemaud, Interdisciplinary Research Institute of Grenoble, CEA

Geoffroy Prévot, INSP, Sorbonne Université

Financement

Ministère de l'Enseignement supérieur et de la Recherche, ONERA

Contact hakim.amara@onera.fr

Ségrégation au sein de nanoparticules bi-métalliques à l'échelle atomique au travers d'une double approche théorique et expérimentale

Résumé

L'analyse des nanoparticules (NPs) à l'échelle nanométrique pour des applications en conditions réelles reste un challenge considérable à l'heure actuelle. Dans ce contexte, l'utilisation de NPs bimétalliques est fortement envisagée dans le domaine de la catalyse avec pour fonction de favoriser et d'accélérer la cinétique de réactions chimiques de surface. Il est alors fondamental de décrire finement la structure ainsi que la composition chimique des surfaces qui sont en interaction directe avec le milieu environnant dans lequel les NPs sont plongées. Au cours de cette thèse, nous avons mis au point une double approche théorique et expérimentale à l'échelle atomique dans le but d'étudier deux types d'alliages en particulier : Or-Cuivre (Aux-Cu_{1-x}) et Nickel-Aluminium (Nix-Al_{1-x}). Au travers d'une synthèse de NPs Aux-Cu_{1-x} octaédriques facettées de 5 nm par voie laser et d'observations en microscopie électronique corrigée des aberrations en mode sonde, nous avons développé une méthode d'analyse de la composition chimique de chaque plan atomique. En procédant ainsi, nous avons mis en évidence un fort effet de ségrégation de l'or en surface ainsi que des profils de concentration au sein des NPs différents selon l'ordre chimique (ordonné ou désordonné). Dans le cas d'une composition Au_{0.5}Cu_{0.5} ordonnée de phase L10, nous avons caractérisé une structure rarement observée jusqu'ici et correspondant à la présence des trois variants possibles de la phase L10 au sein d'une même particule. En parallèle, des simulations à l'échelle atomique ont permis des analyses plus précises en considérant des empilements de plans infinis ainsi que des NPs de différentes tailles et compositions.

L'excellente adéquation entre les simulations et les analyses expérimentales renforce la pertinence de nos résultats et démontre l'importance de cette double approche que nous avons par la suite appliquée à l'étude des propriétés de surface de NPs de type Nix-Al_{1-x}. Dans un premier temps, nous sommes parvenus à optimiser les paramètres de synthèse pour obtenir des NPs à tailles et compositions définies. Les analyses expérimentales des surfaces couplées à des simulations atomistiques nous ont permis d'observer un phénomène jusqu'alors inédit. En effet, une ségrégation quasi complète de l'aluminium apparaît jusqu'à la formation de NPs adoptant une structure coeur (Nickel) - coquille (Aluminium), pour toutes les concentrations étudiées empêchant ainsi toute formation d'alliages. Ceci est d'autant plus surprenant, qu'à l'état massif et pour une composition de 50% de nickel et 50% d'aluminium, la phase ordonnée B2, connue pour sa stabilité et sa résistance à la corrosion, apparaît. Ces différences structurales flagrantes entre l'échelle nanométrique et macroscopique montrent là encore la physique si unique qui existe dans le monde de l'infiniment petit.

Mots-clés

Nanoparticule, alliage, synthèse, microscopie électronique en transmission, simulation atomistique, Monte Carlo, propriétés thermodynamiques.

Télécharger la thèse : <https://theses.fr/s231597>

Matteo Erbi

Thèse soutenue le 24 novembre 2023 à Châtillon

ED 397 - Physique et chimie des matériaux - Sorbonne Université

Encadrement

Département Matériaux et structures, ONERA, Châtillon

Encadrant : Ricardo Gatti, LEM, ONERA/DMAS-CNRS

Directeur de thèse : Hakim Amara, LEM, ONERA/DMAS-CNRS

Jury

Riccardo Ferrando, Department of Physics, Université de Gênes

Julien Godet, Institut Pprime, Poitiers

Francesco Montalenti, Dipartimento di scienza dei materiali, Univ. de Milan-Bicocca

Christine Mottet, CINaM, Aix-Marseille Université

Fabio Pietrucci, IMPMC, Sorbonne Université

Barbara Putz, Lab. for Mechanics of Materials and Nanostructures, Empa (Suisse)

Financement

ONERA

Contact hakim.amara@onera.fr

Résumé

Les nanoparticules métalliques (NP) possèdent des propriétés uniques, distinctes des matériaux massifs, offrant ainsi des applications potentielles dans divers domaines tels que la mécanique, la catalyse ou encore l'optique. Dans ce contexte, cette thèse étudie comment les propriétés mécaniques des NP, influencées par la forme, la taille et la composition, affectent leurs propriétés électroniques.

En couplant des calculs de type dynamique moléculaire et des simulations par éléments finis, nous démontrons l'effet significatif de la forme sur la réponse élastique effective. Nos résultats soulignent que la plasticité est contrôlée à la fois par la forme et la taille, avec un effet de taille universel pour les NP cristallines cubiques à faces centrées. Dans le cas de NPs d'alliages, des mécanismes de renforcement et d'adoucissement sont observés, indiquant l'influence de l'ordre local sur l'élasticité et la plasticité.

Enfin, grâce à un modèle reposant sur un formalisme de type liaisons fortes et des calculs ab initio, nous révélons que la déformation plastique crée de nouveaux sites réactifs à la surface des NP.

Sébastien Roux

Thèse soutenue le 24 mai 2023 à Châtillon

ED 573 (INTERFACES) - Approches interdisciplinaires/fondements, applications et innovation - Université Paris-Saclay

Encadrement

Département Matériaux et structures, ONERA, Châtillon

Encadrant : Christian Arnold, GEMaC, UVSQ ; Frédéric Fossard, ONERA/DMAS

Directeurs de thèse : Annick Loiseau, LEM, ONERA/DMAS-CNRS ;

Julien Barjon, GEMaC, UVSQ

Jury

Catherine Journet, LMI, Université Lyon 1

Gwénoél Jacopin, Institut Néel, Grenoble

Christophe Voisin, LPENS, Sorbonne Université

Claudio Attaccalite, CInAM, Aix-Marseille Université

Stéphane Collin, C2N, Université Paris-Saclay

Cédric Robert, LPCNO, INSA Toulouse

Financement Flagship Graphene

Contact annick.loiseau@onera.fr

Résumé

Le nitrure de bore hexagonal (hBN) est un semi-conducteur à large bande interdite qui joue un rôle stratégique dans la famille des matériaux 2D en raison de propriétés telles qu'une luminescence UV intense ou son rôle protecteur pour les autres matériaux 2D. L'assemblage de différents matériaux 2D pour former des hétérostructures de matériaux 2D (h2D) offre des perspectives intéressantes pour l'ingénierie de leurs propriétés optiques et

Excitons dans le nitrure de bore hexagonal et ses homostructures en rotation : propriétés de volume, aux surfaces et aux interfaces

électroniques. Cela nécessite une compréhension des propriétés intrinsèques de chaque matériau 2D, mais aussi des influences réciproques des matériaux assemblés les uns sur les autres, ainsi que des effets de surface et d'interface. Il s'agit d'étudier sur des cristaux hBN leur dynamique spatiale et temporelle en volume, leur diffusivité et l'effet recombinant de la surface pour ensuite aborder en détail les phénomènes d'émission lumineuse aux interfaces entre deux cristaux de hBN désorientés formant une homostructure hBN-hBN en rotation. Ces études ont été réalisées avec le dispositif de cathodoluminescence (CL) résolue en temps du GEMaC, qui permet un contrôle spatial et temporel de l'excitation. Les expériences ont été menées sur des monocristaux de hBN de synthésés différemment et sur des homostructures hBN-hBN assemblées à partir de fragments exfoliés de cristaux massifs.

L'étude de la dynamique de déclin de l'exciton libre en volume de différents cristaux hBN a d'abord permis de mesurer sa durée de vie radiative, qui est une donnée intrinsèque au matériau, à 27 ns. Cette très faible valeur nous a permis de comprendre l'origine de la forte efficacité de luminescence du hBN, qui est un sujet débattu depuis plus de 10 ans. Il est ainsi établi que l'efficacité de luminescence est due à la compacité spatiale de l'exciton qui rend sa désexcitation radiative particulièrement efficace. Le rôle des défauts cristallins sur la durée de vie de l'exciton est identifié et discuté à partir de l'étude comparative de cristaux de différentes qualités. Ensuite, nous avons étudié la diffusion des excitons et leurs recombinaisons aux surfaces du hBN grâce à un nouveau protocole expérimental en CL qui utilise les recombinaisons de surface comme sonde de la diffusion de l'exciton. L'application du protocole a permis de mesurer la diffusivité hors du plan (jusqu'à $0.2 \text{ cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ pour le meilleur échantillon) et la vitesse de recombinaison de surface ($\geq 105 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$). La surface de hBN se révèle être au niveau des plus recombinantes des semiconducteurs connus. Ces résultats ont été exploités pour dimensionner les homostructures hBN-hBN de façon à maximiser le transfert des excitons vers l'interface entre les deux cristaux. Enfin, un phénomène de luminescence intense et large observé à 300 nm à l'interface des homostructures hBN-hBN désorientées a été étudié en détail. Une série d'expériences menées en excitation continue et en dynamique a permis d'établir que cette bande d'émission est alimentée de façon très efficace par le transfert et le piégeage d'excitons libres à l'interface. Son rendement quantique interne peut atteindre 100% pour des angles de désorientation proche de 30° . L'ensemble des résultats est cohérent avec l'attribution proposée pour cette bande à la recombinaison d'excitons auto-piégés à l'interface. L'étude des déclins de luminescence en fonction de la température a mis en évidence une barrière d'énergie à la formation des excitons auto-piégés de 10 meV et un potentiel de piégeage de l'interface pour les excitons de 100 meV aux angles de 11° et 15° . Le dernier volet de la thèse traite de la fabrication de centres colorés dans le hBN par implantation ionique et irradiation électronique. L'effet de ces techniques sur la luminescence du hBN est étudié en CL et en photoluminescence afin d'évaluer l'application potentielle des centres créés pour les technologies quantiques.

Mots-clés

Hexagonal boron nitride, homostructures de Van Waals, interface, dynamique, cathodoluminescence résolue en temps, nitrure de bore, hétérostructures, interfaces cristallines,

Télécharger la thèse : <https://theses.fr/2023UPAST074>

Laure Tailpied

Thèse soutenue le 26 avril 2023 à Châtillon

ED 397 - Physique et chimie des matériaux - Sorbonne Université

Encadrement

Département Matériaux et structures, ONERA, Châtillon

Encadrante : Amandine Andrieux-Ledier, ONERA/DMAS

Directrice de thèse : Annick Loiseau, LEM, ONERA/DMAS-CNRS

Jury

Franck Vidal, Institut des Nanosciences de Paris, Sorbonne Université

Bérandère Toury-Pierre, LMI, Université Lyon 1

Luc Imhoff, ICB, Université de Bourgogne

Laëtitia Marty, Institut Néel, Université Grenoble Alpes

Jean-Manuel Decams, Annealsys (invité)

Financement

CNRS

Contact amandine.andrieux@onera.fr



Synthèse par CVD de films de nitrure de bore aux propriétés optimisées pour dispositifs en optoélectronique

Résumé

Dans la famille des matériaux bidimensionnels (2D), le nitrure de bore a été identifié comme un matériau stratégique. Ce semi-conducteur à grand gap (> 6 eV), atomiquement plan, résistant chimiquement et thermiquement, peut jouer plusieurs rôles dans les hétérostructures de matériaux 2D : substrat de graphène pour préserver la mobilité exceptionnelle de ses porteurs de charge ou couche encapsulante pour protéger d'autres matériaux 2D sensibles à leur environnement ou exalter leurs propriétés.

Des démonstrateurs de principe ont été réalisés avec des monocristaux de BN. Les dimensions latérales et l'homogénéité en épaisseur du BN sont limitées par la dimension initiale millimétriques des cristaux et leur mise en œuvre par exfoliation mécanique. Cette technique est donc difficilement industrialisable. Il est nécessaire de développer des synthèses de films de BN de dimensions, structure et qualité contrôlées pour permettre une montée en échelle.

Dans cette thèse en partenariat avec la PME Annealsys, nous avons choisi de développer la synthèse de films de BN sur nickel par dépôt chimique en phase vapeur à basse pression (LPCVD). Dans un premier temps, nous avons transposé sur le bâti de l'équipementier Annealsys le procédé de synthèse de BN sur des substrats de nickel polycristallin à partir de borazine déjà maîtrisé par l'équipe. Nous avons confirmé que la morphologie et la qualité du BN dépend de l'orientation cristallographique du nickel sous-jacent et que l'orientation (111) du nickel est la plus favorable pour la synthèse de film continu de BN. Nous avons donc ensuite travaillé avec des substrats monocristallins de Ni(111) /YSZ/Si(111). Nous avons porté une attention particulière à la préparation de ces substrats spécifiques et développé un traitement de stabilisation in situ dans le bâti de dépôt, compatible avec un procédé industriel. La structure et la qualité des films de BN synthétisés, i.e. épaisseur, rugosité, séquence d'empilement, cristallinité et taille de domaines, ont été caractérisées de l'échelle atomique à l'échelle millimétrique par un panel de techniques de microscopies et spectroscopies (AFM, MEB, Raman, MET...). Nous avons mis en place une méthodologie de caractérisation statistique à l'échelle centimétrique, indispensable à la vérification de l'homogénéité des films de BN, prérequis pour la fabrication de dispositifs performants. Nous avons fait varier des paramètres de synthèse clés tels que la quantité de gaz précurseur ou l'épaisseur du substrat de nickel et étudié leur impact sur les films de BN. Les résultats sont discutés d'un point de vue mécanisme de croissance.

Mots-clés

Synthèse, CVD, nitrure de bore, matériaux 2D, caractérisation, hétérostructures, dépôt chimique en phase vapeur, optoélectronique.

Télécharger la thèse : <https://theses.fr/2023SORUS125>

Thibaut Armanni

Thèse soutenue le 6 décembre 2023 à Châtillon

ED 579 (SMEMaG) - Sciences mécaniques et énergétiques, matériaux et géosciences
- Université Paris-Saclay

Encadrement

Département Matériaux et structures, ONERA, Châtillon

Encadrant : Frédéric Fossard, LEM, ONERA/DMAS-CNRS

Directeur de thèse : Benoît Appolaire, IJL, Université de Lorraine

Jury

Jean-Philippe Couzinié, ICMPE, Université Paris-Est Créteil

Patrick Villechaise, Institut Pprime, Poitiers

Anne Denquin, ONERA/DMAS

Eva Héripéré, PIMM, Arts et Métiers ParisTech

Yvon Millet, Timet Savoie

Financement

ANR

Contact frederic.fossard@onera.fr

Résumé

L'optimisation des alliages de titane pour résister à des températures élevées, supérieures à 550°C, constitue un défi majeur dans l'industrie aéronautique. Les alliages quasi-alpha, malgré leurs performances supérieures, présentent une sensibilité à la fatigue/fluage à froid, appelé effet Dwell. Ce travail vise à contribuer à la conception d'alliages quasi-alpha par apprentissage automatique, en caractérisant leurs microstructures et propriétés mécaniques à différentes températures.

Parallèlement, l'étude explore l'impact de la composition chimique, en particulier la teneur en silicium, sur la microstructure et le comportement mécanique. Les analyses microscopiques, combinant la microscopie électronique à balayage et en transmission, révèlent la précipitation de siliciures au-delà d'une certaine teneur en silicium. Une approche alternative, associant le découpage par faisceau d'ions et l'observation par microscopie électronique à balayage, permet une reconstruction tridimensionnelle détaillée des siliciures. Enfin, des essais de traction et de fluage à différentes vitesses de déformation démontrent le rôle bénéfique du silicium sur le comportement à froid et à chaud des alliages quasi-alpha.

Mots-clés

Alliages de titane, alliages quasi-alpha, microscopies électroniques, 3D, essais mécaniques, apprentissage automatique.

Lisa Audouard

Thèse soutenue le 12 décembre 2023 à Châtillon

ED 037 (SPIM) - Sciences physiques pour l'ingénieur et microtechniques - Université fédérale Bourgogne Franche-Comté

Encadrement

Département Matériaux et structures, ONERA, Châtillon

Encadrants : Aurélie Julian-Jankowiak, ONERA/DMAS ;
Pierre Bertrand, ICB, UBFC

Directrice de thèse : Cécile Langlade, ICB, UBFC

Jury

Francis Rebillat, LCTS, Université de Bordeaux

Alexandre Maitre, IRCER, Université de Limoges

Helen Reveron, MATEIS, INSA Lyon

Aurélie Quet, CEA, Le Ripault

Mathieu Garcia, CNES (invité)

Financement CNES, ONERA

Contact aurelie.jankowiak@onera.fr

Prix de thèse des Journées scientifiques du groupe francophone de densification de matériaux, 2021

Prix des doctorants ONERA MAS, 2023

Prix ArianeGroup du meilleur article étudiant "Structures & GNC", EUCASS 2023



Résumé

Le développement d'un nouveau prototype d'ergol vert destiné aux moteurs de repositionnement de satellites implique des conditions thermiques et environnementales plus sévères pour les matériaux de la chambre de combustion, par rapport aux conditions actuelles. De ce fait, des matériaux alternatifs dits Matériaux à Gradient de Propriétés (MGP) sont développés depuis plusieurs années dans le cadre d'une étude ONERA-CNES-ICB. Cette thèse a pour objectif de poursuivre le développement de ce type de matériau à gradient céramique/métal afin d'assurer ainsi sa mise en œuvre jusqu'à 2400 °C en présence de vapeur d'eau. Différentes configurations de MGP élaborées par projection thermique plasma sous air (APS) ont été testées sous flux thermique laser sous vide. La mise en place d'une modélisation de la fissuration de ces matériaux soumis à un choc thermique a permis de mieux faire le lien entre les dégradations observées et les configurations de MGP. Ensuite, la possibilité d'utiliser les MGP élaborés dans une ambiance oxydante à ultra haute température a été étudiée au moyen de deux bancs d'essais expérimentaux. Le premier d'entre eux est un banc laser qui a permis de tester la résistance des matériaux à des chocs thermiques répétés jusqu'à 1800 °C et en présence de vapeur d'eau. Les mécanismes de dégradation relatifs à l'oxydation du MGP ont pu être identifiés et reliés aux différentes configurations de MGP et aux conditions d'essai testées. Le second moyen d'essai a permis de qualifier les MGP dans la flamme H₂/O₂ d'une chambre de combustion. De ce fait, les conditions d'essais étaient relativement proches des conditions réelles visées.

En parallèle, un travail a été mené sur l'amélioration de la partie en céramique à base d'oxyde d'hafnium et d'oxyde de terre rare. Un point clé de cette étude a consisté à comprendre l'influence de la composition de la céramique et en particulier du taux et de la nature de l'oxyde de terre rare utilisé sur le coefficient de dilatation thermique, la conductivité ionique et la conductivité thermique. Enfin, une dernière partie de cette thèse était consacrée à étudier la possibilité de cicatrifier les fissures observées au sein de la couche céramique, par l'introduction d'une phase visqueuse en température. Son influence sur la résistance des échantillons dans des conditions sévères de température et d'atmosphère a été reportée.

Mots-clés

MGP, satellites, ultra-réfractaires, projection thermique, caractérisations à chaud.

Télécharger la thèse : <https://theses.fr/s253811>

Nathan Brard

Thèse soutenue le 13 décembre 2023 à Palaiseau

ED 531 - Sciences, énergie, environnement - Paris Est Sup

Encadrement

Département Matériaux et structures, ONERA, Châtillon

Encadrant : Johan Petit, ONERA/DMAS

Directeur de thèse : Stéphane Bach, ICMPE, Université Paris-Saclay

Jury

Sophie Guillemet-Fritsch, CIRIMAT, Université de Toulouse

Alexandre Maitre, IRCER, Université de Limoges

Lucille Amory, DGA

Michel Mortier, IRCP, Université PSL

Edouard Flavin, MBDA (invité)

Financement DGA/AID, ONERA

Contact johan.petit@onera.fr

Prix 2021 de la session Jeune chercheur du colloque Science et technologie des poudres et matériaux frittés

Résumé

Ces travaux ont consisté en la synthèse et la caractérisation d'un matériau céramique nanocomposite $MgO-Y_2O_3$ pour les applications de fenêtres aérospatiales dans l'infrarouge à faible émissivité, qui soit transparent dans l'IR, plus spécifiquement dans la bande II de transparence de l'atmosphère (longueur d'onde 3 à 5 μm) y compris à des températures élevées (jusqu'à 1000 °C au moins). En effet, les céramiques transparentes

en bande II actuellement utilisées pour protéger les détecteurs optiques (saphir, spinelle, AION) présentent des dégradations de leur transparence, et donc une hausse de leur émissivité, avec l'augmentation de la température. Ces phénomènes limitent les températures d'utilisation dans les aéronefs.

La céramique nanocomposite $MgO-Y_2O_3$ est développée depuis une vingtaine d'année et apparaît comme une solution. De par sa fenêtre de transparence plus large (jusqu'à 9 μm dans l'IR) et sa structure composite ralentissant la croissance granulaire, ce matériau allie propriétés optiques et thermomécaniques adéquates pour des applications en conditions sévères. Cependant, la mise en œuvre du procédé d'élaboration de ce matériau est très exigeante. En effet, sa microstructure doit présenter un faible diamètre de grains, une densité relative proche de 1 et une répartition des grains des deux composés la plus homogène possible. Les différentes étapes d'élaboration de la céramique (synthèse de la poudre, frittage et post-traitements) ont ainsi été étudiées et optimisées en s'appuyant sur les moyens techniques de l'ONERA et de l'ICMPE et sur des procédés de frittage originaux.

Des travaux ont tout d'abord été réalisés sur la synthèse d'une poudre composite $MgO-Y_2O_3$ nanométrique, par voie sol-gel à 800 °C, utilisant le procédé de Pechini, qui est choisie et justifiée. La poudre est ensuite frittée par procédé FACE (DCS et SPS) en faisant varier les paramètres de frittage mais aussi à l'aide de cycles thermiques originaux en deux étapes. Ceux-ci permettent d'obtenir des microstructures plus denses et plus fines par rapport à un cycle thermique classique en une étape. En parallèle, le procédé FACE est modélisé à l'aide d'un calcul par éléments finis pour appuyer les analyses. Enfin, les impacts des post-traitements, frittage HIP et recuits sous air, sur les propriétés des matériaux les plus denses et les plus fins frittés ont été évalués. Un HIP allant jusqu'à 4000 bar et disponible à l'ONERA a été utilisée. Le matériau obtenu le plus prometteur a un diamètre moyen de grains de 235 nm et une densité relative proche de 1. Il présente une transmittance en bande II supérieure à 80 % pour une épaisseur de 1 mm. A 1000 °C et à 5 μm , cette transmittance ne se dégrade que de 10 à 15 % pour une épaisseur de 2 mm. Sa dureté est de 10,7 GPa.

Cette thèse ouvre la voie à de futures recherches visant à améliorer le procédé d'élaboration de cette céramique. Cela pourrait inclure une étude paramétrique plus approfondie des conditions de la synthèse sol-gel et du traitement HIP. Avec une élaboration plus maîtrisée, des perspectives à plus long terme pourraient inclure le frittage de pièces de tailles plus importantes et de formes plus complexes. En outre, l'extension de la fenêtre de transparence du matériau vers le proche infrarouge, voire le visible, pourrait être envisagée en affinant la microstructure et/ou en utilisant de nouvelles compositions.

Mots-clés

Nanocomposite $MgO-Y_2O_3$, céramique transparente IR, synthèse sol-gel, frittage SPS, frittage en deux étapes, haute température.

Télécharger la thèse : <https://theses.fr/s279394>

Gwenaëlle Chebil

Thèse soutenue le 24 février 2023 à Paris

ED 432 (SMI) - Sciences des métiers de l'ingénieur - HESAM Université

Encadrement

Département Matériaux et structures, ONERA, Châtillon

Encadrants : Pierre Beauchêne ONERA/DMAS

Directeurs de thèse : Matthieu Schneider, Véronique Favier, PIMM, ENSAM ;
Cécile Davoine, Marc Thomas, ONERA/DMAS

Jury

Sophie Costil, ICB, Université de Bourgogne

Pascal Aubry, Laser processing and Additive Manufacturing, CEA

Guilhem Martin, SIMAP, INP Grenoble

Patrice Peyre, PIMM, Arts et métiers ParisTech

Bechir Chehab, Additive Manufacturing, Constellium

Matthieu Pachoutinsky, Dassault Aviation

Financement

ENSAM, ONERA

Contact cecile.davoine@onera.fr

Prix doctorant ONERA MAS 2022

Résumé

La fabrication additive sur lit de poudre (L-PBF) de l'aluminium présente un intérêt majeur pour des pièces à forte valeur ajoutée. Néanmoins, certaines limites inhérentes à ce matériau, ainsi qu'un manque de connaissance des phénomènes physiques mis en jeu au cours du procédé, ralentissent son industrialisation à grande échelle. En particulier, des éjections de métal issues de l'interaction laser-matière pouvant atteindre des rayons cinq fois supérieurs à ceux de la poudre initiale, contaminent le lit de poudre et génèrent des défauts. L'objectif de cette thèse est d'améliorer la compréhension et la maîtrise du procédé L-PBF pour les alliages d'aluminium, en corrélant deux observables : les éjectas et les comportements hydrodynamiques du bain liquide. Deux alliages de fonderie largement répandus en L-PBF sont étudiés (AlSi7Mg et AlSi10Mg), ainsi que deux alliages développés par Constellium et spécifiquement conçus pour la fabrication additive (Aheadd®HT1 et Aheadd®CP1). L'originalité de ces travaux repose sur la mise en place d'une méthode numérique automatisée utilisant des outils d'apprentissage profond issus de l'intelligence artificielle, qui ont montré des performances supérieures aux méthodes d'analyse d'image traditionnelles. Elle permet d'étudier les éjectas à partir d'observations in situ de l'interaction laser-matière sur un banc laser instrumenté. L'adaptabilité du banc laser permet de travailler avec des puissances et des diamètres de faisceau supérieurs à ceux habituellement présentés dans la littérature, permettant ainsi d'explorer un domaine plus étendu que celui des machines de fabrication courantes. Grâce à cette méthode innovante et au traitement statistique des données résultantes, le flux de particules éjectées est étudié à la fois qualitativement et quantitativement. Ces données sont mises en parallèle avec les comportements hydrodynamiques du bain liquide, observés in situ mais également à travers l'analyse des échantillons en coupe. Des différences apparaissent clairement suivant la paramétrie laser appliquée, et sont liées à la morphologie du bain (profondeur, orientation du front avant) qui conditionne l'orientation de la plume de vapeur. De même, les alliages présentent des comportements distincts vis-à-vis des éjectas, avec notamment un flux de particule 30% plus important pour l'AlSi7Mg par rapport à l'AlSi10Mg. L'étude de ces observables de l'interaction laser-matière s'avère donc prometteuse pour améliorer les méthodes de contrôle in situ et in operando ainsi que les stratégies de protection gazeuse en L-PBF, tout en identifiant des plages de paramétries adaptées afin, à terme, de prédire et limiter certains défauts.

Mots-clés

Fabrication additive, interaction laser-matière, éjectas, hydrodynamique, aluminium, détection d'objet, intelligence artificielle.

Télécharger la thèse : <https://theses.fr/2023HESAE003>

Camille Salsi

Thèse soutenue le 22 février 2023 à Châtillon

ED 482 (SDM) - Sciences de la matière - Université de Toulouse

Encadrement

Département Matériaux et structures, ONERA, Châtillon

Encadrante : Clara Desgranges, Safran Tech, puis CEA Saclay

Directeurs de thèse : Daniel Monceau, CIRIMAT, INP Toulouse ;
Thomas Gheno, ONERA/DMAS

Jury

Clément Keller, ENI Tarbes

Dominique Mangelinck, IM2NP, Université Aix-Marseille

Michel Perez, MATEIS, INSA Lyon

Olivier Dezellus, LMI, Université Claude Bernard Lyon1

Cécilie Duhamel, Centre des Matériaux, Mines ParisTech

Laure Martinelli, SC2M, CEA

Financement

ANR

Contact thomas.gheno@onera.fr

Étude de l'interdiffusion et de l'effet Kirkendall dans les alliages métalliques à base de nickel

Résumé

Les matériaux de structure employés dans les turbines aéronautiques, soumis à des conditions extrêmes, nécessitent très souvent d'être revêtus pour être protégés de leur environnement agressif. Ces systèmes alliage revêtement sont exposés à de hautes températures (> 900 °C), ce qui conduit à de l'interdiffusion entre l'alliage et le revêtement. L'interdiffusion est une source de vieillissement du système, car elle modifie localement les compositions de l'alliage et du revêtement, et potentiellement leurs microstructures. D'autres conséquences peuvent également apparaître comme la formation de porosité ou encore des déformations locales dues à l'effet Kirkendall.

L'objectif de ces travaux de thèse est d'approfondir nos connaissances sur l'effet Kirkendall et ses conséquences, en utilisant des moyens récents de caractérisation et de modélisation. Les expériences sont réalisées avec des couples de diffusion d'alliages modèles du système Ni-Cr-Si. Tout d'abord, un protocole innovant a été mis en place afin de mesurer des champs denses de déformation en 2D par corrélation d'images sur les couples de diffusion. À partir de la corrélation d'images, la déformation induite par la diffusion peut ainsi être estimée dans la direction de diffusion ainsi que dans la direction normale à la diffusion. Dans un second temps, la porosité de Kirkendall a été mesurée quantitativement par tomographie X et par microscopie optique et ces résultats ont été comparés avec différentes méthodes de prévision. Cette étude a permis de mettre en avant la grande sensibilité du système Ni-Cr-Si aux données de mobilité. En effet, les données de mobilité de ce système ont dû être optimisées afin d'obtenir des prévisions de localisation de la porosité en accord avec les observations expérimentales. Par ailleurs, des analyses par tomographie X à différents stades de la diffusion ont permis de montrer un comportement des pores (déplacement et croissance) différent selon leur position vis-à-vis de l'interface du couple. Enfin, tous les résultats expérimentaux quantitatifs sont également comparés à des résultats de simulation 1D, en prenant en compte les lacunes et leurs cinétiques d'élimination sur deux types de puits : les dislocations et les pores. Ces comparaisons ont permis d'évaluer l'efficacité relative de ces différents puits par le biais d'une estimation des deux forces de puits..

Mots-clés

Interdiffusion, effet Kirkendall, système Ni-Cr-Si, porosité, déformation, dislocations, simulation, corrélation d'images, tomographie.

Thibaut Froeliger

Thèse soutenue le 7 mars 2023 à Châtillon

ED 510 (IMEP2) - Ingénierie - matériaux, mécanique, énergétique, procédés, production - INP Grenoble

Encadrement

Département Matériaux et structures, ONERA, Châtillon

Encadrants : Didier Locq, Louise Toualbi, ONERA/DMAS

Directeur de thèse : Rémy Dendievel, SIMAP, INP Grenoble

Jury

Charles-André Gandin, CEMEF, Mines ParisTech

Jean-Philippe Couzinié, ICMPE, Université Paris-Est

Muriel Véron, SIMAP, INP Grenoble

Christophe Colin, Centre des Matériaux, Mines ParisTech

Financement

ANR, ONERA

Contact didier.locq@onera.fr

Résumé

Suite à leur découverte récente, les superalliages à base de cobalt biphasés γ/γ' ont montré des caractéristiques mécaniques à haute température pouvant rivaliser avec celles des superalliages à base de nickel. Bien que la fabrication additive (FA) offre la possibilité de réduire les étapes d'élaboration des pièces, cette technique n'avait jusqu'à présent encore jamais été mise en œuvre pour cette nouvelle famille d'alliages.

Ce travail vise à étudier l'élaboration par FA-DED (projection de poudre et fusion laser) de ces nouveaux alliages. Après la caractérisation microstructurale complète des échantillons bruts de fabrication, cette étude s'est concentrée sur la compréhension des mécanismes de fissuration et de leurs origines lors de l'élaboration par DED des superalliages à base de cobalt. Plusieurs causes intrinsèques au procédé et aux alliages ont été identifiées, ce qui a permis de proposer des solutions pour réduire la sensibilité de ces alliages à la fissuration. L'optimisation des paramètres d'élaboration et des stratégies de lasage permet le contrôle de la microstructure brute de FA ainsi que des gradients thermiques lors de l'élaboration, et ainsi a mené à la réduction de la fissuration. De même, des modifications chimiques adéquates ont permis de réduire voire de supprimer la fissuration sans pour autant dégrader les propriétés à chaud des alliages.

Ce travail de thèse offre des voies d'élaboration par fabrication additive laser permettant d'obtenir des superalliages à base de cobalt biphasés γ/γ' sains. Ces voies peuvent être transposées, en général, aux superalliages élaborés par FA.

Mots-clés

Fabrication additive, DED, superalliage à base de cobalt, fissuration en phase liquide, contrôle de la microstructure, éléments mineurs.

Grégoire Brot

Thèse soutenue le 26 octobre 2023 à Paris

ED 432 (SMI) - Sciences des métiers de l'ingénieur - HESAM Université

Encadrement

Département Matériaux et structures, ONERA, Châtillon

Encadrants : Imade Koutiri, Vincent Bonnand, ONERA/DMAS

Directrice de thèse : Véronique Favier, PIMM, ENSAM

Jury

Éric Charlaluk, Département de mécanique, École polytechnique

Jonathan Cormier, ISAE-ENSMA

Catherine Mabru, ISAE-SUPAERO

Thierry Palin-Luc, I2M, Arts et Métiers ParisTech

Imade Koutiri, I2M, Arts et Métiers ParisTech

Fabien Lefebvre, CETIM

Financement

CETIM, ONERA

Contact vincent.bonnand@onera.fr

Caractérisation accélérée de la fatigue à grand nombre de cycles de pièces de fabrication additive par essais d'auto-échauffement et par machine ultrasonique de fatigue

Résumé

Les propriétés en fatigue à grand nombre de cycles des composants de fabrication additive sont complexes notamment à cause de la porosité résiduelle des pièces fabriquées. De plus, de nombreux paramètres du procédé peuvent influencer la microstructure et la porosité des pièces obtenues et donc leur résistance en fatigue. Dans ce contexte, une détermination rapide de ces propriétés est nécessaire afin de pouvoir optimiser la résistance en fatigue en jouant sur les paramètres de fabrication.

Deux méthodes prometteuses de caractérisation rapide sont étudiées : les essais ultrasoniques de fatigue et la détermination de limite de fatigue par essai d'auto-échauffement. Ces travaux examinent la capacité de ces deux méthodes à caractériser rapidement la résistance en fatigue de matériaux issus de fabrication additive et en particulier celle du Ti-6Al-4V obtenu par fusion laser sur lit de poudre. Plus précisément, ces travaux étudient la sensibilité de ces deux méthodes d'essais aux variations de microstructure et de porosité du matériau. Pour cela des essais de caractérisation rapide ainsi que des essais conventionnels de fatigue sont réalisés sur des nuances matériaux ayant différentes microstructures ou différents niveaux de porosité. Les résistances ainsi que les mécanismes d'amorçage de fissure obtenus par essais ultrasoniques sont en accords avec ceux des essais conventionnels, montrant une même sensibilité de ces méthodes d'essais aux variations de porosité et de microstructure. En revanche, les essais d'auto-échauffement réalisés ont montré qu'une estimation de limite de fatigue ne semble pas possible avec cette méthode pour le Ti-6Al-4V issu de fabrication additive. Ce résultat s'explique par les propriétés élasto-plastique de ce matériau et la présence de porosité.

Mots-clés

Fatigue, caractérisation accélérée, fatigue ultrasonique, auto-échauffement, fabrication additive, Ti-6Al-4V.

Guillaume Fourrier

Thèse soutenue le 1er décembre 2023 à Compiègne

ED 71 - Sciences pour l'ingénieur - Université de technologie de Compiègne

Encadrement

Département Matériaux et structures, ONERA, Châtillon

Encadrants : Christian Fagiano, Martin Hirsekorn, ONERA/DMAS

Directeurs de thèse : Emmanuel Baranger, LMPS, Univ. Paris-Saclay ;
Alain Rassinoux, GSM, UTC

Jury

Éric Maire, MATEIS, INSA Lyon

Gilles Hivet, Génie industriel pour la cosmétique, la pharmacie et l'agro-alimentaire,
Polytech Orléans

Delphine Brancherie, GSM, UTC

Guillaume Couégnat, I2M, Université de Bordeaux

Julien Schneider, Safran Aircraft Engines (invité)

Financement

Ministère de l'Enseignement supérieur et de la Recherche

Contact christian.fagiano@onera.fr



Résumé

Ce travail de thèse s'inscrit dans le cadre de la modélisation multi-échelle des matériaux composites à renfort tissé afin de prévoir leur comportement et leur tenue mécanique.

L'objectif de cette étude est de prendre en compte les variations du renfort tissé dues aux défauts dans la modélisation du matériau à l'échelle mésoscopique (échelle du renfort) pour évaluer leur impact sur le comportement mécanique du composite tissé. La première étape de cette approche consiste en l'extraction automatisée des caractéristiques géométriques du composite tissé, afin de reconstruire un maillage conforme du matériau. Pour cela, nous exploitons les données issues de tomographie à rayons X.

Deux méthodes sont présentées pour réaliser la segmentation de la tomographie, dans le but d'identifier les différents composants du matériau : une approche de traitement d'images par filtrage directionnel, en grande partie automatisée, et une approche par apprentissage automatique (*machine learning*), plus précise, mais nécessitant l'annotation manuelle d'une petite partie de la tomographie pour l'apprentissage initial du modèle. La différenciation des torons d'une même orientation est réalisée par un suivi 3D et recalage des fibres neutres à partir des données issues de la segmentation. Cette étape fournit les données d'entrée pour une méthode originale de gonflement analytique des torons, permettant d'identifier les frontières entre torons et de générer ainsi une voxelisation fidèle de la géométrie du matériau, avec et sans défaut. La dernière étape de lissage et de déaffinement du maillage permet de passer d'un volume contenant plusieurs centaines de millions de voxels à un maillage d'une dizaine de millions d'éléments tétraédriques, ce qui est essentiel pour la mise en place du calcul par éléments finis. La démarche de génération du modèle numérique du matériau a été validée par comparaison quantitative des caractéristiques géométriques des sections et des taux de torons obtenus avec ceux déterminés par segmentation manuelle.

La simulation du comportement mécanique macroscopique d'une cellule élémentaire représentative du matériau, avec et sans défaut, a permis de valider la représentativité du modèle généré par notre approche et l'absence d'effets du défaut étudié sur la tenue mécanique en traction. Cependant, l'analyse des champs de contrainte locaux a montré un impact local du défaut, qui relocalise les zones de rupture à proximité des zones géométriquement impactées par celui-ci. La campagne expérimentale menée pour conclure notre étude a permis de confirmer les observations numériques concernant l'impact du défaut sur les propriétés mécaniques du composite tissé 2D. L'approche proposée à travers l'ensemble de cette étude constitue une chaîne complète de modélisation représentative de la géométrie réelle d'un matériau composite tissé à l'échelle mésoscopique, en prenant en compte les éventuels défauts géométriques du renfort.

Mots-clés

Composite tissés, défaut de fabrication, segmentation de tomographie, génération géométrie maillée, échelle mésoscopique.

Télécharger la thèse : <https://theses.fr/s347609>

Claire Fougerouse

Thèse soutenue le 20 mars 2023 à Châtillon

ED 579 (SMEMaG) - Sciences mécaniques et énergétiques, matériaux et géosciences - Université Paris-Saclay

Encadrement

Département Matériaux et structures, ONERA, Châtillon

Encadrants : Christian Fagiano, Martin Hirsekorn, ONERA/DMAS

Directeur de thèse : Frédéric Laurin, ONERA/DMAS

Jury

Jean-Claude Grandidier, ISAE-ENSMA Poitiers

Christophe Bouvet, ISEA-SUPAERO Toulouse

Zoheir Aboura, Département de Génie Mécanique, UTC, Compiègne

Michael R. Wisnom, Bristol Composites Institute

Financement

CIFRE Airbus

Contact frederic.laurin@onera.fr

Compréhension et modélisation des effets de défauts d'ondulation hors plan sur les performances mécaniques d'un stratifié à matrice thermoplastique

Résumé

Ces travaux de thèse CIFRE (ONERA/AIRBUS Operations) portent sur les défauts de fabrication de type ondulations hors-plan générés dans des éprouvettes lisses de composite stratifié à plis unidirectionnels en fibre de carbone et à matrice thermoplastique. En particulier, les effets de tels défauts sur les performances mécaniques ont été étudiés pour des sollicitations en traction et en compression. Des éprouvettes ont été fabriquées en y insérant artificiellement des ondulations hors-plan durant le procédé de fabrication. Des observations optiques sur tranche ont été effectuées avant les essais afin d'analyser les morphologies de défauts. Une campagne expérimentale sur des éprouvettes avec et sans défaut a été menée avec des essais multi-instrumentés. Elle a permis de mettre en avant une réduction de la rigidité, des différences de scénarios d'endommagement et un abatement de la contrainte à rupture en présence d'une ondulation.

En parallèle, des simulations numériques ont été réalisées afin d'affiner la compréhension des effets du défaut. Pour cela, un jumeau numérique a été généré pour chaque éprouvette à partir des micrographies ou tomographies réalisées avant les essais et sur la base d'une description paramétrique du défaut. À l'aide d'un modèle d'endommagement continu, les simulations numériques ont mis en évidence un abatement local non négligeable des propriétés élastiques au niveau de l'ondulation maximale et une réduction significative de la contrainte à rupture en lien avec la sévérité du défaut. De plus, le scénario d'endommagement observé expérimentalement est qualitativement bien capturé par le modèle. Finalement, une stratégie numérique basée sur de la méta-modélisation a été proposée pour analyser l'influence de chaque paramètre géométrique du défaut sur la réponse mécanique et pour proposer une estimation rapide des abattements induits par un défaut selon géométrie.

Mots-clés

Composite thermoplastique, effets des défauts, modélisation, essais multi-instrumentés, thermoplastiques, matières plastiques stratifiées, défauts ponctuels.

Télécharger la thèse : <https://theses.fr/2023UPAST038>

Zakia Karoui

Thèse soutenue le 6 mars 2023 à Lille

ED 391 (SMAER) - Sciences mécaniques, acoustique, électronique & robotique - Sorbonne Université

Encadrement

Département Matériaux et structures, ONERA, Lille

Encadrant : Julien Berthe, ONERA/DMAS

Directeur de thèse : Corrado Maurini, Institut Jean Le Rond d'Alembert, Sorbonne Université

Jury

Véronique Lazarus, IMSIA, ENSTA ParisTech

Vladislav Mantic, Mecánica de Medios Continuos y T. de Estructuras, Univ.de Sevilla

Djimédo Kondo, Institut Jean le Rond d'Alembert, Sorbonne Université

Blaise Bourdin, Dep. of Mathematics & Statistics, McMaster University, Canada

Financement

ONERA

Contact julien.berthe@onera.fr

Résumé

Les matériaux composites sont aujourd'hui largement utilisés dans les domaines du génie civil, de l'aviation, de l'espace et du sport. La compréhension de leur comportement sous sollicitations mécaniques et de l'apparition éventuelle de fissures ou d'endommagements est cruciale pour leurs applications et l'optimisation des séquences d'empilement afin de réduire le poids des structures. Nous étudions ici le cas des stratifiés composites unidirectionnels renforcés par fibres de carbone. Dans le cas standard des stratifiés à plis croisés, c'est-à-dire pour des empilements de type $[0/90]$ soumis à une sollicitation de traction, un réseau de fissures transverses se propage dans l'épaisseur des plis intérieurs à 90° et ceci apparaît comme premier phénomène d'endommagement à l'échelle du pli.

Nous présentons tout d'abord une étude expérimentale avec une nouvelle analyse du processus de fissuration des couches à 90° , en nous concentrant sur la taille des segments avant et après la fissuration. Cela montre clairement un processus de fissuration générant des motifs aperiodiques pour le matériau étudié. Nous étudions donc le problème de la détermination de l'espacement optimal des fissures d'un point de vue théorique et numérique. En utilisant une approche variationnelle et un modèle de rupture fragile à interface *sharp* à la Griffith, nous montrons qu'une bifurcation entre les solutions avec des espacements de fissures uniformes et non-uniformes est la conséquence d'une condition de minimalité énergétique. Nous caractérisons les espacements de fissures et leur dépendance aux paramètres géométriques et matériels sur la base d'une approche modulaire et des propriétés de la complaisance élastique de la cellule élémentaire. Enfin, nous effectuons des simulations numériques à l'aide d'un modèle de rupture champ de phase régularisé, qui confirme le comportement qualitatif prédit par le modèle d'interface *sharp*.

Mots-clés

Fissuration matricielle, approches variationnelles, *phase field*, motifs de fissuration, aperiodicité, composites-propriétés mécaniques, stratifiés, fissuration-modèles mathématiques, ruptures, calcul des variations.

Télécharger la thèse : <https://theses.fr/2023SORUS043>

Clément Labouffie

Thèse soutenue le 16 novembre 2023 à Châtillon

ED 488 (SIS) - Sciences, ingénierie, santé - Université de Lyon

Encadrement

Département Matériaux et structures, ONERA, Châtillon

Encadrants : François Xavier Irisarri, Jean-François Maire, ONERA/DMAS ;
Mathieu Balesdent, Loïc Brevault, ONERA/DTIS ;
Sébastien Da Veiga, Safran Tech

Directeur de thèse : Rodolphe Le Riche, LIMOS, Mines Saint-Étienne

Jury

Ludovic Chamoin, LMPS, ENS Paris-Saclay

Christian Gogu, ISAE-SUPAERO

Mathilde Chevreuil Plessis, GeM, Université de Nantes

Laurent Guillaumat, M2P, ENSAM

Financement

Safran Tech, ONERA

Résumé

De nombreuses techniques de calibration de modèle permettent de prendre en compte l'impact des erreurs de mesures, mais plus rarement celui de la variabilité matériau sur les paramètres de modèle, celle-ci étant significative dans le cas des composites. L'objectif de ce travail est de mettre en place une méthode de calibration pour estimer l'influence de la variabilité sur les paramètres de lois complexes de comportement composite. Le cadre d'application statistique des méthodes usuelles de quantification d'incertitudes est d'abord analysé dans une revue bibliographique. L'application de ces méthodes à des répétitions d'essais de traction monotone illustre l'importance de la variabilité matériau et les limites des méthodes usuelles pour son estimation. Pour caractériser son impact sur les propriétés du matériau, le cadre des approches par population, déjà mis en œuvre dans des problématiques de mécanique des structures, est adopté. On se concentre en particulier sur les modèles à effets-mixtes, caractérisés par une importante souplesse d'utilisation.

Ces méthodes sont mises en œuvre pour démontrer leur pertinence sur un modèle élémentaire, et tester leurs réglages et hypothèses. Deux points sont spécifiquement étudiés : le nombre d'individus, déterminant pour garantir la confiance sur les estimations de la variabilité matériau, et la complexité de la modélisation de la variabilité (notamment la prise en compte des dépendances statistiques entre paramètres de modèles). Cette étude est réalisée sur un modèle de comportement élastique endommageable uniaxial simple avec quatre paramètres à identifier. Pour aborder des modèles mécaniques plus avancés, nous proposons une stratégie de calibration séquentielle, compatible avec les modèles à effets-mixtes. La méthode, appliquée sur des données synthétiques puis réelles, permet, par rapport à une application classique des effets-mixtes, d'estimer avec une précision équivalente la variabilité matériau en divisant environ par deux le nombre d'appels au modèle. Enfin, les distributions calibrées sont propagées pour estimer l'effort à rupture d'une plaque composite perforée, sollicitée en traction, ce qui illustre l'ensemble de la chaîne de quantification d'incertitudes, depuis leur estimation jusqu'à leur propagation.

Mots-clés

Calibration de lois de comportement composites, variabilité, modèles à effets mixtes.

Matthieu Nicol

Thèse soutenue le 24 mars 2023 à Châtillon

ED 579 (SMEMaG) - Sciences mécaniques et énergétiques, matériaux et géosciences - Université Paris-Saclay

Encadrement

Département Matériaux et structures, ONERA, Châtillon

Encadrants : Martin Hirsekorn, Jean-François Maire, ONERA/DMAS

Directeur de thèse : Frédéric Laurin, ONERA/DMAS

Jury

Pedro Camanho, Departamento de Engenharia Mecânica, University of Porto

Mohammed Shabi Loukil, Division of Engineering Materials, Linköping University

Nadia Bahlouli, ICube, Université de Strasbourg

Emmanuel Baranger, LMPS, Université Paris-Saclay

Éric Martin, LCTS, Bordeaux

Financement

CIFRE Safran, ONERA

Contact frederic.laurin@onera.fr

Compréhension et modélisation de l'influence de l'ordre d'empilement sur les scénarios d'endommagement dans des composites stratifiés de plis unidirectionnels

Résumé

Ces travaux de thèse CIFRE (ONERA/Safran Composites) s'intéressent à un matériau composite stratifié de plis unidirectionnels carbone-époxy et portent sur la compréhension de l'influence de l'ordre d'empilement des plis sur le développement de la fissuration au sein du matériau. Une campagne expérimentale conséquente a été menée, avec des essais richement instrumentés pour, d'une part, identifier les propriétés du pli élémentaire et, d'autre part, étudier les cinétiques de fissuration dans plusieurs types d'empilement, présentant notamment des ordres d'empilement des plis différents. Ces essais ont montré, selon l'ordre d'empilement des plis, une interaction de la fissuration dans un pli sur l'amorçage de la fissuration dans les plis voisins. En parallèle, un modèle d'endommagement discret a été développé pour étudier numériquement ces mécanismes d'interaction localisés, qui échappent aux modèles continus actuels. Cette approche consiste en l'insertion explicite de fissures dans un maillage éléments finis et en un critère couplé d'amorçage des fissures. Ce modèle permet d'expliquer les tendances d'amorçage observées lors des essais.

Enfin, les conclusions du modèle discret ont permis d'esquisser des pistes d'enrichissement d'un modèle d'endommagement continu pour y intégrer de manière homogénéisée les effets d'ordre d'empilement. Ces travaux ont amélioré la compréhension des mécanismes d'endommagement et des effets de stratification au sein de l'ONERA et de Safran.

Mots-clés

Composites, stratifiés, endommagement, effet de séquence d'empilement.

Maxime Nutte

Thèse soutenue le 16 octobre 2023 à Châtillon

ED 579 (SMEMaG) - Sciences mécaniques et énergétiques, matériaux et géosciences - Université Paris-Saclay

Encadrement

Département Matériaux et structures, ONERA, Châtillon

Encadrants : Pascale Kanoute, Vincent Bonnand, ONERA/DMAS ;
Benjamin Delpuech, Dassault Aviation

Directeurs de thèse : Serge Kruch, Bertrand Langrand, ONERA/DMAS

Jury

Alain Daidié, Génie mécanique, INSA Toulouse

Franck Morel, LAMPA, ENSAM, Paris

Véronique Favier, PIMM, ENSAM, Paris

Habibou Maitournam, IMSIA, ENSTA ParisTech

Financement

Dassault Aviation, ONERA

Contact pascale.kanoute@onera.fr

Modélisation de la tenue en fatigue d'assemblages métalliques par une approche locale

Résumé

De nos jours, deux défis importants à relever en matière de prédiction de la tenue fatigue concernent la multiaxialité et les sollicitations aléatoires, en particulier lorsque ces deux effets sont combinés. Ceci est particulièrement vrai dans les structures aéronautiques assemblées où de nombreux phénomènes non-linéaires interagissent (non-linéarité du comportement du matériau, contact avec frottement, comportement de la fixation...).

L'objectif de cette thèse est de proposer une démarche de prédiction de tenue en fatigue robuste, afin d'estimer la durée de vie en fatigue d'assemblages métalliques boulonnés soumis à des conditions de sollicitations multiaxiales variées. Il s'agit d'estimer la durée de vie de pièces assemblées par une approche locale reposant sur une modélisation explicite de la fixation et des efforts induits. À cette fin, une campagne expérimentale majeure a été entreprise avec des essais de complexité croissante allant d'éprouvettes de caractérisation uniaxiale, à des assemblages complexes chargés multiaxialement au moyen d'un dispositif expérimental biaxial.

Parallèlement, une analyse numérique par éléments finis a été réalisée pour modéliser aussi fidèlement que possible des assemblages industriels représentatifs, en tenant compte de toutes les non-linéarités observées (géométriques, induites par le problème de contact, la flexion secondaire, l'entaille, le matériau ...).

Le dialogue entre les résultats expérimentaux et les simulations numériques a permis de tester et de valider le modèle d'endommagement de fatigue développé, ainsi que de mieux comprendre les mécanismes d'amorçages de fissures dans les assemblages métalliques boulonnés soumis à des chargements multiaxiaux.

Mots-clés

Élastoplasticité, fatigue multiaxiale, effets d'échelle, assemblages boulonnés.

Stacy Patti

Thèse soutenue le 8 décembre 2023 à Châtillon

ED 579 (SMEMaG) - Sciences mécaniques et énergétiques, matériaux et géosciences - ENS Paris-Saclay

Encadrement

Département Matériaux et structures, ONERA, Châtillon

Encadrants : Myriam Kaminski, Jean-François Maire, ONERA/DMAS

Directeurs de thèse : Père Maimi, AMADE, Universitat de Girona ;
Frédéric Laurin, ONERA/DMAS

Jury

Paolo Andrea Carraro, DTG, University of Padova

Christophe Bois, GMP, Université de Bordeaux

Christian Hochard, Laboratoire de mécanique et d'acoustique de Marseille

Carlos Davila, NASA Langley Research Center

Financement

Université de Gérone, ONERA

Contact myriam.kaminski@onera.fr

D'une étude expérimentale de la fissuration matricielle en statique et en fatigue des composites stratifiés vers une prévision d'endommagement à l'aide d'un modèle incrémental à variable observable

Résumé

Le développement de modèle s'est inscrit dans une volonté d'accompagner les acteurs des secteurs industriels vers des démarches de conception plus durables, en proposant des outils à la fois simples et efficaces.

Lors de la campagne expérimentale, des essais de traction quasi-statique et de fatigue à différents rapports de charge ont été réalisés sur une grande diversité de séquences d'empilements, tels que des stratifiés croisés, des $[0/\pm 45]_s$, des quasi-isotropes, mais également des quasi double-double. En particulier, des essais de fatigue complexes à amplitude non-constante ont été réalisés, allant jusqu'à l'application de sollicitations spectrales. Tous ces essais ont été multi-instrumentés à l'aide des techniques d'émission acoustique, de corrélation d'images numériques et d'un suivi par microscopie optique permettant de suivre l'évolution de la densité de fissures au cours de l'essai. Les fissures ont ensuite été automatiquement détectées sur les micrographies grâce à un outil développé à l'ONERA et exploitant le module de vision par ordinateur DeepFlow. Des essais supplémentaires de CND par radiographie à rayons X et par tomographie ont été menés afin d'étudier l'état d'endommagement interne des éprouvettes testées.

Au terme des 70 essais réalisés et 100 000 fissures détectées, la campagne expérimentale a permis de mettre en avant les effets de bord libre et les effets de séquence d'empilement, mais également de fournir une base de données du comportement de plis orientés en termes de seuil et cinétique d'évolution de l'endommagement. Cette compréhension du comportement et des mécanismes influant sur la fissuration des stratifiés a mené au développement un modèle d'endommagement avec un formalisme incrémental, permettant la description de chargements complexes proches de ceux rencontrés dans l'industrie, basé sur une variable observable : la densité de fissures. Celle-ci est également adaptée à la prévision d'endommagement pour des stratifiés présentant peu d'effets de l'endommagement sur le comportement macroscopique avant rupture, comme cela est couramment le cas de ceux utilisés dans l'aéronautique. La loi d'évolution de l'endommagement ainsi développée présente la particularité de proposer un formalisme unifié entre la fissuration matricielle en statique et en fatigue. Afin d'en identifier les paramètres, un protocole d'identification répétable et robuste a été proposé à la fois en statique et en fatigue. Les capacités prédictives du modèle ont ensuite été évaluées par confrontation avec les évolutions de fissures obtenues expérimentalement lors des essais de validation. Une prévision d'endommagement très satisfaisante a pu être réalisée en statique et en fatigue sur les stratifications croisées. Les prévisions du modèle se sont également révélées prometteuses dans les autres plis hors-axes au sein de séquences d'empilement plus complexes. Cependant, un important effet de séquence d'empilement sur le seuil d'endommagement a pu être noté, en particulier dans les plis à 45° des stratifications quasi-isotropes. Si les modélisations locales actuelles ne permettent pas de prendre ce phénomène en compte, des règles de drapage supplémentaires en ont été tirées afin de compléter celles en vigueur actuellement.

Mots-clés

Modèle d'endommagement, fatigue, fissuration matricielle, composite stratifié.

Télécharger la thèse : <https://theses.fr/s253805>

Jean-David Thoby

Thèse soutenue le 22 juin 2023 à Lille

ED 635 (PHF) - Sciences pour l'ingénieur - Université Polytechnique Hauts-de-France

Encadrement

Département Matériaux et structures, ONERA, Lille

Encadrants : Delphine Notta-Cuvier, LAMIH, UPHF, EUNICE ;
Thomas Fourest, ONERA/DMAS

Directeurs de thèse : Éric Markiewicz, LAMIH, UPHF, EUNICE ;
Bertrand Langrand, ONERA/DMAS

Jury

Jean-Charles Passieux, Institut Clément Ader, INSA Toulouse

Sandrine Thuillier, ENSIBS, Université Bretagne Sud

Benoit Blaysat, Institut Pascal, Université Clermont Auvergne

Pascal Bouda, DM2S, CEA

Dominique Daniel, Constellium (invité)

Financement

ONERA, Région Hauts-de-France

Contact thomas.fourest@onera.fr

Résumé

Les tôles laminées d'alliages d'aluminium utilisées pour la fabrication de structures aéronautiques, comme l'alliage AA2198-T351, présentent souvent un comportement mécanique anisotrope. La caractérisation de tels comportements avec une approche statiquement déterminée, imposant l'homogénéité des champs mécaniques, repose sur un nombre important d'essais. Au contraire, la méthode des champs virtuels (MCV), associée à des mesures de champs, permet d'exploiter pleinement une information enrichie par l'hétérogénéité des champs mécaniques. Le nombre d'essais de caractérisation requis peut alors être drastiquement réduit, sous réserve de concevoir une géométrie d'éprouvette optimisée. Plusieurs géométries ont été conçues dans cet objectif, mais sans jamais prendre en compte les biais introduits par la chaîne de mesure.

Ces travaux de thèse visent donc à développer une méthode numérique pour la conception d'essais innovants permettant de générer de multiples trajets de chargement, tout en étudiant l'impact des biais de mesure. Un premier classement d'éprouvettes est basé sur l'hétérogénéité du champ de contrainte généré, ce qui valorise des géométries complexes conçues par optimisation topologique. Un second classement se base sur l'impact des biais de mesure sur le processus d'identification par la MCV, en utilisant un générateur d'images synthétiques de champs. Ce critère valorise au contraire des géométries plus simples, comme une éprouvette entaillée. Au bilan, ces travaux montrent donc la nécessité d'atteindre le meilleur compromis entre ces deux critères. Une campagne expérimentale a permis de confirmer les résultats obtenus avec des données numériques.

Mots-clés

Anisotropie, essais hétérogènes, corrélation d'images numériques, méthode des champs virtuels.

Lander Vertonghen

Thèse soutenue le 28 avril 2023 à Châtillon

ED 391 (SMAER) - Sciences mécaniques, acoustique, électronique et robotique - Sorbonne Université

Encadrement

Département Matériaux et structures, ONERA, Châtillon

Encadrants : François-Xavier Irisarri, Dimitri Bettebghor, ONERA/DMAS

Directeur de thèse : Boris Desmorat, Institut Jean Le Rond d'Alembert, Sorbonne Université

Jury

Erik Lund, Department of Materials and Production, Aalborg University

Daniël Peeters, Aerospace Structures and Computational Mechanics, Delft University of Technology

Angela Vincenti, Institut Jean Le Rond d'Alembert, Sorbonne Université

Rafael Estevez, 2MGE, Université de Grenoble Alpes

Frédéric Messine, ENSEEIHT-LAPLACE, University of Toulouse

Attilio Chiappini, Airbus Atlantic (invité)

Financement

Stelia Aerospace

Contact francois-xavier.irisarri@onera.fr



Incorporation de contraintes de résistance dans une optimisation simultanée de la topologie et de l'anisotropie de structures composites stratifiés

Résumé

Cette recherche financée par Airbus Atlantic a pour ambition de combiner la conception du matériau et celle de la structure. Une approche d'optimisation topologique basée sur la densité est adoptée, dans laquelle la rigidité anisotrope des matériaux est incorporée comme variable de conception supplémentaire. La rigidité des matériaux est caractérisée au moyen des paramètres polaires, une représentation du tenseur d'élasticité basée sur des invariants. L'espace de conception des paramètres polaires est décrit par les bornes thermodynamiques dans le cas général des matériaux orthotropes 2D, ou par les bornes géométriques pour restreindre le champ d'application aux stratifiés composites. Dans les optimisations, l'un ou l'autre domaine d'existence est converti en bornes d'optimisation au moyen d'une opération de changement de variable. Une stratégie d'optimisation à gradient basée sur la méthode des asymptotes mobiles (*Method of Moving Asymptotes*) est proposée, dans laquelle les variables de densité et d'anisotropie sont optimisées en parallèle. La méthode est validée en comparant avec une méthode à critère d'optimalité pour la minimisation de la compliance. Par la suite, des contraintes de résistance sont incorporées dans l'optimisation topologique de pièces composites unidirectionnelles, pour lesquelles l'anisotropie du matériau est paramétrée par l'orientation de la fibre, en utilisant une méthode d'agrégation de type lower KS. Des critères elliptiques en contraintes, tels que le critère de rupture Tsai-Wu, sont considérés pour définir la tenue mécanique du matériau. Ces critères étant exprimés dans le repère local du matériau, l'effet de rotation de la fibre est pris en compte pour le calcul de la contrainte d'optimisation et de son gradient. Enfin, pour étendre la prise en compte de la résistance au cas plus général des stratifiés, une enveloppe de déformation maximale admissible est utilisée. Cette enveloppe représente la déformation maximale autorisée pour toutes les orientations possibles de plis. La contrainte d'optimisation correspondante est formulée à partir des déformations exprimées dans le repère global. À cette fin, une approche d'optimisation topologique basée sur les déformations a été proposée et validée par rapport à des optimisations basées sur les contraintes mécaniques dans le cas d'un matériau isotrope. Enfin, la méthode est appliquée pour montrer l'influence de l'anisotropie du matériau, tant pour la rigidité que pour la résistance, sur les solutions optimisées.

Mots-clés

Anisotropie distribuée, SIMP, paramètres polaires, contraintes mécaniques, déformation, critère de rupture elliptique, anisotropie, stratifiés, optimisation topologique, déformations (mécanique), aéronautique-recherche.

Télécharger la thèse : <https://theses.fr/2023SORUS194>

Étienne Tixadou

Thèse soutenue le 16 mars 2023 à Meudon

ED 391 (SMAER) - Sciences mécaniques, acoustique, électronique et robotique - Sorbonne Université

Encadrement

Département Aérodynamique, acoustique, aéroélasticité, ONERA, Meudon

Encadrants : Rémi Coisson, Airbus Helicopters ;

Biel Ortun, Itham Salah el Din, ONERA/DAAA

Directeur de thèse : Michel Costes, ONERA/DAAA

Jury

Jean-François Deü, LMSSC, CNAM

Jean-Camille Chassaing, Institut Jean Le Rond d'Alembert, Sorbonne Université

Georges Jaquet-Richardet, LAMCOS, INSA Lyon

Xavier Amandolese, LMSSC, CNAM

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

Financement CIFRE Airbus Helicopters

Contact itham.salah_el_din@onera.fr

Résumé

L'objectif de la thèse est de définir des méthodes de calcul du torseur des efforts à la fréquence n/rev en tête rotor, qui soient fiables et applicables dans un contexte de développement industriel afin de pouvoir agir sur le dimensionnement de la pale. La méthodologie est potentiellement applicable à un rotor principal ou des configurations nouvelles avec hélices ou multirotors. Le verrou scientifique à lever est d'être capable à terme d'optimiser un rotor, non plus sur des critères de placement des modes en fréquence mais directement sur les efforts harmoniques tranchant en pied de pale. Plus que la recherche de précision absolue, il s'agit de pouvoir comparer et orienter les designs en jouant sur les différents paramètres définissant les caractéristiques de raideur et de distribution de masse. Ce travail de thèse vise à développer une boucle d'optimisation aéroélastique automatisée combinant le code de calcul aéromécanique STORM ainsi qu'un algorithme d'optimisation à paramètres discrets (Algorithme Génétique).

L'approche proposée permet de réduire drastiquement la durée du processus de dimensionnement des pales et résulte en une réduction significative des charges dynamiques sur le cas de vol ciblé, tout en respectant les contraintes de manufacturabilité industrielle.

Mots-clés

Hélicoptère, rotor, charges dynamiques, pale, structure, optimisation.

**Thèses de doctorat ONERA
soutenues en 2023**

**DOMAINE SCIENTIFIQUE
MÉCANIQUE DES FLUIDES
ET ÉNERGÉTIQUE**

Thèses de doctorat ONERA soutenues en 2023

DOMAINE MÉCANIQUE DES FLUIDES ET ÉNERGÉTIQUE

Selon les départements et leurs thématiques scientifiques :

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

Acoustique : sources, propagation et impact

Bruno Mangin	Modélisation de la propagation acoustique dans l'entrée d'air d'un turboréacteur moderne à l'aide d'une méthode multimodale	60
Valentin Morin	Étude numérique de l'injection d'eau pour la réduction du bruit de jet de lanceurs spatiaux	62

Contrôle des écoulements

Pierre Nibourel	Contrôle réactif robuste de la transition à la turbulence d'une couche limite supersonique	64
Clémence Rannou	Méthodologie pour la modélisation du contrôle actif d'écoulement dans un compresseur axial	66

Développement de techniques de mesure et montages expérimentaux

Baptiste Baradel	Micro-anémométrie pour l'aérodynamique : développement et application à la mesure de la turbulence aérothermique	68
Jean-Pierre Dufitumukiza	Développement des techniques optiques pour la caractérisation in situ de la suie dans des foyers de combustion à haute pression	70

Dynamique des écoulements libres

Rolando Cruz Marques	Impact du chargement alaire sur les propriétés et la dynamique des tourbillons de sillage, une analyse en bassin hydrodynamique	72
Pierre Saulgeot	Contributions à la compréhension de la formation et de l'atténuation possible des traînées de condensation de l'aviation	74

Dynamique des écoulements pariétaux

Michel Bouchard	Modélisation et simulation numérique avancée du phénomène de décrochage par une méthode hybride RANS/LES avec prise en compte de la transition laminaire-turbulent	76
Antoine Dufau	Simulations de la transition laminaire-turbulent avec défilement de sillages dans les turbines basse-pression : application aux bulbes de décollement	78

Thomas Jaroslowski	Transition dans les bulbes de décollement laminaire sur des voilures fixes et tournantes à faible nombre de Reynolds	80
Euryale Kitzinger	Étude de la stabilité, de la réceptivité et du contrôle de la couche limite à partir d'analyses globales linéarisées	82
Adrien Rouviere	Amélioration des modèles de tolérance de surface pour les couches limites laminaires en s'appuyant sur des outils d'intelligence artificielle	84
Hector Solorzano Flores	Étude et prédiction des écoulements aérodynamiques sur une entrée d'air de moteur à ingestion de couche limite pour un avion commercial	86
Maxime Stuck	Ablation d'un matériau de protection thermique en régime de transition laminaire-turbulent	88
Fatih Uncu	Modélisation numérique des écoulements de cavité dans les turbines par une approche RANS	90

Écoulements hypersoniques

Xavier Chanteux	Extension de la méthode des paraboles pour la prévision de la transition laminaire-turbulent déclenchée par le 2nd mode de Mack dans le code elsA	92
Arthur Poulain	Solutions optimales linéaires et non-linéaires dans une couche limite hypersonique : stabilité et contrôle en boucle ouverte	94

Écoulements multiphasiques

Florian Granger	Modélisation de l'atomisation primaire d'oxygène liquide dans les flammes diphasiques des moteurs-fusées à ergols liquides	96
------------------------	--	----

Écoulements réactifs

Alexis André	Modélisation de la formation et de l'évolution des suies dans les foyers aéronautiques	98
Lorenzo Byrde	Étude expérimentale de l'atomisation et de la combustion de prototypes de monergols verts ioniques pour une application à la propulsion satellite	100
Christopher Glaser	Développement d'une méthodologie basée sur des marches pour augmenter la vitesse de régression en propulsion hybride	102
Elena Quero Granado	Développement d'un modèle 1,5-D de chambre de combustion d'un moteur hybride pour une application système	104
Pierre Bernigaud	Modélisation de la combustion des matériaux énergétiques nouvelle génération	106

Thèses de doctorat ONERA soutenues en 2023

DOMAINE MÉCANIQUE DES FLUIDES ET ÉNERGÉTIQUE

(suite)

Exploitation de données expérimentales et numériques

Ilyès Berhouni	Étude théorique de la méthode du bilan d'exergie et extension pour l'analyse de performance d'écoulements stationnaires tournants	108
Nicolas Vauchel	Estimation des indices de Sobol à l'aide d'un métamodèle multi-éléments : application à la dynamique du vol	110
Arthur Vervynck	Prédiction hybride d'écoulements autour de profils par assimilation de données	112

Matériaux énergétiques, émissions et dispersion atmosphérique

Rafaël Barrellon-Vernay	Mécanismes de nucléation des particules volatiles dans les émissions des moteurs d'avion et leurs liens avec la composition du carburant	114
------------------------------------	--	-----

Bruno Mangin

Thèse soutenue le 29 novembre 2023 à Châtillon

ED 602 (SPI) - Sciences de l'ingénieur et des systèmes - Université du Mans

Encadrement

Département Aérodynamique, acoustique, aéroélasticité, ONERA, Châtillon

Encadrant : Majd Daroukh, ONERA/DAAA

Directeur de thèse : Gwenaël Gabard, LAUM, Université du Mans

Jury

Michel Roger, LMFA, École Centrale de Lyon

Edward James Brambley, Applied Mathematics, University of Warwick

Jean-François Mercier, ENSTA Paris

Simon Felix, LAUM, Université du Mans

Estelle Piot, ONERA/DMPE

Financement

Union Européenne

Contact majd.daroukh@onera.fr

Prix des doctorants ONERA MFE 2023

2nd Best Student Paper Award , 28th AIAA/CEAS Aeroacoustics 2022 Conference



Résumé

L'analyse du bruit émis par les parties tournantes des moteurs d'avions comporte trois aspects : la génération des sources acoustiques, leur propagation dans la partie carénée et leur rayonnement en champ lointain. La génération des sources est complexe à estimer, et des calculs coûteux sont généralement effectués. Pour les deux autres aspects, un plus large panel de choix est à disposition. L'accent est mis, dans le cadre de la thèse, sur la propagation à l'intérieur du conduit secondaire d'un turboréacteur et le rayonnement acoustique en champ libre associé.

En introduisant quelques simplifications sur la géométrie et l'écoulement, le problème acoustique peut être résolu analytiquement (au moins partiellement), ce qui permet des prévisions très rapides. Ces solutions, semi-analytiques, présentent donc un grand intérêt mais sont naturellement limitées en termes de représentation de la géométrie et de l'écoulement. L'évolution des moteurs vers des géométries à très grand taux de dilution met à mal les hypothèses de ces modèles et introduit des nouveaux défis en terme de modélisation. En particulier, dans ces architectures, le raccourcissement de la nacelle cause une augmentation du nombre de transitions de modes et une distorsion accrue de l'écoulement dans l'entrée d'air qui rendent la propagation particulièrement complexe à calculer. L'objectif principal de cette thèse est de développer des modèles rapides de propagation qui sont capables de prendre en compte ces deux phénomènes. Ceci est réalisé en implémentant une méthode multimodale qui permet de calculer l'écoulement porteur et le champ acoustique sous l'hypothèse d'un écoulement potentiel. Cette méthode est ensuite utilisée pour étudier l'impact de double transitions et de la distorsion azimutale de l'écoulement sur la propagation et le rayonnement acoustique.

Mots-clés

Propagation acoustique, multimodale, WKB, bruit de soufflante, transition modale, distorsion de l'écoulement.

Télécharger la thèse : <https://theses.fr/2023LEMA1020>

Valentin Morin

Thèse soutenue le 31 janvier 2023 à Toulouse

ED 162 (MEGA) - Mécanique, énergétique, génie civil, acoustique - Université de Lyon

Encadrement

Département Multiphysique pour l'énergétique, ONERA, Toulouse

Encadrants : François Vuillot, Julien Troyes, ONERA/DMPE

Directeur de thèse : Christophe Bogey, MFAE, École Centrale de Lyon

Jury

Fabien Anselmet, IRPHE, École Centrale de Marseille

François-Xavier Demoulin, CORIA, Rouen

Eva Dorignac, Institut Pprime, Poitiers

Davide Zuzio, ONERA/DMPE

Hadrien Lambaré, CNES (invité)

Financement

CNES, ONERA

Contact julien.troyes@onera.fr

Résumé

Lors de la phase de décollage, le lanceur, sa charge utile et le pas de tir sont soumis à de fortes contraintes vibratoires, induites par le bruit des jets des propulseurs. Pour réduire ces contraintes sonores, une des méthodes consiste à injecter de l'eau sur la table de lancement. De nombreuses études expérimentales ont permis de mettre en évidence et de caractériser la réduction acoustique par injection d'eau. Des études numériques ont également été menées, mais ne prennent pas en compte la totalité du mécanisme d'atomisation du jet liquide.

L'objectif de cette thèse est de mettre en œuvre et valider une méthode numérique permettant de simuler l'injection d'eau de la configuration à échelle réduite du banc d'essai Martel de l'institut Pprime, en prenant en compte l'atomisation primaire de la phase dense d'un jet liquide en une phase dispersée de gouttes. L'approche retenue pour le calcul de l'écoulement diphasique est une méthode à interface diffuse permettant la résolution des équations de Navier-Stokes en volumes finis sur maillages non structurés. Les gouttes sont simulées par un solveur dédié, couplé au solveur résolvant la phase dense du jet liquide. Dans un premier temps, la méthode numérique est mise en place et validée sur un jet de la littérature axisymétrique, dont le régime d'atomisation est similaire à celui de la buse du banc Martel. Des fluctuations de vitesse sont introduites en entrée de la buse par *Synthetic-Eddy Method*, et s'avèrent nécessaires pour obtenir une transition du jet liquide, dont les propriétés sont en bon accord avec celles de l'expérience. Le modèle d'atomisation retenu dans cette étude est ensuite activé pour générer un brouillard de gouttes. Dans un second temps, la méthode numérique est appliquée au calcul de l'écoulement dans la buse Martel et proche de sa sortie. Le jet simulé est plat et son angle d'évasement en sortie est conforme à ce qui est observé dans l'expérience. L'intensité de la *Synthetic-Eddy Method* est ensuite augmentée afin d'obtenir des niveaux de fluctuations de vitesse suffisants pour calculer la transition du jet. Dans un troisième temps, le jet de la buse Martel avec atomisation est simulé et étudié. La transition du jet est caractérisée par le développement de deux ondes d'instabilité successives à basse et à haute fréquence à l'interface liquide-gaz. La quantité de gouttes produites s'avère être négligeable devant la quantité de liquide présente sous forme dense au niveau de la zone d'impact entre le liquide et le jet principal de gaz du banc Martel. Le bruit produit par le jet d'une buse isolée est ensuite étudié. En particulier, ses niveaux sonores en champ proche sont bien plus faibles que les niveaux sonores du jet principal de gaz obtenus au niveau des buses d'injection d'eau. Les travaux réalisés dans cette thèse pourront par la suite être appliqués au calcul du bruit de jet de la configuration du banc Martel en présence d'injection d'eau.

Mots-clés

Écoulements diphasiques, bruit de jet, aéroacoustique, CFD, simulation numérique, simulation aux grandes échelles, atomisation, turbulence, transition, instabilités, interface diffuse.

Télécharger la thèse : <https://theses.fr/2023ECDL0005>



Pierre Nibourel

Thèse soutenue le 23 juin 2023 à Meudon

ED 626 (IPP) - IP Paris - Institut Polytechnique de Paris

Encadrement

Département Aérodynamique, acoustique, aéroélasticité, ONERA, Meudon

Encadrants : Colin Leclercq, ONERA/DAAA ; Fabrice Demourant, ONERA/DTIS

Directeur de thèse : Éric Garnier, ONERA/DAAA

Jury

Peter Jordan, Institut Pprime

Laurent Cordier, Institut Pprime

Georgios Rigas, Imperial College, London

Aimee S. Morgans, Imperial College, London

Denis Sipp, ONERA/DAAA

Financement

DGA/AID, ONERA

Contact colin.leclercq@onera.fr

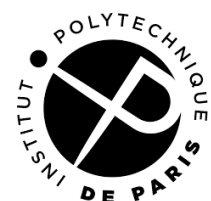
Résumé

La transition à la turbulence d'une couche limite entraîne une augmentation du frottement à la paroi pénalisant la traînée des avions. À très haute vitesse, l'échauffement engendré est significatif et devient une contrainte majeure pour la conception d'engins supersoniques/hypersoniques. La transition à la turbulence des écoulements pariétaux est initiée par l'amplification de perturbations extérieures. Lorsque les perturbations sont de faible intensité, il est possible de limiter leurs amplitudes dans l'optique de retarder la transition à la turbulence en se basant sur les outils linéaires classiques de la théorie du contrôle réactif où l'action de contrôle est continuellement ajustée en fonction des mesures de capteurs. La question de la robustesse en performance, définie comme la capacité de la loi de contrôle à rester efficace en termes de réduction d'amplitude des perturbations malgré des erreurs de modélisation ou des variations des conditions d'écoulement autour du cas de référence, reste un défi majeur pour les écoulements de couche limite en raison de leur nature convective. Le travail de cette thèse consiste donc à obtenir une loi de commande réactive robuste pour retarder la transition vers la turbulence d'une couche limite supersonique.

Des simulations numériques directes ont été réalisées dans des configurations 2D et 3D pour concevoir des lois de contrôle robustes pour une couche limite à Mach 4,5. Les études 2D, qui permettent de simplifier la complexité du problème et d'aborder facilement la question de la robustesse en stabilité/performance des lois de commande, ont mis en évidence que la stratégie de contrôle la plus efficace consiste à placer le capteur d'estimation en aval de l'actionneur (configuration feedback). Dès lors qu'un simple contrôleur ne fournit pas les performances souhaitées sur toute la plage de point de fonctionnement considérée, une méthode de séquençage de gain associée à une configuration feedback peut être utilisée. Dans les simulations 3D, la croissance linéaire des premier et deuxième mode de Mack est considérablement réduite par le contrôle feedback qui présente une certaine robustesse en performance en réduisant toujours l'amplitude des perturbations malgré des capteurs d'estimation bruités ou des variations de vitesse de l'écoulement amont. En contrôlant la croissance linéaire des deux modes de Mack, la région laminaire de la couche limite est étendue dans le cas contrôlé et la transition vers la turbulence est retardée.

Mots-clés

Supersonique, transition, contrôle réactif, boucle fermée, couche limite.



Télécharger la thèse <https://theses.fr/s238224>

Clémence Rannou

Thèse soutenue le 10 novembre 2023 à Lille

ED 432 (SMI) - Sciences des métiers de l'ingénieur - HESAM Université

Encadrement

Département Aérodynamique, acoustique, aéroélasticité, ONERA, Meudon

Encadrants : Julien Marty, Geoffrey Tanguy, ONERA/DAAA

Directeur de thèse : Antoine Dazin, LMFL, ENSAM

Jury

Éric Goncalves, ENSMA, Poitiers

Nicolas Binder, ISAE-SUPAERO

Paola Cinnella, Institut Jean Le Rond d'Alembert, Sorbonne Université

Fabrizio Fontaneto, Institut Von Karman de dynamique des fluides

Pierre Peuriere, DGA (invité)

Financement

DGA/AID, ONERA

Contact julien.marty@onera.fr

Résumé

La plage de fonctionnement des compresseurs axiaux est limitée par la présence d'écoulements instables dont l'origine est localisée au niveau du jeu, entre le rotor et le carter. Ces instabilités peuvent conduire au décrochage tournant et au pompage, réduisant considérablement le domaine d'opérabilité des compresseurs. Ces phénomènes empêchent également le compresseur d'atteindre des taux de compression plus élevés et d'obtenir de meilleurs rendements. Les systèmes de contrôle de l'écoulement offrent alors une solution pour augmenter la marge au pompage par la voie de dispositifs passifs ou actifs. Des études récentes ont montré sur une taille de jeu donnée, que le contrôle actif par injection d'air en amont du bord d'attaque du rotor permettait de retarder l'apparition du décrochage et d'augmenter la marge au pompage. L'impact du contrôle sur différentes tailles de jeux reste encore à explorer. Or les calculs CFD se heurtent aujourd'hui à la complexité des écoulements et des dispositifs de contrôle rendant difficile la prévision de l'écoulement contrôlé. Cette thèse porte sur l'effet de la taille de jeu sur la performance et l'opérabilité des compresseurs ainsi que sur l'efficacité des systèmes de contrôle actif. Une méthodologie de simulation numérique sera notamment proposée pour étudier ce type de configurations.

Le but est de mieux prévoir et de mieux comprendre l'écoulement contrôlé en s'appuyant sur une validation avec des données expérimentales. Les expériences sont menées sur le banc d'essai du compresseur mono-étage CME2, situé au Laboratoire de Mécanique des Fluides de Lille et les simulations numériques sont basées sur le code elsA, développé à l'ONERA. D'autre part, une analyse est présentée sur l'effet de taille du jeu sur les mécanismes physiques intervenant dans l'apparition du décrochage tournant et sur leur modification suite au contrôle par soufflage au carter.

Mots-clés

Compresseur, marge au pompage, contrôle par soufflage, décrochage tournant.

Baptiste Baradel

Thèse soutenue le 30 janvier 2023 à Montpellier

ED 166 (I2S) - Information, structures et systèmes - Université de Montpellier

Encadrement

Département Multiphysique pour l'énergétique, ONERA, Toulouse

Encadrants : Philippe Combette, IES, Université de Montpellier ;

Fabien Méry, ONERA/DMPE

Directeurs de thèse : Alain Giani, IES, Université de Montpellier ;

Olivier Léon, ONERA/DMPE

Jury

Philippe Pernod, IEMN, Centrale Lille

Thomas Castelain, LMFA, École Centrale de Lyon

Jacques Borée, Institut Pprime

Financement

Région Occitanie, ONERA

Contact olivier.leon@onera.fr



Résumé

La turbulence est un phénomène important présent dans de nombreux écoulements, qu'ils soient naturels ou à application industrielle, et qui se caractérise notamment par une grande variété d'échelles spatiales et temporelles. Il est d'un intérêt particulier de développer des moyens métrologiques adaptés à la mesure des différentes grandeurs physiques pour mieux l'appréhender et la caractériser. En aérodynamique, les capteurs les plus communément employés encore aujourd'hui sont l'anémomètre à fil chaud pour les mesures de vitesse et le thermomètre à fil froid pour les mesures de température. Cependant ces deux moyens de mesures présentent des limitations. En effet, il a été montré que si la longueur de leur élément sensible était trop grande en comparaison des échelles caractéristiques de l'écoulement alors ces sondes opèrent un filtrage spatial des plus petites échelles de turbulence, pourtant nécessaires à la résolution complète de ce type d'écoulement.

Cette thèse se pose pour question la possibilité d'une amélioration de ces deux moyens métrologiques. L'axe d'amélioration principal réside dans la réduction de la taille de leur élément sensible permettant ainsi d'augmenter la gamme d'échelles spatiales mesurables dans un écoulement turbulent. Dans le cadre aérothermique, il apparaît intéressant de pouvoir effectuer des mesures simultanées de vitesse (fil chaud) et de température (fil froid). Cela a conduit au développement de micro-capteurs thermorésistifs permettant de repousser la limite de détection des petites échelles contenues dans un écoulement turbulent. Le premier objectif est de réaliser des sondes fonctionnelles pour des mesures anémométriques ou thermométriques, le second vise à développer un capteur du même type mais effectuant ces deux mesures de façon simultanée.

Pour atteindre ces objectifs, il a été question d'effectuer un choix pertinent sur les matériaux utilisés ainsi que d'étudier différents procédés de micro-fabrication, notamment de gravure du silicium. Ceci a alors permis de réaliser différentes géométries de micro-capteur afin d'identifier la plus appropriée aux mesures en écoulement turbulents. Afin de quantifier leur capacité à mesurer des fluctuations de vitesses, ces nouveaux capteurs ont été utilisés en couche limite turbulente, une attention particulière ayant été portée à la maîtrise du protocole expérimental. Les résultats obtenus ont été comparés à différents modèles semi-empiriques ainsi qu'à des mesures effectuées avec des sondes à fil chaud classiques. Dans l'objectif de performance des micro-capteurs pour des mesures de température, un banc expérimental spécifique a été conçu donnant accès aux réponses fréquentielles (pour ce type de mesure). Enfin, des premiers prototypes de micro-sondes permettant de réaliser des mesures simultanées de vitesse et de température ont été testés.

Mots-clés

Anémométrie à fil chaud, turbulence, transfert de chaleur, thermométrie à fil froid, micro-technologie.

Télécharger la thèse : <https://theses.fr/2023UMONS020>

Jean-Pierre Dufitumukiza

Thèse soutenue le 14 mars 2023 à Palaiseau

ED 104 (SMRE) - Sciences de la matière, du rayonnement et de l'environnement -
Université de Lille

Encadrement

Département Multiphysique pour l'énergétique, ONERA, Palaiseau

Encadrants : Cornelia Irimiea, Nicolas Fdida, ONERA/DMPE

Directeur de thèse : Xavier Mercier, PC2A, Université de Lille

Jury

Iain Stewart Burns, Université de Strathclyde, Glasgow

Mario Commodo, Istituto di Ricerche sulla Combustione, Napoli

Éric Therssen, PC2A, Université de Lille,

Benedetta Franzelli, EM2C, Centrale Paris

Jérôme Yon, CORIA, Rouen

Financement

ONERA

Contact cornelia.irimiea@onera.fr

Développement des techniques optiques pour la caractérisation in situ de la suie dans des foyers de combustion à haute pression

Résumé

La croissance du trafic aérien incite les chercheurs en combustion à comprendre en détail les processus physiques et chimiques dans les moteurs, avec deux objectifs principaux : (i) améliorer le processus de combustion ; (ii) réduire les émissions gazeuses et particulaires. Une solution au premier problème réside dans une combustion à pression et température plus élevées, mais cela peut impacter le second.

Le développement d'outils expérimentaux adaptés à des conditions de combustion réalistes est indispensable. Des techniques optiques couplées ont ainsi été développées et mises en œuvre pour caractériser les particules de suie dans des chambres de combustion représentatives. L'incandescence induite par laser (LII) est la principale technique retenue, en raison de sa haute sensibilité pour la détection des particules et de sa flexibilité de mise en œuvre autour des installations semi-industrielles. La fluorescence induite par laser (LIF) est couplée à la LII pour détecter les précurseurs de suie connus sous le nom d'hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP). La LII/LIF a été testée pour la première fois sur une flamme à diffusion laminaire CH₄/air. De plus, deux configurations optiques (imagerie et spectrale) proposées pour la technique LII ont été étudiées pour évaluer l'incertitude induite par l'étape de conversion du signal LII enregistré en fraction de volume de suie. Ces études ont permis l'application des techniques LII/LIF planaires ainsi que de techniques optiques complémentaires sur un banc d'essai semi-industriel. La vélocimétrie par image de particules et la diffusion de Mie sont ainsi utilisées pour compléter le couple LII/LIF. Six points de fonctionnement du banc d'essai ont été caractérisés par les techniques optiques couplées afin d'identifier les principaux paramètres qui affectent la formation de suie. Une caractérisation exhaustive des différents points de fonctionnement et leur corrélation avec le cycle normalisé d'atterrissage/décollage (LTO) est proposée.

Ce travail a permis d'identifier trois points de fonctionnement d'intérêt pour des études approfondies avec les carburants aéronautiques durables (SAF). L'effet des SAF sur la formation de suie a été évalué avec la LII, la chemiluminescence OH* et par diffusion. Une matrice de trois carburants (Jet A-1, 50:50% vol. Jet A-1: Alcool-to-Jet (ATJ) et ATJ) a été sélectionnée pour évaluer les impacts sur la production de suie. Des techniques à haute cadence (OH* et diffusion) ont été mises en œuvre pour obtenir des informations sur la dynamique du spray et le front de flamme à l'intérieur de la chambre de combustion. Les techniques optiques couplées permettent d'identifier les paramètres conduisant à la formation de suie et les relient aux conditions de fonctionnement ou aux propriétés du combustible.

Mots-clés

Combustion, suie, métrologie optique, incandescence/fluorescence induite par laser, diffusion de la lumière, vélocimétrie par imagerie de particules, chimiluminescence OH*, chambre de combustion aéronautique semi-industrielle.

Télécharger la thèse : <https://theses.fr/2023ULILR010>

Rolando Cruz Marquez

Thèse soutenue le 21 décembre 2023 à Villeneuve d'Ascq

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

Encadrement

Département Aérodynamique, acoustique, aéroélasticité, ONERA, Meudon

Encadrante : Marie Couliou, Geoffrey Tanguy, ONERA/DAAA

Directeurs de thèse : Patrick Dupont, LMFL, Lille ; Vincent Brion ONERA/DAAA

Jury

Ivan Delbende, Institut Jean le Rond d'Alembert, Sorbonne Université

Thomas Leweke, IRPHE, Aix-Marseille Université

Djeridi Henda, LEGI, Grenoble

Jean-Philippe Laval, LMFL, Université de Lille

Financement Région Hauts-de-France, ONERA

Contact marie.couliou@onera.fr

Résumé

L'impact de la charge alaire sur les propriétés et la dynamique des tourbillons marginaux est étudié dans des expériences en bassin hydrodynamique. Dans le cadre de la théorie de la ligne portante, la circulation locale $\Gamma(y)$ (y coordonnée en envergure) dépend de la corde locale, de l'incidence effective et du coefficient de portance. Pour un avion commercial, la géométrie de l'aile varie en fonction de la phase du vol (par exemple, déploiement des dispositifs hypersustentateurs), modifiant ainsi Γy . Cela affecte les propriétés du sillage tourbillonnaire, issu de l'enroulement de la nappe

tourbillonnaire initiale caractérisée par une intensité $-d\Gamma y/dy$. Les grandes échelles de longueur impliquées dans le développement du sillage sont difficiles à traiter par un seul et même outil. Nous utilisons une expérience en bassin hydrodynamique pour explorer ce sujet. Cette recherche est motivée par la préoccupation de longue date concernant le danger des tourbillons de sillage, un problème encore largement ouvert d'un point de vue technique et qui suscite une pression croissante dans l'industrie aéronautique, particulièrement aux abords des aéroports. La question centrale du point de vue mécanique des fluides est de savoir s'il est possible de réduire le danger des tourbillons par une conception intelligente de l'aile ou par des perturbations de forme passive qui modifient le sillage tourbillonnaire. La thèse considère d'abord le cas d'une aile rectangulaire, représentative du vol de croisière, puis varie la charge alaire : une configuration hypersustentée, une avec des perturbations en bord de fuite et des configurations qui génèrent quatre tourbillons, spécialement conçues pour une interaction accélérée des tourbillons. Le développement du sillage tourbillonnaire est étudié depuis le stade de l'enroulement jusqu'à 300 envergures en aval à un nombre de Reynolds basé sur la corde $Re_c=10^5$. Des mesures stéréo-PIV sont effectuées dans des sections du sillage. Il est difficile de suivre ces tourbillons sur une longue période ainsi que de décomposer l'écoulement en ses composants moyen et perturbateur. Une fois traités, les résultats mettent en évidence la structure globale du sillage et le nombre de tourbillons marginaux par rapport à la charge alaire. Les propriétés essentielles des tourbillons (profil, rayon, circulation, écoulement axial et évolution temporelle associée) sont analysées pour en extraire un sens physique. Dans certains cas, nous pouvons mettre en évidence le développement de perturbations sur le tourbillon marginal formé dans le sillage lointain. L'impact d'une ondulation de la forme du bord de fuite de l'aile est analysé. Cela montre que le tourbillon marginal est élargi par rapport au cas de référence, tout en conservant la même circulation. Cet élargissement réduit le risque pour un avion suiveur. Pour une portance identique, les configurations hypersustentées qui génèrent des paires de tourbillons corotatifs dans le sillage proche présentent d'abord une fusion des tourbillons de même signe, puis un effet diffusif sur le noyau du tourbillon fusionné par rapport à la configuration de base. De plus, une augmentation de la circulation, jusqu'à 20 %, est observée en raison de la proximité plus grande des tourbillons. En revanche, les configurations qui présentent des tourbillons contrarotatifs de chaque côté du sillage montrent un processus de diffusion visqueuse qui entraîne une réduction de la circulation du tourbillon de bout d'aile. Ce travail montre que la charge alaire a un impact important sur la position spécifique, la force et la taille des tourbillons dans le sillage.

Mots clés

Tourbillons de sillage, charge aérodynamique, stabilité des tourbillons.

Télécharger la thèse : <https://theses.fr/s309735>



Pierre Saulgeot

Thèse soutenue le 20 décembre 2023 à Meudon

ED 626 (IPP) - IP Paris - Institut Polytechnique de Paris

Encadrement

Département Aérodynamique, acoustique, aéroélasticité, ONERA, Lille

Encadrants : Vincent Brion, ONERA/DAAA ; Nicolas Bonne, ONERA/DMPE

Directeurs de thèse : Laurent Jacquin, École polytechnique, ONERA ;
Emmanuel Dormy, ENS Paris

Jury

Roberto Paoli, Mechanical Engineering Department, Polytechnique Montreal

Pierre Brancher, IMFT, Toulouse

Thomas Gerz, Institut de la physique atmosphérique, DLR

Rival Plongonven, Laboratoire de météorologie dynamique, École polytechnique

Arnaud Antkowiak, Institut Jean le Rond d'Alembert, Sorbonne Université

Claire Sarrat, ONERA/DTIS

Financement

ONERA

Contact vincent.brion@onera.fr

Résumé

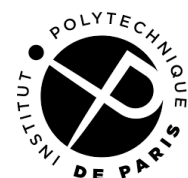
L'évaluation de l'impact environnemental des traînées de condensation est rendu difficile par la multiplicité des échelles spatiales et temporelles et des phénomènes physiques mis en jeu. Ces traînées, qui prennent naissance à la sortie des moteurs d'avion, évoluent très rapidement alors qu'elles sont encore proches de l'avion (sur des distances de l'ordre de quelques envergures), mais ne se transforment potentiellement que beaucoup plus loin en des cirrus induits, dont l'extension peut aller jusqu'à plusieurs centaines de kilomètres carrés agit négativement sur le bilan radiatif terrestre.

Dans ce contexte, cette thèse s'intéresse aux effets du champ proche de l'aéronef sur les propriétés de ces traînées de condensation. Plus spécifiquement, il s'agit de préciser la manière dont les tourbillons de sillage, aussi appelés tourbillons marginaux, modifient la répartition des panaches issus des moteurs et la condensation de la vapeur d'eau en glace, depuis leur enroulement jusqu'à leur déstabilisation loin derrière l'aéronef. La stratification thermique (ou en densité) de l'atmosphère joue un rôle majeur dans cette phase de l'évolution du sillage et constitue un des paramètres clés de l'étude. En particulier, le mouvement naturel des tourbillons est de descendre, mais un sillage secondaire peut se créer dans leur voisinage puis remonter jusqu'à l'altitude de vol dans les environnements stratifiés de manière non adiabatique. Le sillage est alors séparé en deux composantes distinctes et les panaches issus des moteurs peuvent se retrouver pris dans l'un ou l'autre, notamment en fonction de leur position initiale. En zone sursaturée (par rapport à la saturation en glace de l'atmosphère), cela influence fortement la condensation, et donc l'impact radiatif de la traînée produite. Un second paramètre de l'étude est la position relative des jets moteurs. L'objectif sur ce point est de mieux comprendre comment de futures architectures d'aéronef pourraient éventuellement bénéficier d'un positionnement des moteurs moins favorables au développement des traînées de condensation. Les travaux se sont attachés à évaluer de manière exhaustive l'influence de l'ensemble des paramètres jouant sur le champ proche, et qui caractérisent les propriétés aérodynamiques principales de l'aéronef et celles de l'influence de l'atmosphère sur le mouvement de *downwash* naturel du sillage portant.

Un des résultats principaux et originaux de l'étude est de montrer que le phénomène d'emport des traînées par les tourbillons marginaux induit des variations importantes de l'étalement vertical de ces dernières et donc de leur impact radiatif et que des configurations de positionnement des jets propulsifs le long de la voilure sont plus favorables que d'autres.

Mots-clés Tourbillons, traînées de condensation, sillages d'avion, instabilités, impact environnemental.

Télécharger la thèse : <https://theses.fr/s255822>



Michel Bouchard

Thèse soutenue le 12 janvier 2023 à Meudon

ED 391 (SMAER) - Sciences mécaniques, acoustique, électronique et robotique - Sorbonne Université

Encadrement

Département Aérodynamique, acoustique, aéroélasticité, ONERA, Meudon

Encadrant : Julien Marty, ONERA/DAAA

Directeurs de thèse : Sébastien Deck, Michel Costes, ONERA/DAAA

Jury

Paola Cinnella, Institut Jean Le Rond d'Alembert, Sorbonne Université

Éric Goncalves Da Silva, ENSMA, Poitiers

Michel Visonneau, Fluid Mechanics Laboratory, Centrale Nantes

Karen Mulleners, EPFL, Lausanne

Jean-Christophe Robinet, DynFluid, ENSAM

Financement

DGA

Contact julien.marty@onera.fr

Résumé

Ces travaux visent à déterminer, à l'aide de simulations hybrides RANS/LES, les interactions entre transition laminaire-turbulent par bulbe de décollement et phénomènes inhomogènes et instationnaires, qui apparaissent lors du décrochage statique d'un profil. Le cadre RANS γ - Re_{θ_t} de modélisation de la transition est choisi pour un couplage au modèle hybride ZDES mode 2 (2020). Quatre enjeux de ce couplage sont explorés : traitement RANS des couches limites laminares et transitionnelles, traitement LES des zones de décollement massif de couches limites, équilibre entre production et destruction de turbulence modélisée et préservation du comportement du modèle γ - Re_{θ_t} . Une étude approfondie du décrochage statique du profil OA209 est menée à l'aide du modèle construit. Un scénario est proposé pour expliquer l'apparition d'oscillations basse fréquence et de cellules de décrochage, faisant intervenir une interaction forte entre zone de décollement massif et zone de transition.

Mots-clés

Modélisation de la turbulence, hybride RANS/LES, décrochage statique mixte, transition laminaire-turbulent, oscillations basse fréquence, cellules de décrochage.

Antoine Dufau

Thèse soutenue le 27 octobre 2023 à Meudon

ED 468 (MEGEP) - Mécanique, énergétique, génie civil, procédés - Université fédérale de Toulouse Midi-Pyrénées

Encadrement

Département Aérodynamique, acoustique, aéroélasticité, ONERA, Meudon

Directeurs de thèse : Estelle Piot, ONERA/DMPE ; Julien Marty, ONERA/DAAA

Jury

Michel Visonneau, Fluid Mechanics Laboratory, Centrale Nantes

Frédéric Alizard, LMFA, Université de Lyon

Nicolas Binder, ISAE-SUPAERO

Guillaume Balarac, LEGI, Grenoble INP

Financement

CIFRE Safran

Contact julien.marty@onera.fr

Résumé

Les performances d'une turbine basse-pression sont fortement influencées par les phénomènes de transition laminaire-turbulent et de décollement de la couche limite. Cette étude concerne la simulation de ces phénomènes qui se révèlent fortement instationnaires à cause des interactions stator-rotor.

Il s'agit de proposer des méthodes numériques recalées et génériques pour simuler les interactions sillage-couche limite c'est-à-dire l'influence des interactions rotor-stator sur le phénomène de la transition laminaire-turbulent et le décollement de la couche limite. D'une part, des simulations URANS sont réalisées pour valider et hiérarchiser le modèle de Menter-Langtry mais surtout pour mettre en évidence ses limitations, tant numériques que physiques. D'autre part, on effectue des simulations numériques directes où la turbulence est résolue jusqu'à la paroi afin de mieux comprendre les mécanismes mis en jeu dans l'interaction sillage-couche limite.

Enfin, la confrontation avec les résultats obtenus à l'approche URANS permettra de mieux identifier les limitations de cette dernière pour préparer le développement de méthodes hybrides RANS/LES.

Mots-clés

Turbine, basse-pression, transition laminaire-turbulent, bulbe de décollement, interaction rotor-stator.

Thomas Jaroslowski

Thèse soutenue le 6 février 2023 à Toulouse

ED 468 (MEGEP) - Mécanique, énergétique, génie civil, procédés - Université fédérale de Toulouse Midi-Pyrénées

Encadrement

Département Multiphysique pour l'énergétique, ONERA, Toulouse

Encadrants : Maxime Forte, ONERA/DMPE ; Erwin Gowree, ISAE-SUPAERO

Directeur de thèse : Jean-Marc Moschetta, ISAE-SUPAERO

Jury

Taraneh Sayadi, Institut Jean Le Rond d'Alembert, Sorbonne Université

Jens Fransson, KTH Royal Institute of Technology, Stockholm

Sandrine Aubrun-Sanches, LHEEA, École Centrale de Nantes

Ulrich Rist, Institute of Aerodynamics and Gasdynamics, Universität Stuttgart

Estelle Piot, ONERA/DMPE

Financement ONERA, ISAE-SUPAERO

Contact maxime.forte@onera.fr

Résumé

Les micro-véhicules aériens (MAV) modernes utilisent des surfaces portantes fixes et rotatives qui fonctionnent à de faibles nombres de Reynolds, ce qui favorise le décollement de la couche limite et la formation de bulbes de décollement laminaire (LSB). En particulier, ces bulbes peuvent nuire aux performances de la surface portante en créant une situation instationnaire et instable, où de petits changements dans l'écoulement en amont peuvent provoquer un décrochage brutal. Or, les MAVs opèrent usuellement dans des

environnements urbains très perturbés à cause de la présence d'obstacles (bâtiments, arbres, etc.). Par conséquent, cette thèse se concentre sur les mécanismes de transition de la couche limite sur des ailes fixes et rotatives à faibles nombres de Reynolds, en mettant l'accent sur les effets de la turbulence extérieure et des rugosités de paroi sur les instabilités de l'écoulement. Cette thèse vise à mieux comprendre les mécanismes physiques qui régissent le processus de transition dans les bulbes en utilisant une combinaison de techniques expérimentales et également des analyses de stabilité linéaire.

En détail, une première expérience, utilisant la thermographie infrarouge et des mesures de force, a permis de montrer que ces techniques de mesure étaient pertinentes pour qualifier la topologie de l'écoulement et l'état de la couche limite sur les pales d'un petit rotor fonctionnant à faibles nombres de Reynolds. Dans la configuration de vol stationnaire, une région décollée similaire à un bulbe est observée sur le côté extrados des pales. D'autre part, cette expérience a montré l'influence que pouvait avoir le déclenchement de la transition de couche limite sur les performances aérodynamiques du rotor: celles-ci peuvent être améliorées si la transition est déclenchée au moyen de rugosités isolées d'une hauteur appropriée et placées proche du bord d'attaque car dans ce cas, la zone décollée s'en trouve réduite. A l'inverse, le déclenchement de la transition par des rugosités mal choisies peut détériorer les performances du rotor par un surcroît de traînée de frottement. Enfin, cette expérience a montré, lorsque le rotor est dans une configuration de vol en montée (ou avancée), que l'augmentation de la turbulence dans l'écoulement amont entraîne également une amélioration des performances du rotor, ce qui pourrait s'expliquer, de façon similaire, par un processus de transition plus précoce et une réduction de la zone décollée.

Une deuxième expérience a été mise en place sur un profil d'aile bidimensionnel fixe afin de mesurer plus précisément les instabilités qui se développent dans une couche limite décollée au moyen de l'anémométrie à fil chaud. Le bulbe qui se forme sur l'extrados du profil a été soumis à une large gamme de niveaux de turbulence en amont. Cette expérience a montré la coexistence d'instabilités modales dans le bulbe et d'instabilités non-modales générées par la turbulence extérieure. La présence de stries dans la couche limite en amont du bulbe, induites par ces forts niveaux de turbulence, entraîne une modification de l'écoulement moyen, où la réduction de la taille du bulbe entraîne une atténuation de la croissance de l'instabilité modale. Les mesures démontrent que la croissance de l'énergie dans la couche limite est exponentielle pour les niveaux les plus bas de turbulence extérieure et devient progressivement algébrique à mesure que ce niveau augmente. Au-delà d'un taux de turbulence critique, le bulbe disparaît même complètement et la transition de la couche limite n'est plus pilotée que par les instabilités non modales. Enfin, une étude complémentaire a été menée en utilisant le même dispositif expérimental mais en générant des stries au moyen de rugosités isolées placées en amont du bulbe. Cette expérience montre la réduction de la taille du bulbe et l'efficacité de stries artificiellement générée comme stratégie de contrôle pour les écoulements décollés.

Mots-clés Mécanique des fluides, stabilité, transition, bulbes de décollement laminaire

Télécharger la thèse : <https://theses.fr/2023ESAE0009>

Euryale Kitzinger

Thèse soutenue le 23 mars 2023 à Meudon

ED 579 (SMEMaG) - Sciences mécaniques et énergétiques, matériaux et géosciences -
Université Paris-Saclay

Encadrement

Département Aérodynamique, acoustique, aéroélasticité, ONERA, Meudon

Encadrant : Olivier Marquet, ONERA/DAAA

Directeurs de thèse : Denis Sipp, ONERA/DAAA ; Estelle Piot, ONERA/DMPE

Jury

Jean-Christophe Robinet, Arts et Métiers ParisTech

Frédéric Alizard, LMFA, Université de Lyon

Carlo Cossu, CNRS, Centrale Nantes

Ardeshir Hanifi, KTH Royal Institute of Technology, Stockholm

Financement

DGA/AID, ONERA

Contact olivier.marquet@onera.fr

Résumé

Une manière de diminuer la traînée de frottement d'un avion est d'étendre la zone de laminarité de la couche limite sur ses ailes. La transition est souvent modélisée à travers l'amplification d'instabilités qui se développent au sein de la couche limite. Lorsque ces instabilités ont des amplitudes suffisamment faibles, leur croissance suit un mécanisme linéaire. Historiquement, en partie dû à la limitation de la puissance de calcul, les études de ces instabilités se sont faites à travers l'utilisation de méthodes locales, ce qui a pour principale limitation de nécessiter des hypothèses sur l'écoulement ou les instabilités recherchées. L'objectif de la thèse est alors d'étendre, à l'aide d'analyses globales dans la direction de la corde et prenant en compte l'ensemble du bord d'attaque, les études des instabilités se développant sur un profil réaliste en flèche et pouvant être à l'origine de la transition.

Dans un premier temps, nous avons procédé à des analyses de stabilité temporelles, permettant de calculer les perturbations susceptibles de croître exponentiellement en temps au sein de la couche limite. Nous avons identifié les configurations d'écoulement instables et calculé la structure spatiale des modes marginaux afin de comprendre le mécanisme d'instabilité en jeu et mesurer l'influence des paramètres de la configuration sur la stabilité de l'écoulement. Dans un second temps, nous nous sommes intéressés à l'étude de la réceptivité aux rugosités de paroi en utilisant la décomposition en valeurs singulières de l'opérateur résolvant. Cette méthode donne accès aux rugosités les plus critiques et aux perturbations associées ce qui, en plus de fournir des informations intrinsèques à l'écoulement, peut permettre de calculer à moindre coût la perturbation engendrée par une rugosité donnée.

Pour finir, nous avons étudié le contrôle passif à la paroi des valeurs singulières de l'analyse de résolvant précédente. Les contrôles par soufflage/aspiration et par déformation de paroi ont été considérés. La sensibilité par rapport à cette première stratégie de contrôle a été calculée à partir de l'introduction de Lagrangiens appropriés, tandis qu'un formalisme faiblement non-linéaire a été utilisé pour traiter le contrôle par déformation de paroi.

Mots-clés

Dynamique des fluides, couche limite, transition, instabilités.

Adrien Rouviere

Thèse soutenue le 3 avril 2023 à Ville

ED 467 (AA) - Aéronautique, astronautique - Institut supérieur de l'aéronautique et de l'espace, Toulouse

Encadrement

Département Multiphysique pour l'énergétique, ONERA, Toulouse

Encadrant : Lucas Pascal, ONERA/DMPE

Directeurs de thèse : Serge Gratton, ANITI ; Fabien Méry, ONERA/DMPE

Jury

Grégoire Casalis, ISAE-SUPAERO

Bijan Mohammadi, IMAG, Université de Montpellier

Jean-Christophe Robinet, DynFluid, Arts et Métiers ParisTech

Taraneh Sayadi, Institut Jean Le Rond d'Alembert, Sorbonne Université

Financement

UE, ONERA

Contact fabien.mery@onera.fr

Résumé

Cette thèse s'inscrit dans le cadre de l'étude de l'effet de défauts de surface sur le phénomène de transition d'une couche limite laminaire vers la turbulence. La première partie de ce travail a consisté à développer le code de stabilité PIMS2D permettant d'étudier les effets de défauts de surface bidimensionnels sur le développement des ondes de Tollmien-Schlichting (TS) à travers les méthodes du $\exp(N)$ et du ΔN . L'utilisation de ce nouveau code a permis d'étudier l'impact de défauts de surface de types marches montantes et descendantes, bosses ou rainures sur l'écoulement moyen ainsi que sur le développement des ondes TS. Il a notamment été mis en évidence que le phénomène d'amplification de ces ondes instables était modifié de deux manières différentes selon la distance au défaut et la taille de celui-ci. L'influence d'un gradient de pression favorable ou défavorable sur le facteur N a également été étudiée. Finalement, une large base de données d'études de stabilité autour de différents défauts de surface a été générée, analysée et utilisée pour entraîner un réseau neuronal à quantifier l'effet d'un défaut de surface sur la transition. Ce réseau de neurones prend en entrée les paramètres géométriques et aérodynamiques du défaut et de l'écoulement considéré et prédit en sortie le ΔN associé à ce défaut.

Mots-clés

Couche, transition, réseaux de neurones, couche limite, défauts de surface, intelligence artificielle, réseaux neuronaux (informatique).



Télécharger la thèse : <https://theses.fr/2023ESAE0025>

Hector Solorzano Flores

Thèse soutenue le 20 décembre 2023 à Meudon

ED 626 (IPP) - IP Paris - Institut Polytechnique de Paris

Encadrement

Département Aérodynamique, acoustique, aéroélasticité, ONERA, Meudon

Encadrant : Olivier Atinault, ONERA/DAAA ; Cyril Bonnaud, Airbus Opération SAS

Directeur de thèse : Julien Dandois, ONERA/DAAA

Jury

David MacManus, Gas Turbine Technology Group, Cranfield University

Nicolas Gourdain, ISAE-SUPAERO

Arne Seitz, Visionary aircraft concepts, Bauhaus Luftfahrt e. V.

Éric Goncalves, Institut Pprime

Financement

CIFRE AIRBUS, ANR

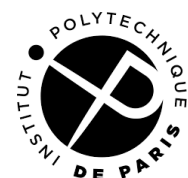
Contact olivier.atinault@onera.fr

Résumé

L'objectif de la thèse était d'identifier les principaux phénomènes physiques impliqués dans une prise d'air ingérant une couche limite, d'estimer la distorsion aérodynamique générée par ces phénomènes physiques et d'analyser la capacité prédictive de différents modèles de turbulence. L'étude a été menée en utilisant une prise d'air BLI semi-enfouie sur une plaque plane, non munie d'un étage de compression. La géométrie a été étudiée à la fois numériquement et expérimentalement dans des conditions transsoniques. Le principal paramètre variant dans l'étude était le débit massique qui la traversait. En outre, d'autres paramètres importants d'ingestion de couche limite, tels que l'épaisseur de la couche limite ou le nombre de Mach de l'écoulement libre, ont été analysés. Les essais en soufflerie ont été comparés aux résultats des simulations numériques avec différents modèles de turbulence. Les modèles de turbulence les plus courants dans l'industrie ont été utilisés, tels que $k\omega$ -SST ou Spalart-Allmaras, y compris certaines de ses corrections, en plus d'un modèle RSM et d'un calcul ZDES. Les comparaisons ont été effectuées à l'aide de prises de pression statique, de transducteurs kulite™ et d'un peigne de 40 capteurs de pression instationnaires situés à l'AIP. Le comportement de l'écoulement et les phénomènes stationnaires ont été comparés, ainsi que le comportement instationnaire par analyse spectrale. Enfin, les niveaux de distorsion générés lors des essais ont été comparés à ceux prédits par les méthodes numériques.

Mot clés

Écoulement transsonique, ingestion de couche limite, décollement, écoulement instationnaire.



Télécharger la thèse : <https://theses.fr/s254033>

Maxime Stuck

Thèse soutenue le 12 décembre 2023 à Bordeaux

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

Encadrement

Département Multiphysique pour l'énergétique, ONERA, Toulouse

Encadrant : Jacques Couzi, CEA-CESTA

Directeurs de thèse : Marina Olazabal-Loumé, CEA-CESTA ;
François Chedevert, ONERA/DMPE

Jury

Héloïse Beaugendre, INRIA Bordeaux

Sofiane Benhamadouche, EDF R&D (invité)

Rémi Manceau, LMAP, Pau

François Charru, IMFT, Toulouse

Financement

CEA

Contact francois.chedevert@onera.fr



Résumé

Lors de sa rentrée dans l'atmosphère, la surface de la pointe avant d'un véhicule spatial est soumise à des pressions et des flux thermiques très intenses (parfois supérieurs à 10 MW/m²). Afin de garantir l'intégrité du corps de rentrée dans de telles conditions, des systèmes de protection thermique, généralement à base de matériaux céramiques, ont dû être développés. Les températures et flux de chaleur extrêmes que doit supporter cette protection entraînent l'oxydation et la sublimation du carbone qui la compose, conduisant à son ablation. La dissipation d'énergie due à cette perte de masse retarde alors l'échauffement du corps de rentrée.

Ces travaux de thèse s'inscrivent dans le contexte de l'étude et de la modélisation des phénomènes liés à l'interaction entre un écoulement turbulent et un véhicule de rentrée atmosphérique. On s'intéresse exclusivement ici à l'apparition de creusements macroscopiques tridimensionnels, appelés coups de gouge, lors du processus d'ablation, et notamment au rôle de la turbulence au sein de la couche limite dans leur formation. L'apparition de tels motifs sur la surface de l'objet a en effet pour conséquence une augmentation des transferts thermiques entre l'écoulement et le corps de rentrée, ce qui tend à accélérer la dégradation de la protection. C'est pourquoi la prise en compte des phénomènes relatifs à l'apparition des coups de gouge revêt un caractère important dans l'optique d'un dimensionnement optimal des boucliers thermiques.

L'objectif concret de cette thèse consiste tout d'abord à étudier la croissance de telles structures dans les premiers instants de leur formation, lors de l'ablation de la protection. Dans ces premiers instants, la déformation de la paroi est de faible amplitude, et les interactions entre la couche limite turbulente et la paroi sont linéaires. Des travaux précédents ayant suggéré un lien entre la taille des creusements et les caractéristiques de la couche limite turbulente, nous avons centré notre étude sur la compréhension de ces interactions. L'approche RANS (Reynolds Averaged Navier–Stokes) étant privilégiée dans des contextes industriels, et notamment lors des phases de dimensionnement des protections thermiques, un deuxième objectif de notre étude est de mettre au point des stratégies de modélisation RANS permettant de reproduire les phénomènes liés aux interactions entre la paroi déformée et la couche limite turbulente.

Mots-clés

Couche limite turbulente, réponse linéaire forcée, Reynolds Averaged Navier–Stokes, aérodynamique, ablation.

Télécharger la thèse : <https://theses.fr/s253026>

Fatih Uncu

Thèse soutenue le 6 octobre 2023 à Meudon

ED 391 (SMAER) - Sciences mécaniques, acoustique, électronique et robotique - Sorbonne Université

Encadrement

Département Aérodynamique, acoustique, aéroélasticité, ONERA, Meudon

Encadrants : Benjamin François, ONERA/DAAA ;
Nicolas Buffaz, Safran Helicopter Engines

Directeur de thèse : Georges Gerolymos, Sorbonne Université

Jury

Paola Cinnella, Institut Jean Le Rond d'Alembert, Sorbonne Université

Éric Goncalvez Da Silva, LEGI, ENSMA

Rémi Manceau, E2S UPPA, Université de Pau

Antoine Dazin, LMFL, Arts et Métiers ParisTech

Financement

CIFRE Safran Helicopter Engines

Contact benjamin.francois@onera.fr

Résumé

Les turbines aéronautiques possèdent de nombreux effets technologiques (cavités, talons, congés) qui ont une influence notable sur leurs performances aérodynamiques. Pour ces effets technologiques de géométries complexes, l'utilisation de maillages structurés est difficilement réalisable dans les simulations numériques. Sa mise en œuvre est longue et requiert souvent des méthodes de recouvrement de maillage de type

chimère. Cependant, la mise en donnée des simulations avec ces méthodes est difficile pour les configurations d'écoulements internes. La représentativité des géométries dans les simulations en phase de conception est un axe de travail pour améliorer la prévision des performances aérodynamiques. Le premier objectif de la thèse a été d'établir des pratiques méthodologiques de maillage non-structuré pour simuler correctement l'écoulement à l'intérieur des cavités et des talons. Les écoulements au sein des effets technologiques présentent des décollements, des recirculations et des zones de mélanges entre deux écoulements transverses. Les modèles de turbulence RANS classiques à deux équations sont mis en défaut dans ces configurations. L'hypothèse de Boussinesq, qui relie linéairement les tensions de Reynolds et les gradients de vitesse, n'est plus vérifiée dans les régions à forte anisotropie et fort taux de turbulence. Les écoulements de talon et de cavité appartiennent à cette catégorie problématique. Le choix de la modélisation de la turbulence est donc un aspect important dans la simulation des écoulements de cavité. Le second objectif de la thèse a été de déterminer les modélisations de la turbulence les plus adaptées, aussi bien les modèles à viscosité turbulente que les modèles à transport du tenseur de Reynolds, pour reproduire le plus fidèlement ces écoulements par une approche RANS stationnaire. Cette analyse a permis de mieux comprendre les limites des différents modèles de turbulence pour divers types d'écoulements et de formuler des recommandations appropriées quant à leur utilisation. La stratégie adoptée pour répondre à la problématique est une gradation de la complexité des configurations étudiées. Les premières études se sont portées vers des configurations d'écoulements canoniques représentatives d'un écoulement de talon dans une turbine basse pression. Ces écoulements sont bien documentés et de nombreuses mesures sont à disposition dans la littérature. Une marche descendante, une série de perturbateurs dans un canal et un jet dans un écoulement transverse ont constitué la première partie des travaux de thèse qui ont permis non seulement d'essayer différentes méthodes de maillage non-structuré mais aussi d'évaluer les modèles de turbulence avec la comparaison aux essais. Une configuration intermédiaire, issue du projet européen MAGPI, qui est constituée d'une grille d'aubes de turbine sur un banc fixe avec la présence d'une cavité et d'un écoulement de purge, a été utilisée pour valider les modèles de turbulence et les pratiques de maillage sélectionnées. Enfin, la dernière étape a été d'appliquer les conclusions tirées des cas académiques et de la grille linéaire sur une turbine libre bi-étages industrielle avec la présence de talons en tête des roues mobiles. Cette configuration a permis d'éprouver les modèles de turbulence et la stratégie de maillage sachant la complexité des différents phénomènes physiques intervenants, à savoir les écoulements secondaires, l'interaction rotor-stator et les effets de compressibilité.

Mots-clés

Turbine basse-pression, modèle de turbulence, écoulement de cavité, RANS.

Télécharger la thèse : <https://theses.fr/2023SORUS296>

Xavier Chanteux

Thèse soutenue le 24 novembre 2023 à Meudon

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

Encadrement

Département Aérodynamique, acoustique, aéroélasticité, ONERA, Meudon

Encadrants : Guillaume Bégou, ONERA/DAAA ; Olivier Vermeersch, ONERA/DMPE

Directeur de thèse : Hugues Deniau, ONERA/DMPE

Jury

Marina Olazabal Loumé, CEA-CESTA (invitée)

Éric Goncalves da Silva, ISAE-ENSMA

Christian Tenaud, EM2C, CentraleSupélec

Jean-Christophe Robinet, DynFluid, ENSAM

Financement

ONERA

Contact guillaume.begou@onera.fr

Résumé

Dans le cadre du design de véhicules hypersoniques, la prévision de la nature laminaire ou turbulente de la couche limite (zone de l'écoulement proche paroi où se concentrent les effets de viscosité) est importante pour la bonne prévision du flux de chaleur et de la traînée visqueuse. En effet, une couche limite laminaire présentera un frottement et un flux de chaleur cinq à dix fois plus faible que son pendant turbulent. Cette couche limite, initialement laminaire, est soumise à des perturbations environnementales. Ces dernières sont alors filtrées, au travers d'un processus de réceptivité, sous la forme d'instabilités harmoniques appelées modes. Ces modes connaissent alors une croissance linéaire, suivie d'interactions non-linéaires qui conduisent à la turbulence : c'est le phénomène de transition laminaire-turbulent.

Cette thèse s'inscrit dans la continuité des travaux liés à la modélisation de la transition laminaire-turbulent à l'ONERA, parmi lesquels le modèle $N-\sigma p$ permet de déterminer une position de transition connaissant l'évolution du taux de croissance linéaire des paraboles. On s'intéresse à l'extension du domaine d'application de la méthode des paraboles aux écoulements hypersoniques et, en particulier, à un type d'instabilité présent en régime hypersonique : le second mode de Mack. Cette extension est ensuite intégrée au modèle NSP dans le solveur elsA.

Mots-clés

Hypersonique, transition laminaire-turbulent, instabilités, stabilité linéaire locale, méthode des paraboles.

Télécharger la thèse : N/A

Arthur Poulain

Thèse soutenue le 13 décembre 2023 à Meudon

ED 626 (IPP) - IP Paris - Institut Polytechnique de Paris

Encadrement

Département Aérodynamique, acoustique, aéroélasticité, ONERA, Meudon

Encadrant : Georgios Rigas, Imperial College, London

Directeurs de thèse : Denis Sipp, Éric Garnier, ONERA/DAAA

Jury

David Fabre, IMFT, Toulouse

Markus J. Kloker, Institute of Aerodynamics and Gas Dynamics, University of Stuttgart

Ardeshir Hanifi, FLOW, Engineering Mechanics, KTH, Stockholm

Jean-Christophe Robinet, DynFluid, ENSAM

Cédric Content, ONERA/DAAA

Franck Hervy, DGA/AID

Financement

DGA

Contact denis.sipp@onera.fr

Résumé

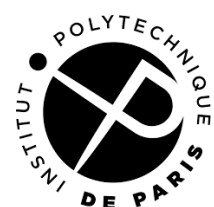
Une donnée essentielle pour la conception des véhicules hypersoniques est la nature de l'écoulement le long de sa surface, à savoir si la couche limite est laminaire ou turbulente. Tandis qu'un écoulement laminaire induit moins de flux de chaleur et de frottement, réduisant le poids de la protection thermique ainsi que la consommation de carburant, un écoulement turbulent est souhaitable afin d'éviter la séparation de couche limite provoquée par l'interaction avec les ondes de choc. La transition laminaire/turbulent est souvent produite par l'amplification de perturbations extérieures au sein de la couche limite. L'identification et le contrôle des perturbations les plus défavorables sont l'objet de ce travail.

Nous avons développé des outils numériques dans le formalisme mathématique discret de stabilité globale pour identifier les instabilités linéaires, calculer leur sensibilité linéaire, les solutions optimales non linéaires ainsi que leur contrôle optimal en boucle ouverte. Les méthodes employées s'appuient sur la Dérivation Automatique de la discrétisation spatiale bidimensionnelle des équations régissant la dynamique des fluides. Afin de maintenir un coût de calcul abordable, les instabilités périodiques selon la troisième direction spatiale (z) sont étudiées par développement de Fourier. Les solutions non linéaires sont ensuite calculées sous forme pseudo-spectrale par Space-Time Spectral Method selon le temps et selon z . Les perturbations optimales sont enfin déduites par optimisation adjointe.

Nous avons appliqué ces outils à une couche limite attachée, à un nombre de Mach de 4,5, où le scénario de transition optimal repose sur l'interaction non linéaire du premier mode oblique de Mack. De plus, les actionneurs optimaux de flux thermique et de soufflage/aspiration pariétaux en boucle ouverte ont été calculés afin d'amortir la croissance linéaire des trois instabilités les plus prédominantes : les stries stationnaires, les premier et second modes de Mack. Enfin, les flux thermiques optimaux agissant sur le champ moyen pour retarder ou promouvoir le scénario de transition optimal ont été déterminés.

Mots clés

Écoulement hypersonique, couche limite, transition laminaire/turbulent, stabilité, optimisation adjointe.



Télécharger la thèse : <https://theses.fr/s257643>

Florian Granger

Thèse soutenue le 11 décembre 2023 à Palaiseau

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

Encadrement

Département Aérodynamique, acoustique, aéroélasticité, ONERA, Lille

Encadrant : Davide Zuzio, ONERA/DMPE

Directeurs de thèse : Jean-Luc Estivalèzes, Luc-Henry Dorey, ONERA/DMPE

Jury

François-Xavier Demoulin, Université de Rouen

Jean-Philippe Matas, Université Claude Bernard, Lyon 1

Annafederica Urbano, ISAE-SUPAERO

Stéphane Zaleski, Sorbonne Université, Paris

Marie Théron, CNES (invitée)

Financement

CNES, ONERA

Contact davide.zuzio@onera.fr

Résumé

Les futurs moteurs-fusées des lanceurs européens sont développés avec l'objectif d'augmenter leur fiabilité et de diminuer leur coût. Pour cela, il est nécessaire de mieux comprendre les phénomènes physiques complexes qui régissent leur fonctionnement, pour estimer au mieux les marges de conception qui conditionnent le



coût et la fiabilité du moteur. Dans le cas des moteurs-fusées à ergols liquides, les phénomènes d'instabilités de combustion de haute fréquence est particulièrement complexe et critique pour le fonctionnement du moteur.

En collaboration avec le CNES, des travaux de recherche sur ce phénomène sont menés à l'ONERA pour des conditions d'injection sub-critique. L'oxygène est alors injecté sous forme liquide dans la chambre de combustion et subit une succession de phénomènes : atomisation du jet dense, fragmentation des ligaments liquides, évaporation des gouttelettes, combustion turbulente. Ces phénomènes doivent être restitués avec précision par la simulation afin de mieux comprendre leur rôle dans le déclenchement des instabilités de combustion qui résultent d'un couplage fort entre tous ces phénomènes. Un effort particulier est porté sur la description de l'écoulement diphasique qui implique de forts gradients de densité et une large gamme d'échelles caractéristiques.

L'ONERA a développé dans le code CEDRE une stratégie LES qui adapte la modélisation en fonction de la taille des structures liquides et celle du maillage utilisé. La prédiction de la taille des gouttes issues de l'atomisation primaire reste en particulier un verrou dans cette méthodologie : des modèles sous-maille doivent intervenir afin de prendre en compte les échelles liquides non résolues par le maillage, complétant ainsi le caractère prédictif de la simulation, de l'atomisation jusqu'à la combustion. Dans ce contexte, l'objectif de la thèse est d'améliorer la stratégie de simulation numérique permettant d'obtenir une description fidèle des flammes diphasiques cryogéniques, en développant en particulier un modèle d'atomisation enrichi. La stratégie LES des petites échelles sera basée sur l'utilisation d'une équation de transport supplémentaire décrivant la densité d'aire interfaciale contenue dans une cellule. Cette information fournira une échelle caractéristique des structures liquides, et sera utilisée par le couplage pour définir une distribution locale de diamètre de la phase dispersée lors de sa génération. Cependant, la fermeture des termes sources décrivant sa création et sa destruction locales dans le cadre d'une LES est à l'heure actuelle un défi majeur.

Pour cela, des simulations DNS ont permis de mieux comprendre le comportement de l'interface et de proposer une modélisation en conséquence. Le modèle développé ici est basé sur une formulation issue de la littérature dont le terme source a été adapté à l'atomisation assistée. Le modèle a ensuite été validé sur une configuration caractéristique de ce régime d'atomisation par comparaison aux simulations DNS. Enfin, la première simulation LES avec l'ensemble des échelles diphasiques calculées de manière locale a été réalisée en utilisant la modélisation de la densité d'aire interfaciale pour estimer une taille de goutte atomisée.

Mots-clés

Oxygène liquide, atomisation, diphasique, fusée, modélisation.

Télécharger la thèse : <https://theses.fr/s254077>

Alexis André

Thèse soutenue le 23 mars 2023 à Toulouse

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

Encadrement

Département Multiphysique pour l'énergétique, ONERA, Toulouse

Encadrant : Nicolas Bertier, ONERA/DMPE

Directeurs de thèse : Philippe Villedieu, Aymeric Boucher, ONERA/DMPE

Jury

Guillaume Legros, ICARE, Orléans

Julien Réveillon, CORIA, Rouen

Jérôme Yon, CORIA, Rouen

Eléonore Riber, CERFACS, Toulouse

Alexis Matynia, Institut Jean Le Rond d'Alembert, Sorbonne Université

Financement

ANR

Contact nicolas.bertier@onera.fr

Résumé

Dans un contexte de réduction de l'empreinte environnementale du trafic aérien, un intérêt particulier est porté aux suies en raison de leurs effets néfastes sur la santé humaine et l'environnement. De plus, l'intensification des transferts radiatifs qu'elles engendrent dans la chambre modifie la charge thermique aux parois ainsi que la formation de NOx. Pour ces raisons, des réglementations de plus en plus restrictives sont imposées à leur rencontre. Il devient alors essentiel d'être capable de proposer des modèles numériques fiables, décrivant la formation et l'évolution de ces particules.

Une première stratégie de modélisation, utilisant une cinétique squelettique, une modélisation sectionnelle des PAH ainsi qu'une modélisation *Lagrangian Soot Tracking* (LST) – permettant un suivi lagrangien des suies le long de leurs trajectoires – a déjà été utilisée avec succès avec le code CEDRE sur la configuration éthylène/air FIRST. Ce travail de thèse consiste à améliorer cette stratégie de modélisation puis à l'étendre afin de permettre la simulation de configurations kérosène/air, représentatives de chambres de combustion réelles. Tout d'abord, une évaluation de la stratégie de modélisation initiale est effectuée sur 17 flammes prémélangées laminares 1D éthylène/air. Cette dernière nous conduira à réduire une nouvelle cinétique squelettique et à modifier le modèle sectionnel de PAH afin de pouvoir prédire correctement la fraction volumique de suies sur l'ensemble des flammes étudiées. Cette évaluation aura en particulier permis de mettre en évidence la nécessité de tester une modélisation sur un nombre de flammes conséquent. Ensuite, un modèle d'agrégation prenant en compte la morphologie fractale des suies est implémenté afin d'améliorer la modélisation de la distribution en taille des suies. Puis, en raison de la difficulté d'adapter la méthode sectionnelle de PAH à une cinétique pour le kérosène, l'utilisation d'une nouvelle cinétique et d'une méthode alternative de dimérisation sont proposées et validées avec succès sur les différentes flammes 1D.

Enfin, la configuration FIRST est simulée avec ces deux alternatives afin de vérifier la bonne prédiction des niveaux de suies sur ce cas. Notre stratégie de modélisation possède alors tous les éléments nécessaires à la simulation de configurations de kérosène.

Mots-clés

Combustion, suies, CFD, PAH, *Lagrangian soot tracking*, méthode sectionnelle.

Lorenzo Byrde

Thèse soutenue le 19 juillet 2023 à Toulouse

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

Encadrement

Département Multiphysique pour l'énergétique, ONERA, Fauga Mauzac

Encadrant : Philippe Villedieu, ONERA/DMPE

Directeurs de thèse : Jérôme Anthoine, Nicolas Pelletier, ONERA/DMPE

Jury

Marc Bellenoue, ISAE-ENSMA

Laurent Catoire, ENSTA, IPP

Financement

CNES, ONERA,

Contact jerome.anthoine@onera.fr

Résumé

La mise et le maintien à poste des satellites sont encore largement réalisés à l'aide de propulseurs chimiques tels que les moteurs bi-liquides NTO/MMH (tetroxyde d'azote / monométhylhydrazine) et les moteurs catalytiques à hydrazine. Toutefois, en raison de son caractère CMR (cancérogène, mutagène, reprotoxique) suspecté chez l'homme, l'Agence Européenne des produits Chimiques (ECHA) a placé l'hydrazine sur la liste des « substances très préoccupantes » via le processus REACh (*Registration, Evaluation, Authorisation and restriction of Chemicals*).

Afin de trouver un remplaçant à ce produit énergétique de nombreux pays ont décidé de rechercher de nouveaux systèmes propulsifs chimiques "verts", c'est-à-dire à toxicité réduite, et présentant des performances accrues, notamment à base de Liquides Ioniques Energétiques (LIE). En France, c'est particulièrement le cas du CNES et de l'ONERA qui ont lancé en 2016 un projet d'intérêt commun Propulsion monergol vert » (PIC PMV). Le présent travail de thèse s'inscrit dans ce projet et poursuit les travaux notamment initiés par Quentin Levard dans sa thèse « Étude expérimentale et numérique de la décomposition d'un liquide ionique énergétique pour le développement d'un propulseur à monergol vert ».

Dans ce travail de thèse nous reprenons cette recherche en nous focalisant sur les deux axes capitaux présents lors de l'allumage et la combustion d'un spray : l'atomisation non-réactive et l'allumage de gouttes isolées. Ainsi, concernant l'étude de l'atomisation, nous avons développé un banc permettant la mesure simultanée de la granulométrie et de l'angle de spray en fonction de la pression d'injection. Enfin, nous avons comparé ces résultats granulométriques avec des relations empiriques issues de la littérature afin de tenter de parvenir à une prédiction fiable de ceux-ci. Ensuite, concernant l'étude de l'allumage et de la combustion de gouttes isolées, nous avons là-aussi développé un banc permettant la visualisation synchrone et superposable de l'allumage d'une goutte en UV et visible. Ce banc nous a notamment permis de confirmer de façon univoque la combustion de monergol vert ainsi que le type de flamme engendré. Pour conclure, nous avons utilisé les connaissances acquises au travers de ces deux axes pour concevoir et mettre à feu un prototype de chambre de combustion à monergol vert ionique.

Mots-clés

Monergol vert ionique, atomisation, allumage, combustion.



Télécharger la thèse : <https://theses.fr/2023ESAE0042>

Christopher Glaser

Thèse soutenue le 29 novembre 2023 à Toulouse

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

Encadrement

Département Multiphysique pour l'énergétique, ONERA, Fauga Mauzac

Directeurs de thèse : Jérôme Anthoine, Jouke Hijlkema, ONERA/DMPE

Jury

Stephen Whitmore, Utah State University

Daniele Bianchi, University of Rome « La Sapienza »

Stefan Schleichtriem, DLR/University of Stuttgart

Grégoire Casalis, ISAE-SUPAERO

Financement

Marie Curie Innovative Training Networks

Contact jerome.antoine@onera.fr

Prix EUCASS « Propulsion » 2023

Résumé

Dans cette thèse, une nouvelle méthodologie de conception d'un bloc de combustible basé sur des marches et augmentant la vitesse de régression a été développée. Elle consiste à assembler de multiples blocs de combustible ayant des configurations différentes (diamètre du canal, longueur, position angulaire). La géométrie interne du combustible est alors approximée par des marches évitant le recours à de l'impression 3D. De plus, ces dernières introduisent des zones de recirculations qui augmentent le mélange entre les réactifs et les transferts thermiques par convection, conduisant alors à un accroissement de la vitesse de régression.

Deux formes des combustibles ont été conçues pendant cette thèse. La géométrie de la première est semi-optimisée et déterminée à l'aide d'un algorithme génétique dans le but de réduire également la variation du rapport de mélange. Elle montre un accroissement de la vitesse de régression jusqu'à 81%. Toutefois, la minimisation de la variation du rapport de mélange n'a pas pu être démontrée de manière concluante. La géométrie de la seconde forme est une hélice étagée (STEPHHY). Elle combine la régression élevée des géométries hélicoïdales avec l'augmentation des transferts convectifs apportée par les marches. STEPHHY permet d'augmenter la vitesse de régression de 245% alors que les géométries hélicoïdales seules ne permettent une augmentation que de 100%. Les essais réalisés démontrent ainsi le potentiel élevé de la combinaison entre une géométrie hélicoïdale et des marches.

Mots-clés

Moteur fusée hybride, augmentation taux de régression, ascension.



Télécharger la thèse : <https://theses.fr/s251484>

Elena Quero Granada

Thèse soutenue le 12 avril 2023 à Toulouse

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

Encadrement

Département Multiphysique pour l'énergétique, ONERA, Fauga Mauzac

Encadrant : Jouke Hijlkema, ONERA/DMPE

Directeurs de thèse : Jérôme Anthoine, Jean-Yves Lestrade, ONERA/DMPE

Jury

Patrick Hendrick, ATM, Université Libre de Bruxelles

Dario Pastrone, PDIMEAS, Politecnico di Torino

Grégoire Casalis, ISAE-SUPAERO

Olivier Orlandi, Airbus Safran Launchers

Financement CNES, ONERA

Contact jerome.antoine@onera.fr

Résumé

La propulsion spatiale hybride est devenue, ces dernières années, de plus en plus attrayante en se plaçant comme l'une des alternatives aux systèmes conventionnels de propulsion chimique pour des raisons de sécurité, de coûts et de performances. Ce type de propulsion est envisagé pour des applications orbitales (positionnement ou désorbitation de satellites), des micro-lanceurs ou encore pour le tourisme spatial. La conception optimisée de cette technologie nécessite la caractérisation du comportement du moteur et la connaissance de ses performances dans différentes configurations. Les

coûts élevés dus à la réalisation de campagnes d'essais ont favorisé le développement de modèles CFD complexes (généralement stationnaires) de la chambre de combustion. Ces codes couplent des modèles de combustion, de turbulence et d'injection pariétale de carburant en fournissant des données détaillées sur le champ aérothermodynamique. Cependant, le temps de calcul associé s'avère considérable lorsque l'on envisage leur application pour des phases d'avant-projet. De l'autre côté du spectre, les modèles simples de chambre de combustion 0-D/1-D employés dans des outils-systèmes, permettent d'obtenir une solution dans un délai plus court. Cependant, ces modèles sont basés sur des relations semi-empiriques, ce qui empêche l'application d'un modèle unique sur des configurations variées de moteurs. Les phases d'avant-projet des systèmes de propulsion nécessitent néanmoins un compromis entre la précision des résultats et le temps de calcul afin de tester efficacement un grand nombre de configurations de moteurs. L'une des solutions envisageables est l'utilisation de modèles 1.5-D. L'objectif de cette thèse est ainsi le développement d'un outil système pour un moteur hybride utilisant un modèle 1.5-D de la chambre de combustion, permettant d'atteindre un compromis entre précision et complexité des calculs. Pour cela, un modèle de chambre de combustion 1.5-D instationnaire et axisymétrique (avec une formulation d'abord non-réactive de l'écoulement et réactive ensuite), et le modèle de tuyère 1-D associé, sont développés. Le taux de régression du combustible de ce modèle est basé sur la loi d'Arrhenius. De plus, le modèle d'interaction gaz-surface permet de décrire les échanges de masse et de chaleur à la surface du combustible. Ces modèles de chambre de combustion et de tuyère sont ensuite validés par la littérature et le moteur hybride de laboratoire HYCAT. Enfin, une analyse de sensibilité a été réalisée pour compléter cette validation et quantifier l'impact des paramètres physiques intervenant dans le modèle de chambre de combustion. Parallèlement au développement de ces deux modèles, le régulateur de débit massique et le catalyseur ont été modélisés en 0-D, puis validés. Ces quatre modèles sont finalement utilisés pour concevoir un outil-système pour un moteur hybride permettant la simulation de toute l'opération en quelques minutes sur un ordinateur de bureau. Cet outil est développé de manière modulaire afin de faciliter l'ajout ou le remplacement des éléments constituant un moteur hybride. Cette architecture permet la simulation d'une grande variété de configurations de moteurs : d'un composant isolé jusqu'au système de propulsion complet. De plus, une méthode itérative basée sur la convergence de la pression dans la chambre de combustion est utilisée pour résoudre l'ensemble du système d'équations entre trois parties du moteur : le sous-système d'alimentation/injection, la chambre de combustion et la tuyère. L'ensemble de l'outil-système pour moteurs hybrides est finalement validé à l'aide des essais HYCAT.

Mots-clés

Propulsion hybride, outil-système, modèle 1.5 D, chambre de combustion, mécanique des fluides, modélisation CFD, moteurs hybrides.

Télécharger la thèse : <https://theses.fr/2023ESAE0031>

Pierre Bernigaud

Thèse soutenue le 19 décembre 2023 à Paris

ED 626 (IPP) - IP Paris - Institut Polytechnique de Paris

Encadrement

Département Multiphysique pour l'énergétique, ONERA, Palaiseau

Encadrant : Dmitry Davidenko, ONERA/DMPE

Directeur de thèse : Laurent Catoire, ENSTA ParisTech

Jury

Yves D'Angelo, Université Côte d'Azur

Stany Gallier, ArianeGroup

Marc Bellenque, Institut PPrime

Christelle Collet, MSIAC OTAN (invitée)

Marc Massot, CMAP, École polytechnique

Financement

DGA/AID, ONERA

Contact dmitry.davidenko@onera.fr

Résumé

Employés dans des moteurs-fusées civils et militaires, les propergols composites sont caractérisés par une structure hétérogène au niveau microscopique. Ils sont constitués principalement de particules oxydantes, d'une matrice de polymère, appelée liant, et éventuellement de particules métalliques. Le liant maintient l'intégrité structurelle du propergol, et fournit par sa pyrolyse des gaz dont la combustion contribue au

dégagement de chaleur dans la flamme. Les produits de combustion des particules oxydantes permettent l'oxydation des autres composants du propergol. Le perchlorate d'ammonium (PA) est un oxydant largement utilisé dans les propergols composites, principalement en association avec un liant polymérique tel que le polybutadiène hydroxytéléchélique (PBHT). Une telle association est alors appelée propergol PA/PBHT. Les propergols nouvelle génération pourraient inclure des nitramines dans leur composition, comme l'hexogène (RDX), en remplacement partiel du PA pour certaines fins spécifiques. En particulier, la réduction de la quantité de PA contenue dans le propergol permet de limiter la formation d'une traînée visible à l'échappement du moteur, réduisant la signature du propulseur. L'objectif de la thèse est d'étudier l'effet de l'inclusion du RDX dans un propergol PA/PBHT conventionnel.

À cette fin, une première partie de la thèse est dédiée à la mise en place des modèles de combustion pour les ingrédients considérés : PA, liant homogénéisé PA/PBHT, et RDX. Un mécanisme de cinétique chimique est mis au point, capable de représenter les processus chimiques caractéristiques de la combustion de l'ensemble de ces matériaux énergétiques. Pour chaque ingrédient, un modèle de décomposition en phase condensée est par ailleurs formulé, pour être associé au mécanisme cinétique. Des simulations unidimensionnelles sont alors réalisées en approche couplée flamme/solide, afin de valider l'ensemble sur les données expérimentales disponibles. De part leur structure hétérogène, l'étude de la combustion d'un propergol composite nécessite l'utilisation de méthodes numériques multidimensionnelles.

Une seconde partie de la thèse est donc dédiée au développement et à la validation d'un code de calcul 2D, permettant la simulation de la combustion d'une particule oxydante entourée d'une couche de liant, en configuration axisymétrique.

Dans une dernière partie, les modèles de combustion mis au point sont utilisés conjointement avec le code de calcul développé afin d'étudier l'effet de l'inclusion du RDX dans un propergol PA/PBHT classique. Pour la première fois, la structure de la flamme produite par un propergol PA/PBHT/RDX est obtenue et caractérisée. Une étude est menée sur l'effet de la pression et de la taille des grains de RDX sur la régression du propergol, mettant en évidence l'existence de différents régimes de combustion. Des recommandations sont faites afin d'optimiser les performances de ce type de composition.

Mot clés

Propergol composite, modèle de combustion, cinétique chimique, combustion hétérogène, PA, PBHT, RDX.

Télécharger la thèse : <https://theses.fr/s252760>



Ilyès Berhouni

Thèse soutenue le 7 décembre 2023 à Meudon

ED 626 (IPP) - IP Paris - Institut Polytechnique de Paris

Encadrement

Département Aérodynamique, acoustique, aéroélasticité, ONERA, Meudon

Encadrants : Didier Bailly, Ilias Petropoulos, ONERA/DAAA

Directeur de thèse : Laurent Jacquin, École polytechnique, ONERA

Jury

Sven Schmitz, PennState Aerospace Engineering, Pennsylvania State University

Paola Cinnella, Institut Jean Le Rond d'Alembert, Sorbonne Université

Éric Laurendeau, Département de génie mécanique, Polytechnique Montréal

Benoît Rodriguez, Safran Tech (invité)

William Thollet, Airbus (invité)

Edoardo Paladini, Safran Aircraft Engines (invité)

Financement

DGAC

Contact didier.bailly@onera.fr

Résumé

L'ambition du secteur de l'aviation civile concernant la réduction de son impact sur l'environnement nécessite le développement de technologies de rupture en termes d'aérodynamique, de motorisation et donc d'efficacité de configurations innovantes. Les moteurs à très haut taux de dilution (UHBR) ou à soufflante non-carénée sont des exemples classiques de technologies visant à réduire la consommation spécifique de carburant. L'analyse des performances de ces configurations nécessite le développement de nouveaux paradigmes théoriques et numériques plus adaptés que les méthodes classiquement utilisées dans l'industrie, reposant par exemple sur des calculs de force.

Cette thèse consiste en l'étude d'une méthode prometteuse basée sur un bilan d'exergie, permettant de prendre en compte les effets mécaniques et thermiques et de réaliser des évaluations de performances sans qu'un partage traînée/poussée ne soit nécessaire. Une étude théorique de la formulation est d'abord réalisée dans un repère inertiel, ce qui permet d'obtenir une version de la formulation adaptée à l'analyse d'écoulements instationnaires. À travers cette première étape, des clarifications et un raffinement concernant l'interprétation des différents termes du bilan sont effectués en terme de décomposition phénoménologique. Le domaine de validité de la formulation est ensuite étendu à l'analyse des écoulements stationnaires dans un repère en rotation (donc non inertiel), et une décomposition phénoménologique du bilan est effectuée afin d'extraire des métriques de performance appropriées pour l'analyse de configurations type turbomachines. Cette nouvelle formulation est finalement utilisée pour l'analyse physique et l'évaluation des performances de configurations d'écoulement stationnaires tournants. Le premier cas d'étude est celui de la configuration externe d'hélice subsonique ONERA HAD-1. Le second est celui de la configuration interne de compresseur transsonique NASA Rotor 37. Dans ces études, des liens physiques sont établis avec les approches classiques d'évaluation de performance, et les informations supplémentaires fournies par le bilan d'exergie sont étudiées.

Mots-clés

Écoulements compressibles, bilan d'exergie, transfert thermique, turbomachines, hélices, FFX.



Télécharger la thèse : <https://theses.fr/s244847>

Nicolas Vauchel

Thèse soutenue le 14 mars 2023 à Lille

ED 72 (SPI) - Sciences pour l'ingénieur - Université de Lille

Encadrement

Département Aérodynamique, acoustique, aéroélasticité, ONERA, Lille

Encadrants : Olivier Rénier, Dominique Farcy, ONERA/DAAA

Directeur de thèse : Thomas Gomez, LMFL, Université de Lille

Jury

Marcello Meldi, LMFL, Lille

Sidonie Lefebvre, ONERA/DOTA

Éric Garnier, ONERA/DAAA

Olivier Le Maître, CMAP, École polytechnique

Franck Cazaurang, IMS, Université de Bordeaux

Financement

Région Hauts de France, ONERA

Contact sidonie.lefebvre@onera.fr

Résumé

Le domaine de vol post-décroché est un domaine aérodynamiquement complexe où l'écoulement autour des surfaces portantes peut présenter de fortes instabilités et être partiellement ou massivement décollé. Dans ce domaine de vol, atteignable de façon accidentelle ou volontaire (avions d'entraînement ou de voltige), les moyens de contrôle usuels sont peu efficaces, voire totalement inefficaces, ce qui peut mettre en danger le

pilote et ses éventuels passagers.

Le travail de recherche s'intéresse à la détermination des prévisions de vol dans le domaine de vol post-décroché, ainsi qu'à leurs dépendances aux structures de modèles utilisées pour les coefficients aérodynamiques et aux incertitudes des données expérimentales sur lesquelles ce modèle repose. La dynamique du mouvement de l'avion est régie par un système dynamique d'équations différentielles ordinaires autonomes non linéaires. Dans ces équations, les effets du fluide sur l'aéronef apparaissent par le biais des coefficients aérodynamiques globaux, qui sont les forces et les moments adimensionnés appliqués par le fluide sur l'aéronef. Ces coefficients dépendent de façon non-linéaire d'un grand nombre de variables, dont la géométrie de l'aéronef, sa vitesse et sa vitesse de rotation par rapport à la Terre, ainsi que des caractéristiques de l'écoulement d'air. Pour chaque coefficient, un modèle de représentation ayant une certaine structure est déterminé pour décrire ces dépendances complexes. Un modèle s'appuie sur des données expérimentales recueillies sur des maquettes de taille réduite. Une autre piste pour l'établissement de ces bases serait d'utiliser des données venant de calculs numériques. Mais le caractère instationnaire et complexe de l'écoulement autour de la géométrie 3D de l'aéronef rend les simulations trop coûteuses en temps de calcul pour le moment, même si des études récentes explorent cette direction de recherche. Les modèles utilisés ici sont bâtis exclusivement sur des données expérimentales. Dans le système dynamique, les coefficients aérodynamiques globaux sont évalués par interpolation dans ces tables de données d'après la structure du modèle choisie. Ces modèles sont lacunaires et entachés d'incertitudes dues au caractère intrinsèque des expériences. Ces lacunes et incertitudes vont impacter les résultats des prévisions de vol.

L'objectif initial de la thèse est d'étudier ces impacts. Au cours des travaux, de nouveaux objectifs scientifiques ont émergé. En premier lieu, une nouvelle méthode multi-éléments basée sur des méthodes modernes d'apprentissage automatique est développée. Les méthodes multi-éléments sont des méthodes qui ont été développées pour pallier au manque de précision des polynômes du chaos en présence de discontinuités. En second lieu, une formule analytique reliant les indices de sensibilité de Sobol aux coefficients d'un métamodèle multi-éléments est démontrée. Ces méthodes sont ainsi utilisées dans le cas de la dynamique du vol pour répondre à l'objectif initial. Les nombreuses bifurcations que possède le système dynamique du vol peuvent se traduire par des irrégularités et/ou des discontinuités dans l'évolution des variables d'état par rapport aux paramètres incertains. Les méthodes d'analyse de sensibilité et de quantification d'incertitude développées sont alors de bonnes candidates pour effectuer l'analyse du système.

Mots-clés

Sécurité, analyse de sensibilité, quantification d'incertitudes, domaine post-décroché.

Télécharger la thèse : <https://theses.fr/2023ULILN008>



Arthur Vervynck

Thèse soutenue le 21 décembre 2023 à Meudon

ED 580 (STIC) - Sciences et technologies de l'information et de la communication -
Université Paris-Saclay

Encadrement

Département Aérodynamique, acoustique, aéroélasticité, ONERA, Meudon

Encadrant : Vincent Mons, ONERA/DAAA

Directeur de thèse : Frédéric Champagnat, ONERA/DTIS

Jury

Taraneh Sayadi, Institut Jean Le Rond d'Alembert, Sorbonne Université

Dominique Heitz, ACTA, INRAE

Jean-Camille Chassaing, Institut Jean Le Rond d'Alembert, Sorbonne Université

Marcello Meldi, LMFL, ENSAM Lille

Luc Pastur, ENSTA, IPP

Charles Soussen, L2S, CentraleSupélec

Financement

ONERA

Contact vincent.mons@onera.fr

Résumé

Cette thèse s'intéresse à la caractérisation d'écoulements instationnaires en couplant des approches expérimentales et numériques (CFD). La PIV (*Particle Image Velocimetry*) est une méthode expérimentale optique qui fournit des champs de vitesses sur un domaine plan ou volumique dont les limitations en résolution spatiale et temporelle réduisent l'accès à certaines quantités d'intérêt, par exemple en proche paroi. La CFD peut résoudre des échelles très fines mais reste limitée en raison d'incertitudes de modélisation ou sur la spécification des entrées des simulations. La combinaison de méthodes expérimentales et numériques par assimilation de données est un moyen de dépasser ces limitations pour améliorer la prédiction et la caractérisation d'écoulements complexes. Une première partie de la thèse s'est consacrée à caractériser par mesures PIV l'écoulement autour d'un profil d'aile à bas Reynolds et d'étudier un phénomène d'oscillation basse fréquence apparaissant proche du décrochage. Un traitement des données expérimentales a été effectué par des techniques spectrales ainsi qu'une analyse des structures spatio-temporelles cohérentes par *Spectral Proper Orthogonal Decomposition* (SPOD). Cependant le temps total de l'acquisition PIV limite l'analyse de ce phénomène basse fréquence. L'assimilation des champs moyens obtenus expérimentalement avec des simulations *Reynolds Averaged Navier-Stokes* (RANS) suivie d'une analyse de résolvant permettent de compléter ces données et de répondre aux limitations constatées.

L'assimilation est alors un moyen d'observer le phénomène d'oscillation basse fréquence ainsi qu'un bulbe de décollement laminaire dans la zone faiblement résolue par les mesures PIV. Une deuxième partie de la thèse s'intéresse au filtrage de données instationnaires avec en vue le développement de techniques d'assimilation permettant la complétion de mesures expérimentales en temps réel. Dans ce contexte, une méthode d'AD de faible complexité numérique basée sur le filtrage de Kalman et la réduction de modèle par *Dynamic Mode Decomposition* (DMD) est développée. La méthodologie proposée, le Catalogue KF (CatKF), est multi-modèle et permet de gérer les incertitudes résultantes de la méconnaissance de paramètres expérimentaux comme la vitesse en soufflerie ou encore l'angle d'attaque d'une aile. L'efficacité du CatKF est testée sur un sillage de cylindre 2D, et l'écoulement autour de deux cylindres carrés côte-à-côte 2D. L'idée fondamentale du CatKF est également étendue pour proposer deux méthodologies originales permettant d'estimer les paramètres incertains.

Mots clés

Assimilation de données, PIV, modèles réduit, décrochage.

Télécharger la thèse : <https://theses.fr/2023UPASG106>

Rafaël Barrellon-Vernay

Thèse soutenue le 20 décembre 2023 à Palaiseau

ED 104 (SMRE) - Sciences de la matière, du rayonnement et de l'environnement -
Université de Lille

Encadrement

Département Multiphysique pour l'énergétique, ONERA, Palaiseau

Encadrant : Ismael K. Ortega, David Delhayé, ONERA/DMPE

Directeur de thèse : Cristian Focsa, PhLAM, Université de Lille

Jury

Richard Miake-Lye, Aerodyne Research (vice president), USA

Beatriz Cabanas Galan, Université de Castille, Espagne

Xavier Mercier, PC2A, Université de Lille

Tuukka Petäjä, Université d'Helsinki, Finlande

Yoann Méry, SAFRAN Aircraft Engine

Financement ANR, ONERA

Contact ismael.ortega@onera.fr

Résumé

L'une des préoccupations actuelles de l'industrie aéronautique est la diminution de la consommation de carburant et de l'empreinte environnementale. En effet, les émissions aéronautiques ont un impact sur la qualité de l'air et notamment au niveau des zones aéroportuaires. Comme d'autres secteurs du transport, le trafic aérien génère des gaz à effet de serre (2 % du total dans le monde), des traînées de condensation ainsi que des particules volatiles et non volatiles (vPM et nvPM).

Pour réduire ces émissions, différentes approches ont été pensées avec en particulier l'usage de carburants aéronautiques durables (SAF - *Sustainable Aviation Fuels*). L'objectif des SAF est de réduire les émissions nettes de CO₂ et de nvPM. Cependant, la combustion de ces carburants peut entraîner la formation de nouveaux polluants qui réagissent avec l'atmosphère en formant des aérosols secondaires (SA). Dans le cadre du projet UNREAL (*Unveiling Nucleation mechanism in aiRcraft Engine exhAust and its Link with fuel composition*), l'objectif de ce travail était d'étudier les différents mécanismes au niveau moléculaire à l'origine de la formation de nouvelles particules à partir des rejets moteurs alimentés par des carburants de compositions différentes, allant du Jet A-1 standard à du carburant 100 % SAF.

La caractérisation physico-chimique des émissions en conditions réelles en sortie moteur est un défi à la fois d'un point de vue technique et économique. Pour pallier à cela un brûleur mini-CAST, adapté à la combustion de carburants liquides aéronautiques, a été utilisé comme alternative pour obtenir des émissions comparables, dans une certaine mesure, à celles des moteurs aéronautiques.

Une diminution des émissions de nvPM (concentration en nombre, concentration en masse et distribution de tailles) peut être observée en corrélation avec la quantité de composés aromatiques présents dans le carburant. De plus, l'analyse par spectrométrie de masse a révélé une diminution de l'intensité relative des hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP) lors de l'emploi de carburant alternatifs. Les émissions du brûleur ont été injectées, avec ou sans filtration des suies, dans une chambre atmosphérique de vieillissement (chambre CESAM reproduisant les conditions atmosphériques au niveau du sol - LISA). Pour tous les carburants testés, la formation de vPM par nucléation homogène a été observée dans la chambre atmosphérique en l'absence de nvPM. Ce phénomène est particulièrement prononcé pour les carburants comprenant de grandes quantités de soufre dans leur composition. Cependant, dans les cas réels (présence de suies), la formation de vPM n'est observée que pour les carburants contenant de fortes quantités de soufre. La concentration de précurseurs gazeux formés pour les autres carburants n'est pas suffisante pour produire des vPM, notamment avec l'adsorption des gaz à la surface des particules de suies (nucléation hétérogène). Les techniques de caractérisation en ligne ont été complétées par des prélèvements sur filtre et une analyse par spectrométrie de masse, mettant en évidence la présence de HAP, d'hydrocarbures oxygénés, de composés soufrés et azotés. En utilisant des méthodes semi-quantitatives, il a été possible de mettre en relation la composition chimique (intensité relative de soufre et de HAP) avec la formation de vPM et leur répartition dans les phases particulaires et gazeuses des émissions.

Mots clés Émissions aéronautiques, particules volatiles (vPM) et non-volatiles (nvPM), chambre atmosphérique, nucléation homogène, carburant aéronautique, brûleur de laboratoire pour carburant liquide.

Télécharger la thèse : <https://theses.fr/s323347>

**Thèses de doctorat ONERA
soutenues en 2023**

**DOMAINE SCIENTIFIQUE
PHYSIQUE**

Thèses de doctorat ONERA soutenues en 2023

DOMAINE PHYSIQUE

Selon les départements et leurs thématiques scientifiques :

ÉLECTROMAGNÉTISME ET RADAR

Antennes, matériaux microonde et technologie pour la furtivité

François Villamizar	Métasurfaces éparses pour la furtivité électromagnétique et les systèmes antennaires reconfigurables	122
----------------------------	--	-----

Compatibilité électromagnétique

Guillaume Dehan	Analyse des effets électromagnétiques des décharges Corona sur les systèmes sol de communication aéronautique	124
------------------------	---	-----

Imagerie radar et télédétection

Milan Rozel	Détection polarimétrique de drone endo-clutter en incidence rasante	126
--------------------	---	-----

Traitement du signal pour le radar et la GE

Maria-Elisavet Chatzitheodoridi	Traitement optimisé des formes d'ondes à modulation de phase continue pour les systèmes conjoints radar-communication : Application à l'imagerie radar	128
Pierre Develter	Nouveaux traitements radar robustes aux erreurs de modèle : le cas des cibles « hors grille »	130

OPTIQUE ET TECHNIQUES ASSOCIÉES

Optoélectronique : photodétection et nanophotonique

Loubnan Abou-Amdan	Sur les propriétés radiatives des dispositifs passifs et actifs sub-longueur d'onde dans le moyen infrarouge	132
Cyprien Brulon	Conversion électromagnétique-thermique dans des dispositifs nanostructurés	134
Adrien Khalili Lazarjani	Avancement de l'imagerie infrarouge basée sur les nanocristaux : Exploration de stratégies novatrices dans la conception et la caractérisation	136

Environnement et signatures pour les senseurs optroniques

Pierrick Chatillon	Réseaux génératifs et contraintes physiques pour la synthèse d'images de nuages et de texture	138
---------------------------	---	-----

Lasers fibrés, lidars et imageurs 3D

Karl Montalban	Perception LiDAR dans des environnements visuels dégradés : une approche probabiliste pour l'analyse de la dégradation et l'inférence de la visibilité	140
Erwan Viala	Augmentation de la résolution latérale d'imageurs laser 3D par <i>compressive sensing</i>	142

Télédétection active et passive

Matthieu Deluzet	Cartographie des espèces d'une forêt par combinaison de données optiques multimodales	144
Nicolas Nesme	Imagerie spectrale satellitaire pour l'observation des émissions anthropiques de gaz atmosphérique à haute résolution spatiale	146
Arnaud Cerbelaud	Télédétection des inondations pluviales à l'aide d'imagerie satellite et d'apprentissage statistique pour l'évaluation de modèles de susceptibilité au ruissellement intense pluvial	148
Rollin Gimenez	Exploitation de données optiques multimodales pour la cartographie des espèces végétales suivant leur sensibilité aux impacts anthropiques	150
Romain Thoreau	Segmentation sémantique d'images hyperspectrales aéroportées (0,4-2,5 μm) pour la cartographie des surfaces imperméabilisées à l'échelle d'une métropole	152

Maîtrise de la surface d'onde, optique adaptative

Hiyam Debary	Observation de la Terre depuis l'Espace par interférométrie optique	154
Émile Klotz	Évaluation de la disponibilité de liens optiques corrigés par optique adaptative grâce à l'apprentissage automatique	156
Nicolas Levraud	Vers l'analyseur de front d'onde ultime pour l'imagerie à haut contraste : application aux télescopes géants	158
Perrine Lognoné	Optimisation des liens télécom sol-GEO haut débit à l'aide de stratégies optiques et numériques	160
Valentina Marulanda Acosta	Distribution quantique de clés à travers la turbulence atmosphérique : liaisons sécurisées satellite-sol	162

Thèses de doctorat ONERA soutenues en 2023

DOMAINE PHYSIQUE

(suite)

Pablo Rodriguez Robles Optique adaptative pour les télécommunications optiques satellite LEO-sol : Modélisation, optimisation et expérimentation 164

Daniel Romero Arrieta Émetteur-récepteur optique cohérent à 100 GBPS pour les environnements de communication point à point Terre-satellite : conception, validation numérique et évaluation expérimentale 166

Alix Yan Restauration d'images corrigées par optique adaptative pour l'observation astronomique et de satellites : approche marginale par échantillonnage 168

Capteurs optiques et imageurs hyperspectraux

Nadine Gerges Procédés de micro-nanotechnologies pour la réalisation de spectromètres imageurs dédiés au sondage atmosphérique 170

Thibaut Mayeur Conception optique freeform ex-nihilo 172

PHYSIQUE, INSTRUMENTATION, ENVIRONNEMENT, ESPACE

Modèles et mesures de l'environnement spatial

Maxime Pinson Étude de la réponse temporelle de la signature d'une particule ionisante sur un moniteur de radiation en environnement spatial : méthode d'identification des particules mises en jeu 174

Interaction de l'environnement spatial avec les matériaux

Carla Costa Étude du comportement des cellules solaires pérovskites aux irradiations protons et électrons 176

Dijwar Ylmaz Synthèse et caractérisation de poly(diméthylsiloxane)s auto-cicatrisants en environnement spatial radiatif 178

Charge et décharges électrostatiques sur satellite

Eva Al Hajj Sleiman Détermination des marges opérationnelles relatives au phénomène multipactor des composants radiofréquences pour la fusion nucléaire contrôlée par confinement magnétique 180

Julie Belfio Optimisation de la morphologie de surfaces métalliques par voies électrochimiques pour le contrôle de l'émission électronique secondaire 182

Lucas Nicolle Modélisation multi-échelle du couplage électrostatique entre un propulseur plasma et les sous-systèmes d'un satellite tout-électrique 184

Quentin Peysson Modélisation 3D des conditions de déclenchement de décharges électrostatiques dans les composants spatiaux HF 186

Foudre, plasma et propulseurs électriques

Séverin Astruc Conception et validation d'un micro-capteur pour la mesure de poussée de propulseurs électriques de satellites 188

Instrumentation et métrologie par spectroscopie laser

Élodie Lin Microscopie CARS en régime hybride fs/ps pour l'étude des nanomatériaux 2D et la prévention de risques explosifs et biologiques 190

Micro/nano-systèmes (MEMS/NEMS) et capteurs inertiels miniatures

Lucas Hudeley Du concept à l'analyse des performances d'un microgyromètre innovant, axisymétrique et résonnant en technologie SOI 192

Vincent Malesys Fabrication et caractérisation de dispositifs à base de graphène, graphène-fluoré et d'hétérostructures graphène/nitride de bore en vue d'applications à des capteurs de gaz 194

Pablo Rodriguez Robles Optique adaptative pour les télécommunications optiques satellite LEO-sol : Modélisation, optimisation et expérimentation 164

François Villamizar

Thèse soutenue le 23 novembre 2023 à Toulouse

ED 323 (GEET) - Génie électrique, électronique et télécommunications - Institut supérieur de l'aéronautique et de l'espace, Toulouse

Encadrement

Département Électromagnétisme et radar, ONERA, Toulouse

Encadrants : Shah Nawaz Burokur, LEME, Université Paris Nanterre
Fabrice Boust, ONERA/DEMR

Directeurs de thèse : André Barka, Cédric Martel, ONERA/DEMR

Jury

Robert Staraj, LEAT, Université Côte d'Azur

Xavier Begaud, Telecom Paris, Institut Polytechnique de Paris

Nathalie Raveu, LAPLACE, Toulouse INP

Uladzislau Papou, Greenerwave

Guido Valerio, GeePs, Sorbonne Université

Financement Région Occitanie, ONERA

Contact cedric.martel@onera.fr

Résumé

Les métamatériaux sont des matériaux artificiels composés d'éléments plus petits que la longueur d'onde. Les métasurfaces sont une version 2D des métamatériaux ayant une très faible épaisseur. Une sélection des éléments constitutifs permet le contrôle du front d'onde réfléchi et/ou transmis, conduisant ainsi à des structures aux propriétés électromagnétiques uniques et au développement de nouvelles fonctionnalités. Les



métasurfaces répondent en principe à la forte demande en miniaturisation et diminution des coûts des systèmes antennaires pour petits porteurs, tels que les avions et les drones. Mais les premières versions accordables souffraient d'une faible efficacité de rayonnement. En effet, les métasurfaces classiques reposent d'une part, sur une densité élevée d'éléments qui requiert un nombre élevé de composants électroniques. D'autre part, leur modélisation se fait à l'aide d'impédances de surfaces qui limitent le contrôle du front d'onde.

En 2017, Y. Ra'di a proposé un nouveau concept basé sur la théorie des réseaux diffractants : les métaréseaux. Les éléments qui les composent, modélisés par des fils infinitésimaux, sont séparés d'une distance de l'ordre de la longueur d'onde, contrairement aux métasurfaces denses, pour lesquelles cette distance est de l'ordre de $\lambda/10$. Le nombre d'éléments à piloter est ainsi drastiquement réduit. De plus, comme les métaréseaux sont des structures périodiques, s'étendant théoriquement à l'infini, leur conception à l'aide d'un solveur numérique est peu gourmande en ressources informatiques. Leur synthèse repose notamment sur une approche par analyse modale ; les interférences constructives et destructives des modes de diffractions permettent de rediriger l'énergie dans des modes désirés. Ils sont limités à des surfaces planes, périodiques et illuminées par des ondes planes.

Récemment, V. Popov et al. ont introduit des métasurfaces dites éparses ou à faible densité, qui reprennent la structure des métaréseaux en s'affranchissant des limitations évoquées. La conception repose sur un calcul numérique des fonctions de Green associées aux fils, en nombre fini, qui composent la métasurface. Les métasurfaces éparses ne sont plus assujetties à une illumination par onde plane et peuvent donc être illuminées par une source au front d'onde arbitraire. Bien que cette nouvelle famille comble le fossé entre métaréseaux et métasurfaces denses, jusqu'ici, peu d'applications exploitent ce nouveau concept.

Nos travaux consistent à proposer des évolutions aux bases théoriques existantes ainsi que de nouvelles structures permettant un contrôle dynamique du champ électromagnétique à bas coût. Les applications visées pour nos métasurfaces éparses sont multiples. Dans un premier temps, nous visons une application de furtivité en concevant des métasurfaces éparses capables de réduire le champ rétrodiffusé par des cylindres métalliques. Nous cherchons ensuite à développer des systèmes antennaires électroniquement reconfigurables. Alors que le premier système antennaire proposé fonctionne en réflexion et permet le dépointage de faisceaux pour deux polarisations linéaires orthogonales, le second système, plus compact, fonctionne en transmission. Plus particulièrement, nous développons une antenne à cavité reconfigurable. Tout au long de l'étude, nous exploitons la facilité d'intégration d'éléments actifs permettant de rendre la métasurface reconfigurable.

Mots-clés

Métamatériaux accordables, antennes multifonctions, métasurfaces, réduction de surface équivalente radar.

Télécharger la thèse : <https://theses.fr/s254212>

Guillaume Dehan

Thèse soutenue le 15 décembre 2023 à Toulouse

ED 323 (GEET) - Génie électrique, électronique et télécommunications -
Institut supérieur de l'aéronautique et de l'espace, Toulouse

Encadrement

Département Physique, instrumentation, environnement, espace, ONERA, Toulouse

Encadrants : Hélène Galiegue, EMA, ENAC ; François Issac, ONERA/DEMR

Directeur de thèse : Alexandre Chabory, EMA, ENAC

Jury

Farhad Rachidi, EMC, Swiss Federal Institute of Technology (EPFL)

Christophe Guiffaut, XLIM, Universités de Limoges et de Poitiers

Françoise Paladian, Institut PASCAL, Université Clermont Auvergne

Olivier Pascal, Université Toulouse III - Paul Sabatier

Financement

ONERA

Contact francois.issac@onera.fr

Résumé

Les décharges Corona sont des phénomènes de décharges électrostatiques partielles qui peuvent se produire au sommet de pylônes ou de structures métalliques élevées, déclenchées par un gradient de champ électrique important, comme en cas de mauvaises conditions climatiques. Leur effet a été étudié suite à l'implantation d'antennes de télévision dans les années 50, car ce phénomène provoquait des dégradations de la qualité de la réception vidéo lorsque les conditions météorologiques devenaient orageuses. La mise en place de radômes sur les antennes a permis de résoudre les problèmes sur les canaux vidéo. Cependant, des problèmes persistent en bande VHF. Ainsi, en conditions orageuses, certaines communications bord-sol (bande VHF) sont fortement dégradées par des bruits parasites, dont l'origine a été attribuée au phénomène de décharges Corona. Des solutions ont été mises en place mais ne sont pas complètement efficaces, par manque de compréhension des étapes de déclenchement des décharges, de propagation de courants parasites et de couplage antennes/structure.

L'objectif de cette thèse est de mieux comprendre les mécanismes physiques d'apparition et d'entretien de ces courants parasites, pour proposer des solutions techniques adaptées, avec notamment la conception de pièges de courants. Des campagnes de mesures sur site et en laboratoire ont été menées. Un important travail de modélisation a également été effectué.

Mots clés

Électromagnétisme, antenne, décharge corona.

Milan Rozel

Thèse soutenue le 26 octobre 2023 à Palaiseau

ED 580 (STIC) - Sciences et technologies de l'information et de la communication -
Université Paris-Saclay

Encadrement

Département Électromagnétisme et radar, ONERA, Palaiseau

Encadrant : Pierre Bruneel, ONERA/DEMR

Directrice de thèse : Hélène Oriot, ONERA/DEMR

Jury

Marco Martorella, Microwave and Integrated Systems Laboratory, Univ. of Birmingham

Laurent Ferro-Famil, ISAE-SUPAERO

Stéphanie Bidon, ISAE-SUPAERO

Fadela Kabeche, DGA (invitée)

Philippe Forster, SITEC, Université de Nanterre

Financement DGA/AID, ONERA

Contact pierre.bruneel@onera.fr

Résumé

La miniaturisation de l'électronique embarquée a permis le développement de drones de petites tailles et d'un large marché civil pour ces drones. La simplicité d'utilisation et le bas coût de ces drones en font des outils redoutables pour des personnes ou organisations mal intentionnées. Les systèmes radar peuvent alors jouer un rôle important pour contrecarrer une attaque menée avec une ou plusieurs unités. Néanmoins, ces derniers volent généralement à faible vitesse et proches du sol. Et ils ont

généralement une faible surface équivalente radar. Ces cibles posent donc des problèmes aux systèmes radar qui ont du mal à les différencier du sol.

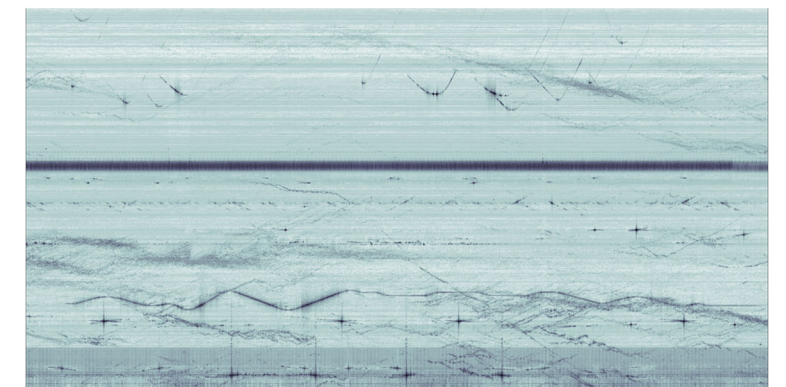
Le but de cette thèse est d'améliorer les capacités de détection endo-clutter de drones en utilisant la polarisation. Nous présentons une méthode permettant d'étudier les propriétés du clutter terrestre polarimétrique. Nous proposons des méthodes de simulation permettant d'identifier le meilleur détecteur dans une scène avec un clutter changeant sur les axes temporel et spatial. Nous étudions les avantages des détecteurs polarimétriques par rapport aux détecteurs mono-polarimétriques à l'aide d'une méthode de comparaison des détecteurs qui permet de choisir le meilleur détecteur en fonction des propriétés du clutter.

Pour atteindre cet objectif, nous analysons les propriétés spatio-temporelles du clutter à l'aide des données d'une campagne de mesure radar en environnement semi-urbain. Cette campagne de mesure nous permet de mettre en exergue des propriétés importantes du clutter telles que : la non-réciprocité du clutter polarimétrique pour un radar dont les antennes de réception des différentes polarisations sont distinctes, l'existence d'un temps d'intégration Doppler optimisant la stabilité du clutter et une instabilité de la signature polarimétrique du clutter. Nous proposons de modéliser l'évolution temporelle du clutter en utilisant conjointement, la distribution des valeurs propres de sa matrice de covariance, et, l'angle entre les matrices de covariances d'une même case clutter à deux instants différents. Cet angle est appelé « angle de désadaptation ». Dans une deuxième phase nous comparons un ensemble de détecteurs polarimétriques et mono-polarimétriques pour des détections endo-clutter. Pour cela : (i) Nous étudions l'influence du rang efficace de la matrice de covariance du clutter - contrôlé par le temps d'intégration Doppler - sur les performances des détecteurs et montrons que la minimisation du rang effectif améliore les performances des détecteurs ; (ii) nous étudions les effets de l'angle de désadaptation sur les performances des détecteurs en fonction du clutter sélectionné ; (iii) nous constatons que les détecteurs filtrant le clutter ont des performances qui diminuent avec l'intervalle de temps entre l'estimation des propriétés du clutter et la réalisation du test de détection, alors que les autres détecteurs ont des performances qui ne sont pas affectées par cet intervalle de temps ; (iv) nous montrons que les détecteurs polarimétriques sont plus adaptés aux détections de drones endo-clutter que les détecteurs mono-polarimétriques.

Les méthodes d'analyse que nous avons présentées permettent d'optimiser le temps d'intégration Doppler et peuvent être utilisées dans les systèmes radar pour déterminer, de manière adaptative, le meilleur détecteur, en fonction du clutter étudié.

Mots-clés

Polarimétrie, radar, drone, fouillis.



Time-Distance map of a complex environment containing low speed targets, including a UAV, measured with the HYCAM S-Band radar.

Télécharger la thèse : <https://theses.fr/2023UPAST147>

Maria-Elisavet Chatzitheodoridi

Thèse soutenue le 3 février 2023 à Gif sur Yvette

ED 580 (STIC) - Sciences et technologies de l'information et de la communication
- Université Paris-Saclay

Encadrement

Département Électromagnétisme et radar, ONERA, Palaiseau

Encadrants : Abigaël Taylor, Olivier Rabaste, ONERA/DEMR

Directrice de thèse : Hélène Oriot, ONERA/DEMR

Jury

Sylvie Marcos, L2S Paris-Saclay

Thierry Chonavel, IMT Atlantique, Université de Rennes 1

Laurent Ferro-Famil, CESBIO

Pierfrancesco Lombardo, University of Rome « La Sapienza »

Henri Ruggiero, DGA (invité)

Financement

ONERA

Contact abigael.taylor@onera.fr

Best Student Paper Award EUSAR2022 conference

Résumé

En raison de la croissance continue des applications électromagnétiques, le spectre devient de plus en plus encombré. Une solution possible pour limiter l'encombrement consiste à créer des systèmes radar-communication joints qui utilisent la même bande passante pour réaliser les deux applications.

Dans cette thèse, nous nous intéressons à un système exploitant une forme d'onde issue du monde des communications pour réaliser conjointement de l'imagerie radar et un transfert d'information. Pour cela, parmi la multitude de codes existants, nous avons choisi d'utiliser des codes modulés continument en phase CPM, et plus particulièrement une sous-famille appelée *Continuous Phase Frequency Shift-Keying* codes. Les propriétés de ceux-ci, notamment en ce qui concerne l'occupation spectrale, sont d'abord étudiées et comparées à d'autres codes représentatifs des communications.

Cependant, ces formes d'ondes présentent des qualités de compression dégradées par rapport au *chirp* habituellement utilisé en radar. En particulier les lobes secondaires résultant de la compression avec le filtre adapté sont plus élevés, nuisant à la qualité de l'image SAR résultante. Un filtre désadapté qui minimise l'énergie des lobes secondaires est proposé, ainsi qu'un algorithme rapide qui fournit les filtres pour tous les signaux émis en un temps de calcul raisonnable. Ce filtre désadapté est amélioré pour pouvoir traiter des valeurs inconnues de décalage Doppler ou de retard hors grille qui peuvent s'appliquer sur le signal reçu. De tels problèmes peuvent être généralisés à d'autres applications radar que le SAR. Une fois le choix de la méthode de compression d'impulsion établi, une évaluation des résultats est proposée. D'une part, des images SAR re-synthétisées sont générées, reconstruites à partir de données réelles basées sur le *chirp*, en utilisant des codes modulés continument en phase et les filtres désadaptés, et différents outils de comparaison sont utilisés pour s'assurer de leurs performances. D'autre part, des données réelles sont acquises dans un cadre ISAR, afin de valider notre système dans un contexte réaliste. Finalement, nous pouvons apporter une réponse positive à la question suivante : pouvons-nous créer un système conjoint SAR-communication qui transmet des informations et fournit des images radar de haute qualité ?

Mots-clés

Radar à synthèse d'ouverture, communications, filtre désadapté, modulation à phase continue, forme d'onde.

Télécharger la thèse : <https://theses.fr/2023UPAST022>

Pierre Develter

Thèse soutenue le 18 décembre 2023 à Gif sur Yvette

ED 580 (STIC) - Sciences et technologies de l'information et de la communication -
ENS Paris-Saclay

Encadrement

Département Électromagnétisme et radar, ONERA, Palaiseau

Encadrants : Jonathan Bosse, Olivier Rabaste, ONERA/DEMR

Directeur de thèse : Philippe Forster, SITEC, Université de Nanterre ;
Jean-Philippe Ovarlez, ONERA/DEMR

Jury

Sylvie Marcos, L2S CentraleSupélec

Audrey Giremus, IMS, Université de Bordeaux

Olivier Besson, ISAE-SUPAERO

Guillaume Ginolhac, LISTIC, Université Savoie Mont-Blanc

Éric Chaumette, ISAE-SUPAERO

Financement

SONDRA, ONERA

Contact jonathan.bosse@onera.fr

Résumé

Le problème de détection d'une cible radar est classiquement représenté par un test d'hypothèse binaire. Quand tous les paramètres sont connus, pour résoudre ce test, on utilise le test du rapport de vraisemblance, optimal au sens de Neyman-Pearson. Cependant, ce cas de figure n'est pas réaliste et en contexte opérationnel, le test d'hypothèse dépendra de plusieurs paramètres inconnus. Une stratégie populaire consiste à introduire les estimateurs du maximum de vraisemblance dans le test de détection : c'est le test du rapport de vraisemblance généralisé (TRVG). Quand les paramètres inconnus sont non linéaires, il n'existe en général pas de forme analytique pour les estimateurs du maximum de vraisemblance. En détection radar, ces paramètres correspondent notamment à la distance et à l'angle de la cible ou à son effet Doppler. La stratégie retenue en pratique consiste à effectuer des tests pour des valeurs de paramètres fixées sur une grille discrète. Cela induit une désadaptation entre les vrais paramètres de cible et les paramètres sous test, qui en retour dégrade les performances de détection du test.

L'objectif de cette thèse est d'étudier l'impact des effets de grille sur la détection radar ainsi que la recherche et l'étude de stratégies à mettre en œuvre pour le contrer. Une attention particulière est donnée à l'approximation et l'étude des TRVG hors-grille, définis comme les TRVG classiques (filtre adapté, filtre adapté normalisé), testés en continu sur l'espace de recherche des paramètres de cibles. Ces détecteurs présentent les meilleures performances de détection connues dans la littérature en présence de cibles hors-grille mais, d'une part, leur statistique est difficile à évaluer, et, d'autre part, une implémentation précise de ces tests en pratique semble coûteuse.

Mots-clés

Traitement du signal, robustesse, théorie de la détection, radar.

Loubnan Abou-Amdan

Thèse soutenue le 10 février 2023 à Paris

ED 564 (PIF) - Physique en Ile de France - ESPCI ParisTech

Encadrement

Département Optique et techniques associées, ONERA, Palaiseau

Directeurs de thèse : Patrick Bouchon, ONERA/DOTA ; Yannick De Wilde, ESCPI

Jury

Nicolas Bonod, Institut Fresnel, Marseille

Natalie Del Fatti, Institut lumière-matière, Univ. Lyon

Emmanuel Baudin, LPENS, Paris - PSL

Jérémie Drévilon, Institut Pprime, Poitiers

Thierry Taliercio, IES, Univ. Montpellier

Riad Haïdar, ONERA

Financement

ONERA

Contact patrick.bouchon@onera.fr

Résumé

Les métamatériaux infrarouges ont été utilisés dans un large éventail d'applications, telles que le refroidissement radiatif, la photodétection et la conception de cellules solaires. Les éléments constitutifs de ces matériaux sont des structures de taille sub-longueur d'onde qui présentent de nombreux effets d'antenne intéressants, à savoir une émission directionnelle, une sélectivité spectrale, ainsi qu'une exaltation du confinement du champ. L'étude des propriétés radiatives intrinsèques de ces structures sub-longueur d'onde est une étape cruciale vers l'optimisation de la réponse optique des métasurfaces à grande échelle. Traditionnellement, l'étude des propriétés radiatives des structures individuelles sub-longueur d'onde est extrêmement difficile en raison de leur rayonnement électromagnétique intrinsèquement faible. Dans la gamme spectrale du moyen infrarouge, le rayonnement du fond est dominant. Dans cette thèse, nous repoussons les limites de diverses techniques hautement sensibles, telles que la spectroscopie à modulation spatiale infrarouge et la microscopie optique en champ proche à pointe diffusante, pour sonder le rayonnement électromagnétique intrinsèque dans le moyen infrarouge de structures sub-longueur d'onde composées d'un ou plusieurs éléments. Un pot-pourri de structures sub-longueur d'onde est examiné et discuté, couvrant un large spectre allant, des antennes diélectriques et plasmoniques passives aux transistors à effet de champ en graphène polarisés électriquement. Les propriétés fondamentales et les interactions associées à ces structures sont étudiées, avec un accent particulier mis sur l'influence des propriétés géométriques et des matériaux sur la réponse en champ proche et lointain. Les résultats présentés dans cette thèse et la discussion associée sont d'un intérêt particulier pour les applications photoniques dans lesquelles une adaptation du spectre moyen infrarouge à l'échelle sub-longueur d'onde est requise.

Mots-clés

Sub-longueur d'onde, moyen infrarouge, champ proche, champ lointain, antennes, polaritons de surface.

Cyprien Brulon

Thèse soutenue le 19 janvier 2023 à Palaiseau

ED 572 (EDOM) - Ondes et matière - Université Paris-Saclay

Encadrement

Département Optique et techniques associées, ONERA, Palaiseau

Encadrant : Baptiste Fix, ONERA/DOTA

Directeur de thèse : Patrick Bouchon, ONERA/DOTA

Jury

Renaud Bachelot, L2N, Université technologique de Troyes

Jean-François Lampin, IEMN, Université de Lille

Pascale Roy, Synchrotron SOLEIL

Sarah Houver, MPQ, Université Paris Cité

Patrice Genevet, CRHEA, Université Côte d'Azur

Sylvie Paolacci-Riera, DGA/AID (invité)

Arnaud Susset, R&D Vision (invité)

Financement

DGA/AID, ONERA

Contact baptiste.fix@onera.fr

Résumé

L'imagerie dans la gamme térahertz (10 THz à 0.1 THz) est en plein développement du fait de l'interaction particulière de la lumière avec la matière à ces longueurs d'onde et des nombreuses perspectives d'application associées. Cependant, cette portion du spectre électromagnétique est restée longtemps inexploitée du fait du manque de sources commerciales puissantes mais aussi de détecteurs performants accessibles. Le but de cette thèse est de concevoir et de développer une technologie d'imagerie térahertz potentiellement multispectrale et bas coût en se basant sur un principe de thermoconversion. Une membrane absorbe une partie des ondes térahertz, s'échauffe et émet un rayonnement thermique qui est capté par une caméra infrarouge.

L'originalité de ces travaux réside dans l'utilisation de métasurfaces térahertz plasmoniques comme membranes de conversion pour améliorer les performances en sensibilité et en temps de réponse tout en apportant des informations supplémentaires de type spectral, en polarisation ou en angle d'incidence sur le rayonnement térahertz. Cette thèse présente toutes les étapes nécessaires à la conception de ces membranes de conversion THz-IR en commençant par les outils de simulations électromagnétiques et thermiques nécessaires à l'optimisation des structures résonantes sub-longueur d'onde les constituant. De plus, la fabrication additive par impression jet d'encre des membranes simulées ainsi que leur caractérisation optique puis thermique par thermographie résolue en temps ont été implémentées. Enfin, l'utilisation de ces mêmes membranes dans un schéma de détection active a mené à l'imagerie d'objets cachés. Ces travaux constituent une preuve de concept forte de la thermoconversion appliquée à l'imagerie multispectrale térahertz et peuvent être exploités pour le développement d'une nouvelle technologie de détection bas coût.

Mots-clés

Térahertz, imagerie, métasurfaces, thermique.

Adrien Khalili Lazarjani

Thèse soutenue le 4 octobre 2023 à Paris

ED 397 - Physique et chimie des matériaux - Sorbonne Université

Encadrement

Département Optique et techniques associées, ONERA, Palaiseau

Encadrant : Grégory Vincent, ONERA/DOTA

Directeur de thèse : Emmanuel Lhuillier, INSP, Sorbonne université

Jury

Thierry Talierco, IES, Université de Montpellier

Hervé Rinnert, IJL, Université de Lorraine

Philippe Guyot-Sionnest, Université de Chicago

Eva Izquierdo, Thalès (invité)

Christophe Testelin, INSP, Sorbonne Université

Financement

CNRS

Contact gregory.vincent@onera.fr

Résumé

L'infrarouge est une région du spectre électromagnétique avec des longueurs d'onde plus longues que celles de la lumière visible. Cette gamme spectrale fournit des informations complémentaires au domaine visible, et trouve des applications dans divers domaines tels que la défense, l'astronomie, et les technologies civiles émergentes dont le LiDAR dans les véhicules autonomes, ou la reconnaissance faciale dans nos smartphones. Alors que la technologie de détection à base de silicium règne sur le marché du visible, son équivalent reste à développer dans l'infrarouge. Les nanocristaux colloïdaux offrent une voie prometteuse pour la réalisation de capteurs infrarouges performants et économiques. Ces objets cristallins synthétisés chimiquement présentent des effets de confinement quantique, qui permettent d'ajuster leurs propriétés optiques avec leur taille. Parmi les nanocristaux absorbant l'infrarouge, j'ai utilisé des nanocristaux de chalcogénures de mercure (HgX) qui peuvent adresser toute la gamme infrarouge du visible à la région THz. Au cours de ma thèse, j'ai exploré des concepts innovants liés à la fois aux propriétés matérielles des nanocristaux et à la conception de géométries de dispositifs complexes avec un couplage lumière-matière exalté.

En particulier, j'ai proposé différentes approches pour découpler les propriétés optiques et de conduction dans les photodétecteurs à base de nanocristaux HgX, afin d'atteindre des performances de détection de pointe. De plus, j'ai entrepris une nouvelle approche en utilisant des mesures in operando, axées sur l'étude du matériau dans le contexte du dispositif lui-même, plutôt que de les considérer comme des entités distinctes.

Mots-clés

Détection infrarouge, nanocristaux, optoélectronique, hétérostructure, imagerie.

Pierrick Chatillon

Thèse soutenue le 19 décembre 2023 à Palaiseau

ED 626 (IPP) - IP Paris - Institut Polytechnique de Paris

Encadrement

Département Optique et techniques associées, ONERA, Palaiseau

Directeurs de thèse : Yann Gousseau, Télécom ParisTech ;
Sidonie Lefebvre, ONERA/DOTA

Jury

Bruno Galerne, Institut Denis Poisson, Université d'Orléans

Javier Portilla, Spanish National Research Council

Agnès Desolneux, centre Borelli, ENS Paris Saclay

Coloma Ballester, Universitat Pompeu Fabra, Barcelone

Frédéric Szczap, LAMP, Université Clermont Auvergne

Céline Sorret, DGA (invité)

Christophe Guilmart, DGA/AID (invité)

Financement DGA/AID, ONERA

Contact sidonie.lefebvre@onera.fr

Résumé

Évaluer la performance des capteurs optiques nécessite notamment de disposer de scènes de référence et de prendre en compte la variabilité des objets d'intérêt et de l'arrière-plan. Générer rapidement des images reproduisant les niveaux radiométriques et la texture des fonds naturels est essentiel pour enrichir les bases de données expérimentales ou remplacer les codes de simulation coûteux, pour l'estimation de quantités statistiques.

Notre travail vise à générer des bases de données d'images de nuages en utilisant des approches d'apprentissage profond par réseaux génératifs pour produire des images de grande taille à partir d'un petit nombre de données mesurées ou de simulations coûteuses, tout en maintenant la cohérence spectrale et radiométrique des images. Nous nous limitons à des données 2D de type RGB, monospectrales en infra-rouge ou bien de contenu en eau /glace, mais les méthodes proposées peuvent être étendues à des données multispectrales.

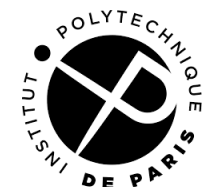
Les méthodes traditionnelles de synthèse physique sont limitées en termes de résolution spatiale si la zone à couvrir est importante. Par conséquent, nous avons exploré deux approches de super-résolution pour augmenter la résolution spatiale des images. Les deux approches relèvent des méthodes internes de super-résolution, c'est à dire qui exploitent la redondance de l'information présente dans une seule image, à différents endroits et différentes échelles. Elles tirent parti des propriétés fractales des fonds nuageux, et utilisent un réseau génératif comme modèle commun pour différentes résolutions. La première approche consiste à maintenir des propriétés statistiques d'intérêt au cours du processus de super-résolution, telles que la propriété de décroissance en puissance du spectre de Fourier, qui forme un descripteur essentiel des textures nuageuses. Le réseau est entraîné selon le paradigme des réseaux génératifs antagonistes, comme dans SinGAN, la méthode dont découle ce travail. La deuxième approche est similaire à la première, mais ne déploie pas d'entraînement adversarial, diminuant ainsi le temps d'entraînement. La décroissance spectrale en puissance n'est pas imposée mais encouragée par l'utilisation d'une pondération fractale du bruit multi-échelle utilisé pour la stochasticité de la méthode.

Dans un second temps, nous avons exploré des méthodes de synthèse de textures. Nous proposons une méthode de génération d'images de nuages à partir de paramètres physiques. Ce modèle génératif est capable de contrôler le comportement spectral et le comportement de l'histogramme des images générées, garantissant ainsi que les statistiques souhaitées sont respectées. Ce dernier exploite à nouveau une pondération appropriée du bruit multi-échelle pour asservir la pente spectrale. La dernière partie de cette thèse traite de synthèse de texture d'un point de vue général, et propose une structure d'auto-encodeur adaptée aux textures, enrichie pour traiter le cas des textures présentant des motifs périodiques. Cette architecture extrait des statistiques non locales d'images, et permet de nombreuses synthèses différentes à partir d'une seule texture exemple. Ces deux approches tirent parti de l'architecture multi-échelle de StyleGAN.

Dans son ensemble, notre travail contribue à la génération d'images de nuages réalistes à partir de données en nombre limité, en préservant les propriétés spectrales et radiométriques, grâce à des approches multi-échelles tirant parti des caractéristiques fractales des nuages.

Mots-clés Modèles génératifs, synthèse de texture, super-résolution, nuages.

Télécharger la thèse : <https://theses.fr/s301972>



Karl Montalban

Thèse soutenue le 18 septembre 2023 à Toulouse

ED 467 (AA) - Aéronautique, astronautique - Institut supérieur de l'aéronautique et de l'espace, Toulouse

Encadrement

Département Optique et techniques associées, ONERA, Toulouse

Encadrants : Paul-Edouard Dupouy, ONERA/DOTA ; Dinesh Atchutha, EasyMile

Directeurs de thèse : Nicolas Rivière, ONERA/DOTA ; Simon Lacroix, LAAS-CNRS

Jury

Fawzi Nashashibi, INRIA

Andrew Wallace, Herriot Watt University

Mariana Batista CAMPOS, Finnish Geospatial Research Institute

Thierry Peynot, Queensland University of Technology

Tristan Allouis, YellowScan (invité)

Financement

CIFRE EasyMile

Contact paul-edouard.dupouy@onera.fr

Résumé

Cette thèse se concentre sur les défis de la conduite autonome dans des environnements visuels dégradés (DVE). Les DVE désignent les conditions environnementales (ex. pluie, brouillard, fumée) qui dégradent les capacités de perception des véhicules autonomes, en particulier ceux qui reposent sur la technologie LiDAR 3D. L'objectif de la thèse est de quantifier les dégradations induites par les DVE sur les nuages de points LiDAR et de développer un modèle d'inférence bayésien pour améliorer la perception dans les DVE. Les contributions comprennent une analyse quantitative des impacts des DVE, un modèle d'inférence bayésien pour récupérer la visibilité à partir des nuages de points 3D, et des propositions d'utilisation du modèle pour améliorer la perception dans les DVE. La thèse est divisée en deux parties : la première présente le contexte, la technologie LiDAR 3D et les scénarii de DVE, la seconde présente la méthodologie, les résultats expérimentaux et le modèle d'inférence développé.

L'approche globale souligne l'importance de comprendre et de résoudre les effets des DVE sur la conduite autonome afin d'améliorer la sécurité et la fiabilité.

Mots-clés

Imagerie laser, lidar 3D, navigation autonome, traitement du signal, faible visibilité, mauvaises conditions météorologiques.

Erwan Viala

Thèse soutenue le 9 octobre 2023 à Toulouse

ED 467 (AA) - Aéronautique, astronautique - Institut supérieur de l'aéronautique et de l'espace, Toulouse

Encadrement

Département Optique et techniques associées, ONERA, Toulouse

Encadrant : Paul-Edouard Dupouy, ONERA/DOTA

Directeurs de thèse : Nicolas Rivière, ONERA ;
Laurent Risser, Institut de Mathématiques de Toulouse

Jury

Bertrand Le Saux, European Space Agency

Basarab Adrian, INSA Lyon

Jean-François Aujol, Institut de Mathématiques de Bordeaux

Olivier Meyer, DGA (invité)

Financement

Région Occitanie, ONERA

Contact erwan.viala@onera.fr

Résumé

L'observation active à longue distance au-delà de 10 km à partir de systèmes embarqués infrarouges à 1550 nm est bénéfique dans de nombreuses applications. Les capteurs idoines sont constitués de matrices de type GmAPD et sont intégrés dans des systèmes actifs 3D à comptage de photons. Cependant leur résolution latérale est limitée à quelques centaines de pixels de grandes tailles par rapport au standard en imagerie passive. Ainsi l'objet de cette thèse est l'amélioration de la résolution latérale de ces imageurs actifs 3D à comptage de photons. Pour cela une chaîne complète de traitement du signal a été développée (CRISPS-3D) afin d'appliquer le *Compressive Sensing* aux données 3D acquises. Le *Compressive Sensing* permet d'augmenter la résolution de ces imageurs en limitant l'impact sur le taux de rafraîchissement induit par l'augmentation de la résolution en comparaison avec des méthodes de balayages traditionnelles. Actuellement, les méthodes de *Compressive Sensing* sont généralement limitées à l'imagerie passive ou active monopixel. Une fois la chaîne CRISPS-3D définie pour des impulsions laser brèves, cette thèse porte sur son extension à un paradigme plus large. Une première étape consiste à prendre en compte des durées d'impulsions laser plus élevées pour maintenir une bonne résolution télémétrique tout en offrant la possibilité d'utiliser une gamme de sources laser plus exhaustive. La seconde étape concerne l'adaptation du mouvement relatif des cibles et de la plateforme dans CRISPS-3D. Notons que peu d'études considèrent le mouvement pendant une acquisition modulée pour l'application du *Compressive Sensing*. Les effets potentiels sur la reconstruction sont parfois incertains et il est nécessaire de les appréhender pour pouvoir les corriger.

Dans cette thèse, nous proposons une méthode de reconstruction en supposant que le mouvement est suffisamment régulier pour que l'on puisse l'estimer et le corriger localement même avec très peu d'acquisitions. Notre méthode est démontrée et validée pour des translations et des rotations dans les plans parallèles au plan focal de la caméra. Les imageurs actifs 3D embarqués sont de plus en plus utilisés dans de nombreuses applications. La présente thèse expose une approche nouvelle dédiée au traitement de données d'imageurs actifs 3D à comptage de photons en tenant compte du mouvement. Notre méthode s'avère être particulièrement pertinente dans le cadre d'applications embarquées.

Mots-clés

Imagerie laser 3D, *Compressive Sensing*, comptage de photons, lidar 3D, télémétrie, haute résolution.



Télécharger la thèse : <https://theses.fr/2023ESAE0049>

Matthieu Deluzet

Thèse soutenue le 4 avril 2023 à Toulouse

ED 173 (SDU2E) - Sciences de l'univers, de l'environnement et de l'espace - Institut supérieur de l'aéronautique et de l'espace, Toulouse

Encadrement

Département Optique et techniques associées, ONERA, Toulouse

Encadrant : David Sheeren, Dynafor/ENSAT

Directeurs de thèse : Sophie Fabre, Xavier Briottet, ONERA/DOTA

Jury

Rodolphe Marion, CEA

Sébastien Gadal, Université Aix-Marseille

Didier Galop, GEODE, Université Toulouse Jean Jaurès

Élodie Magnanou, Observatoire océanologique de Banyuls-sur-mer

Financement

Région Occitanie, ONERA

Contact sophie.fabre@onera.fr

Résumé

La cartographie des essences d'arbres de forêts tempérées est une étape importante pour mieux comprendre l'impact du changement climatique sur ces écosystèmes. La télédétection optique permet de réaliser cette cartographie automatiquement à grande échelle. Trois types d'informations sur le couvert forestier sont d'intérêt pour discriminer les essences d'arbres : les informations spectrales, spatiales et temporelles.



L'information spectrale, accessible à partir de données multispectrales ou hyperspectrales, renseigne sur la réflectance de surface de la canopée reliée à des paramètres bio-physico-chimiques de la végétation. L'information spatiale est liée d'une part à la structure du couvert forestier et obtenue à partir de données LiDAR (*Light Detection And Ranging*) et à sa texture obtenue par la très haute résolution spatiale. L'information temporelle, obtenue par des imageurs optiques passifs avec un fort taux de revisite, donne accès à des variations liées à la phénologie des essences sur une année. L'objectif de cette thèse est d'évaluer la combinaison de ces différents types d'informations complémentaires afin d'améliorer la cartographie des essences d'arbres d'une forêt tempérée. Pour cela, une démarche en deux étapes est retenue : la délimitation des couronnes d'arbres et l'identification de l'essence de chaque couronne segmentée.

Pour délimiter les couronnes, la méthode proposée combine des informations géométriques et spectrales afin de corriger les cas de sur-segmentation d'une segmentation initiale réalisée à partir de la méthode de référence watershed, très utilisée dans la littérature, appliquée à un modèle numérique de hauteur. La méthode a été appliquée sur trois sites de forêts tempérées (Bernadouze, Fabas et la Massane) ayant des caractéristiques différentes (diversité des essences, taille des couronnes, relief...) et a permis d'obtenir une augmentation de performance allant jusqu'à 25% par rapport à la méthode de référence. Cette méthode est évolutive par l'ajout de nouveaux critères.

Les travaux se sont ensuite concentrés sur la détection des hêtres de la forêt ancienne de la Massane et la classification des cinq essences d'arbres présentes sur ce site. Pour cela, une approche orientée objet a été mise en place à partir de la carte de délimitation réalisée au préalable en utilisant différents algorithmes de machine learning. Cette approche utilise des caractéristiques calculées à l'échelle de l'arbre sur une image RGB (Red Green Blue) de haute résolution spatiale (10 cm), un nuage de points LiDAR aéroporté (50 pts/m²) et une série temporelle d'images Sentinel-2. Les résultats montrent notamment que la combinaison des informations améliore les performances de classification des hêtres avec une précision globale de 85% (gain de 5% par rapport à une combinaison de données RGB et LiDAR).

Ces résultats démontrent l'intérêt de la combinaison de données pour la cartographie des forêts tempérées à l'échelle de l'arbre. Les approches proposées dans cette thèse pourront être appliquées à d'autres sites d'étude de forêts tempérées. Enfin, les données acquises par drones ou par de futurs instruments satellitaires, ayant des résolutions spatiales, spectrales ou temporelles plus fines, pourront être utilisées afin de rendre la cartographie plus précise.

Mots-clés

Télédétection, cartographie, forêts, délimitation, classification, RGB, lidar, Sentinel-2.

Télécharger la thèse : <https://theses.fr/2023ESAE0022>

Nicolas Nesme

Thèse soutenue le 19 janvier 2023 à Toulouse

ED 173 (SDU2E) - Sciences de l'univers, de l'environnement et de l'espace - Institut supérieur de l'aéronautique et de l'espace, Toulouse

Encadrement

Département Optique et techniques associées, ONERA, Toulouse

Encadrants : Stéphanie Doz, ONERA/DOTA ; Olivier Lezeaux, SPASCIA

Directeur de thèse : Pierre-Yves Foucher, ONERA/DOTA

Jury

Yannick Deville, IRAP, Université de Toulouse

François-Marie Bréon, LSCE, CEA

Claude Camy-Peyret, IPSL, Sorbonne Université (invité)

Martine De Maziere, Institut royal d'Aéronomie spatiale de Belgique

Sébastien Payan, LATMOS, Sorbonne Université

Financement CIFRE SPASCIA, ONERA

Contact pierre-yves.foucher@onera.fr

Résumé

Les émissions anthropiques de gaz à effet de serre, notamment du méthane, sont au cœur d'enjeux énergétiques, sociétaux et environnementaux. L'observation satellite de ces sources ponctuelles a longtemps été limitée par la résolution spatiale des sondeurs atmosphériques. Ces travaux s'inscrivent dans un contexte satellitaire qui voit l'émergence d'imageurs satellitaires spectraux permettant de résoudre spatialement les points d'émissions. Ces imageurs hyperspectraux ont montré un réel potentiel notamment pour la

cartographie de la concentration de panaches de méthane pour des observations aéroportées. En ce sens deux pistes principales d'analyses ont pu être proposées dans la littérature : (i) méthodes rapides s'appuyant sur l'information spatiale impliquant une linéarisation de l'expression de la transmission, fonction de la concentration, et donc des biais éventuels de quantification, (ii) méthodes non linéaires itératives, se basant sur des outils complets de transfert radiatif et coûteuses en temps calcul pour des images au grand nombre de pixels. Au cours de cette thèse, une méthode hybride nommée ISBR-OE (*In-Scene Background Radiance - Optimal Estimation*) a été élaborée, pour s'affranchir des biais des méthodes linéaires par méthode itérative mais en déterminant les composantes radiatives de la scène sans calculs radiatifs coûteux en temps. Elle offre de plus l'avantage de maîtriser les incertitudes a posteriori. Elle fournit en premier lieu des concentrations intégrées sur le chemin optique, utilisées ensuite pour estimer le débit de la source. Cette estimation repose sur la quantification de la masse sur une étendue spatiale donnée mais nécessite aussi une information sur la vitesse de déplacement associée à cette masse ou vitesse du vent effectif du panache. En ce sens, l'outil de traitement d'images hyperspectrales CELINE (*Characterization of Effluent Leakages in INdustrial Environment*) incluant ISBR-OE, a été développé. À partir d'une image en luminance (niveau 1), il permet de restituer une carte de concentrations (2) et le débit de la source (4). CELINE a été appliqué et validé sur des données synthétiques, puis appliqué sur des données réelles aéroportées et satellitaires. Il s'agit en particulier de données aéroportées HySpex acquises lors d'une expérimentation terrain à débit contrôlé en méthane de l'ordre de 75 g/s. Des données aéroportées AVIRIS associées à différentes sources bien documentées en Californie ont également été utilisées. L'outil a enfin été appliqué sur des données de l'imageur hyperspectral satellitaire PRISMA lancé en 2019 (résolution spatiale décimétrique et résolution spectrale 10 nm a ouvert la voie à un suivi régulier et à grande échelle des émissions de méthane. Nous nous sommes penchés plus particulièrement sur une industrie au Turkménistan avec quatre points sources et avons proposé une analyse temporelle entre 2020 et 2021. Sur cette période, nous avons estimé des débits variant entre 350 et 4500 g/s en fonction des points sources et de la période d'acquisition. Nous avons posé les bases d'une analyse multi-temporelle. Elle se base sur l'utilisation conjointe de plusieurs images dans le processus d'inversion dans l'optique d'améliorer la sensibilité de la détection en réduisant l'incertitude sur la connaissance des réflectances de surfaces. Les premiers résultats montrent une amélioration des performances de détection mais le temps de revisite s'est avéré trop long pour améliorer la quantification (au mieux deux acquisitions par mois). L'arrivée récente de nouveaux imageurs satellitaires et les futurs projets de constellations devraient permettre de réduire le temps de revisite hyperspectral. Associés aux sondeurs dont la résolution spatiale tend à décroître, ces nouveaux produits ouvrent la voie au suivi des sources ponctuelles de méthane sur toute la surface du globe.

Mots-clés Télédétection, SWIR, atmosphère, émission de gaz, haute résolution.

Télécharger la thèse : <https://theses.fr/2023ESAE0007>

Arnaud Cerbelaud

Thèse soutenue le 13 juin 2023 à Toulouse

ED 173 (SDU2E) - Sciences de l'univers, de l'environnement et de l'espace - Institut supérieur de l'aéronautique et de l'espace, Toulouse

Encadrement

Département Optique et techniques associées, ONERA, Toulouse

Encadrants : Laure Roupioz, ONERA/DOTA ; Gwendoline Blanchet, CNES ; Pascal Breil, INRAE

Directeur de thèse : Xavier Briottet, ONERA/DOTA

Jury

Laurence Hubert-Moy, LETG, Université Rennes 2

Andréas Zischg, University of Bern

Dominique Courault, EMMAH, INRAE

Hervé Yesou, iCube, Université de Strasbourg

Financement CNES, ONERA

Contact laure.roupioz@onera.fr

Lauréat du concours « Ma thèse depuis l'Espace » (CNRS, PNTS), 2022

Résumé

Les inondations pluviales se produisent typiquement lors de précipitations de courte durée et de forte intensité et se caractérisent par un ruissellement intense des eaux pluviales, provoquant divers types de dégâts. À l'instar des inondations fluviales, les inondations pluviales sont estimées responsables de la moitié des sinistres dus chaque année aux inondations. Les écoulements intenses peuvent se produire potentiellement



Télédétection des inondations pluviales à l'aide d'imagerie satellite et d'apprentissage statistique pour l'évaluation de modèles de susceptibilité au ruissellement intense pluvial

n'importe où, en particulier en dehors de la proximité des cours d'eau, et sur des laps de temps très courts. Les données in situ sont difficiles à recueillir et souvent incomplètes. Cette thèse vise à tirer parti de l'imagerie satellitaire à haute résolution pour identifier les empreintes des inondations pluviales au sol dans les jours qui suivent un événement météorologique extrême. En premier lieu, des jeux de vérité terrain à grande échelle ont été générés sur trois événements dans le sud de la France après géoréférencement et labellisation de parcelles affectées. Puis, les produits optiques Sentinel-2 (S-2) ont été considérés pour leur résolution spatiale fine, leur fréquence de revisite globale élevée et leur gamme spectrale fournie. Des images de changement ont été produites à partir des données sans nuage les plus proches avant et après chaque événement afin de mettre en évidence des profils statistiques spécifiques dans les évolutions temporelles d'indices spectraux au sein des zones affectées. Des premiers travaux ont permis d'identifier les combinaisons optimales à exploiter dans un classifieur gaussien transférable orienté objet appelée SPCD, pour *Sentinel Plot-based Change Detection*. Des taux de détection $\geq 70\%$ et des faux positifs $\leq 12\%$ ont été obtenus sur les trois événements à l'aide d'indices spectraux VNIR comme le NDVI ou le NDWI. Ensuite, les cartes d'impact SPCD ont été mises en regard des mesures radar de précipitation des événements pour évaluer de manière approfondie la méthode de diagnostic IRIP©. Le modèle IRIP s'est avéré très performant, avec des proportions de parcelles endommagées d'autant plus importantes que les niveaux de susceptibilité étaient élevés, et encore plus importantes dans les zones les plus arrosées. Des améliorations structurelles IRIP ont été proposées dans la version IRIP++. Les principaux facteurs d'IRIP expliquant la localisation des dégâts pluviaux se sont avérés être le *topographic wetness index* et l'indicateur de susceptibilité à la production de ruissellement en amont. Ensuite, une deuxième méthode appelée FuSVIPR, pour *Fusion of Sentinel-2 and Very high resolution Imagery for Pluvial Runoff*, ont été développées dans l'objectif d'enrichir les images de changement S-2 par des images optiques post événement à très haute résolution spatiale provenant des satellites Pléiades ou de capteurs aéroportés pour identifier les changements plus précisément et à l'échelle du pixel, à l'aide d'algorithmes tels que les forêts aléatoires ou les réseaux U-net. Les cartes d'impact finales apportent une résolution submétrique et présentent sur les trois sites de validation contrastés de bons taux de détection ($\geq 75\%$) avec moins de faux positifs ($\leq 2\%$) comparés à SPCD. Cette méthode a également été éprouvée avec des performances de classification similaires (77%) sur un événement supplémentaire récent en Afrique du Sud à l'aide de vérités terrain externes et dans des zones péri-urbaines. Ensuite, les cartes issues d'IRIP et de IRIP++ ont été à nouveau évaluées, cette fois-ci grâce aux données d'impact FuSVIPR. En parallèle, une méthodologie originale a été développée pour guider la désagrégation de précipitations extrêmes à l'aide d'un simulateur stochastique afin de produire des scénarios de pluie cohérents avec la répartition spatiale des inondations pluviales telle qu'identifiée dans les cartes FuSVIPR.

Mots-clés Inondation pluviale, cartographie de susceptibilité, télédétection, détection de changement, apprentissage automatique, analyse des précipitations.

Télécharger la thèse : <https://>

Rollin Gimenez

Thèse soutenue le 20 décembre 2023 à Toulouse

ED 173 (SDU2E) - Science de l'univers, de l'environnement et de l'espace -
Université de Toulouse

Encadrement

Département Optique et techniques associées, ONERA, Toulouse

Encadrant : Anthony Credoz, TotalEnergies

Directeurs de thèse : Sophie Fabre, ONERA/DOTA ;
Arnaud Elger, Laboratoire écologie fonctionnelle
et environnement , Université de Toulouse

Jury

Isabelle Laffont-Schwob, LPED, Université de Marseille

Sébastien Lefèvre, IRISA, Université Bretagne Sud

Anne Puissant, LIVE-CNRS, Université de Strasbourg

Florian Delerue, EPOC, INP Bordeaux

Financement

TotalEnergies, ONERA

Contact sophie.fabre@onera.fr

Résumé

Les impacts anthropiques sur les sols végétalisés sont difficiles à caractériser à l'aide d'instruments de télédétection optique. Ces impacts peuvent cependant entraîner de graves conséquences environnementales. Leur détection indirecte est rendue possible par les altérations provoquées sur la biocénose et la physiologie des plantes, qui se traduisent par des changements de propriétés optiques au niveau de la plante et de la canopée.

L'objectif de cette thèse est de cartographier les espèces végétales en fonction de leur sensibilité aux impacts anthropiques à l'aide de données de télédétection optique multimodale. Différents impacts anthropiques associés à des activités industrielles passées sont considérés (présence d'hydrocarbures dans le sol, contamination chimique polymétallique, remaniement et compactage du sol, etc.) dans un contexte végétal complexe (distribution hétérogène de diverses espèces de différentes strates). Les informations spectrales, temporelles et/ou morphologiques sont utilisées pour identifier les genres et espèces et caractériser leur état de santé afin de définir et de cartographier leur sensibilité aux différents impacts anthropiques. Des images hyperspectrales aéroportées, des séries temporelles Sentinel-2 et des modèles numériques d'élévation sont exploités indépendamment ou combinés.

La démarche proposée repose sur trois étapes. La première consiste à cartographier les impacts anthropiques en combinant des données de télédétection optique et des données fournies par l'opérateur du site (analyses de sol, cartes d'activité, etc.). La seconde étape vise à développer une méthode de cartographie de la végétation à l'aide de données de télédétection optique adaptée à des contextes complexes tels que les sites industriels. Enfin, les variations de la biodiversité et des traits fonctionnels dérivées des images hyperspectrales aéroportées et des modèles numériques d'élévation sont analysées en relation avec la carte d'impact au cours de la troisième étape. Les espèces identifiées comme espèces invasives ainsi que celles en lien avec les pratiques agricoles et forestières et les mesures de biodiversité renseignent sur les impacts biologiques. La cartographie des strates de végétation et la caractérisation de la hauteur des arbres, liées à une succession secondaire, sont utilisées pour détecter les impacts physiques (remaniement du sol, excavations). Enfin, les conséquences du stress induit sur la signature spectrale des espèces sensibles permettent d'identifier les impacts chimiques. Plus précisément, dans le contexte de l'étude, les signatures spectrales de *Quercus* spp, *Alnus glutinosa* et des mélanges herbacés varient en fonction de l'acidité du sol, tandis que celles de *Platanus x hispanica* et des mélanges arbustifs présentent des différences dues aux autres impacts chimiques.

Mots clés

Télédétection optique, hyper-(multi-)spectral, multitemporel, apprentissage automatique, végétation, impacts anthropiques, cartographie des espèces végétales.

Télécharger la thèse : <https://theses.fr/s251485>

Romain Thoreau

Thèse soutenue le 20 novembre 2023 à Toulouse

ED 173 (SDU2E) - Sciences de l'univers, de l'environnement et de l'espace -
Institut supérieur de l'aéronautique et de l'espace, Toulouse

Encadrement

Département Optique et techniques associées, ONERA, Toulouse

Encadrante : Véronique Achard, ONERA/DOTA

Directeurs de thèse : Xavier Briottet, ONERA/DOTA ;
Laurent Risser, IMT, Univ. Toulouse

Jury

Céline Hudelot, CentraleSupélec

Karteek Alahari, INRIA

Yuliya Tarabalka, INRIA & LuxCarta

Patrick Gallinari, Sorbonne Université & Criteo AI Lab

Béatrice Berthelot, Magellium (invité)

Financement CIFRE Magellium

Contact veronique.achard@onera.fr

Résumé

En observation de la Terre, l'un des principaux défis est de cartographier l'artificialisation des sols, identifiée comme un enjeu majeur de politique publique dans le plan Biodiversité 2018 du ministère de la Transition Écologique. L'imperméabilisation des surfaces naturelles par des surfaces artificielles imperméables a en effet des conséquences majeures sur l'hydrologie des bassins versants, en particulier sur les inondations et les sécheresses, sur

les effets d'îlots de chaleur urbains et sur la séquestration du carbone dans les sols. Si les techniques de cartographie automatique ont permis de produire des cartes d'usage des sols à grande échelle à partir d'images satellite (avec des classes telles que forêts, zones bâties, vignobles...), les méthodes actuelles peinent à produire des cartes des surfaces imperméabilisées (béton, asphalte...) à haute résolution à l'échelle d'une métropole. L'imagerie hyperspectrale aéroportée présente un grand potentiel pour la discrimination de l'occupation des sols, grâce à ses hautes résolutions spatiale et spectrale sur un grand domaine spectral. Les techniques de cartographie de l'état de l'art optimisent les modèles de segmentation sémantique (à partir d'un sous-ensemble de pixels annotés, appelé la base d'apprentissage. L'annotation des pixels nécessitant des campagnes terrain coûteuses, la base d'apprentissage est généralement très petite au regard de la diversité des matériaux dans les milieux urbains et de la grande variabilité spectrale intra-classe, qui peut être divisée en trois catégories : la variabilité physique induite par différentes conditions d'éclairage, la variabilité intrinsèque induite par de légères variations dans la composition chimique des matériaux et la variabilité sémantique résultant du fait que différents matériaux sont en fait rassemblés au sein des mêmes classes. Les principales contributions de cette thèse consistent à exploiter l'information des millions de pixels non annotés dans l'image hyperspectrale afin d'apprendre des représentations de données discriminantes et robustes aux variabilités intra-classes (et incidemment aux similitudes inter-classes). La première contribution est l'étude du potentiel des algorithmes d'*Active Learning* (AL) à sélectionner quelques pixels supplémentaires à annoter afin d'améliorer la qualité de la base d'apprentissage. Nos expériences numériques montrent que différentes stratégies d'AL sont complémentaires et que l'information sémantique a priori dérivée de la hiérarchie des classes perméables et imperméables peut efficacement être intégrée dans le processus d'AL, résultant dans des gains importants de la précision des modèles de segmentation pour quelques centaines de pixels annotés supplémentaires. Néanmoins, le potentiel des techniques d'AL est limité par la capacité des modèles de segmentation à apprendre des représentations discriminantes. La deuxième contribution est l'intégration des connaissances a priori dérivées de lois physiques dans un modèle d'apprentissage automatique afin d'apprendre, à partir de données annotées et non annotées, des représentations spectrales qui sont robustes aux variations intra-classes physiques. Nos expériences montrent que notre modèle hybride a de meilleures capacités d'extrapolation que les modèles conventionnels d'apprentissage automatique pour les matériaux dont les conditions d'éclairage ne sont pas représentées dans la base d'apprentissage. La troisième contribution est l'étude du potentiel des méthodes non supervisées et auto-supervisées pour l'apprentissage de représentations spectrales robustes aux variations intrinsèques et sémantiques. À cette fin, nous avons construit et publié une très grande base de données hyperspectrales, particulièrement adaptée à l'évaluation des méthodes semi-supervisées et auto-supervisées, sur laquelle nous établissons deux méthodes de référence pour l'apprentissage de représentation spectrale.

Mots-clés *Hyperspectral imaging, semantic segmentation, machine learning, impermeable surfaces.*

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

Hiyam Debary

Thèse soutenue le 9 février 2023 à Ville

ED 572 (EDOM) - Ondes et matière - Université Paris-Saclay

Encadrement

Département Optique et techniques associées, ONERA, Châtillon

Encadrant : Sébastien Lopez, Airbus Defense & Space

Directeurs de thèse : Vincent Michau, Laurent Mugnier, ONERA/DOTA

Jury

Maud Langlois, CRAL, Université Lyon 1

Sylvestre Lacour, LESIA, Observatoire de Paris PSL

François Reynaud, Xlim, Université de Limoges

Loïc Denis, LHC, IOGS, Université de Saint-Étienne

Jérôme Loicq, CSL, Université de Liège & TU Delft

Financement

Airbus Defense & Space, ONERA

Contact laurent.mugnier@onera.fr

Résumé

Cette thèse a porté sur l'imagerie de la Terre par interférométrie optique, en s'attachant plus précisément au concept SPIDER, proposé initialement par la société américaine Lockheed-Martin. Il s'agit d'une application récente d'interférométrie optique, où un télescope imageur conventionnel est remplacé par un interféromètre optique effectuant ses mesures dans le plan pupillaire. Le signal est collecté par des pupilles

jointives et est ensuite combiné à travers des circuits photoniques intégrés (PIC), permettant une augmentation significative du nombre de fréquences spatiales mesurées. Ainsi, j'ai exploré théoriquement les limitations introduites par un tel imageur interférométrique, et proposé plusieurs améliorations. La première partie de mon travail a porté sur l'étape d'estimation d'une grandeur physique appelée visibilité complexe, caractéristique des interférogrammes et regroupant le contraste et la position des franges. J'ai établi une synthèse exhaustive, grâce à un formalisme analytique, des performances de deux estimateurs statistiques pour l'estimation de la visibilité complexe à partir de différents échantillonnages de l'interférogramme. Cette étude a été faite dans deux cas : un premier cas simple où le bruit prépondérant est homogène, et un second cas plus complexe où le bruit prépondérant est inhomogène, en particulier un bruit photonique. Cela m'a permis d'identifier les méthodes ayant des performances supérieures à celles de l'état de l'art. Ces schémas pourraient également être utilisés dans les interféromètres astronomiques. La deuxième partie de ma thèse a porté sur les architectures de recombinaison. En m'appuyant sur des résultats de la théorie combinatoire, jamais utilisés jusqu'à présent en interférométrie optique, j'ai proposé une méthode pour explorer de manière exhaustive des architectures de recombinaison. En utilisant cette méthode, j'ai développé un outil permettant de construire l'architecture de recombinaison optimale. Cette approche m'a permis de proposer plusieurs types d'architectures de recombinaison permettant d'améliorer significativement la couverture fréquentielle du concept SPIDER proposée habituellement dans la littérature. J'ai notamment mis en évidence l'intérêt d'un système hybride combinant un télescope monolithique avec un interféromètre optique de type SPIDER.

La dernière partie de la thèse a été consacrée à la comparaison d'un interféromètre type SPIDER et d'un imageur optique conventionnel, tous deux utilisés dans des conditions représentatives de l'observation de la Terre depuis un satellite en orbite basse. Des simulations numériques d'images qui pourraient être obtenues par un instrument de type SPIDER ont mis en évidence la présence de repliement de champ. Comme attendu, une adaptation du dispositif de prise de vue est nécessaire pour compenser le défilement rapide de la scène et augmenter le temps de pose, ce quel que soit le type d'imageur. Une adaptation de la prise de vue interférométrique est proposée en ce sens. J'ai comparé le comportement d'un interféromètre de type SPIDER et d'un imageur classique en termes de robustesse au bruit de façon analytique : si l'imageur classique se compare favorablement à l'imageur interférométrique à basses et moyennes fréquences spatiales, l'interféromètre présente un meilleur rapport signal-à-bruit à hautes fréquences spatiales.

Mots-clés

Interférométrie optique, circuits photoniques intégrés, couverture fréquentielle, configuration pupillaire, interférométrie, optique intégrée.

Télécharger la thèse : <https://theses.fr/2023UPASP016>

Émile Klotz

Thèse soutenue le 30 novembre 2023 à Paris

ED 352 - Physique et science de la matière - Aix-Marseille Université

Encadrement

Département Optique et techniques associées, ONERA, Châtillon

Encadrants : Sidonie Lefebvre, Nicolas Védrenne, ONERA/DOTA

Directeurs de thèse : Thierry Fusco, Christian Musso, ONERA/DOTA

Jury

Sukanta Basu, University at Albany

James Osborn, Durham University

Ghaya Rekaya, Telecom ParisTech

Thomas Oberlin, ISAE SUPAERO

Sylvain Poulenard, Airbus (invité)

Financement

Airbus D&S, ONERA

Contact sidonie.lefebvre@onera.fr

Résumé

Les liaisons optiques atmosphériques constituent une réponse de plus en plus concrète au besoin de transfert de données entre le sol et des charges utiles spatialisées, que ce soit pour le rapatriement des données engrangées par les capteurs embarqués (télémétrie) sur des satellites LEO ou pour le développement de l'internet globalisé et de l'internet des objets (IoT) en exploitant les satellites GEO comme relais.

L'influence de l'atmosphère reste un verrou essentiel qu'il convient de forcer pour pouvoir garantir la disponibilité très élevée attendue de systèmes de communication. La fiabilité de son évaluation conditionne les marges utilisées pour le dimensionnement des futurs systèmes, notamment dans le choix des emplacements des futures stations sols. La performance d'un lien optique est notamment conditionnée par l'influence de la turbulence atmosphérique. Sur un lien optique entre un satellite géostationnaire et le sol des perturbations de l'onde optique en phase et en amplitude dégradent les propriétés du signal et compromettent la transmission d'informations. Différentes solutions de correction, optique adaptative à la réception, codes correcteurs, entrelacement, permettent de juguler ses effets. La forte variabilité spatiale et temporelle des conditions de turbulence, et la complexité de ces différentes méthodes de correction imposent une adaptation fine et conjointe de ces méthodes aux conditions atmosphériques locales.

L'objectif principal de cette thèse est d'améliorer notre compréhension de la disponibilité des liens optiques en présence de turbulence optique en utilisant des instruments de caractérisation simples combinés à des modèles décrivant l'état du canal de propagation et à de l'apprentissage machine. Nous avons proposé une méthodologie complète permettant de prédire la marge de puissance du système en ne se basant que sur quatre paramètres intégrés de la turbulence. Ces derniers, renseignant sur l'état du canal de propagation, sont mesurés localement au niveau de la station sol en utilisant une instrumentation dédiée. Ce travail, effectué pour un cas mono-station, représente une étape importante vers la reconfiguration intelligente et dynamique des réseaux de stations sols optiques. Nous avons introduit une méthodologie innovante pour l'évaluation des turbulences et la prédiction de la disponibilité d'un lien optique, en mettant l'accent sur une utilisation rationnelle de l'apprentissage machine combinée à une compréhension approfondie des phénomènes physiques.

Tout en reconnaissant les limites et le besoin de mesures sur le terrain, ces travaux promettent des communications optiques satellite-sol plus fiables et plus efficaces.

Mots-clés

Communication optique en espace libre (FSO), turbulence atmosphérique, disponibilité de la liaison optique, *machine learning*.

Télécharger la thèse : N/A

Nicolas Levraud

Thèse soutenue le 11 décembre 2023 à Marseille

ED 352 - Physique et science de la matière - Aix-Marseille Université

Encadrement

Département Optique et techniques associées, ONERA, Châtillon

Encadrants : Jean-François Sauvage, ONERA/DOTA ;

Vincent Chambouleyron, Astronomy and astrophysics, dep. UC Santa Cruz

Directeurs de thèse : Thierry Fusco, ONERA/DOTA ; Simone Esposito, INAF, Italie

Jury

Yann Clénet, LESIA, Observatoire de Paris

Olivier Lai, OCA, Observatoire de la Côte d'Azur

Maud Langlois, CRAL, Université de Lyon

Samuel Lévêque, ESO, Garching

Financement ANR WOLF, INAF

Contact thierry.fusco@onera.fr

Résumé

La détection et la caractérisation de planètes extrasolaires est un des grands défis de l'astronomie moderne. Après la découverte, en 1995, de la première exoplanète 51PEG_b, il a fallu une décennie de plus pour enfin détecter la lumière directe de ces astres et pouvoir commencer à en étudier le spectre et donc sa composition bio-chimique. Cette avancée majeure a été permise par la génération des « très grands télescopes » (miroirs de 6 à 10cm) et leurs instruments, en particulier les avancées de l'optique adaptative. En effet, pour les très grands télescopes situés au sol, la lumière de

la planète est perdue dans la lumière de l'étoile fortement perturbée et étalée dans le champ de vue par la présence de l'atmosphère terrestre. L'optique adaptative est une méthode permettant de mesurer et corriger la turbulence atmosphérique grâce à un capteur de front d'onde et à un miroir déformable. Cette étape concentre la lumière de l'étoile, facilitant sa suppression par un coronographe et rendant visible son environnement proche comme les exoplanètes. La nouvelle génération de télescopes géants en cours de construction (ELT, TMT et GMT, miroir de 29 à 39m) devrait augmenter le nombre d'exoplanètes directement observables. Les instruments associés à ces télescopes sont en phase de conception et vont être soumis à de nouvelles perturbations introduites par le télescope lui-même. Parmi ces aberrations, celles liées à la structure des supports du miroir secondaire, connues sous le nom de mode « pétale » ont été identifiées comme une des limitations principales des instruments à haute résolution angulaire de ces télescopes géants. Ce mode est causé par la fragmentation de la pupille en plusieurs sections séparées par des zones d'ombre sans mesure (causées par la largeur des « araignées », supports métalliques du miroir secondaire). Le capteur de front d'onde n'est pas capable de garantir la continuité du front d'onde mesuré. L'optique adaptative traite ces fragments comme des zones indépendantes, qui se trouvent déphasées les unes par rapport aux autres au gré de la turbulence atmosphérique et des défauts de phasage inhérents au télescope et à l'instrument. Cela réduit la résolution finale à celle associée à la taille d'un de ces fragments de pupille. Pour l'ELT cela signifie que la résolution finale serait celle d'un télescope de 15m et pas de 39m. Cette forte dégradation est incompatible avec un télescope à la limite de diffraction, d'autant plus avec les hautes performances nécessaires pour l'imagerie d'exoplanètes. L'objectif de la thèse est d'étudier l'impact du mode pétale sur l'analyse de front d'onde de l'optique adaptative, et de proposer des solutions que ça soit avec les capteurs usuels ou avec de nouveaux concepts. Une première étude approfondie du capteur d'optique adaptative des télescopes géants, le capteur pyramide, a été conduite pour expliquer dans quelles conditions ce capteur devient insensible au mode pétale. Ce capteur a en effet besoin d'une opération optique de modulation pour étendre la dynamique de mesure et la rendre compatible avec la mesure de la turbulence atmosphérique. On a montré que cette étape de modulation empêche la mesure du mode pétale. Pour mesurer ce mode, il est proposé des capteurs dédiés à la mesure du mode pétale dans des résidus d'optique adaptative. Forts de l'étude de la pyramide nous avons étudié dans quelles conditions la pyramide pourrait être utilisée comme capteur de pétale. Cela a donné naissance à plusieurs pyramides modifiées pour faciliter la mesure : l'ajout d'une opération de filtrage spatial optique pour réduire les effets de la turbulence résiduelle, et une asymétrisation de la pyramide pour augmenter la réponse à ce signal. Les différents capteurs proposés ont été testés en simulation numérique, et se sont montrés satisfaisants pour les conditions typiques de l'ELT. Les solutions proposées devraient donc permettre à terme de corriger le mode pétale et d'atteindre ainsi la limite de diffraction des futurs très grands télescopes.

Mots-clés Optique Adaptative, analyse de front d'onde, *Extremely Large Telescope (ELT)*, capteur pyramide.

Télécharger la thèse : N/A

Perrine Lognoné

Thèse soutenue le 13 décembre 2023 à Palaiseau

ED 626 (IPP) - IP Paris - Institut Polytechnique de Paris/Telecom ParisTech

Encadrement

Département Optique et techniques associées, ONERA, Châtillon

Directeurs de thèse : Ghaya Rekaya-Ben Othman, Télécom ParisTech ;
Jean-Marc Conan, ONERA/DOTA

Jury

Aniceto Belmonte, Barcelona Tech, UPC

Christophe Peucheret, FOTON, Université de Rennes 1

Eleni Diamanti, LiP6, Sorbonne Université

James Osborn, CfAI, Durham University

Ramon Mata Calvo, ESA

Bouchra Benammar, CNES

Financement

CNES, ONERA

Contact jean-marc.conan@onera.fr

Best student presentation award à la conférence JWOC, 2022

Prix de thèse du CNES, 2022



Résumé

Dans un contexte de besoins numériques croissants, les communications optiques par satellite, complémentaires aux infrastructures terrestres, permettraient d'échanger des données du sol vers l'espace à des débits de l'ordre du téraoctet par seconde. L'une des principales limitations de ces liaisons optiques est la perturbation du champ complexe lors de sa propagation dans l'atmosphère. Du fait de ces perturbations, le flux couplé à bord du satellite fluctue fortement, entraînant de longs et profonds évanouissements du signal, qui dégradent le signal d'information. Plusieurs solutions existent pour atténuer ces pertes d'information. Des moyens physiques, tels que l'utilisation d'une correction par optique adaptative (OA), permettent de minimiser les pertes de couplage, tandis que les techniques numériques permettent d'améliorer la fiabilité des informations grâce au codage et à l'entrelacement. Ces techniques ont été appliquées à la liaison descendante dans des travaux antérieurs. Concernant le lien montant, la technique envisagée est la pré-compensation par OA. Cependant, du fait de la géométrie du lien, comme le lien montant et descendant sont séparés par l'angle de pointage en avant, cette pré-compensation, identique à celle du lien descendant, est sous-optimale. Par conséquent, des évanouissements profonds et longs du signal persistent.

Dans cette thèse, nous concevons de nouvelles méthodes pour optimiser la phase de pré-compensation au pointage en avant, améliorant ainsi les statistiques du canal. La conception et l'évaluation de ces méthodes reposent sur un formalisme réciproque qui permet une description de l'erreur de pré-compensation et du flux couplé associé. Pour optimiser la phase de pré-compensation au pointage en avant, nous développons quatre méthodes qui exploitent les informations obtenues à partir des mesures disponibles au sein de la station terrestre optique. Toutes ces méthodes permettent de réduire considérablement l'erreur de pré-compensation et donc d'améliorer les statistiques du flux couplé à bord du satellite. De plus, nous évaluons les performances de télécommunication des liaisons utilisant les méthodes de pré-compensation développées. Enfin, nous développons le modèle statistique de canal de la liaison pré-compensée par optique adaptative.

Mots-clés

Optique adaptative, communication satellitaire, télécommunication optique, anisoplanétisme.

Télécharger la thèse : <https://theses.fr/s268548>

Valentina Marulanda Acosta

Thèse soutenue le 4 décembre 2023 à Paris

ED 130 (EDITE) - Informatique, télécommunications et électronique - Sorbonne Université

Encadrement

Département Optique et techniques associées, ONERA, Châtillon

Encadrants : Jean-Marc Conan, ONERA/DOTA ; Caroline Botum Lim, LNE-SYRTE

Directrice de thèse : Eleni Diamanti, LIP6, Sorbonne Université

Jury

Giuseppe Vallone, Università degli Studi di Padova

Thomas Jennewein, University of Waterloo

Ghaya Reka, Telecom Paris

Andrew Thain, Airbus Defense and Space

Daniele Dequal, ESA-ESTEC

Financement

Sorbonne Université, ONERA

Contact jean-marc.conan@onera.fr

Résumé

Les exigences sans cesse croissantes des systèmes de télécommunication modernes en termes de débit, ainsi que la menace imminente que pose l'augmentation de la puissance de calcul des ordinateurs modernes sur les méthodes cryptographiques actuelles, font de la transmission sécurisée des données à la fois une exigence essentielle et un grand défi, et donc un domaine d'étude très actif. La distribution quantique des clés (QKD) permet l'échange de clés cryptographiques dont le niveau de sécurité ne dépend pas de la complexité d'un algorithme mathématique mais repose intrinsèquement sur l'exploitation des propriétés de la mécanique quantique. Cependant, le déploiement des systèmes QKD via des réseaux fibrés terrestres, est fortement limité en distance, et n'atteint que quelques centaines de kilomètres, en raison de l'atténuation exponentielle subie par les signaux transmis par fibre optique. Les méthodes d'amplification des répéteurs de communications optiques classiques ne sont pas compatibles avec un signal quantique, et en raison du manque de maturité technologique concernant les répéteurs quantiques, les relais satellite se présentent comme une alternative intéressante pour l'établissement de liaisons quantiques intercontinentales sécurisées. Nous présentons ici, dans le contexte d'un lien QKD descendant entre un satellite en orbite basse et le sol, un modèle complet du canal atmosphérique satellite-sol prenant conjointement en compte la turbulence, sa correction partielle par optique adaptative (OA) les pertes géométriques et les fluctuations de pointage à bord du satellite. Nous utilisons ce modèle pour évaluer les performances de trois protocoles QKD – à variables continues et à variables discrètes, avec des photons uniques ou intriqués – pour différentes conditions de turbulence, différents degrés de correction par OA, différents scénarios de configuration du lien (diamètre télescope, altitude du satellite...) tout en prenant en compte la taille finie de la séquence d'états ou de symboles émise. Les résultats obtenus montrent l'intérêt de l'utilisation d'un système d'OA : en effet, la performance en termes de taux de génération de clé de tous les protocoles analysés s'améliore en considérant une correction par OA. Cette augmentation du taux de clé est particulièrement significative pour les scénarios de forte turbulence, d'opération diurne et pour le protocole QKD à variables continues (CV). L'apport de l'OA est de plus démontré et quantifié dans une configuration très prometteuse exploitant l'émission de deux photons intriqués vers deux stations sol depuis un relais satellite qui n'est pas forcément de confiance.

Afin de valider nos résultats de simulation, nous avons aussi commencé à implémenter un banc de test expérimental à partir d'une émulation simplifiée du canal atmosphérique et d'un système CV-QKD. Nous expliquons les difficultés rencontrées pendant cette mise en œuvre ainsi que les solutions proposées et des idées sur les perspectives de l'étude.

Mots-clés Optique adaptative, communications optiques par satellite, communications quantiques, QKD.

Télécharger la thèse : <https://theses.fr/2023SORUS378>

Pablo Rodriguez Robles

Thèse soutenue le 14 décembre 2023 à Palaiseau

ED 352 - Physique et science de la matière - Aix-Marseille Université

Encadrement

Département Optique et techniques associées, ONERA, Châtillon

Co-encadrante : Bouchra Benammar, CNES

Directeurs de thèse : Benoit Neichel, Laboratoire d'Astrophysique de Marseille
Cyril Petit, ONERA/DOTA

Jury

Andrés Guesalaga, Pontificia Universidad Católica de Chili,

Lisa A. Poyneer, Lawrence Livermore National Laboratory, USA

François Rigaut, Australian National University, Canberra

Marc Ferrari, Laboratoire d'Astrophysique de Marseille

Tim Morris, Durham University

Financement

CNES, ONERA

Résumé

Les liaisons optiques satellite-sol en orbite terrestre basse (LEO) permettront des communications directes à haut débit entre les satellites et les stations sol. Afin d'exploiter les réseaux de télécommunication optique existants, le faisceau optique descendant peut être injecté dans une fibre monomode. Cependant, la turbulence atmosphérique dégrade la propagation du faisceau optique, altérant le couplage dans la fibre monomode. L'optique adaptative (AO) peut fournir une correction en temps réel des effets de turbulence. L'objectif de cette thèse est d'améliorer les performances de l'optique adaptative pour les liaisons optiques LEO-sol. Dans les applications de liens LEO-sol, le vent apparent dû au mouvement relatif entre le télescope et l'atmosphère entraîne une évolution plus rapide de la turbulence, augmentant l'erreur temporelle induite par le retard entre la mesure et la correction du front d'onde fournies par la boucle d'OA. Cette thèse s'intéresse à la limite théorique de réduction de l'erreur temporelle grâce à la prédiction de la turbulence. Cette thèse considère alors un algorithme de contrôle prédictif pour atténuer en temps réel l'impact de l'erreur temporelle. Les résultats de simulation pour le contrôleur montrent une réduction significative des évanouissements de couplage dans la fibre. Le même contrôleur est appliqué à l'imagerie au sol des satellites en orbite LEO, avec de forts gains en qualité d'image. Alternativement, le contrôleur peut être utilisé pour assouplir la fréquence d'asservissement de boucle d'OA, réduisant ainsi la complexité du système et augmentant le flux de photons disponible pour l'analyse du front d'onde. Enfin, cette thèse présente PICOLO, un émulateur de turbulence pour les liaisons basse élévation. A basse élévation, les effets de la turbulence sont plus forts, entraînant une scintillation qui altère le fonctionnement de l'OA. Les effets de scintillation du banc ont été caractérisés et comparés à une simulation numérique, validant l'émulateur et définissant ainsi son jumeau numérique. PICOLO servira aux tests en laboratoire de nouveaux concepts d'OA pour les liaisons LEO-sol dans des conditions réalistes. Un premier test a ainsi été réalisé en couplant un système d'OA à l'émulateur; les statistiques de couplage de la correction par OA utilisant un contrôleur classique ont été comparées avec succès aux simulations numériques. Des travaux ultérieurs mèneront à une démonstration expérimentale du contrôleur prédictif proposé dans la perspective d'une démonstration sur le ciel.

Mots-clés

Turbulence atmosphérique, optique adaptative, communication optique, satellite en orbite basse, command prédictif, contrôleur linéaire-quadratique-gaussien, filtre de Kalman, forte scintillation.

Télécharger la thèse : N/A

Daniel Romero Arrieta

Thèse soutenue le 5 juillet 2023 à Palaiseau

ED 572 (EDOM) - Ondes et matière - Université Paris-Saclay

Encadrement

Département Optique et techniques associées, ONERA, Châtillon

Encadrant : Jean-Marc Conan, ONERA/DOTA ; Rajiv Boddeda, Nokia Bell Labs

Directeur de thèse : Vincent Michau, ONERA

Jury

Aniceto Belmonte, Universitat Politècnica de Catalunya

Chigo Okonkwo, Eindhoven University of Technology

Ghaya Rekaya-Ben Othman, Telecom Paris

Angélique Rissons, ISAE-SUPAERO

Benoît Neichel, LAM

Financement

CIFRE Nokia Bell Labs

Contact jean-marc.conan@onera.fr

Résumé

Le développement accéléré des systèmes connectés et les avancées des systèmes d'observation de la terre exigent une augmentation de la capacité de communication par satellite. Les liaisons optiques par laser en espace libre sont particulièrement prometteuses pour satisfaire ces demandes. Ces liaisons optiques par satellite peuvent profiter des briques technologiques développées pour les réseaux terrestres à fibre

comme le multiplexage en longueur d'onde, les émetteurs-récepteurs cohérents et les techniques de traitement numérique du signal. Cependant, Les gaz et aérosols qui composent l'atmosphère atténuent le signal optique par des mécanismes de diffusion et d'absorption en bande étroite et la turbulence atmosphérique produit des pertes de puissance intermittentes. Les effets de la turbulence atmosphérique peuvent être atténués en utilisant une optique adaptative. L'optique adaptative est très efficace pour atténuer les effets de la turbulence atmosphérique en liaison descendante, son usage pour pré-compenser une liaison montante est cependant limité par l'anisoplanétisme de pointage en avant. Ainsi, des évanouissements importants subsistent. Des mécanismes supplémentaires sont donc nécessaires pour les corriger, tels que des dispositifs d'entrelacement ou de diversité temporelle. Ces mécanismes nécessitent le stockage d'une grande quantité de données (quelques Gbits) à des débits très élevés (> 100 Gbps) L'objectif de cette thèse est de proposer des solutions permettant d'obtenir un lien optique entre une station sol et un satellite géostationnaire avec un débit monocanal allant jusqu'à 100 Gbps. Les solutions de fiabilité de la liaison telles que la diversité temporelle et l'entrelacement de longue durée (par exemple, plusieurs 10 ms) n'ont pas encore fait l'objet d'une démonstration expérimentale dans ce contexte.

Dans cette thèse, ces solutions sont démontrées pour la première fois expérimentalement pour un lien montant pré-compensé par optique adaptative et leur efficacité est évaluée dans des conditions exigeantes. Tout d'abord, nous calculons la capacité de cette liaison et montrons qu'en recourant à un entrelacement des données, nous pouvons atteindre des capacités de plusieurs Térabits par seconde grâce au multiplexage en longueur d'onde, malgré les raies d'absorption des molécules constituant l'atmosphère et la turbulence atmosphérique. Nous passons en revue la mise en œuvre d'un système basé sur la technique de la diversité temporelle. Nous montrons que cette technique permet d'atténuer les évanouissements au prix d'une duplication des équipements de communication. Nous proposons ensuite une méthode de dimensionnement des entrelaceurs, à partir de séries temporelles de la puissance optique obtenues par simulation numérique. Par la suite, nous effectuons une validation expérimentale d'un entrelaceur mis au point à l'aide d'une mémoire SDRAM externe et d'émetteurs-récepteurs OOK à 10 Gbps. Enfin, nous utilisons le démonstrateur pour démontrer l'efficacité de l'entrelacement pour atténuer les évanouissements de puissance. Nous montrons aussi que les nouvelles technologies de mémoire SDRAM permettent la mise en œuvre d'entrelaceurs pour les communications DP-QPSK à 100 Gbps.

Mots-clés

Optique adaptative, communications optiques par satellite, communications cohérentes, techniques de fiabilité.

Télécharger la thèse : <https://theses.fr/2023UPASP067>

Alix Yan

Thèse soutenue le 4 octobre 2023 à Paris

ED 127 (AAIA) - Astronomie astrophysique d'Ile-de-France - Université PSL, Paris

Encadrement

Département Optique et techniques associées, ONERA, Châtillon

Encadrant : Cyril Petit, ONERA/DOA

Directeurs de thèse : Laurent Mugnier, ONERA/DOA ;
Jean-François Giovannelli, IMS, Université de Bordeaux

Jury

Hervé Carfantan, Institut de recherche en astrophysique et planétologie, Toulouse

Eric Thiébaud, Centre de recherche astrophysique de Lyon

Anne-Marie Lagrange, LESIA, Observatoire de Paris

Céline Meillier, ICube

Benoît Neichel, Laboratoire d'Astrophysique de Marseille

Financement

ONERA

Contact cyril.petit@onera.fr

Résumé

La restauration d'images corrigées par optique adaptative est particulièrement difficile, du fait de la méconnaissance de la réponse impulsionnelle du système optique (PSF pour *point spread function*) en plus des difficultés usuelles. Une approche efficace est de marginaliser l'objet en dehors du problème et d'estimer la PSF et les hyper-paramètres (liés à l'objet et au bruit) seuls avant la déconvolution. Des travaux récents ont appliqué cette déconvolution marginale, combinée à un modèle paramétrique de PSF, à des images astronomiques et de satellites.

Cette thèse vise à proposer une extension de cette méthode. En particulier, nous utilisons un algorithme Monte-Carlo par chaînes de Markov (MCMC), afin d'inclure des incertitudes sur les paramètres et d'étudier leur corrélation a posteriori. Nous présentons des résultats détaillés obtenus sur des images astronomiques et de satellites, simulées et expérimentales. Nous présentons également des premiers éléments sur l'ajout d'une contrainte de support sur l'objet.

Mots-clés

Restauration d'image, optique adaptative, déconvolution, turbulence, problèmes inverses.

Télécharger la thèse : N/A

Nadine Gerges

Thèse soutenue le 24 mars 2023 à Grenoble

ED 220 (EEATS) - Électronique, électrotechnique, automatique, traitement du signal - Université Grenoble Alpes

Encadrement

Département Optique et techniques associées, ONERA, Palaiseau

Directeurs de thèse : Cécile Gourgon, TNM, Univ. Grenoble Alpes ;
Yann Ferrec, ONERA/DOTA

Jury

Anne Talneau, C2N, Université Paris Saclay

Christian Seassal, INL, École centrale de Lyon

Patricia Segonds, Institut Néel, Université Grenoble Alpes

Jacques Berthon, CNES

Judikaël Le Rouzo, IM2NP, Aix Marseille Université

Financement

Ministère de l'Enseignement supérieur et de la Recherche

Contact yann.ferrec@onera.fr

Résumé

De nouveaux concepts de mesure de la concentration atmosphérique des gaz à effet de serre (CO₂, CH₄) sont en cours de développement dans le but d'évaluer les progrès accomplis vers les objectifs de l'Accord de Paris de 2015.

NanoCarb est un spectromètre imageur miniature à transformée de Fourier développé dans le cadre du projet européen SCARBO H2020. L'élément principal de cet imageur spectral est un réseau de micro-interféromètres Fabry-Perot obtenu à partir d'une lame de silicium gravée sous forme d'escalier dont les hauteurs de marche sont de l'ordre de 50 nm. Cette thèse s'inscrit dans le cadre d'une collaboration entre le LTM, l'ONERA et l'IPAG, et a eu pour objectif le développement de procédés technologiques pour réaliser le réseau de marches, ainsi que l'intégration sur la même lame d'un filtre interférentiel et un matériau localement absorbant dans l'infrarouge (SWIR).

Nous avons développé des procédés de lithographie à niveaux de gris et gravure plasma afin de réaliser le réseau interférométrique en une seule étape de lithographie et gravure. Nous avons démontré qu'il est possible d'optimiser le contraste d'une résine lithographique avec une résolution verticale de l'ordre de 20 nm pour obtenir des marches en Si de 50 nm de haut. La deuxième partie a visé une réduction des composants optiques par l'ajout en face arrière d'un filtre spectral constitué d'un empilement de 12 couches Si/SiO₂ que nous avons simulé, réalisé et caractérisé. Ce filtre étroit est centré sur la bande d'absorption du CO₂ à 1608 nm. Enfin, nous avons cherché à développer un matériau absorbant dans le proche infrarouge dans le but de minimiser la lumière parasite créée localement.

Mots-clés

Lithographie en niveaux de gris, interférométrie optique, filtres interférentiels.

Thibaut Mayeur

Thèse soutenue le 30 novembre 2023 à Palaiseau

ED 572 (EDOM) - Ondes et matière - Université Paris-Saclay

Encadrement

Département Optique et techniques associées, ONERA, Palaiseau

Encadrant : Jean-Baptiste Volatier ONERA/DOTA

Directeur de thèse : Guillaume Druart, ONERA/DOTA

Jury

Simon Thibault, Université Laval, Canada

Thierry Lépine, IOGS

Vincent Nourrit, ENSTA Bretagne

Emmanuel Hugot, LAM

Florence Rigal, CEA-LETI

Yvan Sortais, IOGS

Financement

CIFRE Safran

Contact guillaume.druart@onera.fr

Résumé

De nos jours, la recherche d'une forte miniaturisation et simplification des systèmes optiques pousse le concepteur opticien à se restreindre à un nombre très limité de surfaces qui doivent en revanche être très asphérisées ou *freeform* pour maintenir les performances optiques. Cependant, l'augmentation considérable du nombre de degrés de liberté accroît le nombre de solutions possibles et rend le choix d'un bon point de départ encore plus critique pour converger vers les solutions les plus performantes. De nouvelles méthodes de conception optique ont donc été proposées pour explorer plus efficacement l'espace des solutions possibles et ainsi réduire l'impact de l'expérience du concepteur opticien. C'est dans ce contexte que j'ai mis en place une approche de conception optique globale qui combine une étape de construction directe de surfaces appelée méthode "*Simultaneous Multiple Surfaces* (SMS) pour générer des points de départ asphériques ou *freeform* et d'une étape d'optimisation automatique à l'aide du logiciel de conception optique Ansys Zemax OpticStudio. La méthode SMS a été initialement proposée par les équipes de J.C Miñano. Cette méthode permet à partir d'hypothèses simples de construire N surfaces optiques afin de corriger N points du champ. J'ai appliqué l'approche globale de conception optique développée pour concevoir des systèmes optiques dioptriques infrarouges pour des applications automobiles. Les systèmes asphériques ou *freeform* conçus sont très ouverts ($F \# \leq 1.2$) et répondent à une problématique *Size, Weight and Power* (SWAP) très sévère imposée par l'industrie automobile. Je me suis également servi de la méthode SMS implémentée pour générer des points de départ d'optimisation pour des systèmes optiques spécialisés, comme des systèmes optiques à vision fovéale ou panamorphes qui permettent de maximiser les performances optiques dans les zones d'imagerie d'intérêt.

Mots-clés

Optiques *freeform*, optiques asphériques, imagerie infrarouge, système d'aide à la conduite automobile, problématique SWAP.

Maxime Pinson

Thèse soutenue le 11 décembre 2023 à Toulouse

ED 173 (SDU2E) - Science de l'univers, de l'environnement et de l'espace -
Université de Toulouse

Encadrement

Département Physique, instrumentation, environnement, espace, ONERA, Toulouse

Encadrant : Pablo Caron, ONERA/DPHY

Directeur de thèse : Sébastien Bourdarie, ONERA/DPHY

Jury

Marin Chabot, IJCLab, IN2P3, Orsay

Arnaud Claret, LISIS, CEA

Sylvie Benck, Center for Space Radiations, UCLouvain

Matthieu Berthomier, LPP, École polytechnique

Financement

Région Occitanie, ONERA

Contact pablo.caron@onera.fr

Résumé

Cette étude porte sur la mesure de l'environnement radiatif spatial de la Terre. Ces mesures utilisent des moniteurs de radiation embarqués sur satellite. Les moniteurs développés actuellement reposent sur une technique d'acquisition permettant de récolter l'énergie totale déposée par la particule incidente. La mesure des flux dans les ceintures de radiations par cette méthode se révèle être imparfaite dans certaines gammes d'énergies de protons et d'électrons. En effet, une telle chaîne d'acquisition ne permet pas de distinguer sans ambiguïté la nature de la particule mise en jeu avec la seule connaissance de son énergie déposée.

Cette étude se focalise sur une méthode d'acquisition utilisant des amplificateurs de courant à large bande passante, ce qui permet d'étudier l'évolution temporelle de la formation du signal (le courant "transitoire") dans le détecteur. Cette technique permet de récupérer davantage d'informations sur la particule incidente.

Dans un premier temps, cette étude porte sur la modélisation du comportement électrique des détecteurs à semi-conducteur, où l'on détaille une implémentation 1D et 2D du courant transitoire généré par une particule incidente donnée. Dans un second temps, la mise au point d'un banc d'essai permettant de mesurer les courants transitoires dans ces détecteurs est étudiée et nous permet de valider nos modèles précédemment développés. Enfin, avec ces modèles validés contre des mesures expérimentales (ainsi que les mesures et modèles de la littérature), une étude de la performance de la capacité de cette méthode à discriminer la nature de la particule est faite. Pour cela une base de données de courants transitoires a été élaborée en prenant en compte l'ensemble des énergies mises en jeu dans les ceintures de radiations. Des algorithmes basiques d'intelligence artificielle permettent enfin de quantifier les performances d'une telle classification.

Mots clés

Traitement du signal, environnement spatial, *machine learning*, interaction rayonnement-matière, moniteurs de radiation.

Carla Costa

Thèse soutenue le 23 octobre 2023 à Toulouse

ED 323 (GEET) - Génie électrique, électronique et télécommunications - Institut supérieur de l'aéronautique et de l'espace, Toulouse

Encadrement

Département Physique, instrumentation, environnement, espace, ONERA, Toulouse
Directeurs de thèse : Thierry Nuns, ONERA/DPHY ; Romain Cariou, CEA

Jury

Philip Schulz, Institut Photovoltaïque d'Ile-de-France

Philippe Christol, Institut d'Électronique et des Systèmes, Montpellier

Mireille Richard-Plouet, Institut des Matériaux Jean Rouxel, Nantes

Dominique Vergnet, Airbus Defence and Space SAS (invité)

Financement CEA, ONERA

Contact thierry.nuns@onera.fr

Meilleure présentation orale de l'ED GEET, 2023

Résumé

L'émergence récente de l'industrie spatiale privée *New Space* se traduit par la recherche de matériaux et dispositifs photovoltaïques alternatifs offrant un compromis en termes de coût, masse, performances et disponibilité industrielle à grande échelle. Les cellules solaires pérovskites (PSC) apparaissent comme une rupture technologique potentielle, avec des perspectives de gains de plusieurs ordres de grandeur sur les coûts (€/W), la puissance spécifique (W/g) & volumique (W/m³). Cependant, pour atteindre ces objectifs, il reste primordial d'améliorer la connaissance des phénomènes de



Étude du comportement des cellules solaires pérovskites aux irradiations protons et électrons

vieillessement des PSC en environnement spatial.

Les principaux objectifs de la thèse étaient : i) étudier l'influence de la composition et de l'architecture des PSC sur la résistance aux irradiations protons et électrons ; ii) analyser et développer la compréhension des phénomènes de dégradations, iii) proposer des stratégies matériaux/dispositifs pour améliorer les performances de fin de vie. L'état de l'art du domaine a permis de rassembler les connaissances sur le vieillissement, et plus particulièrement sur l'interaction des particules chargées avec les matériaux et les cellules solaires. Ce sujet est bien documenté pour les cellules solaires silicium et les cellules III-V multi-jonctions (standard actuel), mais pour les PSC les premières études sous irradiation sont très récentes. Au global ; il en ressort un intérêt croissant motivé par le maintien des performances cellules jusqu'à d'importantes fluences. Cependant, ce corpus d'études est très disparate : composition des pérovskites, architectures cellules, rendements, énergies et fluences électrons/protons, protocoles de mesures, etc.

Pour améliorer la compréhension des mécanismes de dégradation, ce travail de thèse s'est basé sur les axes suivants : i) fabrication de PSC identiques pour les tests (électrons/protons), ii) conditions d'irradiation inspirées des standards et iii) méthodologie originale : irradiations ciblées de couches et caractérisations ex-situ & in-situ. La première campagne d'irradiation PSC s'est focalisée sur les effets des protons sur des PSC Verre/ITO/SnO₂/CsxFA_{1-x}Pb(I_{1-y}Br_y)₃/PTAA/ITOTop, avec des doses ionisantes équivalentes à ~20 ans en orbite LEO. Ces travaux ont mis en évidence un optimum (stabilité, rendement AMO & tenue aux irradiations) de composition pérovskite correspondant à un *band gap* de 1.60 eV. L'origine de la baisse des performances des PSC observées aux fortes fluences (5,10¹⁴ protons/cm² @ 1MeV) a pu être attribuée aux dégradations de la couche collectrice de trous (PTAA). Une seconde campagne d'irradiation s'est focalisée sur les irradiations électrons pour ces mêmes architectures cellules (2,10¹⁵ électrons/cm² @ 1MeV - dose ionisante équivalente ~ 3 ans LEO). Le même optimum en termes de composition de pérovskite a été observé, ainsi qu'une résistance accrue aux irradiations électrons. Des phénomènes d'auto-guérison, déjà documentés ex-situ, ont pu être mis en évidence dans des conditions plus représentatives, grâce aux mesures I(V) in-situ, dans les minutes suivant l'arrêt du faisceau d'électrons. Pour terminer, l'effet du vide sans irradiations sur quatre architectures de PSC a été étudié. Des baisses de performances partiellement réversibles des cellules pour l'architecture NIP ont été mises en évidence par des caractérisations I(V) in-situ. La migration ionique du Li⁺, provenant du LiTFSI (dopant du PTAA) pourrait en être l'origine. Afin de s'affranchir de cette couche (également dégradée sous protons), une architecture de cellules PIN sans PTAA a été testée sous vide et aux irradiations protons. Les premiers résultats présentés dans ce manuscrit semblent prometteurs face à ces 2 contraintes. Cette architecture PIN (plébiscitée pour le PV terrestre) mérite donc d'être étudiée plus en détail pour le spatial.

Mots-clés Pérovskite, cellules solaires polymères, électrons irradiations, protons irradiations, vide.

Télécharger la thèse : <https://theses.fr/2023ESAE0052>

Dijwar Yilmaz

Thèse soutenue le 4 octobre 2023 à Pessac

ED 040 - Sciences Chimiques - Université de Bordeaux

Encadrement

Département Physique, instrumentation, environnement, espace, ONERA, Toulouse

Encadrants : Simon Lewandowski, ONERA/DPHY ;
Audrey Llevot, LCPO, INP Bordeaux

Directeur de thèse : Stéphane Carlotti, LCPO, INP Bordeaux

Jury

Laurent Bouteiller, Institut de chimie, CNRS

Renaud Nicolay, ESCPI

Sylvain Caillol, Institut Charles Gerhardt, Université de Montpellier

Guillaume Fleury, LCPO, Université de Bordeaux

Sophie Perraud, CNES (invité)

Financement

CNES, ONERA

Contact simon.lewandowski@onera.fr

Prix des doctorants ONERA PHY 2023

1st place poster award at the 7th International Symposium Frontiers in Polymer Science, 2023, Gothenburg, Sweden.

Synthèse et caractérisation de poly(diméthylsiloxane)s auto-cicatrisants en environnement spatial radiatif

Résumé

Le polydiméthylsiloxane (PDMS) est largement utilisé pour des applications spatiales grâce, entre autres, à sa transparence et sa résistance thermique ou aux UV. L'exposition prolongée de ces matériaux à l'environnement géostationnaire entraîne leur jaunissement et leur fissuration, induisant une dégradation des satellites. Afin d'augmenter leur durée de vie, des polydiméthylsiloxanes auto-cicatrisants ont été conçus puis irradiés aux protons, simulant un environnement spatial.

Une première approche a reposé sur l'élaboration d'un double réseau permanent et thermo-réversible, par hydrosilylation et réactions de retro Diels-Alder conduisant à des matériaux colorés, maintenant une intégrité structurale à température élevée (> 140 °C), et plus stables aux irradiations protons.

Une deuxième approche a consisté à synthétiser des PDMS portant des fonctions urée et diimine de compositions variables pour former un réseau supramoléculaire réversible à température ambiante. Ces matériaux affichent une transparence et une auto-cicatrisation rapide à 20 °C (80% en 1 h), ainsi qu'une non-fissuration après une irradiation aux protons. Cependant, ces matériaux possèdent des modules élastiques relativement faibles et fluent à des températures supérieures à 80 °C.

Pour améliorer ce système, une dernière approche s'est appuyée sur l'incorporation d'un réseau covalent dynamique par ajout de points de réticulation chimique au réseau supramoléculaire, permettant l'obtention de PDMS transparents et auto-cicatrisants à température ambiante, possédant un module élastique plus élevé ainsi qu'une bonne tenue mécanique à température élevée.

Mots clés

Polydiméthylsiloxane, auto-cicatrisation, double réseau, vieillissement, environnement spatial, protons.

Télécharger la thèse : <https://theses.fr/s346819>

Eva Al Hajj Sleiman

Thèse soutenue le 19 octobre 2023 Saint-Paul-lès-Durance

ED 352 - Physique et science de la matière - Université d'Aix Marseille

Encadrement

Département Physique, instrumentation, environnement, espace, ONERA, Toulouse

Directeurs de thèse : Julien Hillairet, CEA/IRFM, Cadarache
Mohamed Belhaj, ONERA/DPHY

Jury

Benito Gimeno-Martínez, Instituto de Física Corpuscular, Universitat de Valencia

Éric Rius, Lab-STICC, Université de Bretagne

Yolanda Gómez Martínez, LPSC/IN2P3

Thibault Hamelin, CEA/IRFU

Walid Helou, ITER, Cadarache

Nicolas Fil, CNES (invité)

Financement

CEA, ONERA

Contact mohamed.belhaj@onera.fr

Résumé

Les ondes radiofréquences (RF) de haute puissance sont couramment utilisées dans des environnements sous vide pour la recherche sur la fusion nucléaire par confinement magnétique, notamment dans des dispositifs expérimentaux tels que les tokamaks. La capacité de transmission de puissance des antennes peut être limitée par le phénomène de multipactor, qui correspond à une augmentation exponentielle du

nombre

d'électrons. Ce phénomène survient, généralement, lorsque l'énergie des électrons entrant en collision avec les surfaces des composants est suffisamment élevée pour libérer des électrons supplémentaires et lorsque le mouvement des électrons est synchronisé avec le changement de phase du signal RF. Dans de telles conditions, un phénomène d'avalanche électronique se produit, pouvant générer des perturbations RF, une augmentation de la température locale des composants, entraînant une augmentation subséquente de la pression due à la désorption de particules de surface. Si ce phénomène n'est pas arrêté, il peut éventuellement déclencher une décharge corona ou un arc électrique dans le gaz résiduel à basse pression, ce qui peut entraîner la destruction partielle voire totale du composant. L'initiation du multipactor dépend de l'amplitude et de la fréquence du champ électrique RF au sein du dispositif RF, ainsi que des propriétés d'émission d'électrons secondaires des matériaux utilisés, telles que leur composition de surface, leur morphologie, leur historique et de la présence d'un champ magnétique. La prédiction du multipactor est relativement bien comprise pour les géométries métalliques simples, mais reste incertaine pour les structures complexes avec des champs électriques multi-matériaux, telles que les fenêtres d'étanchéité RF composées de matériaux diélectriques et de conducteurs.

Sur le tokamak WEST situé au CEA-Cadarache en France, des systèmes RF sont utilisés pour le chauffage du plasma. En particulier, le phénomène suivant a été observé lors des campagnes expérimentales sur les trois antennes de chauffage par résonance cyclotronique ionique (ICRH) : lorsque seule une antenne est alimentée, la pression augmente dans les antennes qui ne le sont pas. Le problème est que dès que la pression dans l'une des antennes dépasse un seuil prédéfini, le système de sécurité interdit l'application de la puissance RF afin d'éviter la génération d'un plasma induit à l'intérieur de l'antenne, ce qui affecte l'opération du système ICRH. Le phénomène de multipactor est une possible explication de cette augmentation de pression et cette hypothèse est étudiée dans ce travail. L'objectif de ces travaux est de modéliser le phénomène de multipactor pour des composants RF réalistes soumis à des ondes stationnaires, tels que les antennes ICRH de WEST. L'étude des mécanismes physiques à l'origine de ces augmentations de pression dans les antennes vise à déterminer si le multipactor est responsable de ces niveaux de pression mesurés et s'il permet d'en donner une explication.

Mots clés

Multipactor, confinement magnétique, fusion nucléaire, tokamak.

Télécharger la thèse : <https://theses.fr/s346819>

Julie Belfio

Thèse soutenue le 17 mars 2023 à Reims

ED 620 (SNI) - Sciences du numérique et de l'ingénieur - Université de Reims Champagne-Ardenne

Encadrement

Département Physique, instrumentation, environnement, espace, ONERA, Toulouse

Encadrante : Florica Lazar, MATIM, Univ. Reims Champagne-Ardenne

Directeurs de thèse : Omar Jbara, LISM, Univ. Reims Champagne Ardenne ;
Mohammed Belhaj, ONERA/DPHY

Jury

Jean-Paul Chopart, MATIM, Univ. Reims Champagne Ardenne

Julien Hillairet, CEA

Juan Duran, Indra, Espagne (invité)

Olivier Devos, I2M, Université de Bordeaux

Christine Robert-Goumet, Institut Pascal, Université Clermont Auvergne

Financement

Région Grand Est, ONERA

Contact mohamed.belhaj@onera.fr

Résumé

L'émission électronique (EE) joue un rôle important dans les applications spatiales et notamment pour la transmission du signal Radiofréquence (RF) dans les satellites de communication. L'EE induite par l'interaction entre un électron et la matière peut, par un couplage avec l'onde RF, initier un effet indésirable appelé l'effet multipactor. Cet effet se traduit par une forte augmentation de la densité d'électrons dans le vide du composant RF qui forme un nuage d'électrons pouvant nuire au fonctionnement du composant.

Pour éviter ce risque, une des stratégies adoptées est la génération de surfaces aux faibles rendements d'EE (TEEY pour Total Electron Emission Yield). La modification de la morphologie de surface est une des méthodes utilisées pour réduire le TEEY. Cependant, la montée en puissance de la fabrication additive génère de plus en plus de composants RF monolithiques dont les surfaces internes sont difficilement accessibles au laser (méthode usuelle). Dans ce contexte, nous présentons une alternative basée sur des procédés électrochimiques et plus particulièrement sur l'électrodéposition pour produire des surfaces à faible TEEY.

Nous avons réalisé des dépôts d'argent sur un substrat de nickel dans des conditions spécifiques (i.e. température du bain, solvants aqueux et absence de composés toxiques) avec une rugosité de surface spécifique permettant de contrôler l'EE secondaire. Nous allons montrer que certaines compositions de bains influent favorablement sur le TEEY en couplant différentes techniques d'observation et d'analyse telles que la microscopie électronique à balayage (MEB) couplée avec de la spectroscopie de rayons X à dispersion d'énergie (EDXS), l'analyse par diffraction des rayons X (DRX) et la mesure du TEEY.

Mots-clés

Surface, dépôt électrochimique, morphologie, émission secondaire, rugosité, émission ionique secondaire, émission électronique, électroformage.

Lucas Nicolle

Thèse soutenue le 10 février 2023 à Toulouse

ED 323 (GEET) - Génie électrique, électronique et télécommunications - Institut supérieur de l'aéronautique et de l'espace, Toulouse

Encadrement

Département Physique, instrumentation, environnement, espace, ONERA, Toulouse

Directeurs de thèse : Laurent Garrigues, Laplace, Université de Toulouse ;
Pierre Sarrailh, ONERA/DPHY

Jury

Fabrice Cipriani, ESA/ESTEC

Richard Fournier, Laplace, Université de Toulouse

Sedina Tsikata, ICARE, Orléans

François Leblanc, LATMOS, Sorbonne Université

Financement CNES, ONERA

Contact pierre.sarrailh@onera.fr

Best poster Laplace scientific day, 2022

Résumé

Ces dix dernières années ont été marquées par l'arrivée massive de satellites commerciaux tout électriques. Leur spécificité est de permettre une mise à poste au moyen d'un ou plusieurs propulseurs plasma, en effectuant une manœuvre appelée EOR (*Electrical Orbit Rising*). Cette technologie a l'énorme avantage de diviser par deux environ la masse d'un satellite à iso fonctionnalité et donc de réduire les coûts de lancement, ou alternativement, d'augmenter les capacités opérationnelles des satellites tout en conservant une masse inférieure aux capacités d'emport des lanceurs



Modélisation multi-échelle du couplage électrostatique entre un propulseur plasma et les sous-systèmes d'un satellite tout-électrique

commerciaux. Un inconvénient de ce système propulsif est de générer un plasma secondaire autour du satellite. En interagissant avec les surfaces externes du satellite et les systèmes tels que les panneaux solaires, le plasma est susceptible de créer de nombreux effets indésirables et de limiter les performances de la propulsion.

L'objectif de cette thèse est de modéliser à l'échelle du système complet les interactions entre les propulseurs plasmas et les différents systèmes du satellite. Il est primordial de pouvoir modéliser correctement : les mécanismes de création des particules chargées dans le propulseur, le transport de celles-ci, ainsi que les interactions avec les différents matériaux du satellite. Cela permet de pouvoir prévenir les problèmes liés aux effets indésirables et envisager des propulseurs de puissance supérieure ou bien d'autres architectures comme les clusters de propulseurs. Pour ce faire, l'ONERA développe depuis 2005 le cœur numérique du logiciel SPIS (initié dans le cadre du réseau européen SPINE), aujourd'hui utilisé par les scientifiques et les industriels majeurs du domaine pour évaluer la propreté électrostatique des satellites. SPIS permet de simuler en 3D l'interaction de jets plasmas avec les surfaces externes du satellite. Cependant, les modèles actuellement implémentés ne permettent pas de simuler correctement un certain nombre de couplages physiques pourtant essentiels à la quantification des effets liés à la propulsion plasma. Durant cette thèse, la démarche choisie a été d'étudier dans un premier temps la validité des modèles de propulseur et de transport des particules en comparant les simulations avec des mesures expérimentales. Ces mesures peuvent être effectuées en caisson sous vide, au sol ou directement sur plateforme satellite.

L'approche retenue a été d'analyser les mesures du satellite russe Express-A caractérisant le panache d'ions du propulseur de Hall de type SPT-100. Cela a nécessité le développement d'un nouveau modèle de sonde plus détaillé et permettant l'analyse quantitative des mesures de sonde RPA réalisées en orbite. De plus, un algorithme de *backtracking* optimisé par *octree* a été développé dans SPIS afin de pouvoir réaliser numériquement la prédiction de la mesure expérimentale en prenant en compte la géométrie de la plateforme et les interactions plasma-satellite en configuration réaliste. Cette approche innovante a permis d'obtenir un outil de validation des caractéristiques du plasma du propulseur, de caractériser les phénomènes physiques en jeu dans le panache de plasma. L'influence du modèle physique pour les électrons ou la prise en compte des collisions dans le panache ont pu être étudiées et comparées aux mesures, pour préciser le transport des particules du propulseur et par conséquent, l'interaction électrostatique plasma-satellite. Cette démarche a permis d'augmenter les indices de confiance pour les simulations d'interactions propulseur-satellite pour les designs de demain : des propulseurs de plus haute puissance (20 kW), des configurations *direct-drive* ou encore des *clusters* de propulseurs.

Mots-clés

Propulseur plasma, électrostatique, satellite, express-A, RPA, SPIS, véhicules spatiaux, charge électrostatique, fusées à effet Hall, satellites artificiels.

Télécharger la thèse : <https://theses.fr/2023ESAE0010>

Quentin Peysson

Thèse soutenue le 24 novembre 2023 à Toulouse

ED 323 (GEET) - Génie électrique, électronique et télécommunications - Institut supérieur de l'aéronautique et de l'espace, Toulouse

Encadrement

Département Physique, instrumentation, environnement, espace, ONERA, Toulouse

Encadrants : Mohamed Belhaj, ONERA/DPHY ; Nicolas Fil, CNES

Directeur de thèse : Pierre Sarrailh, ONERA/DPHY

Jury

Yves Elskens, Aix-Marseille Université,

Éric Rius, UBO

Jessica Benedicto, UBO

Laurent Guarrigues, Laplace, Univ. Toulouse

Giovanni Rumolo, CERN

Financement

CNES, ONERA

Contact mohamed.belhaj@onera.fr

Résumé

L'objectif de cette thèse a été d'étudier le risque de déclenchement de décharges électrostatiques consécutives à l'effet multipactor dans des géométries 3D incluant des diélectriques.

Un code de simulation de l'effet multipactor 1D a tout d'abord été développé. Dans un premier temps, il nous a permis d'étudier l'impact des paramètres numériques sur la dynamique de la cascade électronique.

Une fois les aspects numériques maîtrisés, nous nous sommes intéressés à la physique du phénomène en y incluant les effets de charge d'espace en volume et les propriétés du nuage d'électrons une fois l'état stationnaire atteint.

Nous avons ensuite étudié l'influence du diélectrique en nous focalisant tout particulièrement sur l'impact du potentiel initial de la surface diélectrique sur la cascade électronique.

Le diélectrique pouvant se charger à cause de l'effet multipactor, un modèle simplifié de déclenchement de décharges par émission de champs depuis une pointe a été développé et a permis d'évaluer en partie le risque de déclenchement de décharge électrostatique en présence d'une onde HF.

Tout cela a permis le développement d'un module de simulation 3D dans le logiciel SPIS qui reprend une partie de la physique implémentée dans le code 1D. Ce module de SPIS a été exploité sur des géométries 3D simples mais nos derniers travaux montrent que ce module devra être encore amélioré notamment pour prendre en compte le déclenchement de décharges.

Mots-clés

Effet multipactor, ESD, simulation numérique, diélectrique.

Séverin Astruc

Thèse soutenue le 13 décembre 2023 à Palaiseau

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

Encadrement

Département Électromagnétisme et radar, ONERA, Palaiseau

Encadrants : Paul-Quentin Elias, Raphaël Levy, ONERA/DPHY

Directeur de thèse : Antoine Godard, ONERA/DPHY

Jury

Alain Giani, IES, Université de Montpellier

Freddy Gaboriau, LAPLACE, Université de Toulouse

Olivier Duchemin, Safran

Tiberiu Minea, LPGP, Université Paris Saclay

Gaëlle Lissorgues, ESIEE

Ulysse Weller, CNES

Financement

CNES, ONERA

Contact paul-quentin.elias@onera.fr

Résumé

La conception et la qualification des propulseurs électriques de satellite nécessitent de mesurer leur poussée au sol dans des enceintes à vide. Cette poussée est habituellement mesurée grâce à des balances de poussée ou à des cibles immergées dans le plasma du propulseur. Cependant, ces systèmes sont volumineux, dépendent de l'enceinte sous vide, de la gamme de poussée du propulseur, et ils nécessitent la gravité

pour fonctionner. Pour ces raisons, cette thèse présente la conception d'un micro-capteur, sensible, peu intrusif et indépendant de l'enceinte, destiné à mesurer le flux de quantité de mouvement transporté dans le jet de plasma du propulseur. La poussée du propulseur est déduite grâce à un sondage de ce jet. Dans un premier temps, une analyse théorique identifie les phénomènes qui limitent la mesure dans le jet de plasma. Ensuite, pour mieux comprendre l'impact de ces phénomènes, une sonde de mesure est conçue à partir d'une micro-cellule accélérométrique préexistante. Cette sonde est caractérisée puis testée avec des sources de gaz neutre et de plasma. La comparaison des résultats expérimentaux avec des simulations permet de comprendre les biais de mesure liés au plasma. Enfin, en tirant parti de ces enseignements, un design de sonde spécifiquement adaptée à la mesure de la poussée, est proposé, et ses performances simulées. L'étude théorique et par simulation montre que, malgré les forces induites par la gaine plasma au contact de la sonde sur les particules, la pression mesurée à la paroi est la même que dans le cas sans sonde. La mesure de poussée est donc possible. En revanche, cette gaine provoque un flux de particules sur les parois tangentes à la direction du plasma et des pressions électrostatiques sur toutes les surfaces de la sonde. Ceci biaise légèrement la mesure de poussée. De plus, le flux thermique du plasma, les charges électrostatiques et la pulvérisation sont des phénomènes plasma perturbateurs de la mesure. On propose d'ajouter une couche métallique sur la cellule accélérométrique pour diminuer ces effets perturbateurs. Après cette modification, la cellule est intégrée dans un boîtier permettant de la protéger du plasma. La sonde résultante est caractérisée dans un caisson sous vide. Sa résolution est limitée par l'environnement vibratoire et la collection des charges du plasma. On démontre néanmoins une résolution de mesure de $0.01 \mu\text{N}\cdot\text{cm}^{-2}$ lors de son exposition à une source de gaz neutre. Face au jet de plasma d'un propulseur ECR, on montre que la sonde mesure une différence de pression due à une accumulation de gaz dans son boîtier. Cette accumulation de gaz entraîne un biais de mesure qui empêche la mesure de la pression dans le jet. À partir de ces enseignements, on conçoit une microcellule de mesure spécifiquement adaptée à la mesure de poussée dans un jet de propulseur électrique. L'architecture particulière de cette nouvelle cellule diminue d'un ordre de grandeur la sensibilité de la sonde aux vibrations et évite les biais de mesure liés à l'accumulation de gaz et la collection de charges. Cette nouvelle sonde peut constituer un outil compact et flexible pour mesurer la poussée des propulseurs électriques. Contrairement aux balances de poussée traditionnelles, cette sonde est indépendante de l'enceinte sous vide, de la gravité, de la taille du propulseur ou de la nature des tests réalisés. La prochaine étape nécessite de valider ces performances sur un propulseur. Ainsi validée, cette sonde pourrait être envisagée pour une standardisation des méthodes de qualification des propulseurs électriques.

Mots clés

Capteur, plasma, microtechnologie, propulsion.

Télécharger la thèse : <https://theses.fr/2023UPASP188>

Élodie Lin

Thèse soutenue le 9 février 2023 à Gif sur Yvette

ED 572 (EDOM) - Ondes et matière - Université Paris-Saclay

Encadrement

Département Physique, instrumentation, environnement, espace, ONERA, Palaiseau

Directeurs de thèse : Brigitte Tretout, Michaël Scherman, ONERA/DPHY

Jury

Emmanuel Beaurepaire, Laboratoire d'optique et de biosciences, École polytechnique

Hervé Rigneault, Institut Fresnel, Marseille

Jean-Sébastien Lauret, LuMin, ENS Paris-Saclay

Pierre Joubert, Institut UTINAM, Université de Franche-Comté

Aude Silve, Karlsruhe Institute of Technology

Financement

DGA/AID, ONERA

Contact michael.scherman@onera.fr

Résumé

Les techniques de diagnostic laser, notamment de spectroscopie vibrationnelle, permettent de sonder les propriétés physico-chimiques de la matière. Parmi elles, la diffusion Raman anti-Stokes cohérente (CARS) exploite la réponse lumineuse produite par l'interaction de plusieurs photons excitateurs avec les modes de vibrations du milieu. L'analyse du spectre obtenu permet de remonter à des paramètres d'état du milieu tels que la composition, la concentration ou la température. Le diagnostic est alors non-invasif, sensible et spécifique chimiquement.

Dans le cadre de cette thèse, nous explorons le potentiel du diagnostic CARS en régime hybride femtoseconde/picoseconde (fs/ps-CARS) appliquée à la microscopie de matériaux bidimensionnels et de la prévention des risques. La bonne résolution spectrale qu'offre ce diagnostic permet d'obtenir des signatures spectrales caractéristiques, avec un bon seuil de détectivité. Un nouveau système de microscopie fs/ps-CARS a été assemblé, à partir d'un système laser existant. Les performances de ce système ont été caractérisées sur des échantillons de référence puis optimisées à l'aide de configurations optiques innovantes. Le diagnostic a ensuite été appliqué à trois familles d'échantillons. Nous avons d'abord étudié un nanomatériau bidimensionnel, le nitrure de Bore (BN), sous forme de micro-cristaux et de feuillets d'épaisseurs nanométriques. La réponse CARS intense a été analysée pour extraire une information caractéristique de l'épaisseur du feuillet et de la qualité de la maille cristalline. Puis la résolution spectrale du dispositif a été exploitée pour identifier et distinguer deux simili-explosifs, le 1,3-dinitrobenzène et le 2,4- dinitrotoluène, à de très faibles concentrations. Enfin, l'étude spectroscopique de souches de bactéries germées, E. coli, B. subtilis et cyanobactéries et d'un marqueur chimique des spores, l'acide dipicolinique, a été réalisée dans une perspective de détection et d'identification d'espèces pathogènes.

Mots-clés

Microscopie CARS, spectroscopie Raman, nitrure de bore, explosifs, bactérie, laser femtoseconde.

Lucas Hudeley

Thèse soutenue le 4 décembre 2023 à Palaiseau

ED 575 (EOBE) - Electrical, optical, bio-physics and engineering - Université Paris-Saclay

Encadrement

Département Physique, instrumentation, environnement, espace, ONERA, Châtillon

Encadrant : Raphaël Levy, ONERA/DPHY

Directeurs de thèse : Alain Bosseboeuf, C2N, Université Paris-Saclay ;
Olivier Le Traon, ONERA/DPHY

Jury

Tarik Bourouina, ESYCOM Lab, Université Gustave Eiffel

Didier Théron, IEMN, Université de Lille

Elisabeth Dufour-Gergam, C2N, Université Paris-Saclay

Skandar Basrour, TIMA, Université Grenoble Alpes

Lionel Buchaillot, IEMN, Université de Lille

Rachid Jaoui, DGA/AID (invité)

Financement

DGA, ONERA

Contact raphael.levy@onera.fr

First Runner Up Student Poster, conférence IEEE Inertial à Avignon, 2022

Résumé

Les gyromètres sont des capteurs capables de mesurer des vitesses de rotation. Associés à des accéléromètres, ils permettent de se diriger dans l'espace de manière autonome. Actuellement, les performances des gyromètres MEMS (Micro Système Electro-Mécanique) n'atteignent pas la classe navigation. Cette thèse porte sur l'étude et le développement d'un microgyromètre vibrant à effet Coriolis fondé sur un nouveau concept susceptible de surmonter les limitations des microgyromètres MEMS actuels. Ce concept innovant repose sur l'utilisation d'un résonateur axisymétrique et utilise des éléments permettant l'équilibrage des quantités de mouvement dans le système. Le facteur de qualité de ces gyromètres est alors en théorie limité uniquement par les pertes thermoélastiques. Ce concept est mis en œuvre ici en technologie silicium sur isolant (SOI) et une transduction exploitant des peignes électrostatiques pour l'excitation et la détection. Un modèle analytique électromécanique complet de la cellule associée à des modélisations par éléments finis ont été mis en place pour dimensionner les différentes parties de la structure résonante et pour optimiser les performances théoriques. Différentes versions ont été fabriquées au C2N et à l'IEMN par métallisation, gravure ionique réactive profonde et libération HF des microstructures résonantes par la face avant ou par la face arrière. Les fréquences de résonance des différents modes de vibration mesurées par microscopie stroboscopique et par voie électrique sont en très bon accord avec les valeurs théoriques. Les facteurs de qualité sont cependant bien plus faibles qu'attendus. Un faible écart de fréquence entre les modes gyromètres et des facteurs de qualité supérieurs à 10 000 sont démontrés pour une version axisymétrique. Ces résultats sont encourageants pour l'utilisation des dispositifs MEMS en mode gyroscope et des améliorations sont identifiées concernant les facteurs de qualité.

Mots-clés

Capteurs inertiels, MEMS, modélisation électromécanique, gyromètres vibrants Coriolis, SOI.

Vincent Malesys

Thèse soutenue le 23 mars 2023 à Mulhouse

ED 182 - Physique et chimie-physique - Université de Strasbourg

Encadrement

Département Physique, instrumentation, environnement, espace, ONERA, Châtillon

Encadrants : Amandine Andrieux-Ledier, Pierre Lavenus, ONERA/DPHY

Directeur de thèse : Laurent Simon, IS2M, Université de Haute Alsace

Jury

Sylvie Contreras, Laboratoire Charles Coulomb, Université de Montpellier

Andrew Mayne, ISMO, Université Paris-Saclay

Marie-Blandine Martin, Unité mixte de physique, CNRS/Thales

Klaus Leifer, Angstrom Laboratory, Uppsala University

Financement

ONERA

Contact amandine.andrieux@onera.fr

Résumé

Cette thèse a pour but le développement et l'étude d'un capteur de gaz ultrasensible et sélectif à base de graphène. Nous présentons la technologie utilisée pour la réalisation des capteurs intégrant une monocouche de graphène : photolithographie et transfert de couches. Les techniques de caractérisation globales (microscopie optique, AFM, Raman...) permettant un diagnostic des rubans de graphène et assurent une bonne reproductibilité des procédés technologiques.

Nous présentons les résultats de caractérisation sous gaz sur une large gamme de températures et de concentrations, y compris les très faibles concentrations de NO₂ et NH₃. Nous avons également cherché les moyens de limiter les instabilités liées au substrat et améliorer la sensibilité du capteur par la mise en place d'une hétérostructure « all-CVD » graphène/BN. Enfin, nous avons étudié les possibilités d'accroître la sélectivité du dispositif par une technique de fluoration innovante du graphène avec une étude complète XPS pour tester la stabilité en température et en temps des couches de graphène fluorées et leur sélectivité chimique.

Mots-clés

Graphène, capteur de gaz, fluoration, nitride de bore, hétérostructure, capteurs, détecteurs de gaz.



Télécharger la thèse : <https://theses.fr/2023MULH4826>

**Thèses de doctorat ONERA
soutenues en 2023**

**DOMAINE SCIENTIFIQUE
SIMULATION NUMÉRIQUE AVANCÉE**

Thèses de doctorat ONERA soutenues en 2023

DOMAINE SIMULATION NUMÉRIQUE AVANCÉE

Selon les départements et leurs thématiques scientifiques :

AÉRODYNAMIQUE , AÉROÉLASTICITÉ, ACOUSTIQUE MULTIPHYSIQUE POUR L'ÉNERGÉTIQUE MATÉRIAUX ET STRUCTURES

Méthodes numériques

Ludovic Coelho	Optimisation de stratifiés composites sous contrainte fiabiliste pour des applications aéroélastiques	200
Théo Flament	Modèle d'ordre réduit de structures non linéaires pour l'aéroélasticité des turbomachines	202
Thomas Marchal	Extension de la Méthode des différences spectrales à la combustion	204
Mehdi Jadoui	Solveurs de Krylov robustes pour la résolution partitionnée et monolithique du système adjoint couplé aéro-structure	206
Maxime Pouliquen	Analyse de la réponse sous impact des stratifiés composites par <i>virtual testing</i> : difficultés et influence des effets de vitesse	208
Pierre Seize	Méthodologies permettant l'obtention efficace de solutions multi-physiques stationnaires pour des applications en énergétique	210

Simulation et calcul intensif

Benjamin Constant	Extension d'une méthode de frontières immergées pour la simulation des écoulements instationnaires autour de géométries complexes	212
Valentin Fer	Passage à l'échelle d'outils de stabilité globale performants en vue de caractériser des phénomènes propres aux turbomachines	214
Alexandre Suss	Couplage des méthodes Navier-Stokes et Lattice Boltzmann pour les simulations aéro-dynamiques instationnaires	216

TRAITEMENT DE L'INFORMATION ET SYSTÈMES

Mathématiques appliquées et calcul scientifique

Matthias Baray	Approches tensorielles pour la résolution haute performance des équations de Maxwell harmoniques	218
Axel Maupoux	Modélisation, analyse mathématique et simulation numérique de grandes flottes de drones autonomes	220
Tuan Dung Nguyen	Développement d'une méthode numérique multi-échelles pour les plasmas atmosphériques et application au contrôle d'écoulements	222

Ludovic Coelho

Thèse soutenue le 9 mars 2023 à Châtillon

ED 579 (SMéMaG) - Sciences mécaniques et énergétiques, matériaux et géosciences - Université Paris-Saclay

Encadrement

Département Matériaux et structures, ONERA, Châtillon

Encadrants : Cédric Julien, Christian Fagiano, , ONERA/DMAS
Nicolò Fabbiane, ONERA/DAAA

Directeur de thèse : Didier Lucor, LISN, Univ. Paris-Saclay

Jury

Angela Vincenti, Institut Jean le Rond d'Alembert, Sorbonne Université

Jean-Marc Bourinet, SIGMA Clermont

Pietro Marco Congedo, CMAP, INRIA

Cécile Mattrand, SIGMA Clermont

Jacobo Diaz, CITEEC, Universidade da Coruña, Espagne

Carl Scarth, Department of Mechanical Engineering, University of Bath, UK

Financement

ONERA

Contact cedric.julien@onera.fr

Résumé

L'optimisation de stratifiés composites sous contrainte fiabiliste a été réalisée avec la prise en compte de l'incertitude des orientations de plis.

Ce travail propose une nouvelle méthodologie itérative qui lie deux espaces d'analyse. Dans le premier espace est gérée la conception macroscopique à faible dimension (en utilisant les paramètres de stratification) avec des informations de gradient pour effectuer une optimisation rapide. Dans le deuxième espace, mésoscopique à haute dimension, les incertitudes des variables de conception sont modélisées et ensuite transportées à l'échelle macroscopique. Avec cette méthodologie, un problème inverse doit être résolu à chaque itération pour pouvoir propager l'incertitude de l'espace mésoscopique à l'espace de conception macroscopique et calculer la probabilité de défaillance nécessaire. Pour cela, une quantification de l'incertitude est nécessaire pour identifier correctement une séquence d'empilement correspondant à la description statistique des paramètres de stratification. Une base orthonormale de Fourier a donc été développée. L'approche d'optimisation présentée est appliquée à différents problèmes : d'abord, l'optimisation d'une plaque composite favorisant la rigidité de la plaque avec une contrainte analytique de flambage et ensuite une optimisation aéroélastique favorisant la flexibilité de la plaque tout en restant fiable vis-à-vis du phénomène de flottement. En raison de la nature modale de la vitesse de flottement, une stratégie combinant une classification et un modèle de substitution classique est proposée pour approximer la quantité d'intérêt et effectuer une analyse de fiabilité rapide.

Les résultats obtenus démontrent une amélioration de la fiabilité par rapport à l'approche consistant à optimiser directement les orientations des plis via un algorithme génétique.

Mots-clés

Matériau composite, optimisation sous incertitudes, multi-échelle, paramètres de stratification, métamodèles, flottement, composites, analyse multi-échelle.

Télécharger la thèse : <https://theses.fr/2023UPAST039>

Théo Flament

Thèse soutenue le 19 décembre 2023 à Châtillon

ED 432 (SMI) - Sciences des métiers de l'ingénieur - Conservatoire national des arts et métiers, Paris

Encadrement

Département Aérodynamique, aéroélasticité, acoustique, ONERA, Châtillon

Encadrants : Antoine Placzek, Mikel Balmaseda, ONERA/DAAA

Directeur de thèse : Jean-François Deü, CNAM

Jury

Évangéline Capiez-Lernout, MSME, Université Gustave Eiffel

Fabrice Thouverez, LTDS, École centrale de Lyon

Florence Nyssen, Cenaero, Charleroi

Marc Mignolet, Arizona State University

Cyril Touzé, IMSIA, ENSTA Paris

Financement

UE

Contact antoine.placzek@onera.fr

Résumé

Ce travail concerne le développement d'un modèle d'ordre réduit non-intrusif de structures non-linéaires géométriques, en vue de remplacer le solveur non-linéaire structure dans le cadre d'un couplage partitionné pour la résolution numérique de problèmes d'interaction fluide-structure et en particulier la prédiction des phénomènes d'aéroélasticité rencontrés au sein des turbomachines. La formulation proposée pour construire ce modèle réduit est basée sur la projection des équations sur une base de dimension réduite, contenant à la fois des modes linéaires de la structure ainsi que des modes duaux. Ces derniers ont pour but d'enrichir la base de modes propres afin de capturer les comportements non-linéaires. Une méthode originale de calcul des coefficients des efforts non-linéaires projetés dans cette base est également proposée. Des efforts sont imposés à la structure contrairement aux déplacements imposés habituellement utilisés. Ainsi, les mêmes cas de chargement peuvent être utilisés à la fois pour la détermination des modes duaux et pour celle des coefficients des efforts non-linéaires projetés. Dans ce manuscrit, la méthodologie de construction du modèle réduit est détaillée. Elle est validée dans un premier temps sur un cas simple de poutre non-linéaire d'Euler-Bernoulli soumise à différents cas de chargement, y compris dans le cadre d'un couplage fluide-structure partitionné impliquant des vibrations induites par des vortex. La capacité de ce modèle réduit à remplacer un solveur éléments finis non linéaire y est démontrée. Une validation sur des cas d'application 3D est également proposée, dont le cas complexe d'une aube de soufflante d'un moteur réaliste soumise à un chargement aérodynamique instationnaire.

Mots-clés

Dynamique des structures, vibrations, non-linéarités géométriques, réduction de modèle, interaction fluide-structure, aéroélasticité.

Mehdi Jadoui

Thèse soutenue le 16 novembre 2023 à Châtillon

ED 386 - Sciences mathématiques de Paris centre - Sorbonne Université

Encadrement

Département Aérodynamique, aéroélasticité, acoustique, ONERA, Châtillon

Encadrant : Christophe Blondeau, ONERA/DAAA

Directeur de thèse : François-Xavier Roux, ONERA/DTIS

Jury

Gilbert Rogé, Dassault Aviation

Luc Giraud, HiePACS, INRIA Bordeaux

Michel Visonneau, Laboratoire de mécanique des fluides, Centrale Nantes

Pierre Jolivet, LIP6, Sorbonne Université Paris

Financement

ONERA

Contact christophe.blondeau@onera.fr



Résumé

L'optimisation multidisciplinaire à base de gradient est une technique largement utilisée dans l'industrie aéronautique et plus particulièrement dans le cadre de dimensionnement de voilures flexibles. Il existe essentiellement deux approches pour le calcul du gradient, à savoir l'approche tangente et l'approche adjointe. Pour une optimisation de forme d'une structure flexible, il y a en général peu de fonctions d'intérêt et de nombreux paramètres de conception. Il est donc adapté d'utiliser la méthode adjointe. Nous nous intéressons ici à l'amélioration des techniques numériques de résolution du problème adjoint couplé fluide-structure.

Dans ce travail, nous considérons l'approche partitionnée d'une part et l'approche monolithique d'autre part. La première a l'avantage de résoudre alternativement le problème fluide et structure en réutilisant des solveurs disciplinaires existants. Elle souffre cependant de limitations numériques dès qu'il s'agit de résoudre des problèmes couplés raides et peut diverger dans le cas d'un fort couplage aéroélastique. L'approche monolithique consiste à résoudre le système adjoint couplé de manière globale et permet d'éliminer les limitations de l'approche partitionnée. En contrepartie elle requiert la mise en place de stratégies de préconditionnement robustes typiquement basées sur un complément de Schur approché et également une mise à l'échelle appropriée du système couplé.

Le mémoire de thèse se compose de trois parties. Tout d'abord nous avons amélioré la résolution du problème adjoint purement fluide en proposant des stratégies de préconditionnement robustes couplées à des solveurs de Krylov emboîtés. Dans un deuxième temps, la convergence de l'approche partitionnée a été améliorée en introduisant des techniques de recyclage d'espace invariant approché entre cycles fluide-structure. Enfin, un solveur monolithique adjoint couplé a été développé et comparé à l'approche partitionnée.

Nous démontrons l'efficacité de ces solveurs sur un cas réaliste de calcul adjoint aéroélastique pour l'aile M6 ONERA en écoulement fluide RANS en considérant un modèle de turbulence entièrement linéarisé. Les résultats numériques ont effectivement montré d'une part l'intérêt du recyclage dans le cadre d'une résolution partitionnée et d'autre part l'intérêt de la résolution monolithique des problèmes numériques raides.

Mots-clés

Adjoint couplé, Krylov, solveur partitionné, GMRES, solveurs linéaires parallèles, solveur monolithique, recyclage, espace invariant, turbulence, complément de Schur.

Télécharger la thèse : <https://theses.fr/2023SORUS350>

Thomas Marchal

Thèse soutenue le 13 mars 2023 à Châtillon

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

Encadrement

Département Multiphysique pour l'énergétique, ONERA, Toulouse

Encadrant : Hugues Deniau, ONERA/DMPE

Directrice de thèse : Bénédicte Cuenot, CERFACS, Toulouse

Jury

Ashwin Chinnayya, Institut Pprime, ISAE-ENSMA

Mario Ricchiuto, CARDAMOM, INRIA Bordeaux

Guido Lodato, CORIA, INSA Rouen

Daniel Mira, Barcelona Supercomputing Center

Jean-Luc Estivalèzes, ONERA/DMPE

Financement CERFACS, ONERA

Contact hugues.deniau@onera.fr

Résumé

L'amélioration des outils d'ingénierie utilisés dans le design des dispositifs industriels de combustion est indispensable afin de respecter les demandes de plus en plus restrictives pour réduire les émissions de gaz à effets de serre. Parmi eux, la mécanique des fluides numériques (CFD) est devenue essentielle pour étudier et optimiser les chambres de combustion au cours des dernières décennies. Elle se complète parfaitement aux expériences réelles qui peuvent être très coûteuses et avec

lesquelles il est impossible d'obtenir des informations sur n'importe quelle quantité d'intérêt en tout point de la chambre de combustion. En utilisant les simulations aux grandes échelles (LES), la CFD décrit directement l'interaction entre les flammes et les structures turbulentes avec une faible modélisation. La qualité des résultats LES est ainsi très dépendante de la discrétisation utilisée incluant à la fois le maillage et également les propriétés de dissipation et de dispersion des méthodes numériques utilisées. Cependant, la plupart des codes LES employés de nos jours dans l'industrie utilisent des schémas de discrétisation spatiale de bas-ordre (LO) à cause de leur faible coût de calcul et leur facilité d'implémentation sur des maillages complexes. Pourtant, les méthodes numériques d'ordres élevés (HO) pour la LES sont développées depuis deux décennies et ont été appliquées sur des écoulements non-réactifs amenant à des résultats plus précis que les méthodes LO avec un plus faible coût de calcul. Bien que les méthodes HO semblent très prometteuses en combustion, en particulier pour mieux décrire le front de flamme, leur utilisation pour des écoulements réactifs restent encore à être démontrée. Au cours de ces travaux, les avantages et les bénéfices des méthodes HO en combustion sont évalués en utilisant la méthode des Différences Spectrales (SD) avec du raffinement hp. Premièrement, il est démontré que la formulation originelle des SD est instable pour des écoulements multi-espèces avec des propriétés thermodynamiques variant avec la température et la composition. Il a été constaté que calculer les variables primitives aux points solutions puis de les extrapoler aux points flux, au lieu de faire l'inverse en extrapolant d'abord les variables conservatives, rend stable la méthode SD dans ce cas-ci. De plus, une nouvelle méthodologie, également plus stable pour calculer les flux diffusifs aux interfaces des cellules est détaillée. Enfin, les conditions aux limites caractéristiques et de murs ont été étendues aux écoulements multi-espèces dans le formalisme SD. Avec ces développements, des flammes laminaires pré-mélangées 1D et 2D ont été simulées avec des mécanismes réduits à 2 réactions ou des mécanismes réduits analytiquement. Les résultats sont très proches de ceux obtenus avec des solveurs de référence bien établis en combustion. Il est montré que pour un même niveau d'erreur, il est plus efficace d'utiliser des maillages grossiers avec des grandes valeurs de p et non l'inverse. Par conséquent, le raffinement local en p , qui applique des grandes valeurs de p dans les régions d'intérêts seulement, permet de garder une bonne précision à un coût de calcul plus faible. Ceci est particulièrement intéressant pour des simulations de combustion où le front de flamme est très localisé et requiert une plus grande précision que le reste de l'écoulement. Il est également observé sur ces cas simples 1D et 2D que la méthode SD est moins sensible à la discrétisation du front de flamme que les solveurs volumes finis comme AVBP. Pour terminer, deux différentes configurations de flammes 3D turbulentes ont été simulées avec l'algorithme des SD étendu aux écoulements réactifs.

Mots-clés Méthode d'ordre élevé, méthode des différences spectrales, combustion, injection de turbulence, Modèle TFLES, gaz à effet de serre, spectroscopie de flamme.

Télécharger la thèse : <https://theses.fr/2023INPT0030>

Maxime Pouliquen

Thèse soutenue le 9 juin 2023 à Lille

ED 579 (SMEMaG) - Sciences mécaniques et énergétiques, matériaux et géosciences - Université Paris-Saclay

Encadrement

Département Matériaux et structures, ONERA, Lille

Encadrants : Roland Ortiz, Johann Rannou, François-Xavier Irisarri ONERA/DMAS ;
Juan Pedro Berro Ramirez, Altair Engineering

Directeur de thèse : Olivier Allix, ENS Paris-Saclay

Jury

Emmanuelle Abisset-Chavanne, Arts et Métiers ParisTech

Christophe Bouvet, ISAE-SUPAERO

Pedro Camanho, Departamento de Engenharia Mecânica, Université de Porto

Frédéric Laurin, ONERA/DMAS

Financement

CIFRE ALTAIR

Contact roland.ortiz@onera.fr

Résumé

Les composites stratifiés sont, aujourd'hui, largement utilisés dans les structures aéronautiques, en raison de leurs propriétés spécifiques et de leur faible masse volumique. Cependant, la complexité de leur réponse, en particulier pour des sollicitations d'impact, conduit à la réalisation d'un grand nombre d'essais pour leur certification. Pour diminuer les coûts induits, le concept de *virtual testing* s'est imposé.

L'enjeu du *virtual testing* est, à partir de modèles intégrant la physique, de pouvoir remplacer les essais à grande échelle les plus coûteux, par des simulations numériques. Cette stratégie n'est pas aujourd'hui mature, en raison, notamment, de la complexité des phénomènes mis en jeu à petite échelle (difficiles à modéliser et très coûteux à simuler), et, dans le cas des chargements d'impacts, à la méconnaissance de la dépendance à la vitesse de sollicitation des matériaux utilisés. C'est sur cette problématique que se sont concentrés les travaux conduits dans cette thèse, où différents aspects de la modélisation des stratifiés composites soumis à des sollicitations d'impact ont été étudiés. Pour cela, un modèle numérique, adapté à la représentation de la propagation des endommagements sous sollicitation d'impact a été développé. L'influence des effets de vitesse sur le comportement des plis, a ensuite été étudiée lors de simulations d'impacts à différentes vitesses, et sur différentes stratifications, permettant de mettre en évidence leur influence sur les endommagements. En raison d'un manque de consensus dans la littérature, un des aspects les plus ouverts concerne la sensibilité du délaminage à la vitesse de sollicitation.

La thèse s'est concentrée sur deux aspects. Le premier concerne la question d'une modélisation correcte des effets de vitesse pour des chargements à vitesse variable. Le second, sur la proposition d'un modèle qui respecte les informations expérimentales qui nous ont paru les plus robustes concernant le délaminage. Une comparaison entre les résultats des simulations et des essais expérimentaux a permis de démontrer l'importance (i) d'une modélisation discrète de la rupture dans les plis du stratifié et (ii) du couplage entre les endommagements des plis et des interfaces. Enfin, une stratégie de chaînage de simulation, essais d'impact – essai de compression après impact dans un code industriel a été présentée, facilitant ainsi l'étude de la tenue résiduelle des stratifiés composites soumis aux impacts.

Mots-clés

Simulation numérique, modèles cohésifs, délaminage, effets de vitesse.

Pierre Seize

Thèse soutenue le 13 mars 2023 à Châtillon

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

Encadrement

Département Multiphysique pour l'énergétique, ONERA, Toulouse

Directeurs de thèse : Guillaume Puigt, Lionel Matuszewski, ONERA/DMPE

Jury

Pierre-Henri Maire, CESTA, CEA

Rodolphe Turpault, Institut de Mathématiques de Bordeaux

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

Jocelyne Erhel, SAGE, INRIA Rennes

Xavier Vasseur, IRIT, Toulouse

Financement

DGA/AID, ONERA

Contact guillaume.puigt@onera.fr

Résumé

Cette thèse s'intéresse aux performances de l'intégration temporelle du code CEDRE sur des problèmes stationnaires. CEDRE est une plateforme logicielle visant la résolution des problèmes multi-physiques pour des applications en énergétique à échelle industrielle. Elle est composée de plusieurs solveurs, chacun dédié à un ensemble de phénomènes physiques. Plus précisément, nous regardons comment améliorer la rapidité, robustesse et convergence de l'intégration temporelle. Pour des raisons de stabilité nous nous intéressons à des méthodes implicites, en particulier à la méthode d'Euler implicite. Ces méthodes nécessitent la résolution de problèmes non-linéaires, qui nécessitent à leur tour la résolution de problèmes linéaires. Le passage de l'un à l'autre se fait par la présence de la Jacobienne des fonctions du problème non-linéaire.

Une méthode de Krylov est déjà existante dans CEDRE pour l'inversion de systèmes linéaires : la méthode GMRES. Nous utilisons le fait qu'elle n'a pas explicitement besoin de la matrice pour l'inverser et mettons en place une méthode JFNK. Le but est d'améliorer la précision de la matrice Jacobienne utilisée, en espérant que cela améliorera la précision globale de l'intégration temporelle. Ceci est justifié par le fait qu'avant cette thèse la Jacobienne utilisée est très approximée, notamment en ce qui concerne les modélisations fines des solveurs, comme les termes sources turbulents, et les méthodes de reconstruction, comme les méthodes MUSCL.

Une implémentation d'une méthode sans-matrice est mise en place de manière générique de sorte que tout solveur de CEDRE puisse utiliser cette formulation. Cela ouvre de plus la porte à une résolution implicite couplée des solveurs, chose non permise avec la structure actuelle de CEDRE. La méthode JFNK est comparée aux méthodes préexistantes de CEDRE sur des applications typiques de complexité croissantes choisies afin de représenter les fonctionnalités du solveur.

Dans un second temps, nous élargissons le contexte en nous intéressant aux méthodes d'intégration exponentielles, cette fois avec le solveur JAGUAR. Ce changement de solveur est justifié par la plus grande précision apportée par la méthode des Différences Spectrales utilisée comme schéma de discrétisation spatiale, précision nécessaire à l'analyse de ces nouveaux schémas temporels très précis. Le choix de s'intéresser aux méthodes exponentielles est justifié par le fait que ces méthodes réutilisent beaucoup des ingrédients de l'approche JFNK précédente. Nous choisissons, implémentons et analysons un ensemble de méthodes exponentielles, en comparaison à des méthodes déjà présentes, sur plusieurs cas pour montrer leur intérêt.

Mots-clés Méthodes numériques, énergétique, multi-physique, stationnaire, analyse numérique, énergie.

Télécharger la thèse : <https://theses.fr/2023ESAE0013>

Benjamin Constant

Thèse soutenue le 20 mars 2023 à Châtillon

ED 39 (EDMI) - Mathématiques et informatique - Université de Bordeaux

Encadrement

Département Aérodynamique, aéroélasticité, acoustique, ONERA, Châtillon

Encadrante : Stéphanie Péron, ONERA/DAAA

Directrice de thèse : Héloïse Beaugendre, ENSEIRB-MATMECA, INP Bordeaux

Jury

Éric Lamballais, Institut Pprime, Poitiers

Julien Favier, M2P2, Aix-Marseille Université

Luc Mieussens, Institut de Mathématiques de Bordeaux

Michel Visonneau, Laboratoire de mécanique des fluides, Centrale Nantes

Marc Terracol, ONERA/DAAA

Financement

ONERA

Contact stephanie.peron@onera.fr

Prix doctorant SNA 2022

Résumé

Ce sujet de thèse concerne la simulation numérique d'écoulements turbulents compressibles autour de géométries complexes. Au cœur de la chaîne de simulation numérique, l'étape de génération de maillage est aujourd'hui le principal goulet d'étranglement d'un processus de plus en plus automatisé, et constitue un défi d'ampleur pour l'industrie aérospatiale. Pour des configurations réalistes présentant de nombreux détails géométriques complexes, cette étape peut ainsi requérir l'intervention manuelle d'un expert pour plusieurs semaines, contre des temps de calcul de l'ordre de la journée pour des simulations de type RANS. Aussi, l'ONERA développe depuis plusieurs années une méthode de frontières immergées (IBM) pour s'affranchir de la génération d'un maillage conforme aux obstacles. Cette approche s'appuie sur une méthode de génération automatique et rapide de maillages cartésiens multi-blocs, et consiste à forcer explicitement la solution fluide au centre des cellules positionnées à proximité de l'obstacle immergé. Un modèle de paroi est également pris en compte pour les simulations d'écoulements à grand nombre de Reynolds, afin d'éviter un surcoût trop important lié aux nombres de mailles cartésiennes nécessaires à la résolution de la couche limite turbulente par le maillage seul. Cette méthode s'avère particulièrement efficace pour effectuer des calculs RANS autour de configurations de type avant-projet, où elle offre un bon compromis entre temps de calcul et qualité de la solution. Cependant, la capture des coefficients pariétaux doit encore être améliorée, pour permettre une analyse quantitative fine des phénomènes physiques intervenant au sein de la couche limite turbulente.

Cette thèse a pour principal objectif d'améliorer la robustesse et la précision de la méthode de frontières immergées développée par Péron et al., afin de démontrer que celle-ci peut être une alternative viable aux approches structurées classiques. Pour ce faire, nous proposons une méthode innovante, basée sur un positionnement optimal des points à forcer autour de la géométrie immergée selon différents critères géométriques et physiques. Ces développements visent à éliminer les oscillations parasites pouvant intervenir au voisinage de la paroi, et à améliorer l'intégration champ-proche des efforts aérodynamiques. La seconde partie de ces travaux consiste à étendre notre modélisation proche paroi à partir de l'intégration des effets de gradients de pression extérieurs, sans compromettre la stabilité globale de l'approche. Nos développements sont finalement étudiés pour différents cas-tests académiques 2D et deux cas d'applications 3D (un aérostat et un avion en configuration hypersustentée), pour des nombres de Reynolds de l'ordre du million et pour des nombres de Mach caractéristiques des régimes subsoniques et transsoniques.

Mots-clés Méthode de frontières immergées (*Immersed Boundary Methods - IBM*), lois de paroi, simulations RANS, maillages cartésiens.

Télécharger la thèse : <https://theses.fr/2023BORD0065>

Valentin Fer

Thèse soutenue le 23 janvier 2023 à Châtillon

ED 432 (SMI) - Sciences des métiers de l'ingénieur - École nationale supérieure des arts et métiers, Paris

Encadrement

Département Aérodynamique, aéroélasticité, acoustique, ONERA, Châtillon

Encadrants : Sébastien Bourasseau, Cédric Content, ONERA/DAAA

Directeur de thèse : Jean-Christophe Robinet, DynFluid, Arts et Métiers

Jury

Lutz Lesshafft, LadHyX, École polytechnique

Taraneh Sayadi, Institut Jean Le Rond d'Alembert, Sorbonne Université

Nicolas Gourdain, ISAE-SUPAERO

François Gallaire, Laboratoire de mécanique des fluides et instabilités, EPFL

Grégory Dergham, Safran Tech

Cédric Content, ONERA/DAAA

Denis Sipp, ONERA/DAAA

Samir Beneddine, ONERA/DAAA

Financement

Safran Tech, ONERA

Contact sebastien.bourasseau@onera.fr

Résumé

Le décollement tournant est un phénomène instationnaire pouvant se produire, dans des conditions physiques spécifiques, au sein des compresseurs axiaux de turbomachines. Même de nos jours, la compréhension de ce type d'évènement potentiellement destructeur demeure incomplète mais pourrait être améliorée par une étude de stabilité globale. Après avoir calculé un point fixe des équations de conservation gouvernant l'écoulement, la technique consiste à résoudre un problème aux valeurs propres dont l'inversion nécessite de nombreuses résolutions de grands systèmes linéaires creux à valeurs complexes. La stratégie usuelle est de recourir à des méthodes d'inversions directes de type factorisation LU. Ce type de pratique devient néanmoins inutilisable sur des cas dépassant les 10^7 degrés de liberté, du fait des limitations mémoires. Cette difficulté peut être outrepassée en utilisant des méthodes itératives de type Krylov préconditionnées. Par ailleurs, l'arithmétique complexe n'étant pas vectorisable, les systèmes linéaires complexes impliqués dans les problèmes de stabilité globale doivent être reformulés dans une version réelle équivalente, ceci afin de pouvoir bénéficier des optimisations HPC récemment menées à l'ONERA.

Dans cette thèse, une méthode permettant le passage à l'échelle d'outils de stabilité globale a été développée, la MSGKF – pour Méthode de stabilité globale K formulée. Le produit matrice-vecteur utilisé pour résoudre le problème aux valeurs propres est obtenu par différentiation algorithmique qui préserve l'optimisation des *patterns* de boucle. Les systèmes complexes impliqués dans les problèmes de stabilité globale ont été réécrits en formulation K, qui préserve la sparsité des opérateurs et permet la réutilisation des routines de préconditionnement les plus avancées en CFD compressible. Le problème aux valeurs propres K formulé est résolu grâce à l'algorithme de Krylov-Schur dans lequel les inversions sont réalisées à l'aide d'un GMRES préconditionné. La MSGKF est ensuite validée sur des cas tests à difficultés croissantes.

Mots-clés

Stabilité globale, point fixe, méthodes de Krylov, différentiation algorithmique, formulation K, sensibilité.

Télécharger la thèse : <https://theses.fr/2023HESAE010>

Alexandre Suss

Thèse soutenue le 20 décembre 2023 à Châtillon

ED 432 (SMI) - Sciences des métiers de l'ingénieur - Conservatoire national des arts et métiers, Paris

Encadrement

Département Aérodynamique, aéroélasticité, acoustique, ONERA, Châtillon

Encadrants : Ivan Mary, ONERA/DAAA

Thomas Le Garrec, ONERA/DAAA

Directeur de thèse : Simon Marié, DynFluid, CNAM

Jury

Éric Lamballais, Institut Pprime, Université de Poitiers

Jonas Latt, Scientific and Parallel Computing lab, Université de Genève

Pierre Sagaut, M2P2, Université Aix-Marseille

Paola Cinnella, Institut Jean Le Rond d'Alembert, Sorbonne Université

François Dubois, CNAM

Financement

ONERA

Contact ivan.mary@onera.fr

Prix des doctorants ONERA SNA 2023

le **cnam**



Résumé

La CFD est devenue un outil de conception indispensable pour l'industrie aéronautique. Alors que la plupart des simulations industrielles sont réalisées à l'aide d'une approche RANS (*Reynolds Averaged Navier-Stokes*), celle-ci montre ses limites dès lors qu'il s'agit de caractériser finement des écoulements turbulents instationnaires ou d'étudier des phénomènes aéroacoustiques large-bande. Ainsi, les industriels expriment un besoin grandissant d'outils de simulation haute-fidélité performants. Deux méthodes numériques se montrent particulièrement prometteuses pour la réalisation de telles simulations dans un futur proche : les méthodes Navier-Stokes et la méthode de Boltzmann sur réseau (*Lattice Boltzmann Method - LBM*).

Ces travaux ont contribué à fournir une meilleure compréhension des avantages et des inconvénients respectifs de ces deux méthodes, démontrant que les méthodes de Boltzmann sur réseau et Navier-Stokes se complètent plutôt qu'elles ne se concurrencent. Pour cela, l'étude s'est divisée en deux grandes parties. En premier lieu, une comparaison exhaustive et rigoureuse des méthodes de Boltzmann sur réseau et Navier-Stokes a été réalisée. Différents aspects des méthodes numériques ont été discutés comme leur dissipation et dispersion intrinsèque, leur performance dans un environnement de calcul parallèle ainsi que leur capacité à simuler efficacement différents problèmes canoniques de la LES à un niveau de précision donné.

Cette étude a permis d'apporter un nouveau regard sur les propriétés des méthodes de Boltzmann sur réseau et Navier-Stokes et de fournir des éléments d'aide à la décision afin d'orienter le choix des ingénieurs vers l'utilisation d'une méthode par rapport à l'autre selon le type d'application visée et le niveau de fidélité requis. Dans un second temps, la possibilité de la mise en place d'un couplage entre les méthodes de Boltzmann sur réseau et Navier-Stokes a été explorée. En effet, de nombreux aspects de la LBM posent encore problèmes ou restent peu efficaces. En particulier le traitement numérique de la zone de proche paroi reste mal défini due à la forme cartésienne des maillages imposée par la méthode. A l'inverse, les approches Navier-Stokes classiques sont particulièrement performantes dans le voisinage de la paroi grâce à l'utilisation de maillages curvilignes à très grand rapport d'aspect et de méthodes d'intégration temporelle implicites. Ainsi, une méthode numérique hybride innovante a été développée, reposant sur un couplage zonal des méthodes de Boltzmann sur réseau et Navier-Stokes, puis étendu au cas de maillages recouvrants (approche Chimère). De nombreuses validations montrent l'intérêt de cette stratégie. Notamment, cette nouvelle méthode hybride permet de réduire le coût de simulations aéroacoustiques directes en offrant une précision optimale.

Mots-clés

Méthode de Boltzmann sur réseau, Navier-Stokes, méthode des volumes finis, couplage, comparaison, aérodynamique, aéroacoustique.

Télécharger la thèse : <https://theses.fr/s263754>

Matthias Baray

Thèse soutenue le 17 janvier 2023 à Toulouse

ED 323 (GEET) - Génie électrique, électronique et télécommunications - Institut supérieur de l'aéronautique et de l'espace, Toulouse

Encadrement

Département Traitement de l'information et systèmes, ONERA, Toulouse

Encadrant : David Levadoux, ONERA/DTIS

Directeur de thèse : Jean-René Poirier, LAPLACE, INP Toulouse

Jury

Nathalie Raveu, N7/3EA, INP Toulouse

Christophe Geuzaine, ACE, Université de Liège

Sébastien Tordeux, LMAP, Université de Pau et des Pays de l'Adour

Luc Giraud, HiePACS, INRIA

Gildas Kubické, DGA

Anthony Nouy, MIB, Centrale Nantes

Financement

DGA/AID, ONERA

Contact david.levadoux@onera.fr

Résumé

La résolution de problèmes de diffraction d'ondes en régime harmonique par des méthodes intégrales de frontière conduit à des systèmes linéaires pleins dont le stockage et la résolution efficaces sont encore des sujets d'actualité malgré les avancées significatives apportées par les méthodes FMM (*Fast Multipole Method*) et H-matrix.

Cette thèse a pour objectif d'étudier un algorithme de compression matricielle encore peu utilisé dans ce contexte : la décomposition *Quantized Tensor Train* (QTT). Les matrices sont exprimées dans un format tensoriel, c'est-à-dire sous la forme d'un tableau multidimensionnel, et comprimées à l'aide d'une généralisation de la séparation des variables permettant un stockage parcimonieux et hiérarchique. Près de 2 à 3 ordres de grandeur de différence en mémoire peuvent être observés par rapport aux H-matrices et dans certains cas le stockage peut être estimé en $O(N)$ ou en $O(\log N)$ (N étant le nombre de degrés de liberté).

À travers des expériences numériques 2D et 3D en acoustique et en électromagnétisme, nous mettons en lumière les avantages et les limites de cette méthode. Son évaluation nous permet de proposer des techniques d'utilisation de QTT au service de l'accélération des solveurs H-matrix et FMM. En particulier nous montrons que, grâce à l'algorithme QTT, il est possible de construire des préconditionneurs efficaces et originaux pour traiter des problèmes de diffraction par des objets non canoniques telles des surfaces ouvertes exfoliées, rugueuses ou résonantes.

Mots-clés

Décomposition quantifiée en train de tenseurs, tenseurs de bas rang, méthode éléments finis de frontière, diffraction d'onde, EFIE, préconditionneur.

Axel Maupoux

Thèse soutenue le 18 décembre 2023 à Toulouse

ED 475 (EDMITT) - Mathématiques, informatique, télécommunications de Toulouse -
Université de Toulouse III Paul Sabatier

Encadrement

Département Traitement de l'information et systèmes, ONERA, Toulouse

Encadrant : Guillaume Dufour, ONERA/DTIS

Directrice de thèse : Claudia Negulescu, Institut de mathématiques de Toulouse

Jury

Pauline Lafitte, département de Mathématiques, Centrale Supélec

Philippe Helluy, IRMA, Université de Strasbourg

Pierre Degond, Institut de mathématiques de Toulouse

Philippe Thieullen, Institut de mathématiques de Bordeaux

Financement

DGA/AID, ONERA

Contact guillaume.dufour@onera.fr

Résumé

Ces dernières années, les drones sont régulièrement utilisés pour réaliser des missions complexes en autonomie pour des applications variées, comme par exemple la surveillance du vieillissement d'un pont. Avec la baisse des coûts de fabrication et la maîtrise croissante de leur navigation, les applications à grand nombre de drones commencent à être imaginées, pour remplacer les alternatives coûteuses, comme les hélicoptères. Cependant cela requiert d'automatiser les réactions des éléments de la flotte. De ces décisions individuelles émergent alors le comportement global et l'accomplissement des objectifs du groupe. L'enjeu principal est donc de calibrer les différents paramètres régissant les interactions au sein de la flotte, afin de s'assurer qu'une mission donnée sera accomplie. Pour cela, nous voulons valider numériquement un modèle mathématique représentant la flotte. L'objectif de cette thèse est de développer un tel modèle, représentant une variété de comportements souhaités et incluant les limitations techniques propres aux drones.

Dans ce but, nous étudierons les modèles de consensus déjà connus, comme celui de Cucker-Smale et ses dérivés, et ferons le lien avec des technologies embarquées dans les drones, telles que la navigation par flot optique. Nous comparerons également les échelles de descriptions micro- (niveau individuel) et macroscopiques (niveau global). La première permet une description précise avec un fort coût de simulation pour de grandes flottes, alors que la seconde a un coût moindre, mais décrit de manière globale le mouvement des drones. Enfin, nous proposerons un nouveau modèle de loi de commande permettant à une flotte d'occuper une zone, en se basant sur des quantités macroscopiques.

Mots clés

Flotte de drones, dynamique des populations, Cucker-Smale, contrôle décentralisé, *flocking*, occupation de zone, évitement de collisions, analyse mathématique, simulation numérique.

Tuan Dung Nguyen

Thèse soutenue le 6 décembre 2023 à Toulouse

ED 475 (MITT) - Mathématiques informatique télécommunications de Toulouse -
Université Toulouse III Paul Sabatier

Encadrement

Département Traitement de l'information et systèmes, ONERA, Toulouse

Encadrant : François Rogier, ONERA/DTIS

Directeur de thèse : Christophe Besse, Institut de Mathématiques de Toulouse

Jury

Raphaël Loubère, Institut de Mathématiques de Bordeaux

Michel Mehrenberger, Institut de Mathématiques de Marseille

Marie-Hélène Vignal, Institut de Mathématiques de Toulouse

Konstantinos Kourtzanidis, CERTH, Thessalonique

Financement

Ministère de l'Enseignement supérieur et de la Recherche, ONERA

Contact guillaume.dufour@onera.fr

Résumé

Selon une étude publiée en 2021, l'industrie aéronautique est responsable de 3.5% des facteurs de changement climatique liés aux activités humaines entre 2010 et 2018, dont les émissions de dioxyde de carbone et d'oxydes d'azote. Les études menées au cours des deux dernières décennies ont montré que les dispositifs à décharge électrique appelés actionneurs de plasma sont capables de contrôler l'écoulement autour d'un profil aérodynamique et de réduire la traînée sur sa surface, ce qui est prometteur pour réduire la consommation de carburant des avions.

Cette thèse contribue à la modélisation numérique des décharges électriques dans l'air qui n'a jamais été une tâche facile en raison de sa nature multi-échelle à la fois en espace et en temps. Nos travaux se focalisent sur deux axes : l'amélioration de la qualité de précision des solutions numériques et la réduction du temps CPU des simulations. Pour le premier objectif, nous concevons des schémas d'ordre élevé connus collectivement sous le nom de méthodes de Scharfetter-Gummel avec correction de courant (SGCC), qui sont une généralisation du schéma Scharfetter-Gummel standard (d'ordre un) qui est largement utilisé dans la simulation des plasmas. Pour le deuxième objectif, nous développons une stratégie d'intégration temporelle implicite pour la simulation de la décharge couronne qui permet de réduire le temps de calcul à quelques heures, au lieu de plusieurs jours, voire semaines, avec les schémas explicites en temps.

Mots-clés

Méthode multi-échelle, schéma implicite, méthode volumes finis, plasma hors-équilibre, décharge électrique, modèle hydrodynamique, vent ionique, actionneur de plasma, contrôle d'écoulements.

**Thèses de doctorat ONERA
soutenues en 2023**

**DOMAINE SCIENTIFIQUE
TRAITEMENT DE L'INFORMATION
ET SYSTÈMES**

Thèses de doctorat ONERA soutenues en 2023

DOMAINE TRAITEMENT DE L'INFORMATION ET SYSTÈMES

Selon le département et ses thématiques scientifiques :

TRAITEMENT DE L'INFORMATION ET SYSTÈMES

Identification et commande des systèmes

Clément Chahbazian	Filtrage particulière sur groupes de Lie : application à la navigation	228
Vincent Guibert	Modélisation hybride polynômiale globale de l'aérodynamique d'un avion autonome en décrochage	230
Clara Leparoux	Contrôle optimal sous incertitudes pour l'atterrissage d'un premier étage de lanceur réutilisable	232
Amath Waly Ndiaye	Lois de commande avancées pour un système de freinage d'avion civil	234

Perception et traitement de l'information

Hanae Labriji	Imagerie d'ombre des satellites en orbite haute	236
Rémy Leroy	Méthodes d'apprentissage profond pour systèmes de vision 3D	238

Robotique et autonomie

Maxime Chareyre	Apprentissage non-supervisé pour la découverte de propriétés d'objets par découplage entre interaction et interprétation	240
Félix Quinton	Stratégies de résolution dynamique pour le problème d'allocation de tâches multi-robots favorisant la connexité du réseau de communications	242

Sûreté et sécurité des systèmes cyber-physiques

Marie Chiron	Estimation de probabilité de défaillance et de sa sensibilité locale dans un espace elliptique standard de grande dimension	244
Arthur Clavière	Vérification de la sûreté des systèmes basés réseaux de neurones s'appuyant sur les méthodes formelles	246

Intelligence artificielle et décision

Camille Blanchard	Méthodologie et outils formels pour la génération et l'analyse de scénarios prospectifs : application aux futurs possibles de l'aviation	248
--------------------------	--	-----

Intelligence artificielle et décision

Mathieu Marchand	Méthodes d'apprentissage et de déclenchement événementiel pour la coordination de systèmes multi-agents	250
Samuel Squillaci	Optimisation de plans de mission pour une constellation de satellites d'observation de la Terre	252
Trong Hieu Tran	Méthodes d'optimisation hybrides pour des problèmes de routages avec profits	254

Conception et optimisation des systèmes

Rémy Charayron	Avancées en optimisation bayésienne multi-fidélité pour la conception multi-disciplinaire de drones	256
Juliette Gamot	Développement d'algorithmes pour les problèmes d'agencement interne à espace de recherche conditionnel	258
Vincenzo Palladino	Méthode de conception pluridisciplinaire appliquée à un avion régional à faibles émissions	260
Marco Saporito	Processus d'analyse et d'optimisation robuste pour la conception d'aéronefs flexibles	262

Ingénierie cognitive et interaction homme-système

Marin Le Guillou	Intelligence artificielle explicable : Exploration du contenu et du format de l'interaction humaine avec l'IA	264
Marine Pagliari	Intelligence artificielle (IA) et transparence : prédictibilité, sentiment de contrôle et confiance	266
Anne-Laure Rineau	Etude des relations entre intégration visuo-vestibulaire et agentivité dans la perception du mouvement propre	268
Rémi Sanchez	Confiance et prise de décision : Étude de l'impact des processus d'action sur la confiance perceptive	270
Mathieu Thomas	Indices visuels, mouvement et pilotage. Caractérisation et enrichissement du support informationnel pour la conception d'aides au contrôle du vol d'hélicoptère	272
Ombeline Aiello	Validation anticipée de conceptions de systèmes par une approche d'ingénierie conjointe basée modèles et optimisation	274

Clément Chahbazian

Thèse soutenue le 9 mai 2023 au Plessis-Robinson

ED 580 (STIC) - Sciences et technologies de l'information et de la communication
- Université Paris-Saclay

Encadrement

Département Traitement de l'information et systèmes, ONERA, Palaiseau

Encadrants : Nicolas Merlinge, Karim Dahia, ONERA/DTIS

Directeur de thèse : Christian Musso, ONERA/DOTA

Jury

Nicolas Le Bihan, Gipsa-lab, INP Grenoble

Audrey Giremus, IMS, Université de Bordeaux

Hichem Snoussi, LM2S, Université de Technologie de Troyes

Silvère Bonnabel, Mines ParisTech, PSL

François Le Gland, IRMAR, INRIA Rennes

Bénédicte Winter-Bonnet, MBDA France (invitée)

Aurélien Blanc, MBDA France (invité)

Financement

CIFRE Défense MBDA

Contact nicolas.merlinge@onera.fr, karim.dahia@onera.fr

Résumé

L'estimation bayésienne est une discipline importante dans un grand nombre de domaines scientifiques. Elle se base sur le théorème de Bayes qui permet d'associer une observation avec une connaissance a priori sur un événement ou un paramètre. Cependant, ce théorème ne peut pas être résolu analytiquement en présence de fortes non-linéarités, aussi de nombreuses méthodes ont été développées pour le traiter numériquement, dont les filtres particuliers qui représentent les densités de probabilités avec un nuage de particules. Cette approche permet de traiter des problèmes fortement non-linéaires avec un cadre générique. Cependant, les filtres particuliers présentent des défis, tels que l'étape de rééchantillonnage, la résolution de problèmes de grande dimension, ainsi que la charge calculatoire.

En parallèle, de récentes études portant sur des algorithmes d'estimation dans les groupes de Lie ont montré l'intérêt de ces approches sur de nombreux aspects. En effet, représenter les variables d'estimation sur les groupes de Lie permet d'utiliser les propriétés algébriques et géométriques de ces espaces et amène à une gestion naturelle des incertitudes. Ainsi, les filtres obtenus présentent une amélioration de leur précision et de leur robustesse par rapport aux approches classiques. Cette thèse porte sur le domaine nouveau du filtrage particulière dans les groupes de Lie. Elle propose un ensemble de filtres particuliers résolvant l'équation de Bayes dans les groupes de Lie, ainsi qu'une borne d'erreur minimale. De nouveaux algorithmes sont développés en particulier pour l'étape de rééchantillonnage et pour la représentation des particules. Les méthodes proposées sont appliquées à la navigation de systèmes autonomes, qui exigent des algorithmes robustes pour estimer leur état (position, vitesse et attitude) afin d'effectuer leur contrôle et leur guidage. Les algorithmes de navigation utilisent les mesures d'une centrale inertielle. Cependant, les défauts de ce capteur génèrent une dérive temporelle des grandeurs cinématiques estimées. Il est donc nécessaire de les recalibrer en vol par les mesures de senseurs auxiliaires, via un processus de fusion de données.

Les algorithmes proposés dans la thèse ont été testés sur des scénarios de navigation exigeants, et ont montré un gain significatif en précision et en robustesse par rapport aux méthodes classiques.

Mots clés :

Groupes de Lie, estimation, filtre particulière, navigation

Vincent Guibert

Thèse soutenue le 6 juillet 2023 à Toulouse

ED 309 (EDSYS) - Systèmes - Institut supérieur de l'aéronautique et de l'espace,
Toulouse

Encadrement

Département Traitement de l'information et systèmes, ONERA, Toulouse

Encadrant : Mathieu Brunot, Airbus

Directeurs de thèse : Jean-Philippe Condomines, ENAC ;
Jean-Marc Biannic, ONERA/DTIS

Jury

Guillaume Mercère, Laboratoire LIAS, Université de Poitiers

Mark Lowenberg, University of Bristol

Isabelle Fantoni, LS2N, Nantes Université

Charles Poussot-Vassal, ONERA/DTIS

Financement

DGA/AID, projet Concorde

Contact jean-marc.biannic@onera.fr

Résumé

Le contrôle d'un avion en phase de décrochage est depuis longtemps un problème majeur de l'aéronautique. Il a même récemment connu un regain d'intérêt suite au développement de la mobilité urbaine. Le principal écueil auquel est confronté un auteur qui s'attaque à ce sujet est l'absence de modélisation fiable du comportement de l'avion. En effet, bien que de multiples études aient été menées, aucune ne s'est encore imposée comme solution privilégiée. De plus, les méthodes locales (CFD, splines, etc.), souvent les plus précises, sont complexes et peu adaptées aux applications de contrôle. De plus, peu de méthodes ont été développées spécifiquement pour les drones malgré des différences significatives par rapport aux avions de transport.

L'objectif de cette étude est donc de proposer un modèle global, basé sur des données, de la dynamique d'un avion autonome sur une enveloppe de vol étendue. Les modèles hybrides sont particulièrement bien adaptés à cette tâche. En effet, ils peuvent modéliser les hystérésis, une étant présente lors du décrochage, tout en conservant un faible nombre de modes, ce qui minimise leur impact dans les applications de contrôle. Combinés à des sous-modèles polynomiaux, ils permettent également de s'affranchir de toute information a priori dans le processus d'identification. Cette thèse propose ainsi plusieurs modèles hybrides polynomiaux pour le décrochage statique et dynamique, tous identifiés à partir de données expérimentales obtenues à l'ENAC, montrant leur capacité à modéliser avec précision le phénomène complexe du décrochage.

Mots clés

Avion autonome, modélisation, décrochage, modélisation hybride, modélisation polynômiale.

Clara Leparoux

Thèse soutenue le 18 septembre 2023 à Palaiseau

ED 574 (EDMH) - École doctorale de mathématiques Hadamard - Institut Polytechnique de Paris

Encadrement

Département Traitement de l'information et systèmes, ONERA, Palaiseau

Encadrant : Bruno Hérisse, ONERA/DTIS

Directeur de thèse : Frédéric Jean, UMA, ENSTA Paris

Jury

Hasnaa Zidani, LMI, INSA Rouen

Nicolas Petit, CAS, Mines ParisTech

Jean-Baptiste Caillau, LJAD, Université Côte d'Azur

Andrea Simonetto, UMA, ENSTA Paris

Éric Bourgeois, CNES

Financement

ENS Paris-Saclay

Contact bruno.herisse@onera.fr

Résumé

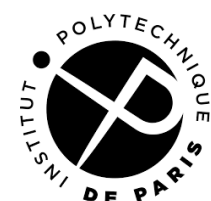
Les travaux de cette thèse portent sur la planification de trajectoire pour l'atterrissage d'un lanceur réutilisable, c'est-à-dire que nous cherchons à calculer une trajectoire de référence et un contrôle, qui sera appliqué en boucle ouverte pour réaliser l'atterrissage ou servira de référence à un algorithme d'asservissement (suivi de trajectoire).

Nous traitons la planification de trajectoire comme un problème de contrôle optimal, cherchant le contrôle permettant d'atteindre une cible en position et en vitesse en minimisant un coût, la consommation de carburant, et en respectant des contraintes sur le contrôle et l'état. Deux approches sont possibles pour résoudre ce problème. D'une part, une modélisation déterministe permet de bénéficier des nombreux outils efficaces du contrôle optimal déterministe, mais elle ne permet pas d'assurer la robustesse voulue. D'autre part, une modélisation stochastique permet la modélisation de nombreux aléas à l'origine d'incertitudes, mais les méthodes numériques de résolution de problèmes de contrôle optimal stochastique manquent d'efficacité, en particulier si la dimension du système est élevée. Notre travail considère et compare ces deux approches. Dans un premier temps, nous étudions la solution optimale du problème déterministe et mettons en avant la persistance de la structure Max-Min-Max du contrôle avec des contraintes fortes sur le contrôle et l'état. Cette structure étant particulièrement sensible aux perturbations, nous en déduisons qu'il est nécessaire de prendre en compte la présence d'aléas pour calculer une solution robuste. Dans un second temps, nous proposons une formulation d'une méthode générale de planification robuste sous-optimale, basée sur la minimisation de la covariance et utilisant la linéarisation statistique. De plus, nous avons mis en œuvre cette méthode sur le problème de l'atterrissage et obtenu des résultats numériques montrant son efficacité. Enfin, nous procurons des justifications théoriques de la pertinence de la méthode de planification de trajectoire robuste proposée. Ces justifications concernent la contrôlabilité des systèmes linéarisés statistiquement, le calcul d'une estimée de l'erreur d'approximation par la linéarisation statistique et l'existence de solutions au problème de contrôle optimal formulé associé à une erreur d'approximation donnée.

Mots clés

Contrôle optimal, contrôle stochastique, robustesse, aérospatial, planification de trajectoire, théorie de la commande.

Télécharger la thèse : <https://theses.fr/s246116>



Amath Waly Ndiaye

Thèse soutenue le 3 juillet 2023 à Toulouse

ED 309 (EDSYS) - Systèmes - Institut supérieur de l'aéronautique et de l'espace, Toulouse

Encadrement

Département Traitement de l'information et systèmes, ONERA, Toulouse

Encadrants : Clément Combier, Jean-Baptiste Lestage, SAFRAN

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

Jury

Sophie Tarbouriech, LAAS-CNRS, Toulouse

Franck Cazaurang, IMS, Université de Bordeaux

Michel Basset, IRIMAS, Université de Haute-Alsace

Adriano Fagiolini, Università degli studi di Palermo

Financement

CIFRE Safran Landing Systems

Contact mario.cassaro@onera.fr

Résumé

La problématique traitée dans cette thèse concerne la synthèse de lois de commande pour les systèmes de freinage automatique sur piste des avions civils. Les méthodes développées visent à satisfaire les spécifications de performance et sécurité liées à la minimisation des distances de freinage ainsi que les exigences de robustesse vis-à-vis de conditions de piste variables et des défauts actionneurs.

Le développement d'un modèle d'avion au sol destiné à la validation des lois de commande de freinage est dans un premier temps réalisé. L'effort de modélisation est porté sur le train d'atterrissage, de manière à représenter fidèlement l'interaction fortement non linéaire de l'avion avec la piste. En particulier, le modèle permet une prise en compte fine des comportements non linéaires associés aux *shock-absorbers* (suspensions de l'avion). La modélisation proposée démontre, lors de sa validation, un comportement très représentatif, capable de capturer des phénomènes critiques tels que le couplage dynamique des efforts longitudinaux et verticaux appliqués aux roues. La synthèse de quatre correcteurs régulant le glissement des roues est ensuite réalisée. Ces lois de commande sont obtenues par des approches purement non linéaires (modes glissant du second ordre) ou par des approches linéaires séquencées. Ces lois de commande sont complétées par un estimateur des moments d'adhérence, à partir des seules mesures de pressions de freinage et de vitesses de rotation des roues. Enfin, deux superviseurs permettent chacun de générer les consignes de glissement optimal à suivre, afin de maximiser l'efficacité du freinage.

Dans un volet expérimental de la thèse, on s'intéresse à la validation du système de freinage au moyen de simulations HIL faisant intervenir le modèle développé et intégrant le véritable actionneur électrohydraulique des freins. La campagne de validation suggère la nécessité d'un recours aux données inertielles permettant une meilleure adaptation des lois de commande en glissement et donc une moindre sensibilité à la méconnaissance des actionneurs.

Mots-clés

Estimation, système de freinage avion, guidage de l'avion au sol, antiskid, commande robuste, glissement, ABS, commande non linéaire, commande en mode glissant.

Hanae Labriji

Thèse soutenue le 7 novembre 2023 à Palaiseau

ED 575 (EOBE) - Electrical, optical, bio-physics and engineering - Université Paris-Saclay

Encadrement

Département Traitement de l'information et systèmes, ONERA, Palaiseau

Encadrant : Olivier Herscovici-Schiller, ONERA/DTIS

Directeur de thèse : Frédéric Cassaing, ONERA/DTIS

Jury

Pascal Picart, Laboratoire d'Acoustique de l'Université du Mans

Laurent Koechlin, Institut de recherche en astrophysique et planétologie, Toulouse

Caroline Kulcsar, Laboratoire Charles Fabry, Université Paris Saclay

Bruno Sicardy, LESIA, Observatoire de Paris

Corinne Fournier, Laboratoire Hubert Curien, Université Jean Monnet, Saint-Etienne

Peter McMahon-Crabtree, US Air Force Research Laboratory

Richard Paxman, Maxar Technologies

Financement

Ministère de l'Enseignement supérieur et de la Recherche, ONERA

Contact olivier.herscovici@onera.fr

Prix des doctorants ONERA TIS, 2023

Résumé

La caractérisation submétrique des objets en orbite géostationnaire est un enjeu crucial pour la surveillance de l'espace mais constitue un objectif très ambitieux, à la limite de performance des moyens en cours de développement pour l'astronomie. Ce travail porte sur l'imagerie d'ombre, une méthode permettant de répondre simplement à ce besoin en exploitant des occultations. Lorsqu'un satellite passe devant une étoile, il projette au sol une ombre qui encode la forme géométrique du satellite. Cette ombre est collectée à l'aide de petits télescopes. Pour extraire l'information d'intérêt, il faut combiner numériquement les mesures issues des divers télescopes en résolvant un problème inverse.

L'objectif a d'abord été d'étudier le modèle de propagation de la lumière, afin de valider le principe de la méthode et de dimensionner et optimiser les paramètres du détecteur. Puis de concevoir l'algorithme d'inversion et estimer les performances du système d'imagerie global. Ce travail a permis de quantifier précisément les effets atmosphériques qui se sont avérés faibles. De plus, des règles de dimensionnement simples ont été établies à partir d'une description modale de la diffraction. Un algorithme d'inversion multispectral a été proposé et validé sur des simulations réalistes montrant que des résolutions submétriques étaient effectivement atteignables. L'inversion proposée a simplifié l'instrument et amélioré les reconstructions.

Enfin, un banc expérimental reproduisant à petite échelle la diffraction a été réalisé dans des conditions équivalentes à celle de l'imagerie d'ombre. Il a permis de valider l'inversion sur des données réelles et de prouver ainsi la robustesse de la technique.

Mots clés

Imagerie de satellite, synthèse d'ouverture, holographie en ligne, diffraction, réfraction atmosphérique.

Rémy Leroy

Thèse soutenue le 10 mars 2023 à Palaiseau

ED 580 (STIC) - Sciences et technologies de l'information et de la communication -
Université Paris-Saclay

Encadrement

Département Traitement de l'information et systèmes, ONERA, Palaiseau

Encadrante : Pauline Trouvé-Peloux, ONERA/DTIS

Directeurs de thèse : Frédéric Champagnat, ONERA/DTIS ;
Bertrand Le Saux, ESA/ESRIN

Jury

Loic Denis, Laboratoire Hubert Curien, Université J. M. de Saint-Étienne

Thierry Château, Logiroad.ai, Université Clermont Auvergne

Bernadette Dorizzi, Télécom SudParis

Christine Guillemot, IRISA, INRIA Rennes

Renaud Marlet, Valeo.ai, Valeo & École des Ponts ParisTech

Financement

ONERA

Contact pauline.trouve@onera.fr

Résumé

Dans cette thèse, nous étudions l'apport de l'apprentissage profond pour les systèmes de vision 3D monoculaire, de l'acquisition de l'image au traitement. Nous proposons d'abord Pix2Point, une méthode d'estimation de nuage de points 3D à partir d'une seule image en utilisant des informations de contexte, et entraînée avec une fonction de coût de transport optimal. Pix2Point réalise une meilleure couverture des scènes lorsqu'il est entraîné sur des nuages de points lacunaires que les méthodes d'estimation de profondeur monoculaire, entraînées sur des cartes de profondeur lacunaires. Deuxièmement, pour exploiter les indices de profondeur provenant du capteur, nous proposons une méthode de régression de profondeur à partir d'un patch défocalisé.

Cette méthode surpasse la classification et la régression directe, sur données simulées et réelles. Enfin, nous abordons la conception d'un système de vision RVB-D, composé d'un capteur dont l'image est traitée par notre réseau de régression de profondeur basée sur la défocalisation et par un réseau de défloutage d'image. Nous proposons un cadre d'optimisation multi-tâches, conjointement aux paramètres des capteurs et des réseaux, et nous l'appliquons à l'optimisation de la mise au point d'une lentille chromatique. Le paysage d'optimisation présente plusieurs optima liés à la tâche de régression en profondeur, tandis que la tâche de défloutage semble moins sensible au paramètre de mise au point. En résumé, cette thèse propose plusieurs contributions exploitant les réseaux de neurones pour l'estimation 3D monoculaire et ouvre la voie d'une conception conjointe de systèmes RVB-D.

Mots-clés

Apprentissage profond, nuage de points 3D, co-conception, apprentissage profond, vision monoculaire, imagerie 3D.

Télécharger la thèse : <https://theses.fr/2023UPASG021>

Maxime Chareyre

Thèse soutenue le 18 décembre 2023 à Palaiseau

ED 070 (SPI) - Sciences pour l'ingénieur - Université Clermont Auvergne

Encadrement

Département Traitement de l'information et systèmes, ONERA, Palaiseau

Encadrants : Pierre Fournier, Julien Moras, ONERA/DTIS

Directeurs de thèse : Jean-Marc Bourinet, Youcef Mezouar, SIGMA Clermont

Jury

Alain Dutech, LORIA, INRIA Nancy

David Filliat, U2SIS, ENSTA, IP Paris

Ouiddad Labbani-Igbida, XLIM, Université de Limoges

Olivier Sigaud, SCAI, Sorbonne Université

Financement

Ministère de l'Enseignement supérieur et de la Recherche, ONERA

Contact julien.moras@onera.fr

Résumé

Les robots sont de plus en plus utilisés pour réaliser des tâches dans des environnements contrôlés. Leur utilisation en milieu ouvert est cependant encore confrontée à des difficultés. L'agent robotique est en effet susceptible de rencontrer des objets dont il ignore le comportement et la fonction. Dans certains cas, il doit interagir avec ces éléments pour réaliser sa mission en les collectant ou en les déplaçant mais, sans la connaissance de leurs propriétés dynamiques il n'est pas possible de mettre en place une stratégie de résolution de la mission efficace. Dans cette thèse, nous présentons une méthode visant à apprendre à un robot autonome une stratégie d'interaction physique avec des objets inconnus, sans aucune connaissance a priori, l'objectif étant d'extraire de l'information sur un maximum de propriétés physiques de l'objet à partir des interactions observées par ses capteurs.

Mots clés

Apprentissage auto-supervisé, apprentissage par renforcement profond, robotique mobile, motivation intrinsèque, estimation de propriétés d'objets.

Félix Quinton

Thèse soutenue le 7 décembre 2023 à Toulouse

ED 309 (EDSYS) - Systèmes - Institut supérieur de l'aéronautique et de l'espace,
Toulouse

Encadrement

Département Traitement de l'information et systèmes, ONERA, Toulouse

Directeurs de thèse : Charles Lesire-Cabaniols, Christophe Grand, ONERA/DTIS

Jury

Aurélié Beynier, LIP6, Université Sorbonne

Jean-Paul Jamont, LCIS, Université de Grenoble

Simon Lacroix, LAAS-CNRS

Olivier Simonin, CITI lab, INSA Lyon

Financement

ISAE-SUPAERO

Contact christophe.grand@onera.fr

Résumé

Les applications robotiques font aujourd'hui partie de notre quotidien. Robots aspirateurs, tondeuses autonomes, et véhicules semi-autonomes sont aujourd'hui produits en masse et équipent de nombreux foyers. Cependant, ces robots, très spécialisés, ne sont pas amenés à coopérer, et s'ignorent les uns les autres. Pourtant, les milieux scientifiques, militaires et industriels, s'intéressent depuis de nombreuses années aux systèmes multi-robots, consistant en plusieurs robots devant coordonner leurs actions pour atteindre un objectif commun. En coopérant, les robots composant ces

systèmes ont accompli des exploits scientifiques, tels que l'échantillonnage de la comète Tchouri par la mission Rosetta. Un élément fondamental pour la coopération d'une équipe de robots est que ceux-ci soient en mesure de se coordonner, ce qui n'est possible que s'ils parviennent d'abord à s'accorder sur le partage des tâches qui leur permettra d'atteindre l'objectif assigné. Pour cela, ils doivent, ensemble, résoudre le problème d'allocation des tâches, qui nécessite donc une attention particulière. En effet, si ce processus devait échouer à allouer une tâche, celle-ci ne serait pas exécutée par les robots, entraînant l'échec partiel ou complet de la mission. En conséquence, les chercheurs ont proposé de nombreux paradigmes pour résoudre l'allocation des tâches, et pour réparer l'allocation dans l'éventualité qu'elle soit perturbée par des événements imprévisibles. Face à de tels événements, les robots peuvent être amenés à se concerter pour s'accorder sur une nouvelle allocation des tâches, c'est-à-dire, à procéder à des réallocations dynamiques. Or, la qualité des réallocations dynamiques est corrélée au nombre de robots y participant. Malgré cela, peu de travaux ont été consacrés au maintien d'un réseau de communication bien connecté au sein de l'équipe multi-robots, alors même qu'en augmentant le nombre de participants aux réallocations dynamiques, un réseau bien connecté améliorerait la qualité des réallocations et la robustesse du système multi-robots. Les travaux de cette thèse s'attachent à répondre à ce besoin, en proposant des stratégies pour favoriser des allocations de tâches dans lesquelles la qualité du réseau est maintenue. Ainsi, nous introduisons, dans le cadre d'approches de résolution basées enchères, une stratégie d'évaluation des mises basée sur une anticipation de la connexité du réseau de communication pour inciter les robots à surévaluer les enchères émises pour les tâches leur permettant de communiquer avec leurs coéquipiers. Grâce à cette stratégie d'évaluation des mises, nous sommes parvenus à améliorer la robustesse du système multi-robots face à des événements imprévisibles, par rapport à une stratégie d'évaluation usuelle. Cependant, les performances absolues obtenues grâce aux approches basées enchères n'ont pas été satisfaisantes, car les réallocations échouent relativement souvent, laissant des tâches non allouées et provoquant l'échec total des missions. Pour remédier à cela, nous présentons également une adaptation d'algorithmes d'optimisation sous contraintes distribuée pour la résolution de l'allocation de tâches. Ces approches, ayant peu été investiguées pour leurs applications aux systèmes multi-robots, permettent une exploration plus profonde de l'espace de recherche, au prix de temps de calcul relativement élevés. En plus de décrire un modèle permettant de représenter une application multi-robots dans le cadre de ces approches, nous proposons également des ensembles de contraintes dédiés au maintien de la connexité du réseau de communication. Ces contraintes ont significativement amélioré la qualité des réallocations dynamiques, augmentant la robustesse et les performances du système multi-robots.

Mots clés

Systèmes multi-robots, allocation de tâches, optimisation sous contraintes distribuée, approches basées enchères.

Télécharger la thèse : <https://theses.fr/s228599>



Marie Chiron

Thèse soutenue le 4 juillet 2023 à Toulouse

ED 475 (MITT) - Mathématiques informatique télécommunications de Toulouse -
Institut supérieur de l'aéronautique et de l'espace, Toulouse

Encadrement

Département Traitement de l'information et systèmes, ONERA, Toulouse

Encadrant : Sylvain Dubreuil, ONERA/DTIS

Directeurs de thèse : Jérôme Morio, ONERA/DTIS ; Michel Salaün, ISAE-SUPAERO

Jury

Josselin Garnier, CMAP, École polytechnique

Céline Helbert, Institut Camille Jordan, Centrale Lyon

Carsten Proppe, Karlsruhe IT

Cécile Mattrand, SIGMA Clermont, INP Clermont Auvergne

Guillaume Perrin, IMSE, Université Gustave Eiffel

Financement ONERA

Contact sylvain.dubreuil@onera.fr

Résumé

Dans de nombreuses disciplines scientifiques, un système complexe est souvent modélisé avec une fonction M , supposée simuler le comportement du système. La sortie de cette fonction est la réponse observée tandis que les entrées représentent les différentes variables qui influencent le comportement du système. Le système étant soumis à des aléas, certaines de ses entrées sont des variables aléatoires. Ainsi, la sortie de la fonction est également aléatoire. La défaillance du système correspond à une réponse extrême de la fonction, dont les conséquences sont critiques. Dans un contexte où

la fonction M agit comme une boîte noire, le calcul de la probabilité de défaillance et de sa sensibilité locale est crucial pour l'analyse de fiabilité du système. L'estimation de la probabilité de défaillance et de sa sensibilité locale est particulièrement difficile pour des systèmes de grande dimension, dont le domaine de défaillance des entrées possède plusieurs régions de défaillance. Les entrées aléatoires sont modélisées ici avec des distributions elliptiques standards, comme la loi normale standard par exemple. Le comportement de telles distributions en grande dimension doit être pris en compte dans le processus d'estimation. Dans la littérature, de nombreux algorithmes d'échantillonnage préférentiel (EP) ont été spécifiquement adaptés à l'estimation de la probabilité de défaillance de systèmes possédant plusieurs régions de défaillance dans l'espace standard normal de grande dimension. Le but de l'EP est de construire une densité auxiliaire qui génère plus d'observations dans le domaine de défaillance que la densité de probabilité initiale des entrées aléatoires. Afin de prendre en compte la multiplicité des régions de défaillance, la densité auxiliaire est alors construite comme un mélange de densités. Cependant, le nombre de densités dans le mélange, correspondant au nombre de régions de défaillance, doit être fixé a priori et est difficile à paramétrer dans un contexte de boîte noire. De plus, dans l'espace standard elliptique, la sensibilité locale de la probabilité par rapport à une entrée déterministe s'écrit nécessairement comme une intégrale surfacique, dont l'estimation est laborieuse. Ces sensibilités sont souvent approchées par un estimateur biaisé plus facile à obtenir, mais dont le biais est difficilement évaluable. Le but de cette thèse est alors d'améliorer l'estimation de la probabilité de défaillance et de sa sensibilité locale dans un tel contexte. L'algorithme proposé pour estimer la probabilité de défaillance repose sur une recherche progressive des régions de défaillance dans l'espace standard elliptique. Pour chaque région de défaillance identifiée, une densité auxiliaire est construite et optimisée de manière adaptative. Cette densité prend en compte le comportement des entrées en grande dimension puisque sa construction bénéficie de leur représentation stochastique. La probabilité de défaillance finale est estimée avec un échantillonnage préférentiel multiple, en utilisant toutes les densités auxiliaires précédemment construites. L'approche proposée pour estimer la sensibilité de la probabilité par rapport aux entrées déterministes repose sur une régression polynomiale hétéroscédastique. En effet, la sensibilité locale est identifiée comme le terme d'ordre zéro d'un développement de Taylor. En utilisant les méthodes de simulation pour construire la base de données de la régression, un nouvel estimateur de la sensibilité locale est ainsi obtenu. Cet estimateur est biaisé mais son biais est contrôlable grâce aux paramètres de régression : le degré du polynôme ainsi que l'intervalle de régression. Les deux algorithmes sont mis en pratique indépendamment avec différentes applications pour démontrer leur robustesse. Une étude de la fiabilité d'un oscillateur de Duffing permet de tester la combinaison des deux algorithmes pour un système de grande dimension possédant plusieurs régions de défaillance.

Mots clés

Analyse de fiabilité, estimation de probabilité de défaillance, sensibilité locale de probabilité de défaillance, échantillonnage préférentiel, régression polynomiale hétéroscédastique, loi standard elliptique, régions de défaillance multiples, système de grande dimension.

Télécharger la thèse : <https://theses.fr/2023ESAE0039>

Arthur Clavière

Thèse soutenue le 17 juillet 2023 à Toulouse

ED 475 (MITT) - Mathématiques informatique télécommunications de Toulouse -
Institut supérieur de l'aéronautique et de l'espace, Toulouse

Encadrement

Département Traitement de l'information et systèmes, ONERA, Toulouse

Encadrant : Éric Asselin, Collins Aerospace

Directrice de thèse : Claire Pagetti, ONERA/DTIS

Jury

Benedikt Bollig, LMF, Université Paris-Saclay

Éric Goubault, Laboratoire d'Informatique, École polytechnique

Susanne Graf, VERIMAG, Université Grenoble Alpes

Élisa Fromont, ISTIC, Université de Rennes

Joao Marques-Silva, IRIT-CNRS & ANITI

Financement

CIFRE Collins Aerospace

Contact claire.pagetti@onera.fr

Résumé

La thèse a porté sur l'étude et la vérification de la sûreté de fonctionnement de systèmes contrôlés par réseaux de neurones. Un tel système combine un système physique et un contrôleur basé réseaux de neurones, dont l'intérêt peut être : (1) d'approximer un autre contrôleur, déjà existant, mais en demandant moins de ressources de calcul (sachant qu'un contrôleur dispose souvent de ressources limitées) ou (2) de reproduire le comportement d'un humain (ce qui peut s'avérer intéressant pour les systèmes autonomes).

Dans le cas où le système contrôlé par réseaux de neurones est critique, il est important de vérifier sa sûreté de fonctionnement. A cette fin, nous avons d'abord considéré le cas (1) pour lequel nous avons développé une méthode et un outil (appelé SAM) afin de comparer les deux contrôleurs et montrer que le contrôleur basé réseaux de neurones est une approximation correcte du contrôleur original. Ensuite, nous avons considéré le cas général (1) + (2) pour lequel notre approche a été de vérifier le système contrôlé par réseaux de neurones en entier. Cette seconde contribution comporte deux aspects : (i) le développement d'un modèle basé automate hybride du système étudié et (ii) un outil, appelé SAMBA, qui permet l'analyse de cet automate hybride.

Mots-clés

Réseaux de neurones, sûreté, méthodes formelles.

Camille Blanchard

Thèse soutenue le 7 décembre 2023 2023 à Toulouse

ED 309 (EDSYS) - Systèmes - Institut supérieur de l'aéronautique et de l'espace, Toulouse

Encadrement

Département Traitement de l'information et systèmes, ONERA, Toulouse

Directrices de thèse : Catherine Tessier, Claire Saurel, ONERA/DTIS

Jury

Olivier Boissier, SMS, École Nationale Supérieure des Mines de Saint-Étienne

Grégory Bonnet, GREYC, Université de Caen Normandie

Philippe Durance, LIRSA, Conservatoire National des Arts et Métiers

Nicolas Gourdain, ISAE-SUPAERO

Régine Monti-Tessier, LIRSA, Conservatoire National des Arts et Métiers

Financement

Région Occitanie, ONERA

Contact catherine.tessier@onera.fr

Résumé

Cette thèse s'inscrit dans le domaine de la prospective. Elle consiste à développer une méthode formelle de scénarios pour un système d'acteurs, afin en particulier de réduire les biais inhérents à la construction manuelle de scénarios. Un cas d'étude relatif au système de transport aérien, qui fait l'objet de nombreux questionnements aujourd'hui, a été mis en place. Le modèle formel proposé inclut les notions de système et de ses composantes – acteurs, principes, variables, et les éléments permettant l'évolution de ce système – décisions, conflits logiques, conflits moraux. Ce modèle est mis en œuvre sous la forme d'un outil de génération automatique et exhaustive de scénarios et d'outils d'analyse, dont nous illustrons le fonctionnement sur le cas d'étude.

L'analyse des scénarios générés met en lumière les stratégies qui doivent être mises en place par l'utilisateur pour atteindre ses objectifs ou éviter des conflits. Finalement, nous discutons des éléments de validation de notre méthode mais aussi des hypothèses, de l'effet sur les biais, des possibilités de gestion de la complexité et enfin des possibles cas d'usage de notre outil.

Mots clés

Prospective, méthode des scénarios, aide à la décision, modélisation formelle des connaissances et du raisonnement, génération et analyse de scénarios, transport aérien



Télécharger la thèse : <https://theses.fr/s251747>

Mathieu Marchand

Thèse soutenue le 9 octobre 2023 à Gif sur Yvette

ED 580 (STIC) - Sciences et technologies de l'information et de la communication -
Université Paris-Saclay

Encadrement

Département Traitement de l'information et systèmes, ONERA, Palaiseau

Encadrant : Sylvain Bertrand, ONERA/DTIS

Directrice de thèse : Hélène Piet-Lahanier ONERA/DTIS

co-directeur : Vincent Andrieu, LAGEPP, Université de Lyon

Jury

Antoine Girard, L2S, Université Paris-Saclay

Romain Postoyan, CRAN, Université de Lorraine

Christophe Prieur, Gipsa-lab, Université Grenoble Alpes

Sophie Tarbouriech, LAAS-CNRS

Denis Efimov, INRIA, Université de Lille

Financement

ANR, ONERA

Contact sylvain.bertrand@onera.fr

Résumé

Dans cette thèse, nous nous sommes intéressés à la synthèse de lois de commande et de communications distribuées afin qu'un système multi-agents réalise une mission coopérative de consensus. Dans le cas de la commande distribuée, chaque agent doit évaluer sa commande en fonction de ses connaissances et des informations pouvant être envoyées par ses voisins. Les communications sont énergivores, elles doivent être donc limitées. Les communications à déclenchement événementiel consistent à ne transmettre une information que lorsqu'elle est jugée intéressante et permettent de réduire sérieusement la quantité de communications tout en préservant les performances du système. Afin de quantifier si l'information pouvant être envoyée est intéressante ou non, une métrique, appelée condition de déclenchement de communication, doit être définie. Cette condition est d'autant plus complexe à obtenir que les dynamiques du système multi-agents le sont. Dans un premier temps, nous avons cherché à obtenir cette condition pour les systèmes multi-agents décrits par des dynamiques non-linéaires affines en la commande, par analyse de stabilité. Remarquant que ces conditions obtenues pouvaient présenter des communications non nécessaires pour l'accomplissement de la mission, nous avons cherché à les optimiser. Dans un premier temps, nous avons considéré le problème de l'observateur à déclenchement événementiel puis nous nous sommes intéressés au cas général des systèmes multi-agents. Une approche par apprentissage profond est proposée pour l'obtention de lois de déclenchement pour ces deux problèmes.

Mots clés

Apprentissage, systèmes multi-agents, observation et commande distribuées, communications déclenchées, connectivité dans un réseau, systèmes distribués.

Samuel Squillaci

Thèse soutenue le 18 décembre 2023 à Palaiseau

ED 309 (EDSYS) - Systèmes - Institut supérieur de l'aéronautique et de l'espace,
Toulouse

Encadrement

Département Traitement de l'information et systèmes, ONERA, Toulouse

Directeurs de thèse : Cédric Pralet, Stéphanie Roussel, ONERA/DTIS

Jury

Jin-Kao Hao, LERIA, Université d'Angers

Laurent Deroussi, LIMOS, Université Clermont Auvergne

Marie-José Hughet, INSA Toulouse

Dominique Feillet, CMP, Mines de Saint Étienne

Financement

BPI, ONERA

Contact cedric.pralet@onera.fr

Résumé

Dans les systèmes de gestion des constellations de satellites d'observation de la Terre, des requêtes d'observation sont émises par différents clients. Chaque requête représente une demande d'observation d'une cible à la surface de la Terre par un satellite. De nos jours, divers algorithmes de planification sont utilisés pour sélectionner automatiquement les requêtes à satisfaire, sachant que les requêtes sont trop nombreuses en général pour être toutes satisfaites par la constellation de satellites. Ces algorithmes parviennent à planifier divers types de requêtes, comme par exemple des requêtes d'observation simples (nécessitant une seule prise photo de la cible) ou encore des requêtes stéréoscopiques (nécessitant deux prises photo de la cible depuis deux angles de vue différents). Dans cette thèse, nous proposons un nouveau modèle du problème de planification qui permet d'intégrer n'importe quel type de requête d'observation. De nouveaux types de requêtes sont introduits tels que les requêtes périodiques, qui nécessitent une observation d'une cible périodiquement dans le temps. Des modes de réalisation des requêtes sont définis pour permettre de satisfaire les requêtes de différentes manières et d'exprimer des préférences sur ces manières. Différents algorithmes de résolution sont proposés, à savoir une résolution par Programmation par Contraintes, des algorithmes gloutons itérés parallèles ainsi que des algorithmes de recherche à voisinage large. Enfin, de nombreuses expérimentations sont réalisées sur des problèmes réalistes.

Mots clés

Constellation de satellites, observation de la Terre, ordonnancement, méta-heuristiques, programmation par contraintes.

Trong Hieu Tran

Thèse soutenue le 13 décembre 2023 à Toulouse

ED 475 (MITT) - Mathématiques informatique télécommunications de Toulouse -
Université Toulouse III Paul Sabatier

Encadrement

Département Traitement de l'information et systèmes, ONERA, Toulouse
Directeurs de thèse : Cédric Pralet, ONERA/DTIS ; Hélène Fargier IRIT-CNRS

Jury

Gilles Audemard, CRIL-CNRS, Université d'Artois

Christian Artigues, LAAS-CNRS

Aziz Moukrim, Heudiasyc, Université de Technologie de Compiègne

Christine Solnon, LIRIS-CNRS, INSA Lyon

Financement

ANITI, ANR

Contact cedric.pralet@onera.fr

Résumé

L'optimisation combinatoire est une branche de l'optimisation mathématique qui se concentre sur la recherche de solutions optimales parmi un ensemble fini de combinaisons possibles, tout en respectant un ensemble de contraintes et en maximisant ou minimisant une fonction objectif. Pour résoudre ces problèmes, les méthodes incomplètes sont souvent utilisées en pratique, car ces dernières peuvent produire rapidement des solutions de haute qualité, ce qui est un point critique dans de nombreuses applications. Dans cette thèse, nous nous intéressons au développement d'approches hybrides qui permettent d'améliorer la recherche incomplète en exploitant les méthodes complètes.

Pour traiter en cas pratique, nous considérons ici le problème de tournées de véhicules avec profits, dont l'objectif est de sélectionner un sous-ensemble de clients à visiter par des véhicules de manière à maximiser la somme des profits associés aux clients visités. Plus précisément, nous visons tout d'abord à améliorer les algorithmes de recherche incomplets en exploitant les connaissances acquises dans le passé. L'idée centrale est de: (i) apprendre des conflits (combinaisons de décisions qui conduisent à une violation de certaines contraintes ou à une sous-optimalité des solutions) et les utiliser pour éviter de réexaminer les mêmes solutions et guider la recherche, et (ii) exploiter les bonnes caractéristiques de solutions élites afin de produire de nouvelles solutions ayant une meilleure qualité.

En outre, nous étudions le développement d'un solveur générique pour des problèmes de routage complexes pouvant impliquer des clients optionnels, des véhicules multiples, des fenêtres temporelles multiples, des contraintes supplémentaires, et/ou des temps de transition dépendant du temps. Le solveur générique proposé exploite des sous-problèmes pour lesquels des méthodes de raisonnement dédiées sont disponibles. L'efficacité des approches proposées est évaluée par diverses expérimentations sur des instances classiques et sur des données réelles liées à un problème d'ordonnement pour des satellites d'observation de la Terre, qui inclut éventuellement des profits incertains.

Mots-clés

Recherche opérationnelle, optimisation combinatoire, méthodes hybrides complètes/incomplètes, métaheuristiques, apprentissage de clauses, programmation dynamique, routage avec profits, satellites d'observation.

Télécharger la thèse : <https://theses.fr/s295543>



Rémy Charayron

Thèse soutenue le 5 décembre 2023 à Toulouse

ED 467 (AA) - Aéronautique, astronautique - Institut supérieur de l'aéronautique et de l'espace, Toulouse

Encadrement

Département Traitement de l'information et systèmes, ONERA, Toulouse

Directeur de thèse : Joseph Morlier, ISAE-SUPAERO ; Nathalie Bartoli, ONERA/DTIS

Jury

Clémentine Prieur, Laboratoire Jean Kuntzmann, Université de Grenoble Alpes

Michael Kokkolaras, Université de McGill, Montréal

François Jouve, Laboratoire Jacques-Louis Lions, Université Paris Cité

Thierry Lefebvre, ONERA/DTIS

Rémy Priem, DGA (invité)

Financement DGA/AID, projet Concorde

Contact nathalie.bartoli@onera.fr

Résumé

Les drones à voilure fixe ont récemment gagné en popularité dans divers secteurs nécessitant une couverture aérienne étendue et une grande endurance. La demande croissante en matière de drones souligne l'importance d'optimiser leur conception en fonction de leurs objectifs spécifiques. La conception préliminaire de ces drones implique des modèles multidisciplinaires faisant appel à de nombreuses disciplines fortement couplées comme l'aérodynamique, la structure, la propulsion, la mission, l'acoustique... qui sont parfois évaluées à l'aide de différents outils. L'aspect multidisciplinaire de ces modèles

de drones rend l'évaluation coûteuse, et le gradient des quantités d'intérêt pas toujours accessible. Le problème d'optimisation multidisciplinaire correspondant est donc un problème d'optimisation de boîte noire coûteuse. Il ne peut donc en pratique pas être résolu ni par des algorithmes d'optimisation basés sur le gradient, ni par des algorithmes effectuant un grand nombre d'appels aux fonctions. Dans ce contexte, l'optimisation bayésienne est une approche basée sur les modèles de substitution (ou métamodèles) dont l'objectif est de trouver une solution au problème d'optimisation en équilibrant l'exploration de l'espace de conception et l'exploitation du métamodèle afin de minimiser le nombre d'appels aux fonctions coûteuses. Les extensions multi-fidélité des méthodes d'optimisation bayésienne cherchent à tirer parti de différents modèles dont la fidélité et le coût varient. L'idée sous-jacente est de pouvoir bénéficier à la fois des informations précises fournies par des modèles haute fidélité coûteux et d'une bonne exploration de l'ensemble de l'espace de conception grâce à des modèles basse fidélité beaucoup moins coûteux. Cependant, les méthodes d'optimisation bayésienne multi-fidélité existantes n'ont pas été testées sur des problèmes d'optimisation fortement multidisciplinaire tels que ceux de conception de drones. D'autre part, lorsqu'un grand nombre de niveaux de fidélité est disponible, nous devons faire un choix parmi les différentes combinaisons possibles. De plus, les problèmes de conception de drones impliquent souvent plusieurs objectifs à optimiser conjointement, ainsi que des variables mixtes comme le nombre de batteries ou le choix de matériaux. Les méthodes bayésiennes d'optimisation multi-fidélité doivent donc pouvoir s'adapter pour résoudre de tels problèmes, ce qui n'est pas le cas aujourd'hui.

La première partie de ce travail a consisté à développer des modèles multidisciplinaires de drones à voilure fixe. En particulier, des modèles impliquant la propulsion électrique et prenant en compte la mission que le drone est censé accomplir une fois en service. Ces modèles ont été utilisés pour comparer les performances de l'optimisation bayésienne mono et multi-fidélité sur des problèmes de conception de drones. Ensuite, dans le cas où un grand nombre de fidélités est disponible, nous avons proposé et validé sur des cas tests d'optimisation analytiques et drone une méthode pour déterminer les niveaux de fidélité à utiliser dans un processus multi-fidélité afin de rendre le processus aussi efficace que possible. Nous avons ensuite proposé une méthode d'optimisation bayésienne multi-fidélité capable de traiter des problèmes d'optimisation multi-objectif prenant en compte des variables mixtes. La méthode a aussi été validée à l'aide de cas tests analytiques et de cas tests drone. Finalement, l'emploi d'algorithmes multi-fidélité a entraîné des réductions de coûts d'optimisation de l'ordre de 2 sur les cas tests mono-objectif de conception de drones. En ce qui concerne les cas tests multi-objectif pour les drones (avec variables continues ou mixtes), nous avons observé une amélioration des solutions obtenues de l'ordre de 2. La méthode développée offre de belles perspectives dans l'utilisation de chaînes de calcul industrielles donc très coûteuses.

Mots-clés Optimisation multi-disciplinaire, processus Gaussien, optimisation bayésienne, drones, krigeage, multi-fidélité, champ libre gaussien, statistique bayésienne.

Télécharger la thèse : <https://theses.fr/2023ESAE0065>



Juliette Gamot

Thèse soutenue le 18 décembre 2023 à Palaiseau

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

Encadrement

Département Traitement de l'information et systèmes, ONERA, Palaiseau

Encadrants : Mathieu Balesdent, Romain Wuilbercq, Arnault Tremolet, ONERA/DTIS

Directeurs de thèse : Nouredine Melab, Talbi El-Ghazali, CRISTAL, INRIA Lille

Jury

Pascal Lafon, LASMIS, Université de Technologie de Troyes

Frédéric Saubion, LERIA, Université d'Angers

Patrick Siarry, LISSI, UPEC, Université Paris-Est Créteil

Delphine Sinoquet, IFP Énergies nouvelles

Financement INRIA avec région Hauts-de-France, ONERA

Contact arnault.tremolet@onera.fr

Résumé

Cette thèse s'inscrit dans le cadre de l'optimisation d'agencement, une étape importante dans la conception de systèmes multidisciplinaires complexes tels que les véhicules aérospatiaux. Les problèmes d'agencement optimal (*Optimal Layout Problems - OLP*) consistent à trouver la meilleure disposition d'un ensemble de composants dans un système ou un espace, afin d'atteindre certains objectifs (réduction des coûts, amélioration des performances, etc.) tout en satisfaisant diverses contraintes

(géométriques, fonctionnelles, etc.). Le traitement des OLP est encore un défi aujourd'hui, tant en termes de formulation que de résolution. En effet, les OLP sont souvent très contraints et impliquent de nombreuses variables d'optimisation (continues, discrètes, catégorielles), qui peuvent être fixes ou conditionnelles. Les variables conditionnelles sont utiles pour définir différents choix de conception qui doivent être faits en même temps que l'optimisation de l'agencement des composants. Ainsi, la résolution des OLP nécessite l'utilisation d'algorithmes d'optimisation avancés combinant différentes catégories de méthodes (métaheuristiques et l'optimisation bayésienne).

L'objectif global de la thèse est d'étudier les OLP, leur formulation dans différents contextes, leur résolution à l'aide de diverses méthodes d'optimisation et hybridations, ainsi que la validation de ces méthodes dans le cadre de la conception de véhicules aérospatiaux. Les contributions de la thèse sont organisées en deux parties correspondant à deux types d'OLP.

Dans la première partie, une étude de la résolution des agencements avec des listes de composants à nombre fixe (*Fixed Search Size FSS-OLP*) est proposée avec un focus particulier sur les méthodes quasi-physiques et les métaheuristiques. Basés sur un système de force virtuelle (*Virtual Force - VF*), ces algorithmes simulent les lois de la dynamique et traitent efficacement les problèmes fortement contraints. Une variante (*Component Swarm Optimization VF - CSO-VF*) de ces algorithmes est développée afin de résoudre les FSS-OLP à un seul contenant... Pour traiter les systèmes multi-tenants, le CSO-VF est hybridé à un algorithme génétique (GA) dans un algorithme à deux étages qui assigne les composants aux tenants puis optimise leur disposition dans chacun des tenants. Dans la deuxième partie, la liste des composants est variable et l'espace de recherche est conditionnel (*Conditional Search Space CSS-OLP*). Les variables conditionnelles engendrent des OLP plus complexes. Par exemple, dans le contexte de la conception aérospatiale, une quantité donnée de carburant peut être incluse dans le système, soit dans un grand réservoir, soit dans deux plus petits. Par conséquent, le nombre de composants à positionner n'est pas le même dans les deux cas et le nombre de variables de conception et de contraintes varient donc au cours du processus d'optimisation. Deux approches ont été développées pour traiter les CSS-OLP à un seul contenant : la première est un GA modifié pour introduire des variables cachées dans les chromosomes. La seconde est une approche bi-niveaux combinant optimisation bayésienne et l'algorithme CSO-VF. L'optimisation bayésienne sélectionne les composants et le CSO-VF optimise leur agencement. Cette dernière approche a été hybridée avec un GA dans un algorithme tri-niveaux afin de traiter les CSS-OLP multi-tenants. Enfin, tous les algorithmes sont évalués et comparés grâce à des problèmes d'agencement de satellites.

Mots-clés Optimisation d'agencement, espace de recherche conditionnel, méthodes quasi-physique, optimisation bayésienne, hybridation.

Télécharger la thèse : <https://theses.fr/s327832>

Vincenzo Palladino

Thèse soutenue le 23 mars 2023 à Toulouse

ED 467 (ED-AA) - Aéronautique, astronautique - Institut supérieur de l'aéronautique et de l'espace, Toulouse

Encadrement

Département Traitement de l'information et systèmes, ONERA, Toulouse

Directrices de thèse : Valérie Pommier-Budinger ISAE-SUPAERO ;
Nathalie Bartoli ONERA/DTIS

Jury

Panagiotis Laskaridis, Centre for Propulsion and Thermal Power Engineering,
Cranfield University

Frank Thielecke, Institute of Aircraft Systems Engineering, TUHH, Hamburg

Emmanuel Bénard, ISAE-SUPAERO

Peter Schmollgruber, ONERA/DTIS

Financement

CIFRE ATR

Contact nathalie.bartoli@onera.fr

Résumé

L'un des plus grands défis du secteur de l'aviation au cours de la dernière décennie a été le développement de véhicules "plus verts", qui présentent de faibles émissions de CO₂ et de NO_x. La Commission de l'Union européenne, en collaboration avec les acteurs de l'industrie aéronautique, a fixé des objectifs ambitieux à atteindre d'ici 2050. Pour cela, une approche innovante dans les technologies de propulsion et la conception des avions est nécessaire pour atteindre les objectifs de réduction.

L'objectif de cette thèse est d'identifier des architectures propulsives alternatives pour réduire la consommation de carburant des avions et les émissions de CO₂. En particulier, le présent travail se concentre sur la conception d'un avion régional de 70 places dans le but de fournir les outils, les méthodes et les résultats à utiliser comme base crédible pour évaluer le potentiel des technologies de propulsion à faibles émissions sur le transport d'avion régional. Après une première enquête sur les technologies, les architectures propulsives les plus prometteuses avec différentes sources d'alimentation et différentes architectures sont identifiées.

Ensuite, un processus de conception d'avion multidisciplinaire adapté à la conception d'un avion régional avec une technologie de propulsion disruptive est développé. Les performances de chaque architecture propulsive sont d'abord évaluées avec des études conceptuelles de haut niveau pour identifier ses principaux inconvénients et avantages. Ensuite, les architectures les plus prometteuses sont évaluées plus en profondeur avec des techniques d'analyse et d'optimisation de conception multidisciplinaires, où des algorithmes d'optimisation sont utilisés pour déterminer les variables de conception de système optimales.

Des techniques de gestion de l'incertitude sont également utilisées pour identifier les paramètres incertains, qui ont un impact considérable sur la quantité d'intérêt, afin de déterminer les modèles qui peuvent nécessiter des développements supplémentaires pour améliorer la précision des résultats.

Mots-clés

HEA, conception avion, hybride, propulsion électrique, avions-propulsion par réaction, avions-conception et constructions.



Télécharger la thèse : <https://theses.fr/2023ESAE0020>

Marco Saporito

Thèse soutenue le 19 février 2023 à Southampton

University of Southampton

Encadrement

Département Traitement de l'information et systèmes, ONERA, Toulouse

Encadrants : Sébastien Defoort, ONERA/DTIS ;

Scott Walker, Univ. Of Southampton

Directeurs de thèse : Andrea Da Ronch, Univ. Of Southampton

Nathalie Bartoli, ONERA/DTIS

Jury

David Toal, Univ. Southampton

Joseph Morlier, ISAE-SUPAERO

Financement

University of Southampton, ONERA

Contact nathalie.bartoli@onera.fr

Résumé

L'un des principaux défis de l'aéronautique moderne consiste à trouver des solutions de conception novatrices pour une aviation plus écologique et plus abordable. L'un des moyens d'atteindre cet objectif est d'accroître l'efficacité aérodynamique grâce à des ailes très allongées, impliquant des structures plus légères et flexibles pour réduire le poids. L'un des principaux obstacles est de fournir des prévisions fiables dès les premières étapes de la conception, là où les approches conventionnelles échouent en raison d'une connaissance insuffisante et d'une marge de manœuvre limitée pour les

analyses de haute fidélité. Des progrès considérables ont déjà été réalisés en intégrant dans le processus de conception des méthodes plus efficaces basées sur la physique. Cependant, dans la plupart des cas, l'étude des phénomènes complexes n'est pas accompagnée d'une évaluation des risques inhérents.

Or, l'incertitude peut être critique, en particulier au début des phases de conception, car sa méconnaissance dans les phases avancées peut avoir de graves conséquences (comme la nécessité de revoir entièrement la conception de l'aéronef). L'objectif de ce projet est donc de combler cette lacune, en développant des outils d'analyse appropriés pour soutenir la conception d'avions hautement flexibles, avec la capacité de propager certaines incertitudes pertinentes à travers le processus d'optimisation et enfin de fournir des informations sur la fiabilité des résultats. À cette fin, nous utilisons la simulation basée sur la physique comme source d'information la plus complète, capable de capturer les non-linéarités et les interactions disciplinaires complexes typiques de la dynamique des avions flexibles.

Le projet s'articule autour de quatre objectifs : 1) le développement d'un ensemble de modèles adéquats pour l'aérodynamique, la dynamique du vol et la dynamique structurelle ; 2) l'intégration des modules ci-dessus avec un outil de dimensionnement d'avion pour élargir les capacités d'exploration de la conception en prenant en compte l'incertitude et les contraintes liées à la discipline ; 3) l'expansion des capacités d'analyse et de l'ensemble des contraintes en permettant des analyses couplées aérostructure dans l'incertitude ; 4) la démonstration d'un processus de conception et d'optimisation robuste pour un concept d'avion hautement flexible.

Après une discussion détaillée du contexte et de la littérature pertinente, ce document continue à présenter et à discuter le développement, la validation et l'intégration des différents outils d'analyse. Il présente ensuite une première application dans laquelle certaines des capacités d'analyse et de simulation sont exploitées dans le cadre d'un processus multidisciplinaire de conception et d'optimisation d'un aéronef, où l'incertitude est autorisée à se propager dans certains indices de performance clés. Une deuxième architecture, plus complexe, est ensuite présentée, où l'aéroélasticité statique et dynamique est prise en compte, avec et sans incertitude.

Enfin, certaines études démontrent comment le cadre proposé peut être utilisé avec succès dans un processus d'analyse et d'optimisation robuste d'aéronefs flexibles à grand allongement. Les conclusions et les perspectives d'avenir sont élaborées dans le dernier chapitre.

Mots-clés Conception avion, aéronef flexible, optimisation robuste, aéroélasticité, optimisation multidisciplinaire.

Télécharger la thèse : eprints.soton.ac.uk/477725



Marin Le Guillou

Thèse soutenue le 22 septembre 2023 à Salon de Provence

ED 356 - Cognition, langage, éducation - Aix-Marseille Université

Encadrement

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

Directeurs de thèse : Laurent Prévot, Laboratoire Parole et langage, Aix-Marseille Univ. ;
Bruno Berberian, ONERA/DTIS

Jury

Franck Mars, Laboratoire des sciences du numérique de Nantes

Aurélien Clodic, LAAS-CNRS, Toulouse

Elisabeth Pacherie, Institut Jean Nicod, ENS Paris, EHESS

Florence De Grancey, THALES AVS FRANCE SAS

Noel Nguyen-Trong, Laboratoire Parole et langage, Aix-Marseille Université

Financement

Région Sud - Provence-Alpes-Côte-d'Azur, ONERA

Contact bruno.berberian@onera.fr

Résumé

La révolution technologique promise par les récents progrès de l'intelligence artificielle permet d'imaginer une ère dans laquelle les humains seront assistés par des agents artificiels (AA) dans de nombreuses tâches. Or l'opacité de l'IA embarquée dans les AA freine aujourd'hui les possibilités de coopération. Il apparaît dès lors critique de comprendre comment soutenir la coopération entre les humains et ces agents artificiels. Cette thèse contribue à cet effort en proposant une approche originale du problème. Se basant sur les connaissances inhérentes au contrôle de l'action, notamment de l'action conjointe, la thèse explore la nature de l'information qu'un agent artificiel doit transmettre pour soutenir la coopération avec son partenaire humain. L'hypothèse est faite que la communication des précurseurs des intentions de l'agent artificiel (*Intention Based Explanations* ou *IBEs*) est un élément clé de la coopération entre l'homme et l'agent artificiel.

Utilisant une tâche coopérative (*Overcooked*), nous avons mené une série d'expériences dans lesquelles nous avons étudié l'impact de la communication des intentions (IBEs) de l'agent artificiel sur la performance de l'équipe humain-agent et l'expérience subjective des participants. Nos résultats suggèrent un impact positif des IBEs sur la confiance des participants envers les actions de l'agent artificiel. Les résultats d'une seconde expérience montrent que les IBEs influencent le comportement des participants vers plus de coopération - même s'ils ne sont pas efficaces en termes de performance, tout en répliquant l'impact des IBEs sur la confiance des participants. Dans une troisième expérience, nous démontrons que l'amélioration de la performance individuelle de l'agent réduit l'effet des IBE à la fois sur le plan comportemental et subjectif. Enfin, une quatrième étude indique que les bénéfices en termes subjectifs (notamment la confiance dans l'AA) liés à l'utilisation des IBEs disparaissent si les intentions proximales ou motrices sont présentées de manière séparée.

La thèse apporte des éléments permettant de considérer les IBEs comme des activateurs de l'action conjointe humain-agent artificiel. Les IBEs ont l'avantage d'être des activateurs d'action conjointe « en ligne », alors que les approches plus traditionnelles des explications causales sont des processus hors ligne. En outre, les IBE ont l'avantage potentiel d'être moins coûteux que les explications causales, compte tenu du compromis performance/transparence des techniques d'IA. Les solutions opérationnelles proviendront probablement d'une combinaison équilibrée des deux approches, associée à des capacités de coopération efficaces du côté de l'agent – éventuellement par le biais d'une lecture adéquate des intentions de l'humain.

Mots-clés

Intelligence artificielle explicable (XIA), coopération humain-agent artificiel, équipe humain-autonomie, modèle hiérarchique des intentions, mécanismes prédictifs.

Télécharger la thèse : N/A

Marine Pagliari

Thèse soutenue le 12 décembre 2023 à Salon de Provence

ED 158 (3C) - Cerveau, cognition, comportement - ENS Paris, Université PSL

Encadrement

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

Encadrant : Bruno Berberian, ONERA/DTIS

Directeur de thèse : Valérian Chambon, Institut Jean Nicod, ENS Paris

Jury

Bert Timmermans, University of Aberdeen King's College, Écosse

Émilie Caspar, Ghent University Universiteitstraat, Belgique

Elisabeth Pacherie, Institut Jean Nicod, ENS Paris, EHESS

Sophie Bouton, Institut Pasteur

Lionel Brunel, Epsilon-Laboratoire de psychologie, Université Paul-Valéry Montpellier 3

Financement

DGA/AID, ONERA

Contact bruno.berberian@onera.fr

Résumé

L'émergence de systèmes autonomes a considérablement transformé notre manière d'interagir avec le monde qui nous entoure et les prévisions pour l'avenir indiquent que cette tendance va continuer à se développer, en particulier avec l'avènement de l'intelligence artificielle. Les systèmes autonomes avec lesquels nous collaborons exigent une adaptation de nos compétences cognitives et comportementales afin de nous synchroniser efficacement avec eux. Par conséquent, il devient essentiel de comprendre comment notre cognition s'est adaptée, et continue de s'adapter, aux caractéristiques de cette automatisation accrue. L'une des questions centrales de cette thèse s'articule autour des fonctions cognitives mobilisées par les nouvelles formes d'interactions entre opérateurs humains et systèmes autonomes. Nous nous sommes intéressés à l'influence de ces nouvelles formes d'interaction sur l'expérience subjective de contrôle des opérateurs humains, i.e. le sentiment d'agentivité. Le sentiment d'agentivité fait référence au sentiment de contrôler les actions que nous effectuons et les conséquences de ces actions dans le monde (Haggard & Chambon, 2012).

L'objectif de cette thèse était de (i) caractériser l'impact de l'IA sur la cognition humaine, en particulier sur le sentiment d'agentivité des opérateurs humains, et de (ii) définir et implémenter de nouveaux formats d'« explication », afin de compenser l'influence de l'opacité des systèmes sur l'émergence du sentiment d'agentivité des opérateurs. Pour ce faire, nous avons mené quatre études expérimentales. Nos résultats indiquent que plus l'autonomie de l'IA est élevée, plus le sentiment de contrôle et de responsabilité des opérateurs diminuent. La communication d'explications permet toutefois l'adaptation des opérateurs humains à la tâche en cours, ainsi que l'augmentation concomitante de leur sentiment d'agentivité (études 1 et 2). En outre, nous montrons que lorsque l'IA fournit des explications, les opérateurs humains leur attribuent une responsabilité accrue (étude 3), et que ces explications permettent d'accéder à des indices supplémentaires qui favorisent l'émergence d'un sentiment de contrôle plus fiable (étude 4). Enfin, nos résultats soulignent l'importance de maintenir l'engagement de l'opérateur humain dans la tâche à réaliser, afin de préserver son sentiment de responsabilité dans l'interaction avec le système artificiel.

Cette thèse souligne l'importance d'intégrer la cognition humaine dans le développement des partenaires artificiels à venir. Les modèles de cognition humaine peuvent en effet contribuer à une caractérisation plus fine des informations sur lesquelles repose le développement d'interactions qualitatives, de manière à proposer des solutions qui garantissent une meilleure collaboration entre opérateurs humains et systèmes artificiels autonomes.

Mots clés Intelligence artificielle explicable (XIA), niveau d'autonomie, sentiment d'agentivité.

Télécharger la thèse : <https://theses.fr/s259596>

Anne-Laure Rineau

Thèse soutenue le 6 novembre 2023 à Salon de Provence

ED 463 (SMH) - Sciences du mouvement humain - Aix-Marseille Université

Encadrement

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

Directeurs de thèse : Lionel Bringoux, Institut des Sciences du Mouvement,
Aix-Marseille Université ; Bruno Berberian, ONERA/DTIS

Jury

Patrick Haggard, Institute of Cognitive Neuroscience, University College of London

Jean-Pierre Bresciani, Section de médecine, Université de Fribourg

Isabelle Mackrous, Systems and Behavioural Neuroscience Lab, Univ. McGill, Montreal

Anne Kavounoudias, Laboratoire de neurosciences cognitives, Univ. Aix-Marseille

Financement

ONERA

Contact bruno.berberian@onera.fr

Résumé

A chaque instant, notre cerveau traite un ensemble d'information nous permettant d'accéder à notre position et aux déplacements de notre corps dans l'espace. Autrement appelé perception du mouvement propre, cette fonction est vitale pour l'être humain en ce sens qu'elle est nécessaire pour se déplacer et produire un comportement adapté. Elle est d'autant plus critique lorsqu'il s'agit de contrôler les mouvements d'un système dans l'espace, situations dans laquelle le mouvement peut dépendre d'un ensemble d'éléments plus ou moins complexes à appréhender. C'est notamment le cas dans le domaine de

l'aéronautique où le pilote doit pouvoir accéder à chaque instant aux déplacements et la position de son avion sous peine de perdre le contrôle de son appareil. La perception du mouvement propre repose principalement sur des informations externes (visuelles) et des informations internes (vestibulaires, somatosensorielles et proprioceptives). On parle classiquement d'intégration visuo-vestibulaire pour désigner les mécanismes intégratifs multisensoriels qui sous-tendent cette perception. Si cette intégration se fait généralement de manière efficace, certaines conditions de vols (nuit, brouillard...) sont propices à l'apparition de perceptions erronées de la position du pilote dans l'espace. Ces épisodes de désorientation spatiale (DS) constituent un enjeu majeur pour la sécurité des vols. Dès lors, comprendre les mécanismes sous-jacents à ce phénomène apparaît critique.

Le travail présenté dans ce manuscrit traite de cette problématique sous un angle original, celui de l'agentivité. L'agentivité concerne le fait de se sentir en contrôle de ses actions et des conséquences sensorielles qui en résultent. Nous savons aujourd'hui que l'agentivité 1/ module notre perception de l'environnement, 2/ est dégradée par l'automatisation des systèmes. Dans ce contexte, la question de l'impact des environnements automatisés sur la propension des pilotes à être sujet à la DS se pose. Le projet de thèse vise donc à explorer l'impact de l'agentivité sur la perception du mouvement propre. D'un point de vue méthodologique, l'impact du contrôle de l'action sur la perception du mouvement propre a été étudié pour différentes tâches comportementales : détection d'un déplacement (étude 1), discrimination de l'intensité de deux déplacements successifs (2), capacité à intégrer les entrées sensorielles (3 - intégration temporelle, 4 - intégration spatiale). Ces tâches ont été réalisées sous deux conditions d'agentivité : un condition dite Passive (automatique) et une condition dite Active (manuelle). L'hypothèse était posée que le fait d'être en contrôle de l'action permet une potentialisation de l'intégration multisensorielle, particulièrement en contexte ambigu. Globalement, un maintien de la performance en condition Active et une dégradation de la performance en condition Passive ont été observés lorsque l'ambiguïté (i.e. la difficulté de discrimination) augmente. Ces résultats indiquent une résilience des mécanismes intégratifs visuo-vestibulaires à l'ambiguïté en condition Active. Cette condition s'accompagne également d'une plus grande confiance et d'une meilleure fiabilité métacognitive. La condition Active était caractérisée par une grande prédictibilité des conséquences sensorielles liées à l'action. Dès lors, on pose l'hypothèse qu'une plus faible erreur de prédiction en condition Active a permis de potentialiser les mécanismes multisensoriels, au profit d'une meilleure performance perceptive, et ce particulièrement en contexte ambigu. On peut donc se demander dans quelle mesure cette gestion de l'ambiguïté pourrait s'étendre à des conditions plus écologiques telles que celles de la DS. De tels résultats ouvrent des perspectives encourageantes puisqu'ils suggèrent un lien probable entre automatisation et perception du mouvement propre tout en suggérant des principes de conception permettant de le contrer.

Mots clés

Perception du mouvement propre, Intégration multisensorielle, codage prédictif, agentivité, automatisation.

Télécharger la thèse : N/A

Rémi Sanchez

Thèse soutenue le 15 novembre 2023 à Marseille

ED 62 - Sciences de la vie et de la santé - Aix-Marseille Université

Encadrement

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

Encadrant : Andrea Desantis, ONERA/DTIS

Directeur de thèse : Thibault Gajdos, Laboratoire de psychologie cognitive,
Aix-Marseille Université

Jury

Kobe Desender, Leuven Brain Institute, KU Leuven (Louvain), Belgique

Claire Sergent, INCC, Université Paris Cité

Nathan Faivre, Laboratoire de psychologie cognitive, Aix-Marseille Université

Elisa Filevich, Bernstein center for computational neuroscience, Berlin

Lucie Charles, School of Biological and Behavioural Sciences, Queen Mary University,
London

Pascal Mamassian, Laboratoire des Systèmes Perceptifs, ENS Paris

Financement

ONERA

Contact andrea.desantis@onera.fr

Résumé

En neurosciences cognitives, l'un des défis majeurs est de comprendre la confiance, c'est-à-dire la capacité des humains à évaluer l'exactitude de leurs décisions afin d'adapter leur comportement. Des recherches ont montré que la confiance dans les décisions perceptives repose sur des informations sensorielles (Galvin et al., 2003 ; Kiani & Shadlen, 2009 ; Vickers, 1979). Cependant, des études récentes suggèrent que la confiance peut également être influencée par des processus moteurs (Gajdos et al., 2019). En effet, alors que pratiquement chaque décision que nous prenons entraîne une action, les processus moteurs sont largement négligés dans la littérature (Rosenbaum, 2005).

Cette thèse vise à contribuer à notre compréhension du rôle des processus moteurs dans la génération des estimations de confiance ainsi que la fonction de la confiance dans la prise de décision. J'ai réalisé au total sept expériences (dont six pré-enregistrées) afin d'étudier le rôle de la préparation motrice et de la précision motrice des décisions perceptives dans les jugements de confiance. De plus, nous avons exploré le rôle de la confiance dans la prise de décision lors des interactions avec un partenaire.

Les résultats ont apporté de nouvelles preuves comportementales et électrophysiologiques de l'influence des actions sur la confiance perceptive. Ces résultats suggèrent que les calculs de confiance sont en partie influencés par la façon dont les individus surveillent et contrôlent leurs propres actions, indépendamment de la perception visuelle. Cela met en lumière la question générale du rôle du système moteur dans les processus cognitifs. De plus, ces résultats apportent de nouvelles preuves empiriques indiquant que la confiance permet de pondérer nos décisions afin d'adapter notre comportement lors des interactions avec un partenaire, contribuant ainsi à notre compréhension du rôle de la confiance dans la cognition.

Mots clés

Neurosciences cognitives, confiance, prise de décision, processus moteurs, supervision de l'action, EEG

Mathieu Thomas

Thèse soutenue le 5 octobre 2023 à Marseille

ED 463 - Sciences du mouvement humain - Aix-Marseille Université

Encadrement

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

Encadrants : Thomas Rakotomamonjy, ONERA/DTIS ;

Julien Serres, Institut des Sciences du Mouvement, Aix-Marseille Univ.

Directeurs de thèse : Franck Ruffier, Antoine Morice,

Institut des Sciences du Mouvement, Aix-Marseille Univ.

Jury

Anne-Hélène Olivier, M2S, Université de Rennes 2

Isabelle Siegler, L2S, Université Paris-Saclay

Clark Bosrt, Delft University of Technology

Ludovic Seifert, CETAPS, Université de Rouen Normandie

Brice Isableu, Centre PsyCLÉ, Aix-Marseille Université

Emmanuel Gardinetti, DGA/AID (invité)

Financement

DGA/AID, ONERA

Contact thomas.rakotomamonjy@onera.fr

Résumé

L'atterrissage d'hélicoptère sur navire (l'appontage) est une tâche périlleuse et sollicitante dont la majeure partie des accidents et incidents ont pour cause principale le facteur humain. Dans cette thèse, nous concevons et testons une assistance visuelle en environnement virtuel dans le but d'améliorer la sécurité de l'appontage en suivant les principes de conception d'interfaces écologiques. En effet, l'approche écologique de la perception et de l'action est une approche pertinente pour étudier le comportement de pilote appontant sur navire, et établir les fondements scientifiques nécessaires à la conception d'une assistance visuelle. Le processus de conception s'appuie sur 1) une analyse du domaine de travail (l'hélicoptère en environnement maritime) établie d'après la littérature et des entretiens avec des pilotes experts, 2) l'analyse du comportement des pilotes en environnement virtuel immersif, 3) la modélisation des possibilités d'appontage sous la forme d'un modèle d'affordance (l'appontabilité) et 4) l'étude empirique de la perception de l'affordance d'appontabilité et l'évaluation des bénéfices d'une assistance d'aide à la prise de décision, en environnement virtuel.

Les principaux résultats obtenus mettent en évidence que des pilotes experts couplent les déplacements verticaux de leur appareil avec ceux du navire afin de minimiser leur vitesse d'impact au moment du poser. Afin de questionner le rationnel de la stratégie de couplage observée, nous proposons un modèle d'affordance d'appontabilité, formalisant si l'appontage est permis dans les limites de vitesse d'impact déterminées lors de l'analyse du domaine de travail. Le modèle s'est montré pertinent pour capturer le processus de prise de décision à l'appontage. L'assistance visuelle conçue d'après le modèle est bénéfique pour la sécurité de l'appontage car elle permet à l'opérateur de mieux distinguer les situations ne permettant pas un poser sûr, de celles le permettant. Ce travail constitue une première étape dans la formalisation de l'appontabilité et son application à la conception d'assistance au pilotage. Les perspectives de développements permettant de raffiner et compléter le modèle, ainsi que les applications dans différents champs sont discutées.

Mots-clés

Affordance, EID, appontage, hélicoptère.

Ombeline Aiello

Thèse soutenue le 13 avril 2023 à Toulouse

ED 475 (MITT) - Mathématiques informatique télécommunications de Toulouse -
Institut supérieur de l'aéronautique et de l'espace, Toulouse

Encadrement

Département Traitement de l'information et systèmes, ONERA, Toulouse

Encadrant : Jean-Charles Chaudemar, ISAE-SUPAERO

Directeurs de thèse : Pierre de Saqui-Sannes, ISAE-SUPAERO ;
Olivier Poitou, ONERA/DTIS

Jury

Daniel Amyot, School of Electrical Engineering and Computer Science, Université d'Ottawa

Régine Laleau, LACL, Université Paris-Est

Ludovic Aprville, LabSoc, Télécom Paris

Nathalie Bartoli, ONERA/DTIS

Olivia Penas, ISAE-SUPMECA

Financement

DGA/AID, projet Concorde

Contact olivier.poitou@onera.fr



Résumé

Depuis quelques années, le nombre de drones ne cesse d'augmenter. Ces derniers sont amenés à réaliser différents types de missions, qu'elles soient civiles ou militaires, pour lesquelles ils présentent des caractéristiques techniques spécifiques, adaptées aux besoins de chacune d'elles.

Les travaux de cette thèse ont pour but de développer une méthodologie de conception et d'optimisation de systèmes de drones basée modèles, pour laquelle les approches MBSE (*Model-Based System Engineering*) et MDAO (*Multidisciplinary Design Analysis and Optimization*) sont utilisées. Cette méthodologie contient trois contributions majeures. Premièrement, nous proposons d'utiliser le langage GRL (*Goal-oriented Requirement Language*) pour formaliser la mission que le drone doit effectuer et ainsi identifier les parties prenantes et leurs besoins. Puis, nous proposons des règles d'intégrité qui permettent de passer de l'étape d'analyse des besoins (que nous modélisons en GRL), à la phase de spécification du cycle en V. Cette phase de spécification est modélisée suivant la méthodologie MBSE pour laquelle nous utilisons le langage SysML. Pour permettre ce passage d'une étape à l'autre, les règles d'intégrité proposées ont plusieurs fonctions. D'une part, elles permettent de générer des diagrammes SysML à partir de la modélisation GRL réalisée dans la phase d'analyse des besoins. D'autre part, elles permettent de garantir la cohérence entre la modélisation GRL et les diagrammes SysML créés ou modifiés manuellement.

Enfin, nous avons réalisé un travail focalisé sur les exigences (système et mission) pour les améliorer et les préciser le plus tôt possible dans le cycle de développement du système. Pour ce faire, un couplage entre les approches MBSE et MDAO est proposé. Ce couplage intègre des résultats analytiques dans des modèles systèmes dès la phase de conception préliminaire du drone, améliore la précision de ces modèles systèmes, et garantit la cohérence entre ces modèles et des modèles physiques (à partir d'équations mathématiques). De plus, la formalisation des relations entre MBSE et MDAO a pour objectif, à terme, de faciliter les évolutions des modèles en indiquant d'éventuelles anomalies et/ou incohérences. La méthodologie développée dans le cadre de cette thèse est appliquée sur un cas d'étude de surveillance de lignes électriques en montagne, pour en évaluer les bénéfices et limites. Cette application a aussi pour but d'identifier de nouvelles pistes de recherche, susceptibles de renforcer cette méthodologie, et éventuellement, de la transposer à d'autres systèmes complexes.

Mots clés

Analyse, conception, interopérabilité, drones.

Télécharger la thèse : <https://theses.fr/s247187>

HDR
Habilitations à diriger
des recherches
soutenues en 2023

Aurélien Vattré

Habilitation à diriger des recherches soutenue le 10 mai 2023

ED 146 - Galilée - Université Sorbonne Paris Nord

Environnement

Département Matériaux et structures (DMAS), Châtillon

Jury

Ian Ionescu, Professeur, Université Sorbonne-Paris-Nord

Brigitte Bacroix, LSPM, CNRS, Villetaneuse

Stéphane Berbenni, LEM3, Université de Lorraine

Marc Fivel, SIMAP, INP Grenoble

Renald Brenner, Institut Jean Le Rond d'Alembert, Sorbonne Université

Contact aurelien.vattre@onera.fr



Résumé

Les interfaces telles que les joints de grains dans les matériaux polycristallins ainsi que les hétéro-interfaces dans les solides multiphasés sont omniprésentes en science et ingénierie des matériaux. Par conséquent, comprendre le rôle mécanique des interfaces est essentiel dans l'optimisation des matériaux dominés par les interfaces pour une large gamme d'applications industrielles, comme la conversion et le stockage d'énergie électrochimique, les applications optiques, magnétiques et mécaniques, les applications thermiques, à l'instar des revêtements thermiques et environnementaux dans les industries automobile et aéronautique.

Bien loin d'être des surfaces de séparation entre deux cristaux adjacents, élucider le rôle des interfaces solide-solide est une tâche difficile qui nécessite de mettre en œuvre des stratégies théoriques et numériques pour décrire les caractéristiques physiques et mécaniques de ces interfaces internes. La première partie de ce manuscrit concerne les microstructures dominées par les interfaces résultant de transformations de phase structurales polymorphes (martensitiques, sans diffusion). Sous l'action d'une compression hydrostatique élevée ou lors d'un passage d'une onde de choc, les transitions de phase induites par la pression et la formation d'interfaces internes dans le fer sont décrites dans un cadre thermodynamiquement cohérent combinant le comportement élasto-viscoplastique anisotrope en grandes déformations du fer et une approche originale de type champ de phase. Les calculs ont mis en évidence le rôle crucial joué par la déformation plastique dans les processus d'évolution morphologique et microstructurale des variants de transformation, et une signature microstructurale en dynamique rapide a été révélée. La deuxième section vise à modéliser de telles interfaces imparfaites à une échelle plus fine, pour lesquelles les interfaces semi-cohérentes sont décrites par des réseaux de dislocations de désaccord paramétrique (cristallographique et élastique). Au cours des dix dernières années, un effort constant a été consacré à la résolution de l'équation de Frank-Bilby et du réseau O de Bollmann en adaptant le formalisme de l'élasticité anisotrope de Stroh aux motifs de moiré dessinés par les dislocations intrinsèques interfaciales. Les structures topologiques et énergétiques des interfaces semi-cohérentes sont quantifiées et utilisées afin de proposer des interfaces avec des motifs de dislocations de désaccord sur mesure, susceptibles de mieux résister aux défauts ponctuels d'irradiation que des matériaux massifs conventionnels.

Mots-clés

Interfaces solide-solide, transformations de phase, élasto-viscoplasticité, interfaces semi-cohérentes, moiré, élasticité hétérogène et anisotrope, défauts ponctuels d'irradiation.

Télécharger la thèse : <https://arxiv.org/abs/2307.14569>

Emmanuel Radenac

Habilitation à diriger des recherches soutenue le 4 décembre 2023 à Toulouse

ED 468 - MEGEP - Université Toulouse 3 Paul Sabatier

Environnement

Département Multiphysique pour l'énergétique (DMPE), Toulouse

Jury

Stephan Bansmer, Institut de mécanique des fluides, TU Braunschweig

Yannick Hoarau, ICube, Université de Strasbourg

Franck Nicoud, IMAG, Université de Montpellier

Christophe Airiau, IMFT, Université Toulouse 3 Paul Sabatier

Héloïse Beaugendre, Institut de Mathématiques de Bordeaux, Univ. Bordeaux

Philippe Villedieu, ONERA/DMPE

Contact emmanuel.radenac@onera.fr

Résumé

Les travaux de ce mémoire d'habilitation à diriger des recherches (HDR) portent sur la modélisation d'écoulements rencontrés dans le domaine aérospatial. Deux thématiques sont abordées. Le premier axe concerne les oscillations de pression dans les moteurs à propergol solide. En particulier, il est question des instabilités de fonctionnement liées à l'interaction thermo-acoustique due à la combustion de gouttes d'aluminium. Des méthodes d'analyse linéaire de l'acoustique dans ces moteurs sont développées et des conclusions sont tirées concernant les phénomènes gouvernant l'instabilité.

Le deuxième volet de cette HDR concerne la simulation du givrage en vol des avions. Deux aspects de la modélisation sont plus spécifiquement traités. Le premier est consacré aux transferts dans les couches limites sur paroi givrée ou protégée thermiquement contre le givre. Des méthodes de type intégral sont étudiées. L'impact de la rugosité de surface ou d'un chauffage non uniforme de paroi est pris en compte. Le deuxième point est la modélisation de la croissance du givre. Plusieurs approches numériques peuvent être employées pour cela. Des méthodes de frontières immergées, une méthode *Level-Set* et une méthode de type morphogénétique sont notamment présentées.

Mots-clés

Interfaces Propulsion solide, interaction thermo-acoustique, physique du givrage, couche limite, transfert de chaleur convectif, méthodes de frontières immergées.

Olivier Vermeersch

Habilitation à diriger des recherches soutenue le 9 novembre 2023 à Toulouse

ED 468 - MEGEP - Université Toulouse 3 Paul Sabatier

Environnement

Département Multiphysique pour l'énergétique (DMPE), Toulouse

Jury

Jean-Christophe Robinet, DynFluid, ENSAM

Eric Lamballais, Institut Pprime, Poitiers

Eric Laurendeau, Polytechnique Montréal

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

Christophe Airiau, IMFT, Toulouse

Grégoire Casalis, ISAE-SUPAERO

Contact olivier.vermeersch@onera.fr

Résumé

Ce mémoire d'habilitation à diriger des recherches regroupe plusieurs études portant sur les mécanismes de transition du régime laminaire vers le régime turbulent pour un écoulement de type couche limite.

Le premier chapitre traite de l'analyse théorique des instabilités hydrodynamiques et des différentes étapes du processus conduisant à la transition. Les caractéristiques des instabilités dites non-modales et la façon dont elles peuvent interagir avec les instabilités modales sont en particulier étudiées. Les deux chapitres suivants sont dédiés à la modélisation de la transition laminaire-turbulent en adoptant une formulation compatible avec une approche RANS basée sur la résolution d'équations de transport supplémentaires. Le chapitre 2 propose une modélisation de la transition bypass, reposant sur le concept d'énergie cinétique laminaire, lorsque la couche limite est soumise à des perturbations extérieures d'intensité significative. Le chapitre 3 présente quant à lui un modèle traduisant l'amplification des instabilités modales permettant de prévoir la transition naturelle.

La seconde partie du manuscrit repose sur une approche expérimentale destinée à évaluer l'influence de conditions de surface sur les instabilités hydrodynamiques et la transition. En premier lieu, l'impact de conditions pariétales non contrôlées, telles que les défauts de surface ou la rugosité de paroi, sont étudiées (chapitre 4). Dans le chapitre suivant (chapitre 5), ces conditions sont travaillées afin de retarder le déclenchement de la transition laminaire-turbulent.

En définitive, ce manuscrit rassemble des analyses théoriques et expérimentales pour comprendre les mécanismes régissant la transition d'un écoulement de couche limite d'un état laminaire vers un régime turbulent. Il aborde également l'élaboration de modèles numériques permettant de prévoir les différents types de transition.

Mots-clés

Transition laminaire-turbulent, transition naturelle, transition bypass, instabilités hydrodynamiques, instabilités modales, instabilités non-modales, énergie cinétique laminaire, modes de Klebanoff, modélisation RANS.

Bruno Hérisse

Habilitation à diriger des recherches soutenue le 17 mars 2023 à Palaiseau

ED 580 (STIC) - Sciences et technologies de l'information et de la communication -
Université Paris-Saclay

Environnement

Département Traitement de l'information et systèmes, ONERA, Palaiseau

Jury

Nicolas Petit, CAS, Mines Paris PSL

Jean-Baptiste Pomet, INRIA, Sophia Antipolis

Hasnaa Zidani, LMI, INSA Rouen Normandie

Jean-Baptiste Caillau, LJAD, Université Côte d'Azur

Yacine Chitour, L2S, Université Paris-Saclay

Frédéric Jean, UMA, ENSTA Paris

Emmanuel Trélat, Laboratoire Jacques-Louis Lions, Sorbonne Université

Contact bruno.herisse@onera.fr

Contrôle optimal et planification de trajectoire pour le guidage des systèmes aérospatiaux

Résumé

Dans la boucle de Navigation-Guidage-Pilotage des systèmes aéronautiques et spatiaux, le guidage porte spécifiquement sur la commande du centre de masse du véhicule. En raison de la complexité des problèmes rencontrés, une approche classique consiste tout d'abord à calculer une trajectoire de référence par méthode d'optimisation. Un algorithme d'asservissement est ensuite appliqué pour suivre cette trajectoire. Bien que simple à mettre en œuvre et peu coûteuse en calculs, cette technique n'autorise aucun imprévu (e.g. un changement d'objectif ou une déviation de trajectoire due à la présence de fortes incertitudes). Une première partie des travaux présentés dans cette HDR porte sur l'étude de nouveaux algorithmes de guidage permettant de conserver optimalité et robustesse dans de tels cas. Pour cela, les méthodes du contrôle optimal sont utilisées afin d'analyser la structure de la commande et les méthodes numériques de tir indirect et de continuation sont combinées pour obtenir un algorithme embarqué. Ces développements ont été appliqués à des problèmes d'interception de cible et à des problèmes de retour de lanceurs réutilisables.

Une deuxième partie des travaux se concentre sur des problèmes de planification de trajectoire et de commande en environnement fortement contraint pour lesquels les techniques de contrôle optimal utilisées seules sont impossibles à mettre en œuvre (e.g. en présence d'obstacles ou de forts aléas). Des méthodes probabilistes sont utilisées avec des méthodes de contrôle optimal pour la planification de trajectoire d'un drone. Dans le problème de navigation par corrélation de terrain, une méthode de commande prédictive robuste basée sur un formalisme stochastique a été développée pour pallier le problème de couplage entre l'estimation et la commande. Des travaux en cours proposent d'approximer des problèmes de contrôle stochastique réputés insolubles pour générer de manière efficace des trajectoires robustes à des aléas.

Mots-clés

Guidage des systèmes aérospatiaux, contrôle optimal, planification de trajectoire.

Télécharger la thèse : <https://theses.hal.science/tel-04095485>

Paul-Quentin Elias

Habilitation à diriger des recherches soutenue le 2 octobre 2023 à Gif-sur-Yvette

ED 572 (EDOM) - Ondes et matière - Université Paris-Saclay

Environnement

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

Jury

Françoise Massines, PROMES, Univ. Perpignan

Jean-Pierre Bœuf, LAPLACE, Univ. Toulouse

Stéphane Mazouffre, ICARE, CNRS Orléans

Svetlana Starikovskaia, Laboratoire de physique des plasmas,
École polytechnique, IP Palaiseau

Christophe Laux, Professeur, EM2C, CentraleSupélec

Contact paul-quentin.elias@onera.fr

Résumé

Ces travaux portent sur l'étude de plasmas pour leur utilisation dans le domaine aérospatial. Ils s'articulent selon deux axes. Le premier est consacré à l'utilisation de plasmas à pression atmosphérique pour l'obtention de dépôts d'énergie linéiques. L'objectif est d'utiliser ces dépôts pour des applications telles que le contrôle d'écoulement, la réduction de traînée en régime supersonique, l'allumage de chambre de combustion et, plus récemment, la décarbonation. À chaque fois, ces développements s'appuient sur une démonstration expérimentale. Un outil privilégié pour obtenir une telle topologie est la décharge de surface. Cette décharge à barrière diélectrique, avec une configuration asymétrique d'électrodes et une excitation impulsionnelle, fait l'objet de caractérisations plus approfondies. Le deuxième axe porte sur la propulsion plasmique des satellites. Dans ce cadre, de nouveaux outils de diagnostic ont été développés pour mieux caractériser le jet de plasma de ce type de propulseurs. En parallèle, une contribution de ce travail porte sur le développement du propulseur ECR de l'ONERA, notamment sur l'étude des mécanismes de couplage entre les ondes micro-ondes et le plasma. Ceci a nécessité de développer des outils de simulation adaptés à ce type de plasma magnétisé à basse pression.

Mots-clés

Plasma, propulsion spatiale, décharge de surface, aérospatiale.

Myriam Raybaut

Habilitation à diriger des recherches soutenue le 7 novembre 2023

Université Paris-Saclay

Environnement

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

Jury

Patricia Segonds, Institut Néel, Université Grenoble Alpes

Weidong Chen, LPCA, Université du Littoral Côte d'Opale

Alain Miffre, Institut Lumière matière, Université Lyon 1

Cyrille Flamant, LATMOS, Université Paris-Saclay

Antoine Godard, ONERA/DSD/PHY

Contact myriam.raybaut@onera.fr

Résumé

Agiles en fréquence, les sources paramétriques optiques (oscillateurs et amplificateurs paramétriques) sont des sources de choix pour les applications de détection d'espèces gazeuses par spectrométrie d'absorption. La maîtrise du contenu spectral de ces sources paramétriques en régime impulsionnel est une étape essentielle pour le développement d'instruments sensibles de détection à distance. Les travaux ayant porté sur le développement d'oscillateurs paramétriques innovants, permettant une émission mono-fréquence accordable, seront présentés. La démarche de co-conception entre ces sources cohérentes et les instruments de mesure développés sera présentée. Quelques exemples de mise en application pour les mesures de type lidar à absorption différentielle seront détaillés, pour des visées applicatives environnementales ou de sécurité.

Mots-clés

Spectrométrie, optique non-linéaire, sources paramétriques.

**Contrats post-doctoraux ONERA
terminés en 2023**

Pierre-Emmanuel Des Boscs

Exploiting wall-pressure and displacement measurements from wind-tunnel experiments of a transonic, aeroelastic wing-model with physics-informed data-driven approaches

Contrat de post-doc terminé le 30 juin 2023

Département Aérodynamique, aéroélasticité, acoustique, ONERA, Meudon

Responsable : Nicolo Fabbiane, ONERA/DAAA

Tuteur : Olivier Marquet (MR1), ONERA/DAAA

Financement ONERA

Contact nicole.fabianne@onera.fr

Minh Vuong Le

Proposition d'une stratégie de simulation efficace pour l'estimation des effets des défauts d'ondulation hors-plan des plis UD au sein de cornières composites stratifiées

Contrat de post-doc terminé le 9 janvier 2023

Département Matériaux et structures, ONERA, Châtillon

Responsable : Juan-Manuel García, ONERA/DMAS

Tuteur : Frédéric Laurin (DR2), ONERA/DMAS

Financement ONERA

Contact jean-manuel.garcia@onera.fr

DOMAINE MATÉRIAUX ET STRUCTURES

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

Ahmed Demokrati

Modélisation microstructurale 3D à grande échelle :
Formulation multi-champ de la méthode S-PFM
et application à la croissance des polycristaux

Contrat de post-doc terminé le 6 août 2023

Département Matériaux et structures, ONERA, Châtillon

Responsable : Yann Le Bouar, ONERA/DMAS/LEM

Tuteur : Alphonse Finel (DR1), ONERA/DMAS

Financement ONERA

Contact yann.lebouar@onera.fr



DOMAINE MÉCANIQUE DES FLUIDES ET ÉNERGÉTIQUE

Thématique Acoustique : sources, propagation et impact

Smail Lebbal

Analyse des mécanismes de génération
du bruit de bec de bord d'attaque
par méthodes de stabilité globale

Contrat de post-doc terminé le 31 juillet 2023

Département Aérodynamique, aéroélasticité, acoustique, ONERA, Châtillon

Responsable : Maxime Huet, ONERA/DAAA

Tuteur : Denis Sipp (DR1), ONERA/DAAA

Financement DGAC, ONERA

Contact maxime.huet@onera.fr

Résumé

L'étude porte sur le bruit tonal issu des cavités de bec, produit par l'impact de la couche de cisaillement sur la paroi opposée du bec avec un couplage aéro-acoustique de type Rossiter. L'analyse utilise la théorie de la stabilité globale. Le calcul des modes de résolvant est conforme avec la décomposition SPOD de l'écoulement et permet de retrouver le premier mode de Rossiter. Le formalisme utilisé permet ainsi de modéliser la résonance à la fréquence fondamentale de l'instabilité, mais la reproduction des harmoniques d'ordre supérieur, moins définis, semble nécessiter l'inclusion des interactions non linéaires.

Mots-clés

Acoustique, bruit bec, profil hypersustenté, stabilité globale, modes propres, résolvante.



Cynthia Tayeh

Reconstruction d'écoulements autour de profils
à partir de mesures pariétales

Contrat de post-doc terminé le 31 juillet 2023

Département Aérodynamique, aéroélasticité, acoustique, ONERA, Meudon

Responsable : Vincent Mons, ONERA/DAAA

Tuteur : Olivier Marquet (MR1), ONERA/DAAA

Financement ONERA

Contact vincent.mons@onera.fr

Résumé

Les essais en soufflerie pour des configurations industrielles ne permettent généralement que de mesurer la pression pariétale à certaines positions sur les maquettes. Ce postdoc a été consacré au développement de méthodologies d'assimilation de données permettant de reconstruire l'ensemble de l'écoulement moyen à partir de telles mesures. Ces méthodologies ont été appliquées à l'écoulement autour d'un profil proche du décrochage et des données numériques et expérimentales. Un résultat marquant de ce postdoc est la possibilité d'obtenir une estimation fidèle de l'écoulement à partir d'une unique mesure de pression.

Mots-clés Assimilation de données, essai en soufflerie

Arijit De

*Characterization and simulation of the tropospheric
propagation channel at Ka and Q/V bands using physical
deterministic models from data collected in the GSAT-14
propagation campaign*

Contrat de post-doc terminé le 31 mars 2023

Département Électromagnétisme et radar, ONERA, Toulouse

Responsable : Laurent Castanet, ONERA/DEMUR

Tuteur : Jean-Pascal Monvoisin, ONERA/DEMUR

Financement CNES, ONERA

Contact laurent.castanet@onera.fr

Yongseok Jang

Algèbre linéaire rapide pour la CFD

Contrat de post-doc terminé le 17 avril 2023

Département Aérodynamique, aéroélasticité, acoustique, ONERA, Châtillon

Responsable : Denis Gueyffier, ONERA/DAAA

Tuteurs : Émeric Martin, Cédric Content (CR), ONERA/DAAA

Financement DGAC

Contact denis.gueyffier@onera.fr

Résumé

Pour rechercher un point fixe des équations hyperboliques régissant les écoulements compressibles à une précision arbitraire, les méthodes classiques de type LU-SGS peuvent s'avérer inopérantes. Les méthodes de Krylov sont plus adaptées pour traiter ces matrices de grande taille, creuses, non-symétriques en valeurs, non-normales et souvent mal conditionnées. Il est alors nécessaire de contraindre la taille de l'espace de Krylov pour limiter les coûts engendrés par le procédé de construction de sa base. Ce projet post-doctoral a associé un procédé par projection aléatoire, pour générer une base plus stable à coût réduit, et des techniques de déflation au redémarrage de la méthode, exploitant vecteurs propres ou singuliers. Plusieurs algorithmes robustes et efficaces avec préconditionnement flexible sont en cours de publication dans la revue *Numerical Algorithms* (Y. Jang et al., *Randomized Flexible GMRES with Deflated Restarting*, 2023).

Mots-clés Projection aléatoire, sous-espace de Krylov, déflation.



Jesus Toledo Zucco

Dynamical systems observer design with application in aircraft flutter detection

Contrat de post-doc terminé le 9 juillet 2023

Département Traitement de l'information et systèmes, ONERA, Toulouse

Responsable : Charles Poussot-Vassal (DR2), ONERA/DTIS

Financement DGAC

Contact charles.poussot-vassal@onera.fr

Résumé

En aéronautique, le flottement fait référence à un phénomène d'instabilité qui se produit lorsque les forces aérodynamiques et les efforts de structure (élastiques, inertie...) sont couplés. Plus spécifiquement, ce couplage mène à des résonances et à un amortissement structurel qui peut devenir insuffisant pour préserver les marges la stabilité. Un amortissement structurel insuffisant peut donc provoquer une instabilité dans certaines conditions de vol, et ainsi conduire à une rupture. Dans ce projet nous avons proposé une technique pour estimer l'amortissement d'un système dynamique en temps-réel, en utilisant des observateurs d'état. Cet observateur permet de prendre des décisions préventives lorsque l'avion s'approche d'une condition de flottement.

Mots-clés Observateur d'état, flottement, aéroélasticité.



Sofiane Kraiem

Développement des nouvelles architectures de contrôle intelligentes, basées apprentissage, pour l'autonomie des avions civils

Contrat de post-doc terminé le 4 septembre 2023

Département Traitement de l'information et systèmes, ONERA, Toulouse

Responsable : Mario Cassaro, ONERA/DTIS

Tuteur : Jean-Marc Biannic (DR1), ONERA/DTIS

Financement DGAC

Contact mario.cassaro@onera.fr

Résumé

Les principaux objectifs atteints sont : l'adaptation de la plateforme de simulation SCHEMIN aux tâches d'apprentissage ; la conception et la validation, en environnement de simulation, d'une fonction d'atterrissage autonome avec IA dans la boucle critique de vol ; l'exploitation des jeux de données synthétiques pour l'entraînement et l'évaluation des performances de différents modèles de détection d'objets et de segmentation d'images pour la détection de piste.

Mots-clés

Détection et segmentation de piste, asservissement visuel basé sur la pose, simulation de vol



Julio Betancourt Vera

Quantitative task analysis and evaluation of collaborative robotic solutions for the optimization of industrial processes

Contrat de post-doc terminé le 31 août 2023

Département Traitement de l'information et systèmes, ONERA, Toulouse

Responsable : Mathieu Rognant, ONERA/DTIS

Tuteur : Clément Roos (DR2), ONERA/DTIS

Financement BPIfrance

Contact mathieu.rognant@onera.fr



Rafael Bailon-Ruiz

Architecture de contrôle et planification embarquée
pour satellite d'observation d'une constellation

Contrat de post-doc terminé le 31 mars 2023

Département Traitement de l'information et systèmes, ONERA, Toulouse

Responsable : Éric Bensana, ONERA/DTIS

Tuteur : Charles Lesire-Cabaniols (DR2), ONERA/DTIS

Financement BPIfrance

Contact eric.bensana@onera.fr

INDEX DES AUTEURS

Index des auteurs

Abou-Amdan, Loubnan	Thèse de doctorat	PHY	132
Aiello, Ombeline	Thèse de doctorat	TIS	274
Al Hajj Sleiman , Eva	Thèse de doctorat	PHY	180
André, Alexis	Thèse de doctorat	MFE	98
Armani, Thibaut	Thèse de doctorat	MAS	20
Astruc, Séverin	Thèse de doctorat	PHY	188
Audouard, Lisa	Thèse de doctorat	MAS	22
B ailon-Ruiz, Rafael	Post-doc	TIS	302
Baradel, Baptiste	Thèse de doctorat	MFE	68
Baray, Matthias	Thèse de doctorat	SNA	216
Barrellon-Vernay, Rafaël	Thèse de doctorat	MFE	114
Belfio, Julie	Thèse de doctorat	PHY	182
Berhouni, Ilyès	Thèse de doctorat	MFE	108
Bernigaud, Pierre	Thèse de doctorat	MFE	106
Betancourt Vera, Julio	Post-doc	TIS	301
Blanchard, Camille	Thèse de doctorat	TIS	248
Bouchard, Michel	Thèse de doctorat	MFE	76
Brard , Nathan	Thèse de doctorat	MAS	24
Breyton, Grégoire	Thèse de doctorat	MAS	12
Brot, Grégoire	Thèse de doctorat	MAS	32
Brulon, Cyprien	Thèse de doctorat	PHY	134
Byrde, Lorenzo	Thèse de doctorat	MFE	100
C erbelaud, Arnaud	Thèse de doctorat	PHY	148
Chahbazian, Clément	Thèse de doctorat	TIS	228
Chanteux, Xavier	Thèse de doctorat	MFE	92
Charayron, Rémy	Thèse de doctorat	TIS	256
Chareyre, Maxime	Thèse de doctorat	TIS	240
Chatillon, Pierrick	Thèse de doctorat	PHY	138
Chatzitheodoridi, Maria-Elisavet	Thèse de doctorat	PHY	128
Chebil, Gwenaëlle	Thèse de doctorat	MAS	26
Chiron, Marie	Thèse de doctorat	TIS	244
Clavière, Arthur	Thèse de doctorat	TIS	246
Coelho , Ludovic	Thèse de doctorat	SNA	200
Constant, Benjamin	Thèse de doctorat	SNA	210
Costa, Carla	Thèse de doctorat	PHY	176
Cruz Marques, Rolando	Thèse de doctorat	MFE	72
D e, Arijit	Post-doc	PHY	297
Debary, Hiyam	Thèse de doctorat	PHY	154
Dehan, Guillaume	Thèse de doctorat	PHY	124

Deluzet, Matthieu	Thèse de doctorat	PHY	144
Demokrati, Ahmed	Post-doc	MAS	294
Des Boscs, Pierre-Emmanuel	Post-doc	MAS	292
Develter, Pierre	Thèse de doctorat	PHY	130
Dufau, Antoine	Thèse de doctorat	MFE	78
Dufitumukiza, Jean-Pierre	Thèse de doctorat	MFE	70
E lias, Paul-Quentin	HDR	PHY	286
Erbi, Matteo	Thèse de doctorat	MAS	14
F er, Valentin	Thèse de doctorat	SNA	212
Flament, Théo	Thèse de doctorat	SNA	202
Fougerouse, Claire	Thèse de doctorat	MAS	36
Fourrier, Guillaume	Thèse de doctorat	MAS	34
Froeliger, Thibaut	Thèse de doctorat	MAS	30
G amot, Juliette	Thèse de doctorat	TIS	258
Gerges, Nadine	Thèse de doctorat	PHY	170
Gimenez, Rollin	Thèse de doctorat	PHY	150
Glaser, Christopher	Thèse de doctorat	MFE	102
Granger, Florian	Thèse de doctorat	MFE	96
Guibert, Vincent	Thèse de doctorat	TIS	230
H érissé, Bruno	HDR	TIS	284
Hudeley, Lucas	Thèse de doctorat	PHY	192
J adouï, Mehdi	Thèse de doctorat	SNA	204
Jang, Yongseok	Post-doc	SNA	298
Jaroslawski, Thomas	Thèse de doctorat	MFE	80
K aroui, Zakia	Thèse de doctorat	MAS	38
Khalili Lazarjani, Adrien	Thèse de doctorat	PHY	136
Kitzinger, Euryale	Thèse de doctorat	MFE	82
Klotz, Émile	Thèse de doctorat	PHY	156
Kraiem, Sofiane	Post-doc	TIS	300
L aboulfie, Clément	Thèse de doctorat	MAS	40
Labriji, Hanae	Thèse de doctorat	TIS	236
Le Guillou, Marin	Thèse de doctorat	TIS	264
Le, Minh Vuong	Post-doc	MAS	293
Lebbal, Smail	Post-doc	MFE	295
Leparoux, Clara	Thèse de doctorat	TIS	232

Leroy, Rémy	Thèse de doctorat	TIS	238
Levraud, Nicolas	Thèse de doctorat	PHY	158
Lin, Elodie	Thèse de doctorat	PHY	190
Lognoné, Perrine	Thèse de doctorat	PHY	160
Malesys, Vincent	Thèse de doctorat	PHY	194
Mangin, Bruno	Thèse de doctorat	MFE	60
Marchand, Mathieu	Thèse de doctorat	TIS	250
Marulanda Acosta, Valentina	Thèse de doctorat	PHY	162
Maupoux, Axel	Thèse de doctorat	SNA	218
Mayeur, Thibaut	Thèse de doctorat	PHY	172
Montalban, Karl	Thèse de doctorat	PHY	140
Morin, Valentin	Thèse de doctorat	MFE	62
Ndiaye, Amath Waly	Thèse de doctorat	TIS	234
Nesme, Nicolas	Thèse de doctorat	PHY	146
Nguyen, Tuan Dung	Thèse de doctorat	SNA	220
Nibourel, Pierre	Thèse de doctorat	MFE	64
Nicol, Matthieu	Thèse de doctorat	MAS	42
Nicolle, Lucas	Thèse de doctorat	PHY	184
Nutte, Maxime	Thèse de doctorat	MAS	44
Pagliari, Marine	Thèse de doctorat	TIS	266
Palladino, Vincenzo	Thèse de doctorat	TIS	260
Patti, Stacy	Thèse de doctorat	MAS	46
Peysson, Quentin	Thèse de doctorat	PHY	186
Pinson, Maxime	Thèse de doctorat	PHY	174
Poulain, Arthur	Thèse de doctorat	MFE	94
Pouliquen, Maxime	Thèse de doctorat	SNA	206
Quero Granado, Elena	Thèse de doctorat	MFE	104
Quinton, Félix	Thèse de doctorat	TIS	242
Radenac, Emmanuel	HDR	MFE	280
Rannou, Clémence	Thèse de doctorat	MFE	66
Raybaut, Myriam	HDR	PHY	288
Rineau, Anne-Laure	Thèse de doctorat	TIS	268
Rodriguez Robles, Pablo	Thèse de doctorat	PHY	164
Romero Arrieta, Daniel	Thèse de doctorat	PHY	166
Rouviere, Adrien	Thèse de doctorat	MFE	84
Roux, Sébastien	Thèse de doctorat	MAS	16
Rozel, Milan	Thèse de doctorat	PHY	126

Salsi, Camille	Thèse de doctorat	MAS	28
Sanchez, Rémi	Thèse de doctorat	TIS	270
Saporito, Marco	Thèse de doctorat	TIS	262
Saulgeot, Pierre	Thèse de doctorat	MFE	74
Seize, Pierre	Thèse de doctorat	SNA	208
Solorzano Flores, Hector	Thèse de doctorat	MFE	86
Squillaci, Samuel	Thèse de doctorat	TIS	252
Stuck, Maxime	Thèse de doctorat	MFE	88
Suss, Alexandre	Thèse de doctorat	SNA	214
Tailpied, Laure	Thèse de doctorat	MAS	18
Tayeh, Cynthia	Post-doc	MFE	296
Thoby, Jean-David	Thèse de doctorat	MAS	48
Thomas, Mathieu	Thèse de doctorat	TIS	272
Thoreau, Romain	Thèse de doctorat	PHY	152
Tixadou, Étienne	Thèse de doctorat	MAS	52
Toledo Zucco, Jesus	Post-doc	TIS	299
Tran, Trong Hieu	Thèse de doctorat	TIS	254
Uncu, Fatih	Thèse de doctorat	MFE	90
Vatré, Aurélien	HDR	MAS	278
Vauchel, Nicolas	Thèse de doctorat	MFE	110
Vermeersch, Olivier	HDR	MFE	282
Vertonghen, Lander	Thèse de doctorat	MAS	50
Vervynck, Arthur	Thèse de doctorat	MFE	112
Viala, Erwan	Thèse de doctorat	PHY	142
Villamizar, François	Thèse de doctorat	PHY	122
Yan, Alix	Thèse de doctorat	PHY	168
Ylmaz, Dijwar	Thèse de doctorat	PHY	178

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 – TÉL. : +33 1 80 38 60 60

www.onera.fr