

# Plan

## stratégique scientifique

### 2015-2025

BILAN 2019



# Plan stratégique scientifique

## Bilan 2019 - Introduction

Le plan stratégique scientifique de l'ONERA (PSS), élaboré en 2014-2015 par un travail collectif extrêmement important, a été publié au début de l'année 2016. Il prévoit une actualisation régulière. La première d'entre elles a été programmée pour l'année 2019. Cette actualisation s'appuie avant tout sur un bilan de ces quatre premières années de mise en œuvre effective au sein de l'ONERA. C'est ce bilan, réalisé par la Direction scientifique générale, qui fait l'objet du présent document.

Le PSS comporte 12 défis scientifiques et identifie 8 leviers d'organisation pour réussir. Le bilan des principales actions concernant ces leviers fait l'objet de la première partie de ce document (pages 5 à 16). En cohérence avec le contrat d'objectifs et de performance (COP), ces actions ont mobilisé l'ensemble de l'ONERA dans la mise en œuvre de sa stratégie, dont le PSS est un élément central. Cette partie comporte un focus sur les doctorants, qui apportent une contribution essentielle aux travaux de recherche dans les domaines Aérospatial et Défense, et dont le nombre, ainsi que celui des post-doctorants, a crû de façon significative durant ces quatre années.

La deuxième partie de ce bilan, qui s'attache aux 12 défis scientifiques (pages 17 à 81), est l'occasion de présenter les résultats des projets et de façon générale ceux de l'ensemble de l'activité de recherche de l'ONERA. Dans une démarche de ce type et du fait de la richesse de cette activité, il ne faut pas manquer de souligner ce qui est dû aux travaux qui ont précédé ou environné le PSS. Cette production scientifique est le fruit du travail des départements de l'ONERA, et elle n'a été rendue possible que grâce à la mobilisation des 8 leviers du PSS dans toutes les directions de l'ONERA : beaucoup des avancées présentées dans la seconde partie de ce bilan leur sont dues.

### Chiffres clés sur la période

- **1000** publications par an dont **1/3** dans des revues à comité de lecture
- **320** thèses soutenues, **32** HDR
- **14** prix scientifiques, **31** prix de thèses
- **88** projets sur ressources générales lancés depuis 2017
- **7** projets de développement lancés depuis 2018
- **1/4** des publications dans des revues scientifiques figurant dans le top **10%** mondial
- **28.5%** des publications en collaboration internationale et **11.6%** en collaboration industrielle



# Plan stratégique scientifique

## Bilan 2019 – L'organisation

- 1 Rénover la relation avec les services de l'État et les industriels
- 2 Mobiliser les femmes et les hommes
- 3 Développer une politique partenariale globale nationale et internationale
- 4 S'appuyer sur les capacités du triptyque expérimentation-modélisation-simulation
- 5 Mieux développer et exploiter les grandes souffleries pour la recherche
- 6 Préciser la politique logicielle
- 7 Évaluer en continu politique et production scientifique
- 8 Suivre la réalisation et évaluer le Plan Stratégique Scientifique

8 leviers pour réussir

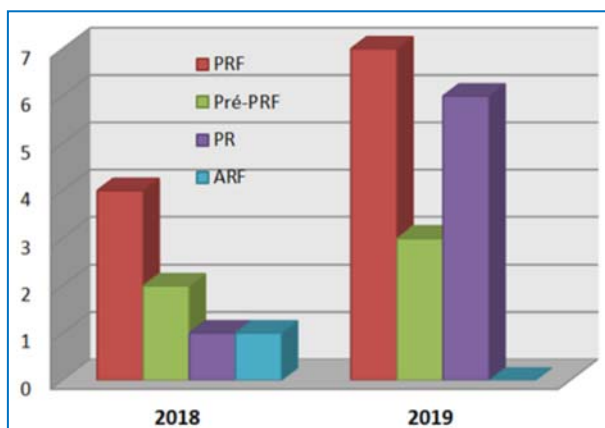
## [1] Rénover la relation avec les services de l'État et les industriels

Les points principaux à relever sur le plan des relations avec les services de l'État sont :

- la remise en place du haut conseil scientifique (HCS, deux séances annuelles) et la transmission sous un mois de son compte-rendu au ministère des Armées ;
- la diffusion des notes d'arbitrage annuel des projets sur ressources générales et des notes d'appel à projets sur thématiques prioritaires respectivement en septembre et novembre de chaque année ;
- le recueil des besoins et avis de la DGA (puis de l'AID) ;
- le recueil des avis de l'AID sur les feuilles de route de l'ONERA ;
- la construction d'un ensemble de conventions de recherche avec la DGAC sur les physiques de base pour l'aéronautique.

L'appel à projets sur thématiques prioritaires est constitué sur la base des besoins recueillis auprès de l'AID, de la direction des programmes de l'ONERA, ainsi que des comités de suivi des feuilles de routes.

**Thématiques prioritaires :**  
8 en 2018, 16 en 2019



La relation avec la DGAC s'est confortée avec la construction de conventions de recherche sur des thématiques concernant la sûreté et la sécurité du transport aérien, en s'attachant à progresser sur la connaissance des phénomènes physiques qui l'environnent ou des nouveaux composants ou objets qui sont apparus.

<b>PHYWAKE</b>	Compréhension des phénomènes de formation des sillages des avions de transport. Etude de leur impact sur la sécurité aéroportuaire et sur l'environnement	2016-2020
<b>PHYSICE</b>	Connaissance et modélisation des mécanismes du givrage, dispositifs de dégivrage	2013-2019
<b>PHYLIGHT</b>	Connaissance des phénomènes de foudroiement, étude des conséquences sur les structures (endommagements, circulation des courants)	2016-2020
<b>PHYSAFE</b>	Physique et modélisation des endommagements des structures sous impact	2015-2020
<b>PHYFIRE</b>	Tenue au feu des matériaux et structures composites	2016-2020
<b>PHYLOG</b>	Certificabilité des systèmes logiciels basés sur des matériels multi-cœurs	2017-2020
<b>PHYDIAS</b>	Procédures de pilotage et d'insertion des drones dans l'espace aérien, qualification et certification d'équipements	2018-2021

## [2] Mobiliser les hommes et les femmes

Avec la remise en place du haut conseil scientifique (HCS), le processus de nomination des directeurs de recherche a pu reprendre (cf. tableau ci-contre). La filière recherche de l'ONERA comporte aujourd'hui trois grades : maître de recherche 1 et 2 (MR1 et MR2), directeur de recherche (DR). Il faut relever le faible taux de féminisation malgré une proportion de femmes docteurs plus importante que de docteurs hommes (mais sur un effectif beaucoup plus faible).

Une réflexion est en cours pour faire évoluer cette filière et mieux faire reconnaître les directeurs de recherche de l'ONERA au sein des écoles doctorales.

La mobilité internationale, facteur important de l'efficacité de la recherche mais aussi de l'attractivité de l'ONERA a été organisée entre DAI, DSG et DRH tant pour les mobilités sortantes qu'entrantes (chercheurs invités). Depuis la mise en place du dispositif à l'automne 2019, 19 mobilités sortantes ont été accompagnées tant pour les chercheurs que pour les doctorants de l'ONERA.

### Nominations depuis 2015

Maitres de recherche 1	43 (8)
Maitres de recherche 2	9 (0)
Directeurs de recherche	15 (1)
	(dont femmes)

## [3] Développer une politique partenariale globale nationale et internationale

### Le partenariat international

La direction des affaires internationales de l'ONERA (DAI) a développé de nombreux accords internationaux, s'est impliquée dans la construction et le fonctionnement de groupes de recherche au niveau européen, ainsi que dans le soutien à la soumission de projets H2020.

Un élément marquant de la coopération avec le DLR est la rencontre scientifique annuelle ODAS. En 2019 a eu lieu la dix-neuvième édition de ces symposiums qui se tiennent alternativement en France et en Allemagne.

2015	Toulouse	<i>Aerial Robotics</i>
2016	Oberpfaffenhofen	<i>Remote Sensing</i>
2017	Aussois	<i>Computational Fluid Dynamics and Experimental Validations</i>
2018	Bonn	<i>New Concepts of Aerial Vehicles</i>
2019	Meudon	20 <sup>ème</sup> anniversaire de la coopération sur les hélicoptères

### ONERA-DLR Aerospace Symposium (ODAS)

### Les partenariats en France

Le COP de l'ONERA prévoit que des liens soient renforcés avec les écoles d'ingénieurs sous tutelle du ministère des Armées. Sur le plan de l'enseignement, les conditions particulières d'enseignement du personnel de l'ONERA à l'ISAE-Supaéro ont été étendues à l'ensemble de ces écoles. Parallèlement des conventions portant sur la recherche et l'innovation ont été signées avec ces écoles et une fédération de recherche a été mise en place conjointement avec l'ISAE-Supaéro et l'ENAC.

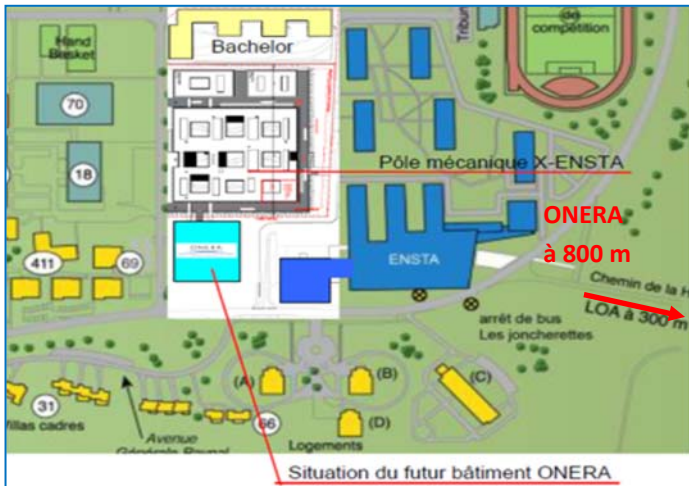
2018	Fédération de recherche ONERA-ISAE-Supaéro-ENAC « Systèmes aérospatiaux du futur »
2018	Participation à l'École universitaire de recherche TSAE ( <i>Toulouse Graduate School of Aerospace Engineering</i> )
2019	Convention tripartite École polytechnique-ENSTA-ONERA
2019	Convention École de l'air

### Partenariats avec les écoles d'ingénieurs sous tutelle du ministère des Armées

### Le bâtiment ONERA sur le campus de l'École polytechnique

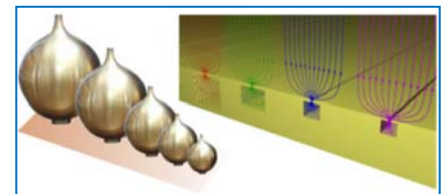
Ce projet prendra forme en 2023, le financement étant acquis au sein de la rationalisation des sites ONERA d'Île-de-France (regroupement sur le site de Palaiseau). À proximité immédiate du site palaisien, ce bâtiment regroupera les compétences en aérodynamique, aéro-élasticité et vibrations. Les souffleries de recherche de Meudon y seront installées. Ce bâtiment sera situé dans le prolongement du futur bâtiment « pôle de mécanique » regroupant les laboratoires de mécanique de l'École polytechnique et de l'ENSTA. Dans le cadre de la

convention tripartite X-ENSTA-ONERA, des rencontres avec l'ensemble des acteurs sur les thématiques abordées dans ce bâtiment ont déjà eu lieu.



### Le laboratoire commun MINAO

L'accord portant création du laboratoire de micro et nano-optique entre les équipes ONERA du DOTA et le Laboratoire de photonique et nanostructures (LPN) est arrivé à échéance en mars 2019 après quatre années de fonctionnement. Le bilan scientifique, technique et de PI, aussi bien en termes de projets co-pilotés (ANR, LabEx, H2020, ASTRID et PEA) qu'en nombre de chercheurs formés (doctorants et post-doctorants) est excellent. MINAO a également permis à l'ONERA d'accéder à une activité de réalisation technologique de pointe dans un domaine extrêmement concurrentiel. L'accord n'a pas été reconduit à l'identique du fait de l'évolution du paysage autour du LPN et de la restructuration de l'ONERA ; la réflexion se place désormais au sein de la construction de l'Université Paris-Saclay.



Résonateurs optiques basés sur l'analogie avec les résonateurs acoustiques de Helmholtz

### Unités mixtes de recherche ONERA-CNRS

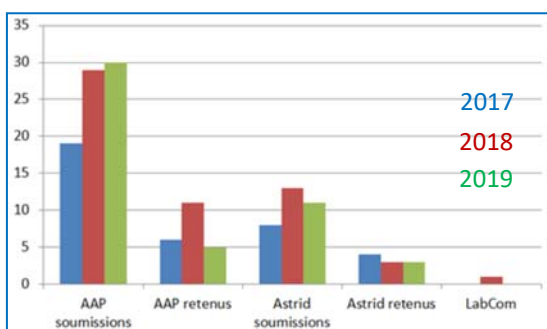
L'ONERA dispose de deux unités mixtes de recherche avec le CNRS :

- le Laboratoire d'étude des microstructures (LEM), créé en 1998 avec l'Institut de physique du CNRS. Le LEM est une unité du département DMAS ;
- le Laboratoire de mécanique des fluides de Lille (LMFL), créé en 2019 avec l'Institut des sciences de l'ingénierie et des systèmes du CNRS, l'ENSAM, l'Université de Lille, l'École centrale de Lille. L'unité lilloise « Expérimentation et limites de vol » du département DAAA est concernée. Le LMFL a été créé dans le cadre du PSS.

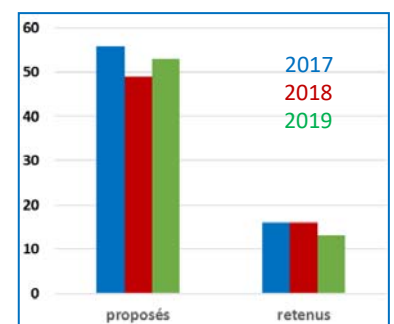


### Appels à projets de l'ANR et de l'UE (H2020)

Des partenariats plus ciblés sont également recherchés et mis en œuvre au travers de la construction par les départements de projets collaboratifs en réponse aux appels à projets nationaux de l'ANR et de l'Union européenne (H2020).



Soumissions de projets à l'ANR et projets retenus (incluant la liste complémentaire)



Soumissions de projets et projets retenus dans le cadre du 8<sup>e</sup> programme cadre H2020 de l'Union européenne

Le programme "Jeunes Chercheuses et Jeunes Chercheurs" de l'ANR (JCJC) a pour but de soutenir les projets de jeunes scientifiques, de façon à favoriser leur prise de responsabilité, leur autonomie et leur capacité de recherche exploratoire et d'innovation sur une thématique propre. En 2019, 3 bourses JCJC ont été ainsi attribuées à de jeunes chercheurs de l'ONERA et ont permis de faire progresser autant de défis.



## Le grand prix ONERA de l'Académie des sciences

Ce prix a été mis en place en 2018 ; il récompense l'auteur français ou étranger de recherches conduites dans un laboratoire français pour des travaux remarquables dans les domaines de recherche de l'aéronautique et du spatial (incluant les travaux en mathématiques appliquées et calcul scientifique). Il est attribué alternativement dans le domaine de la mécanique des fluides et dans le domaine de la mécanique des matériaux et des structures.

Les deux premiers lauréats en sont :

**2018** (Mécanique des fluides) : Vincent Moureau (CORIA – Univ. Rouen, INSA, CNRS)

**2019** (Mécanique des matériaux et des structures) : Nicolas Moës (GEM – Univ. Nantes, CNRS)

## [4] S'appuyer sur les capacités du triptyque expérimentation-modélisation-simulation

Sans chercher à être exhaustif, on donne ici quelques illustrations marquantes sur ce thème durant les premières années du PSS.

### Propulsion plasma

Le nouveau concept de propulseur plasma ECRA, propulseur quasi-neutre à tuyère magnétique a été identifié par l'UE comme une technologie disruptive et fait l'objet du projet européen MINOTOR.

En parallèle de la dimension expérimentale, un effort particulier a porté sur le développement et la validation d'outils numériques spécifiques aux conditions physiques spécifiques des propulseurs spatiaux (très basse pression, particules énergétiques) afin de comprendre et développer les technologies associées. Un code PIC (*Particule In Cell*) est en développement et a déjà produit des résultats prometteurs et une modélisation physique plus globale a permis de comprendre la physique du confinement du propulseur.

### Opto-électronique

L'ONERA s'inscrit pleinement dans le processus de convergence (i) des moyens technologiques hérités de la micro-électronique, (ii) de la puissance des moyens de calcul informatique qui permettent la résolution des équations de Maxwell à l'échelle de la longueur d'onde, et (iii) des besoins croissants en systèmes opto-électroniques compacts, économes en énergie et combinant plusieurs fonctionnalités.

À l'amont de l'ingénierie des fonctions opto-électroniques, des outils de modélisation électromagnétique ont été développés afin de concevoir ces dispositifs, leur réalisation technologique étant effectuée au sein de laboratoires partenaires (Centre des nanosciences et nanotechnologies C2N, au sein du laboratoire commun de recherches MINAO, et Institut d'électronique et des systèmes IES). La caractérisation de leurs propriétés opto-électroniques est menée au sein du laboratoire ONDA du DOTA.

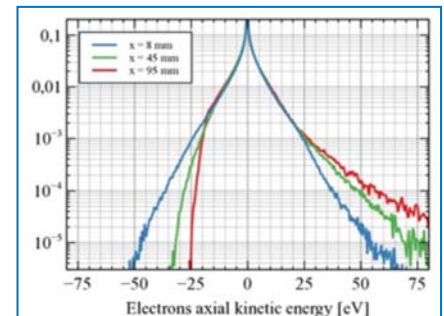
### Mécanique des matériaux et structures

Le PRF MECHANICS, suivi du PRF THERMOSOLEX, ont permis le développement de la plateforme *escale* dédiée au lien calcul-essais dans le domaine de la mécanique des matériaux et des structures, exploitant les mesures de champs cinématique et thermique en surface.

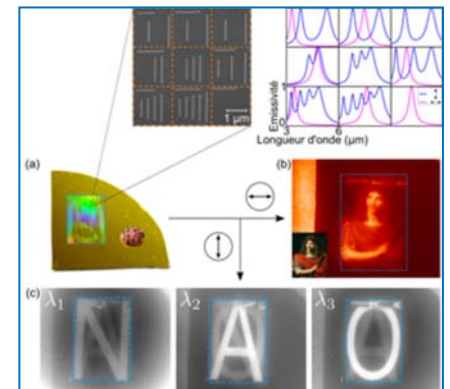
*escale* intègre :

- des composants d'analyse d'images innovants : FOLKI-D, logiciel de stéréo-corrélation rapide sur GPU comprenant un estimateur d'incertitude sur les déplacements mesurés ; une méthode de remaillage adaptatif pour la corrélation d'images par éléments finis ; un algorithme de détection de fissure dans les images ;
- des méthodes d'identification à partir de champs denses assorties notamment d'un nouveau moyen d'appliquer les conditions limites réelles mesurées. Elles permettent l'identification de paramètres de plasticité et d'endommagement, même en grandes transformations.

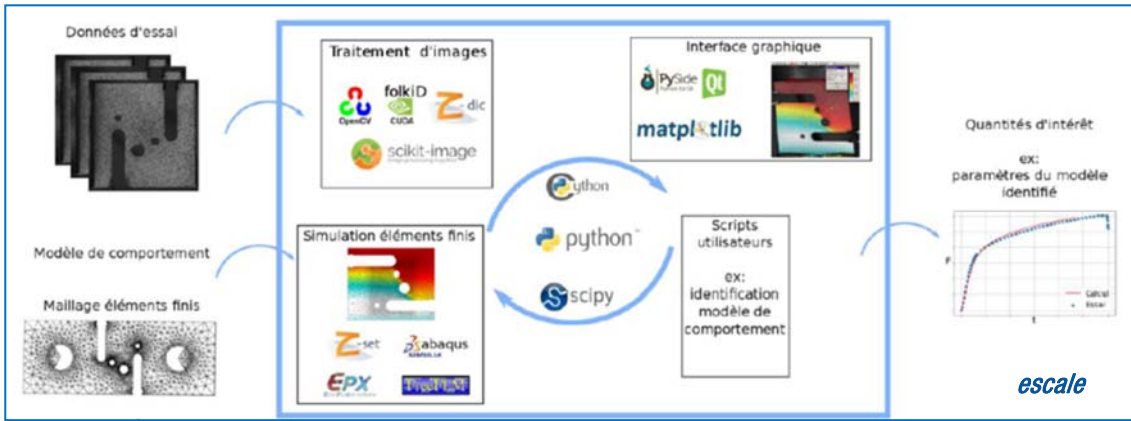
Sur le plan expérimental, une base de données d'essais a été établie et le nouveau système d'observation multi-échelle MEB-Iris a été développé pour l'analyse d'essais à l'échelle microscopique. Enfin les premières briques ont été mises en place pour permettre le pilotage d'essais, au travers de la plateforme *escale*, par une grandeur issue de l'analyse d'images et/ou du modèle.



Simulations PIC « 1D-3V » du propulseur ECRA, distributions en énergie des électrons



Contrôle et ingénierie de l'émissivité infrarouge de groupes de nanostructures



### Le buffeting ou tremblement

Le tremblement de profil constitue l'une des principales contraintes limitant le domaine de vol d'un avion de transport. Les caractéristiques et la dangerosité de ce phénomène dépendent de la nature laminaire ou turbulente de la couche limite au niveau du choc sur l'aile. Plusieurs actions de recherche pour prévoir ces mécanismes et améliorer les outils industriels ont exploité le triptyque expérimentation-modélisation-simulation avec :

- un essai de caractérisation fine dans la soufflerie S3Ch du centre de Meudon ;
- un calcul de simulation massive utilisant le solveur FAST en mode LES et des simulations hybrides de type RANS-LES drastiquement améliorées afin de mieux prendre en compte la zone de raccord entre la modélisation RANS et la simulation LES ;
- l'exploration numérique d'une aile tridimensionnelle avec flèche.

Tous ces résultats ont été analysés au moyen des avancées les plus récentes de la théorie de la stabilité hydrodynamique et ont permis de comprendre l'origine des phénomènes observés.

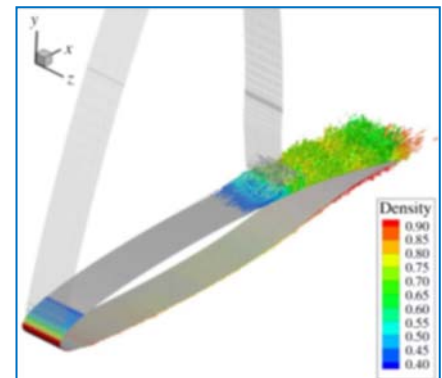
### Caractérisation aérothermique des chambres de combustion

La température des gaz dans une chambre de combustion aéronautique atteint des valeurs supérieures à la température de fusion des parois qui doivent donc être refroidies pour assurer le bon fonctionnement du moteur. La solution utilisée consiste à injecter de l'air frais à travers la paroi par des milliers de perforations d'un diamètre inférieur au millimètre. L'efficacité de la méthode dépend du motif de perçage (répartition, forme, taille des perforations). Afin d'augmenter le rendement énergétique des moteurs le motif de perçage doit donc être optimisé.

L'ONERA a effectué pour Safran des essais sur plusieurs éprouvettes afin de créer une base de données expérimentale reproduisant des conditions de fonctionnement réalistes et, dans le cadre du programme européen FP7 SOPRANO, réalisé une des premières caractérisations aérothermiques complètes sur un montage à échelle 12. Parallèlement deux approches de simulations ont été mise en œuvre, avec et sans maillage des perforations. En s'appuyant sur les différentes données expérimentales, l'apport de modèles RANS avancés (DRSM) et des approches instationnaires (ZDES) a pu être démontré. On dispose désormais de modèles de complexité croissante, à utiliser en fonction de critères de précision ou de temps de calcul.



Simulation LES



Paroi multiperforée de chambre de combustion

## [5] Mieux développer et exploiter les grandes souffleries pour la recherche

Le défi 3 « Souffleries du futur » a permis de soutenir cet objectif. Plusieurs projets de recherche ont été lancés depuis la publication du PSS, faisant appel à des installations de la direction des souffleries.

### Projets sur ressources générales et soufflerie concernée

PR OPA-UCAV	Outils pour l'optimisation et le contrôle des écoulements dans les prises d'air d'UCAV	F4- Fauga Mauzac
PR SUNSET2	Connaissance et modélisation des mécanismes du givrage, dispositifs de dégivrage	F1- Fauga Mauzac
PR IDEE	Connaissance des phénomènes de foudroiement, étude des conséquences sur les structures (endommagements, circulation des courants)	CEPRA 19- Saclay
PR ARENE	Physique et modélisation des endommagements des structures sous impact	F2- Fauga Mauzac
PR PANDA	Tenue au feu des matériaux et structures composites	F2- Fauga Mauzac

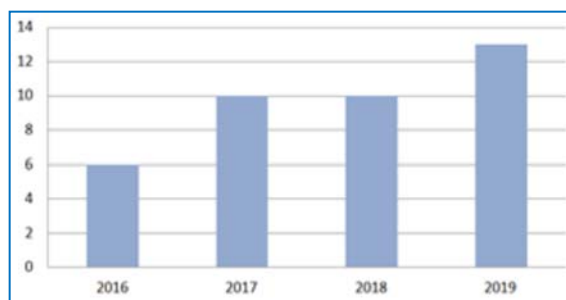
Symétriquement, des projets soutenus par la DGAC permettant une évolution très significative des capacités des grandes souffleries au service de questions aujourd’hui majeures pour les industriels ont mobilisé également les départements de l’ONERA.

RAMSES	Amélioration des capacités de mesure de bruit de S1Ma	2018
FUTURS1	Préparation de S1Ma et du BEM (banc d’essais moteurs) pour les essais des configurations UHBR (moteurs haut taux de dilution)	2018
BLCS	Amélioration du simulateur de jet CEPRA19	2016
BEIR	Banc d’intégration motrice dans S1MA	2019

## [6] Préciser la politique logicielle

### Protection des logiciels

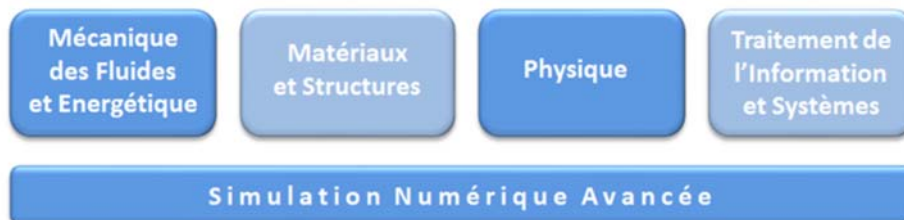
Un accent a été mis sur la nécessité de protéger la production logicielle de l’ONERA. On constate ainsi une progression des dépôts de logiciels à l’Agence pour la protection des programmes, sous l’égide de la direction de la valorisation et de la propriété industrielle de l’ONERA (DVPI).



Nombre de dépôts à l’APP

### Domaine SNA

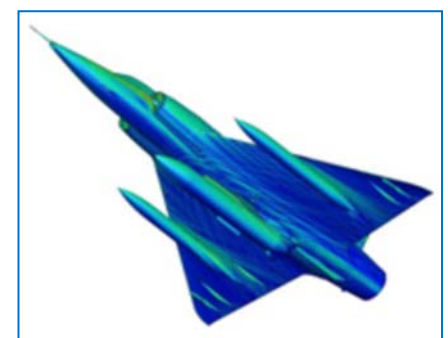
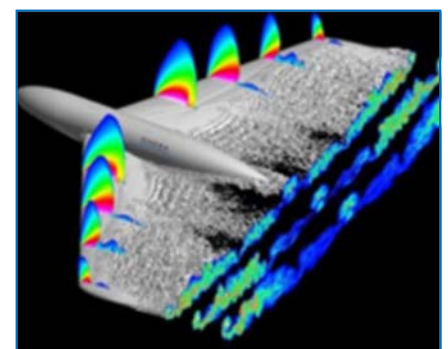
L’évolution majeure réside dans la création d’un nouveau domaine scientifique en 2017, celui de la simulation numérique avancée (SNA) venant compléter et supporter les quatre domaines (anciennement branches) « historiques » de l’ONERA.



Le domaine intègre l’ensemble du processus de recherche et de développement associé à la production scientifique et technique de l’ONERA sous forme de logiciels, et recouvre ainsi, pour toutes les disciplines de la physique, les recherches sur la modélisation, les études sur l’algorithmique et les mathématiques appliquées, la problématique de calcul haute performance, les couplages entre physiques différentes, les techniques de réduction de modèles et la prise en compte des incertitudes.

La simulation numérique a pour objectifs de permettre une compréhension approfondie de la physique, de répondre à des demandes régaliennes (sécurité, environnement, certification…) et de favoriser l’amélioration de la compétitivité des industriels. Les activités s’appuient sur une recherche fondamentale de haut niveau et fructueuse en collaborations, et conduisent à des projets structurants, souvent de grande taille et de longue durée.

Les logiciels ONERA tirent profit des spécificités du positionnement de l’Office. Outre l’appui sur le triptyque expérimentation-modélisation-simulation et la disponibilité de compétences multi-disciplinaires en modélisation physique et sciences du numérique, les relations étroites nouées avec des partenaires industriels permettent une connaissance détaillée et évolutive des besoins, un transfert rapide des recherches vers l’industrie et une validation par l’usage sur des configurations réalistes.



Le développement par l'ONERA de ses propres logiciels répond à ses besoins d'autonomie pour ses recherches et de capitalisation de son patrimoine scientifique et technique. Le domaine SNA regroupe trois thématiques scientifiques réparties sur quatre départements de l'ONERA.

### Une tournée aux États-Unis

Pour conforter la stratégie de l'ONERA en matière de simulation numérique et de calcul haute performance, une visite de quelques grands organismes de recherche américains s'est déroulée en 2018. Celle-ci comprenait des laboratoires situés tant sur la côte est que sur la côte ouest : NASA-Ames, NASA-Langley, le HPCMP3 du Département de la Défense (DoD) et le LLNL du Département de l'Énergie (DoE). Le LLNL est très régulièrement crédité de la plus grande puissance de calcul mondiale.

### Politique d'open source et partenariats

L'ONERA a rejoint début 2019 le consortium, constitué par EDF, Airbus, Imacs et Phimeca, de développement de la bibliothèque logicielle open source OpenTURNS permettant le traitement des incertitudes en simulation numérique.

Les principaux objectifs poursuivis sont de :

- s'adosser à une communauté de chercheurs développant et utilisant les avancées récentes en matière de propagation, quantification et hiérarchisation des incertitudes dans le cadre d'applications réalistes, voire industrielles ;
- bénéficier de l'environnement et des outils, en particulier des pré et des post-traitements ;
- valoriser les résultats de recherche de l'ONERA dans le domaine de la maîtrise des incertitudes et du traitement probabiliste.

L'ONERA est également contributeur au *framework* MDO (*MultiDisciplinary Optimization*) de la NASA. XDSMjs, bibliothèque permettant la visualisation de processus MDO et développée en *open source* suivant le formalisme XDSM de l'Université du Michigan, a été intégrée dans la dernière version du *framework open source* OpenMDAO développé par la NASA Glenn. OpenMDAO est utilisé par l'ONERA pour développer des processus de conception avant-projet d'avions et de lanceurs, et est notamment au cœur de l'environnement collaboratif WhatsOpt, atelier de conception issu du projet interne ACADIA.

### Projets de développement

Sur le plan organisationnel, un nouveau type de projet, le projet de développement (PDev), permet de valoriser les logiciels ou plateformes développés au cours des projets internes (PR-PRF). Ainsi la plate-forme *escale* dédiée au dialogue essais-calculs en mécanique des matériaux et des structures et issue des PRF MECHANICS et THERMOSOLEX associés aux défis 6 « Matériaux aérospatiaux stratégiques » et 7 « Des structures aérospatiales plus endurantes », va bénéficier d'un support sous forme du PDev DEPLOIE pour l'amener à un niveau de robustesse adapté à un partage avec le monde académique.

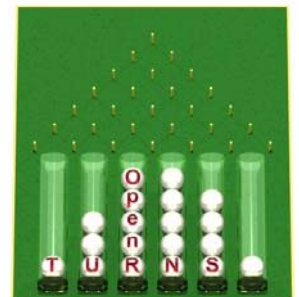
### Une plateforme pour toutes les physiques de l'ASD

L'ONERA s'est engagée en 2019 dans le projet de plateforme de simulation multi-physique ORION, plus fédératrice encore que ne le sont elsA et CEDRE. Le socle architectural est partagé avec la plateforme de simulation CFD MOSAIC de Safran.

Dans le cadre de la mutualisation au sein de la plateforme ORION, une démarche de rapprochement des logiciels d'aérodynamique et d'énergétique de l'ONERA (baptisée ORION-CFD) a été entreprise pour partager des composants logiciels d'intérêt général et pour rechercher une architecture logicielle commune. En outre, un accord a été signé avec Airbus et le DLR pour développer le logiciel d'aérodynamique de nouvelle génération CODA, et des échanges (voire des passerelles) sont prévus entre ORION-CFD et CODA

### Mutualisation des mathématiques appliquées.

Le volet ORION est associé à la création au sein de l'ONERA d'un "laboratoire sans murs" visant à fédérer les compétences en mathématiques appliquées. Le Laboratoire de mathématiques appliquées à l'aéronautique et au spatial (LMA2S) a été créé le 15 janvier 2019. C'est un laboratoire transverse aux départements, doté d'un budget propre (financement par l'ARF LMA2S), qui a pour objectif de fédérer à l'ONERA les activités en mathématiques appliquées dans le domaine du calcul scientifique ainsi que dans le domaine de l'optimisation et des incertitudes, et de développer des collaborations avec les laboratoires académiques.



*An open source initiative for the treatment of uncertainties, risks'n statistics*



*An open source framework for efficient multidisciplinary optimization*

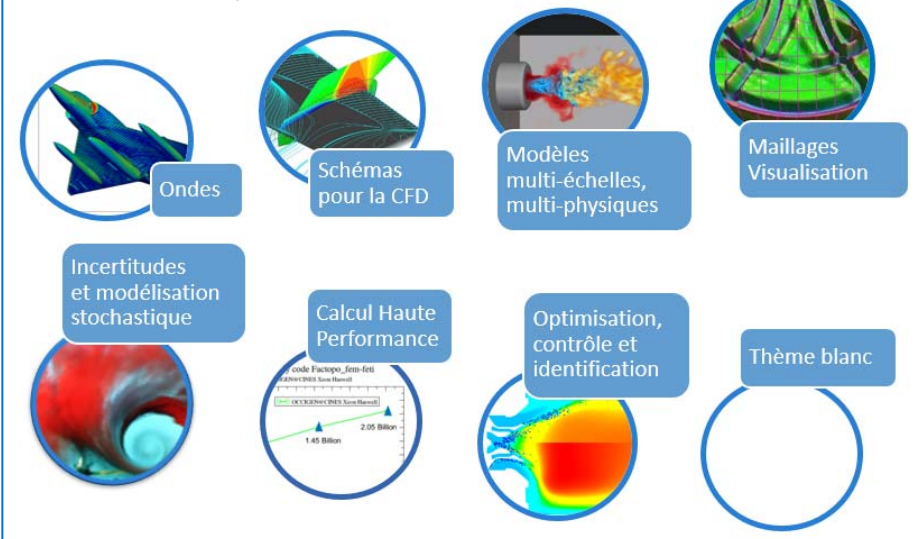


Plateforme ONERA (projet)



Plateforme CFD Safran

**Les axes scientifiques du LMA2S**



**Relations avec le Cerfacs**

L'ONERA a activement participé avec les autres associés du Cerfacs à la réactualisation de la stratégie de cet organisme, recentrée sur ses axes de recherche fondamentaux (calcul intensif, algèbre linéaire, science des données...) et au service de l'ensemble de ses associés. La direction scientifique générale s'est fortement investie pour que les résultats des travaux du Cerfacs contribuent le plus efficacement possible aux besoins d'études et de recherches de l'ONERA. Un accord spécifique a été signé entre l'ONERA et le Cerfacs pour examiner les potentialités dans le domaine de l'énergétique des méthodes numériques de différences spectrales (logiciel commun Jaguar).



**Le centre européen de recherche et de formation avancée en calcul scientifique compte sept membres associés :**  
 EDF, Airbus, Safran, Total, Météo-France, CNES et ONERA

**Une autre voie pour la CFD**

Enfin, dans le domaine des méthodes Lattice-Boltzmann très prometteuses pour certaines applications en aérodynamique et en aéroacoustique, l'ONERA a signé un partenariat de coopération scientifique avec le consortium de développement du logiciel ProLB (consortium formé d'Airbus, Renault, CS et de plusieurs laboratoires universitaires français).

**[7] Évaluer en continu politique et production scientifique**

L'évaluation des départements par les comités d'évaluation scientifique et technique (CEST), proche du modèle du Hcéres, a pris fin en 2016. La réorganisation de l'ONERA de 2017 a réduit le nombre de départements à 7. En 2018, la décision a été prise de faire évaluer les départements par le Hcéres (en prêtant attention à leur dimension multi-sites). La vague A (Occitanie) de l'évaluation de 2019 concerne quatre départements : DMPE, DOTA, DPHY, DTIS, ainsi que la fédération de recherche ISAE Supaéro-ENAC-ONERA.



**Le Haut Conseil de l'évaluation de la recherche et de l'enseignement supérieur (Hcéres) est une autorité administrative indépendante**

Les deux unités mixtes de recherche de l'ONERA (le laboratoire d'études des microstructures LEM et le laboratoire de mécanique des fluides de Lille « Kampé de Fériet ») ont été évaluées par le Hcéres lors de la vague E. Toutes deux sont renouvelées au 1er janvier 2020.

Le haut conseil scientifique de l'ONERA (HCS) est également mobilisé sur l'évaluation, d'une part via la présentation des résultats des évaluations réalisées dans le cadre des CEST puis du Hcéres, d'autre part via l'avis qu'il rend sur les candidatures au grade de directeur de recherche de l'ONERA, enfin sur un certain nombre de dossiers thématiques qui lui sont présentés. Lors de ces présentations, la production scientifique, les moyens et compétences, ainsi que les perspectives et la stratégie proposées par la direction scientifique générale sont examinés et font l'objet d'avis et de recommandations.



- Composition HCS, mandat 2015-2017**
- Mme Césarsky (présidente)
  - MM. Abou-Kandil, Baptiste, Chinesta, Deville, Lebouché, Petit, Picollet
  - M. Appriou puis M. Dupoirieux (secrétaires)

- Composition HCS, mandat 2018-2022**
- Mme Césarsky (présidente)
  - M<sup>me</sup> Bouchiat, MM. Abou-Kandil, Arts, Chinesta, Deville, Pignié, Sportisse
  - M. Dupoirieux (secrétaire)

Les sujets traités par le HCS de l'ONERA depuis 2015 sont :

- le projet de PSS ;
- l'organisation de la recherche à l'ONERA ;
- la synthèse des évaluations des départements par les CEST ;
- la démarche d'élaboration des feuilles de route ;
- la structuration des compétences : les thématiques scientifiques de l'ONERA ;
- l'avenir des souffleries et couplage expérimentation-numérique ;
- l'activité « interaction homme-système » ;
- la simulation numérique en mécanique des fluides ;
- le laboratoire ONERA de mathématiques appliquées ;
- l'hyperspectral à l'ONERA ;
- l'intelligence artificielle à l'ONERA ;
- les matériaux et structures dans le domaine aérospatial.

Une batterie d'indicateurs, élaborée en 2019, sera mise en place en 2020 à la direction scientifique générale avec le soutien de la direction de l'information scientifique et technique (DIST). Certains de ces indicateurs rejoindront le tableau de bord mensuel suivi par le COMEX de l'ONERA. Enfin, une liste de « revues d'intérêt » par domaine a été élaborée avec les adjoints scientifiques des départements. Elle a pour but de préciser les attentes de la direction scientifique générale en matière de publication, la notion de publication de rang A n'étant ni précise, ni totalement adaptée au contexte de l'ONERA, du fait de la nécessité d'atteindre des communautés de recherche industrielles.

#### Intégrité scientifique et éthique de la recherche

Le président de l'ONERA a ratifié en 2018 la charte nationale de déontologie des métiers de la recherche et une référente intégrité scientifique et éthique de la recherche (RISER) a été nommée. Rattachée à mi-temps pour sa mission au directeur scientifique général et sans responsabilité hiérarchique, la référente se consacre principalement aux questions d'intégrité scientifique et à la formation dans ce domaine. Plusieurs sessions de sensibilisation ont été réalisées.

### [8] Suivre la réalisation et évaluer le plan stratégique scientifique

Depuis 2016, le livret des projets en cours, classés par défis du PSS, est édité et placé en diffusion libre. Les projets de recherche terminés sont évalués chaque année par les directeurs scientifiques de domaine et une présentation des principaux résultats a lieu lors des séances de printemps du HCS.



### [+] La recherche exploratoire

La recherche exploratoire n'a pas été étouffée par la démarche de structuration d'un plan scientifique stratégique puisque 37 actions de recherche exploratoire (ARE) ont été lancées. S'y ajoutent les actions de recherche internationales mises en place parfois sur des sujets également exploratoires, cf. bilan sur le levier « Développer une politique partenariale globale nationale et internationale ». Par ailleurs pour plus de réactivité, les ARE peuvent désormais être lancées « au fil de l'eau » au cours de l'année et non plus uniquement comme par le passé une fois par an.

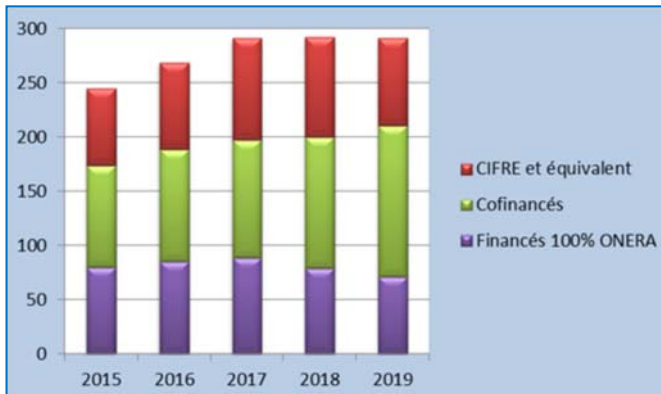
[+] : ce point n'est pas un levier du PSS mais plutôt une composante permanente de la vie scientifique de l'ONERA.

## [+] Les thèses et post doctorats

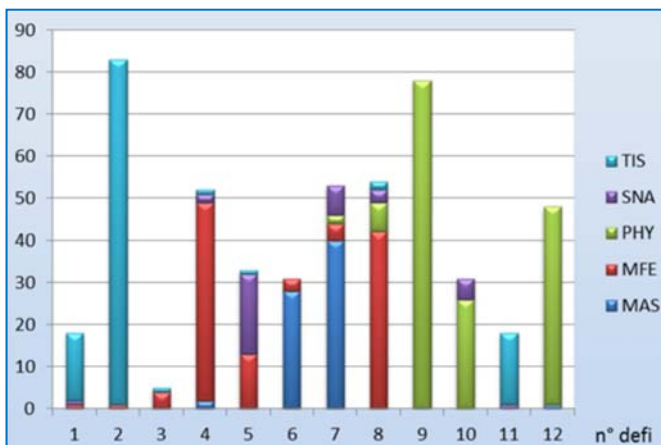
Les doctorants et post-doctorants constituent une ressource importante dans la réalisation des objectifs définis par le PSS. Le nombre de doctorants a connu une progression très significative (de l'ordre de 20%) par une augmentation des ressources propres de l'ONERA dans ce domaine, mais aussi par la recherche (fructueuse) de financements et de co-financements externes.

Les thèses engagées depuis le début du PSS se répartissent sur les défis de façon assez hétérogène tant en nombre qu'en domaines scientifiques, ce qui révèle le caractère multidisciplinaire de certains défis mais tient compte également de certaines particularités régionales en matière de financement de doctorants.

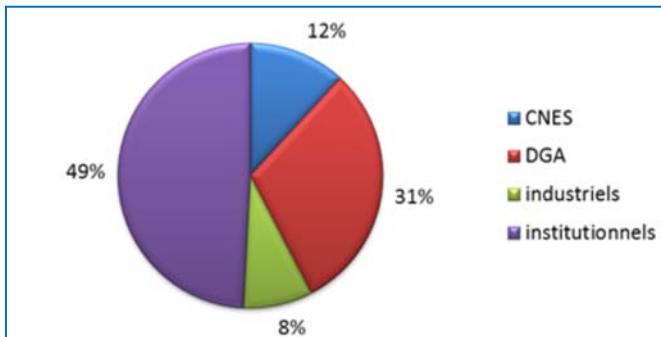
### Nombre de doctorants par année (prorata temporis)



### Répartition des thèses par défi et par domaine scientifique



### Thèses cofinancées (recrutement 2019)



Un poste de chargé de mission pour la formation par la recherche a été créé à la DSG en 2017, ce qui permet une meilleure gestion, un meilleur accueil et un meilleur suivi des doctorants (contact : [formation-par-la-recherche@onera.fr](mailto:formation-par-la-recherche@onera.fr)).

Des formations ont été mises en place :

- formation à la publication et sensibilisation à la PPSTN ;
- formation des encadrants de doctorants, avec l'aide de l'ABG.

Les thèses soutenues sont mises en valeur depuis 2016 au travers d'un document annuel.

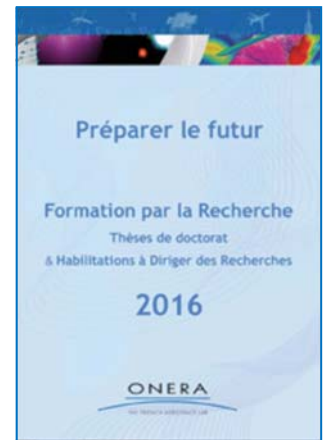
Les doctorants de l'ONERA ont reçu 85 prix ou distinctions diverses au cours de cette première période du PSS.

Une aide à la préparation des habilitations à diriger les recherches a été mise en place et les soutenances de HDR figurent également dans le document de présentation des thèses soutenues dans l'année.

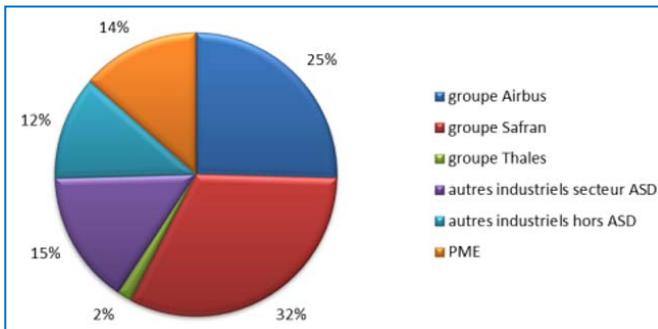
Le dispositif de formation par la recherche de l'ONERA (doctorants et post-doctorants) a également pour objectif de fournir au domaine aéronautique-espace-défense (AED) des talents et des compétences bien adaptés à ses enjeux scientifiques et techniques. Grâce notamment au dispositif des conventions Cifre, le secteur d'activité du premier emploi des docteurs ONERA est pour 41 % d'entre eux le domaine AED.

330 thèses, 29 HDR  
sur la période 2016-2019

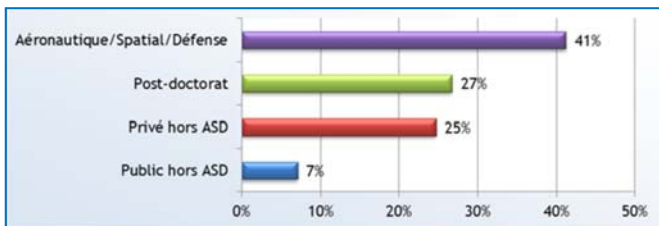
Chaque année, la compilation  
des thèses et HDR soutenues



**Thèses Cifre démarrées sur la période 2015-2019**



**Secteurs d'activité des docteurs ONERA**



Il faut également mentionner la création en 2016 de l'association Alumni ONERA qui a pour objectif d'établir un réseau professionnel entre ses membres, tous issus d'une thèse ou d'un post-doctorat à l'ONERA.

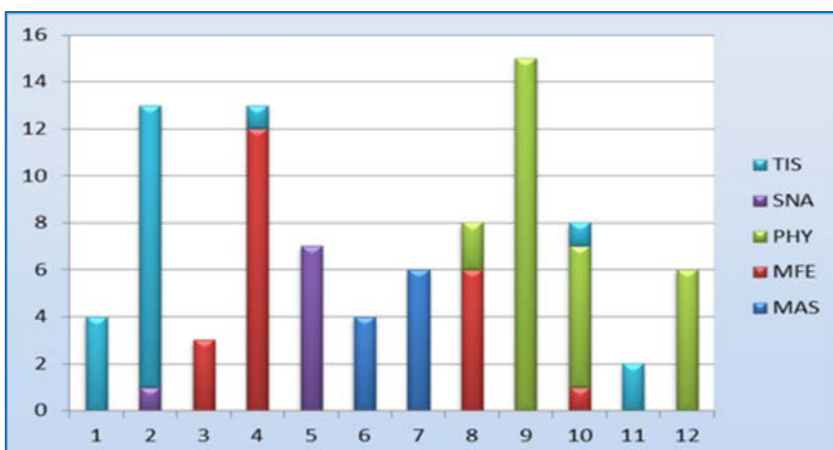


Elle vise principalement :

- à favoriser les échanges à caractère professionnel entre ses membres ;
- à promouvoir la formation doctorale et post-doctorale de l'ONERA ;
- à entretenir le dialogue entre ses membres et l'ONERA.

Cette première période du PSS a également été marquée par une progression du nombre de post-doctorants avec 89 contrats de post-doctorat, dont une grande part est cofinancée.

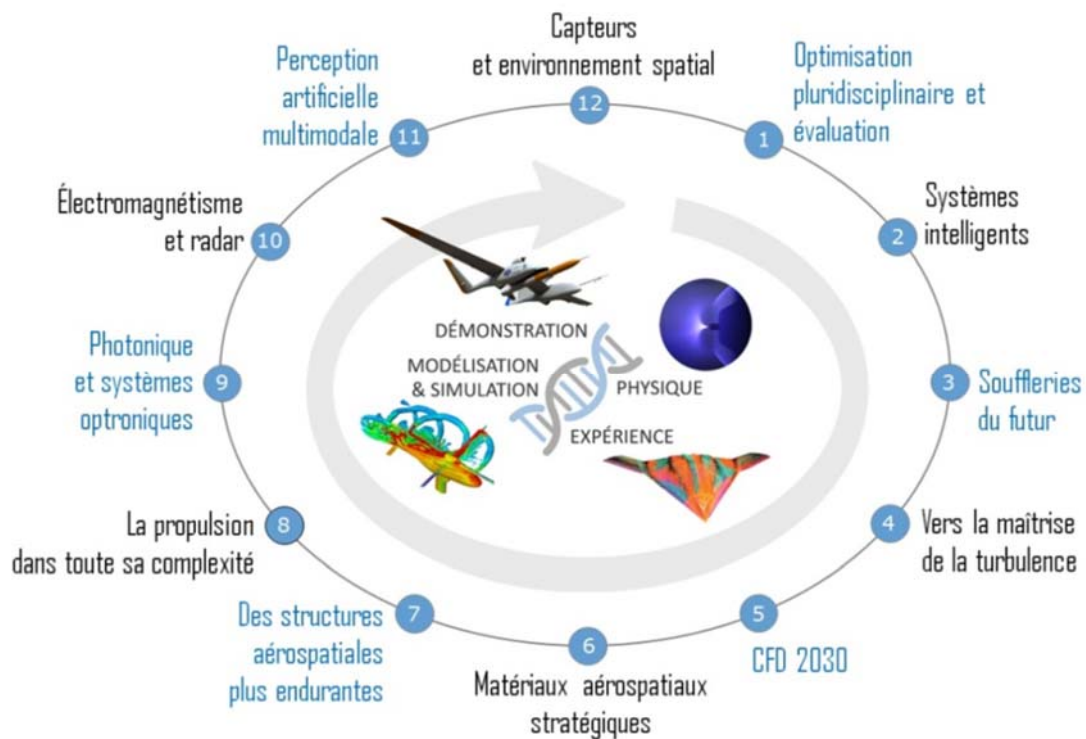
**Répartition des post-docs par défi et domaine scientifique**





# Plan stratégique scientifique

## Bilan 2019 – Les défis



Le PSS en 12 défis

défi **1**

# Optimisation pluridisciplinaire et évaluation

Une plateforme numérique d'optimisation pluridisciplinaire et d'évaluation de nouveaux concepts

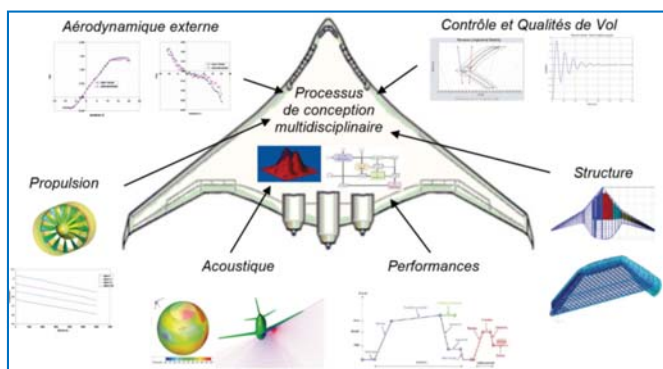
## le défi

Plutôt que la réalisation d'objets du domaine aéronautique ou spatial, ce défi consiste à mettre au point ou faire progresser des méthodologies de conception, d'optimisation ou d'estimation de performance des objets. Cet objectif a été atteint au travers de projets internes ONERA de type PR-PRF ou de projets collaboratifs.

## les partenariats

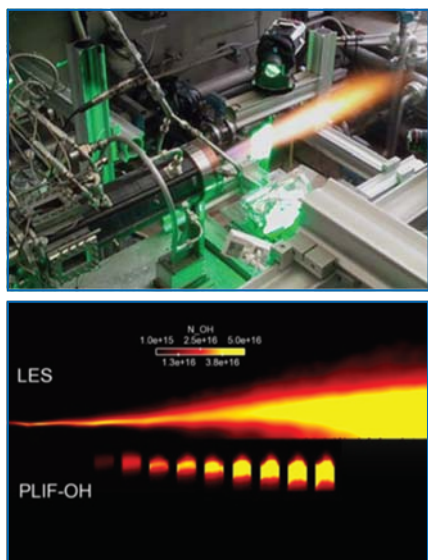
CNRS, INRIA, ISAE, IRT Saint-Exupéry, IRT SystemX ; à l'international : DLR, Georgia Tech, Univ. of Michigan, NASA.

## le bilan par les projets

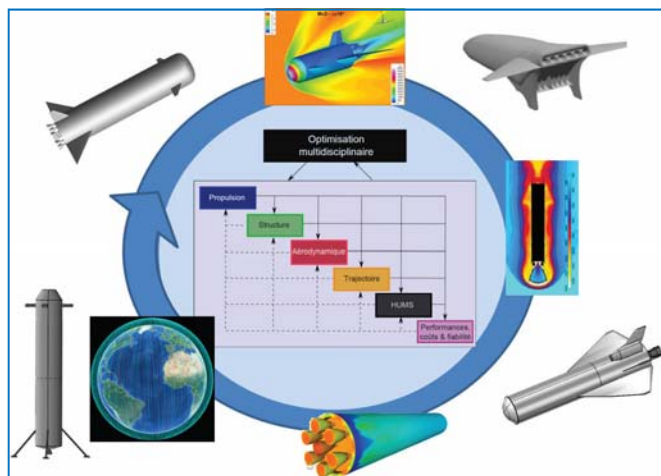


**CICAV Développement d'un processus de conception et d'optimisation multidisciplinaire de configurations BWB**

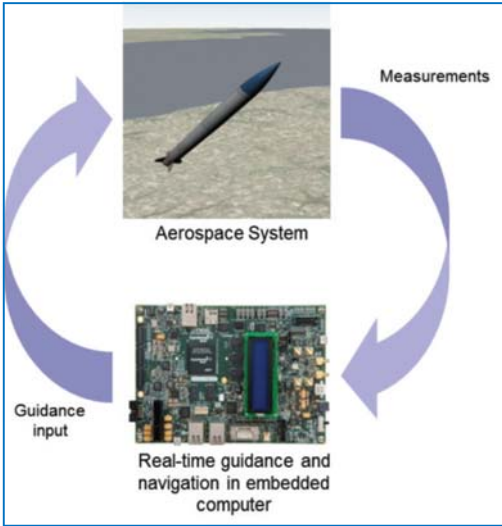
Les modèles de substitution sont nécessaires dans les processus d'optimisation de systèmes complexes car ils sont les seuls qui permettent d'aboutir à un résultat optimisé avec un coût et un temps de calcul raisonnable. Des modèles de ce type ont été développés pour des applications MDO très diverses : optimisation multi-objectifs aérodynamique/signature radar dans l'**ARF AERODIS**, aéronefs BWB dans le **PRF CICAV**, modélisation POD de jets réactifs dans le **PRF SIMBA**, optimisation de véhicules de lancement réutilisables dans le **PRF HERACLES**.



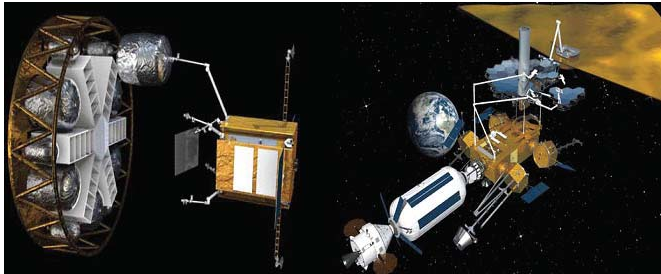
**SIMBA Modéliser les signatures infrarouge et radar de jet de missiles balistiques**



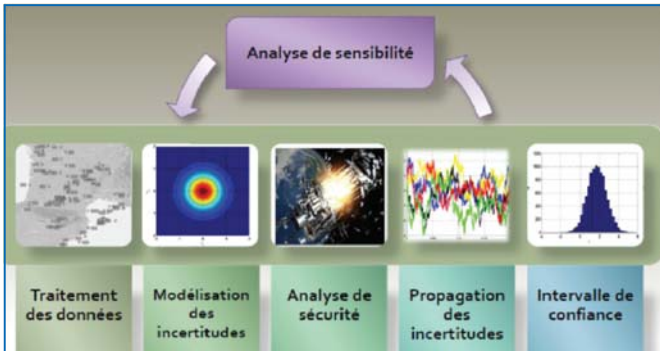
**HERACLES Évaluer de nouvelles architectures de lanceurs réutilisables**



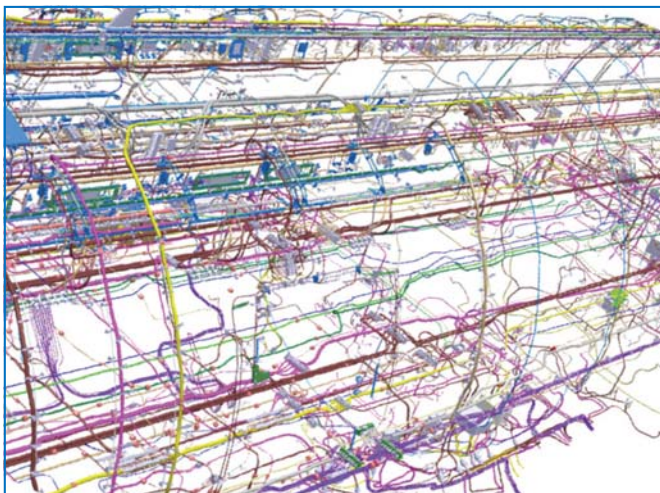
**ANGE Plus d'intelligence embarquée pour les futurs véhicules autonomes**



**ROSO Service en orbite : automatisation de la phase de capture**



**MUSIK Quand l'exception fait la règle !**



**WIRELESS Réseaux de communication sans fil pour l'avion de demain**

L'autonomie des aéronefs et engins spatiaux est un enjeu particulièrement important pour la maîtrise de l'espace situé dans et au-delà de l'atmosphère terrestre. Grâce à la mise au point d'algorithmes de navigation par filtrage particulaire et de guidage optimal, le **PR ANGE** a contribué à l'amélioration du contrôle des engins autonomes de type drones ou missiles. Les algorithmes ont été mis en place sur des calculateurs embarqués intégrés à des simulateurs, ce qui permet de réaliser des simulations hybrides avec éléments réels. Le **PR ROSO** a permis de faire progresser l'automatisation de tâches réalisées par des véhicules orbitaux ne pouvant être télé-opérées depuis le sol, telles que la maintenance de satellites ou la récupération de débris.

Dans les processus d'optimisation, la prise en compte des incertitudes est cruciale pour assurer la fiabilité des résultats. L'évaluation des incertitudes propres à chaque composant du système relève de l'ingénierie de ces composants mais la connaissance de ces incertitudes doit être complétée par une maîtrise de leur propagation dans le processus de conception/optimisation du système. Le **PR MUSIK** a été consacré à l'étude théorique de la propagation d'incertitudes. Sur le plan des applications, la plateforme **ACADIA** (voir encadré) propose aujourd'hui une méthode de conception prenant en compte les incertitudes aléatoires. Elle a été testée sur le cas pratique de la conception d'un lanceur.

La maîtrise des architectures système est aussi au cœur du développement des systèmes aérospatiaux complexes. Le **PRF WIRELESS** est consacré à ce domaine de l'architecture système. Ce projet a conduit au développement d'une technique de communication sans fils sûre et performante pour des aéronefs civils, rendant possible une conception et une maintenance plus simples, ainsi qu'une réduction de masse.



**WIRELESS**

Câblages d'un rack de calculateurs avioniques d'un A340

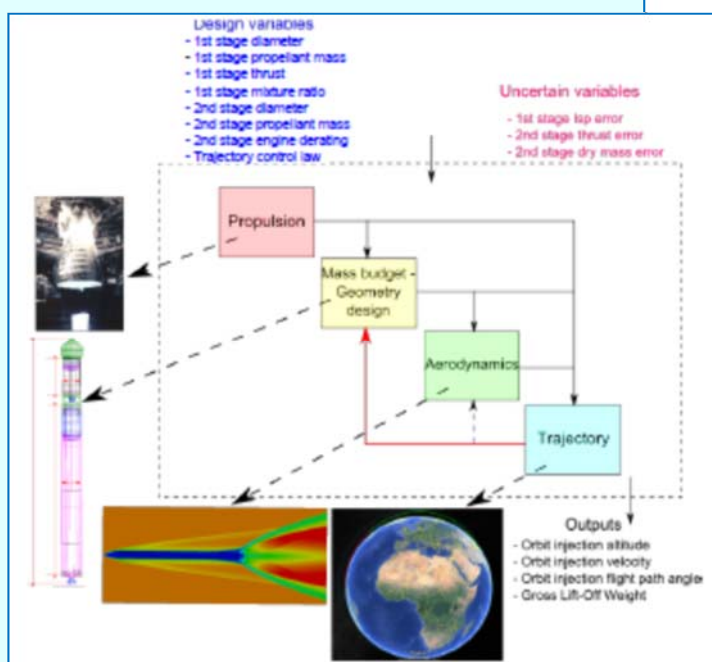
Schéma de câblage d'un A350

## ACADIA Plateforme de conception sous incertitudes

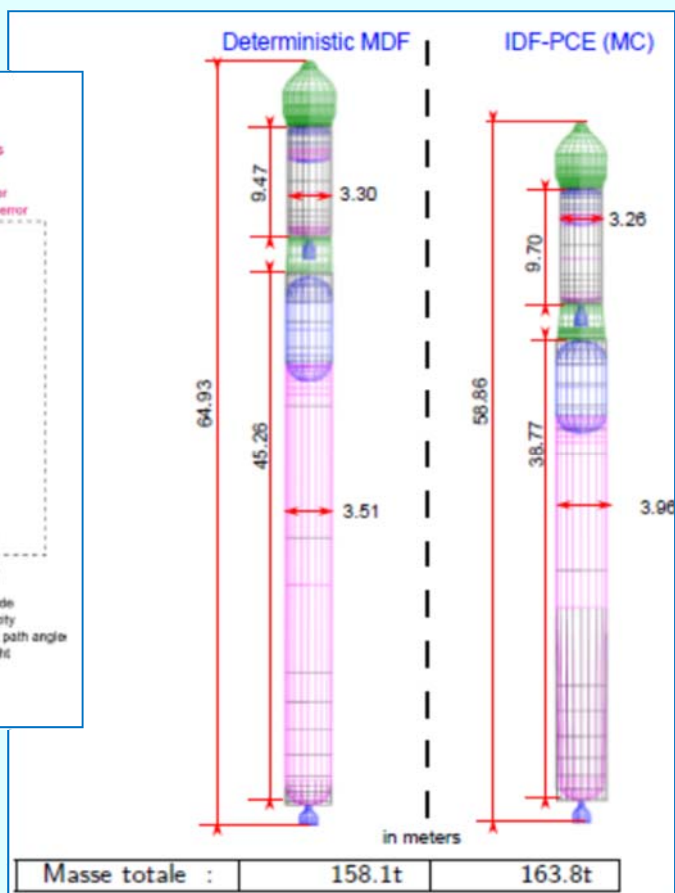
La plateforme du **PRF ACADIA** a pour objectif la prise en compte des couplages multidisciplinaires lors de la conception d'un système aéronautique ou spatial complexe. Deux possibilités sont offertes : soit on s'assure que les contraintes liées au couplage sont satisfaites à chaque itération du processus d'optimisation, soit on recherche une satisfaction des contraintes seulement en fin de processus. ACADIA a également pour objectif la maîtrise des incertitudes sur les données des composants du système étudié et de leur propagation dans le processus d'optimisation. Comme le montre l'exemple ci-dessous, la prise en compte des incertitudes est nécessaire pour assurer la fiabilité du processus. A partir d'un certain niveau d'incertitudes, l'approche partiellement découplée doit être préférée à l'approche basée sur un couplage

multidisciplinaire fort car ce dernier présente un temps de calcul excessif. Pour réduire la complexité du problème, des modèles de substitution du type « polynômes du chaos » sont utilisés pour simplifier les relations de couplage. La figure ci-dessous illustre la problématique de l'optimisation d'un lanceur spatial.

La figure à droite met en évidence les différences obtenues sur le lanceur sans (à gauche) et avec prise en compte des incertitudes dans le processus d'optimisation. Ces différences sont notables, tant du point de vue de la masse que des dimensions du lanceur, et mettent en évidence la nécessité de prendre en compte les incertitudes.



Optimisation multidisciplinaire d'un lanceur spatial



Résultat d'optimisation multidisciplinaire sans (véhicule de gauche) et avec (véhicule de droite) prise en compte des incertitudes

## au-delà des projets ONERA, des faits marquants

### Optimisation multidisciplinaire | Lancement d'un projet H2020 à 5,8 M€ coordonné par l'ONERA

L'objectif du projet H2020 MADELEINE est de démontrer les bénéfices des techniques MDO haute-fidélité basées sur l'approche adjointe pour la conception des configurations industrielles civiles : voilure d'avion, intégration motrice, composants moteur – la méthode adjointe est utilisée pour calculer les gradients d'une fonction à optimiser par rapport aux paramètres du système.

15 partenaires pour ce projet de 3 ans, dont Airbus, Rolls Royce, Dassault Aviation. L'ONERA, coordinateur du projet et expert de longue date sur cette thématique, apporte l'amélioration des méthodes de résolution du système adjoint, l'optimisation aéro-structure d'une voilure d'avion civil, la mise en place d'un adjoint aéro-acoustique et son application à une configuration d'hélice isolée. [DAAA 2018]

### Réduction de modèle | Livraison de la toolbox opensource SMT

La version 0.1 de la **toolbox SMT** relative aux modèles de substitution a été livrée le 1er juillet 2017. Elle est le fruit de la collaboration entre 4 équipes de recherche de l'université du Michigan (MDOLab), du NASA Glenn Research Center, de l'ISAE-Supaéro et de l'ONERA.

Cette bibliothèque, écrite en Python, contient des méthodes de construction de modèles de substitution (ou réduits), des techniques d'échantillonnage et des fonctions de test. Elle se veut à la fois simple à utiliser, mais aussi simple à enrichir avec de nouveaux algorithmes.

Les modèles de substitution générés par SMT peuvent être utilisés pour remplacer les codes de calcul haute fidélité dans un processus d'optimisation en vue de réduire les temps de calcul (e.g. calcul d'interaction fluide-structure pour la conception avant-projet). SMT est documentée et distribuée sous licence BSD. [DTIS 2017]



### Optimisation multidisciplinaire | L'ONERA contributeur au framework MDO de la NASA

XDSMjs, bibliothèque permettant la visualisation de processus MDO, développée par l'ONERA suivant le formalisme de l'Université du Michigan vient de faire l'objet d'une intégration dans la dernière version du *framework open source* OpenMDAO développé par la NASA Glenn.

OpenMDAO est utilisé par l'ONERA pour développer des processus de conception avant-projet avions et lanceurs, et est notamment au coeur de l'environnement collaboratif WhatsOpt, l'atelier de conception issu du projet ONERA ACADIA. L'intégration de XDSMjs prolonge la collaboration internationale tissée depuis plusieurs années avec la NASA Glenn et l'Université du Michigan dans ce domaine et confirme l'ONERA comme contributeur majeur à OpenMDAO. [DTIS 2019]

### Lancement spatial | Succès du démonstrateur Eole en Guyane pour le projet H2020 ALTAIR



La campagne d'essai finale du projet H2020 ALTAIR a eu lieu début septembre au Centre Spatial Guyanais. Elle a donné lieu au largage, avec le démonstrateur Eole, d'une maquette inerte à petite échelle d'un futur lanceur de mini-satellite. Cette campagne finit de démontrer la faisabilité technique et économique d'un système de lancement de petit satellite, basé sur un concept aéroporté par drone (altair-h2020.eu).

Ce volet expérimental portait sur la réalisation d'essais en vol pour tester la séquence de séparation porteur/lanceur, les procédures et algorithmes développés pour les phases d'initialisation du lanceur et la gestion de la sécurité de son vol après séparation. Le démonstrateur Eole, développé par l'ONERA et le CNES dans le cadre du projet Perseus a été utilisé.

Cette campagne a permis d'élargir le domaine de vol exploré, et de réaliser pour la première fois des vols « hors vue », dont le vol final avec largage.

ALTAIR est un projet coordonné par l'ONERA, financé par l'Union européenne et la Suisse, réalisé par un consortium de 8 partenaires de 6 pays.

### Propulsion distribuée | Premier vol concluant d'une maquette d'aéronef dotée de huit propulseurs

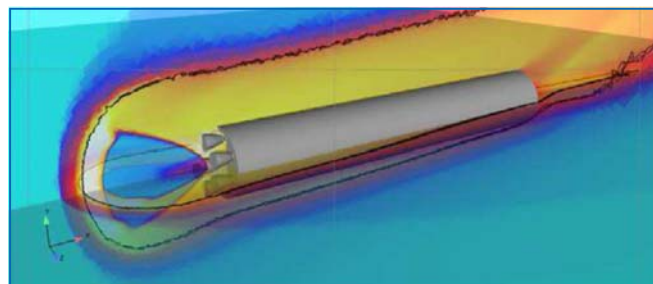
Le 3 octobre 2019 sur l'aérodrome de Revel (31), le démonstrateur à propulsion distribuée (8 hélices) développé dans le cadre de la chaire Cedar – *Chaire for Eco-Design of Aircraft* – a effectué son premier vol et vérifié en conditions réelles ses systèmes embarqués et ses caractéristiques de vol. Cette activité de démonstrateur volant s'inscrit dans le cadre d'une thèse co-encadrée par l'ONERA et l'ISAE-Supaéro.

Les objectifs sont, d'une part de proposer une méthode de co-design pour concevoir les lois de commande des moteurs et dimensionner la dérive tout en respectant des contraintes qualités de vol et de sûreté et, d'autre part, de donner un point de comparaison avec une solution éprouvée en vol sur démonstrateur.

La chaire Cedar a été créée conjointement par Airbus, ISAE-Supaéro, sa fondation et l'ONERA.

### Lanceurs réutilisables | Simulation numérique du retour *toss back* d'un premier étage

Pour la première fois en Europe, des calculs de type URANS ont été effectués par l'ONERA avec la chaîne de calcul Cedre, pour simuler le retour de type *toss back* d'un premier étage de lanceur, pendant lequel le véhicule redescend tuyère en avant en étant freiné par des rallumages successifs d'un de ses moteurs. Ces simulations, faites pour différentes configurations (Mach, altitude de retour, angle d'incidence, avec et sans jets propulsifs, etc.) ont permis de fixer les ordres de grandeur des caractéristiques aérodynamiques et thermiques en différents points de la trajectoire. Les résultats obtenus permettent d'évaluer le domaine de vol où l'allumage du moteur est utile au freinage de l'étage. Ils alimenteront les modèles globaux de trajectographie et de pilotage ainsi que le dimensionnement de protections thermiques pour la récupération du véhicule. [DMPE, DTIS 2017]



*les thèses soutenues*

\* : renvoie à la rubrique « prix et distinctions aux doctorants »

## [TIS 2016]

**Mohamed Amine Bouhlel** - Optimisation auto-adaptative en environnement d'analyse multidisciplinaire via les modèles de Krigeage combinés à la méthode. *Univ. Toulouse*

**Nathaniel Price** - Optimisation multidisciplinaire hybride - application à la conception de véhicules aérospatiaux. *Univ. St Étienne*

**Jonathan Guerra** - Optimisation multi-objectif sous incertitudes de phénomènes de thermique transitoire. *Univ. Toulouse*

**José-Alvaro Perez Gonzalez** - Commande robuste structurée : Application co-design mécanique / contrôle d'attitude d'un satellite flexible. *Univ. Toulouse*

**Yann Denieul** - Conception préliminaire de surfaces de contrôle et lois de commande pour configurations d'avions non conventionnelles. *Univ. Toulouse*

## [TIS 2017]

**Timothée Achard** - Techniques de calcul de gradient aéro-structure haute-fidélité pour l'optimisation de voilures flexibles. *Hesam Univ.*

## [SNA 2018]

\***Quentin Mercier** - Optimisation multicritère sous incertitudes : un algorithme de descente stochastique. *Univ. Côte d'Azur*

## [TIS 2018]

**Peter Schmolgruber** - Amélioration du processus de conception avion en prenant en compte les contraintes de certification et des simulations de mission complètes. *Univ. Toulouse*

**Joan Mas Colomer** - Similitude aéroélastique d'un démonstrateur en vol via l'optimisation multidisciplinaire. *Univ. Toulouse*

**Elliot Roynette** - Optimisation de la conception du design du harnais de commande des satellites. *Univ. Toulouse*

\***Elinirina Robinson** - Méthodes de filtrage et de propagation d'incertitudes pour le pronostic à base de modèles. *Sorbonne Univ.*

**Vincent Chabridon** - Analyse de sensibilité fiabiliste avec prise en compte d'incertitudes sur le modèle probabiliste. *Univ. Clermont Auvergne*

**Raquel Stella da Silva de Aguiar** - Optimization-based design of structured LTI controllers for uncertain and infinite-dimensional systems. *Univ. Toulouse*

## [TIS 2019]

**Alessandro Sgueglia** - Sizing and optimisation priorities applied to a Blended Wing-Body with distributed electric ducted fans. *Univ. Toulouse*

**Andrea Viti** - Conceptual multidisciplinary aircraft design using aerostuctural adjoint-based method. *Imperial College, UK*

**Pierre Derennes** - Mesures de sensibilité de Borgonovo : estimation des indices d'ordre un et supérieur, et application à l'analyse de fiabilité. *Univ. Toulouse*

*prix et distinctions pour les doctorants*

**Quentin Mercier** Prix des doctorants ONERA SNA 2018  
[SNA 2018]

**Elinirina Robinson** *Young Author Award* - IFAC Symposium on Fault Detection, Supervision and Safety for Technical Processes, 2018 [TIS 2018]

# défi 2

## Systèmes intelligents

### Concevoir des systèmes intelligents performants et sûrs

#### le défi

Faire progresser les outils et méthodes permettant d'analyser les systèmes complexes, de contrôler le comportement des engins aérospatiaux de tout type, de préparer, superviser les missions d'engins autonomes, favoriser la résilience de ces engins lorsqu'ils sont soumis à des imprévus, d'intégrer le contrôle santé dans la maintenance, ou encore d'analyser les risques de défaillance ou de non satisfaction des exigences des systèmes aérospatiaux. Sont également des composantes de ce défi la maîtrise de la qualité et des performances des plateformes et logiciels embarqués, et l'analyse de systèmes dynamiques ayant des aspects structurels riches.

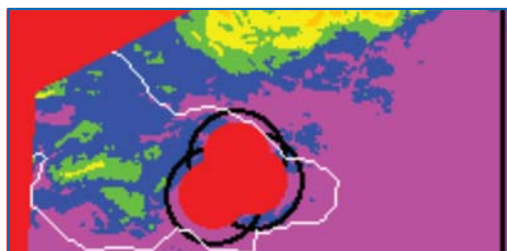
#### les partenariats

DGAC, partenaires industriels de l'aéronautique et des systèmes de drones. Au niveau national, collaborations avec le CNRS, l'INRIA, l'ISAE, le CEA, l'ENAC et de nombreux laboratoires universitaires. A l'international, des collaborations avec la NASA, le DLR, la JAXA.

#### le bilan par les projets



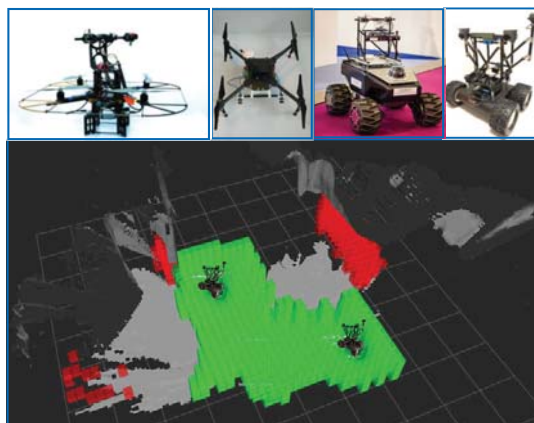
**ANGE** Plus d'intelligence embarquée pour les futurs véhicules autonomes



**ADAC** Comment doit être gérée l'interaction d'un UCAV avec son opérateur ?



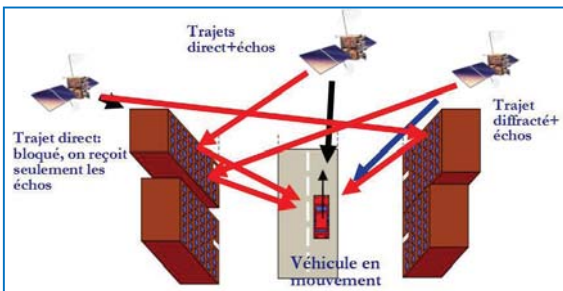
**MOSKITO** Planifier les tâches d'un système pour optimiser ses performances



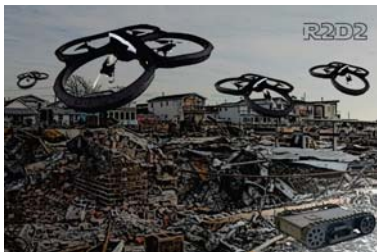
**GUIMAUVE** Perception et guidage embarqués pour flottes de véhicules autonomes

La planification et le contrôle de la navigation d'engins autonomes de type drones ou missiles ont bénéficié des travaux réalisés dans les **PR ADAC** et **ANGE**. Le premier de ces projets a abouti à la mise au point d'une méthode de planification de chemin basse altitude d'un UCAV avec possibilité d'introduire l'homme dans la boucle. Le second a conduit au développement d'algorithmes de navigation par filtrage particulaire et de guidage optimal qui ont été implémentés sur des calculateurs embarqués intégrés à un simulateur. Il a alors été possible de réaliser une expérimentation par simulation hybride avec éléments réels.

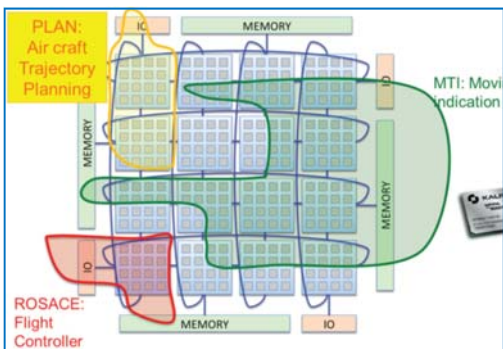
Le **PR GUIMAUVE** (voir encadré) a permis de développer et valider en conditions réelles des algorithmes de localisation, cartographie, commande et estimation pour les systèmes multi-véhicules explorant des zones inconnues. Le **PR MOSKITO** s'est traduit par la réalisation de la boîte à outil « InCELL » qui permet de traiter, dans le cadre de la planification de mission d'un ou plusieurs engins, des problèmes d'ordonnancement de tâches, d'allocation, de routage, et plus généralement d'optimisation sous contraintes.



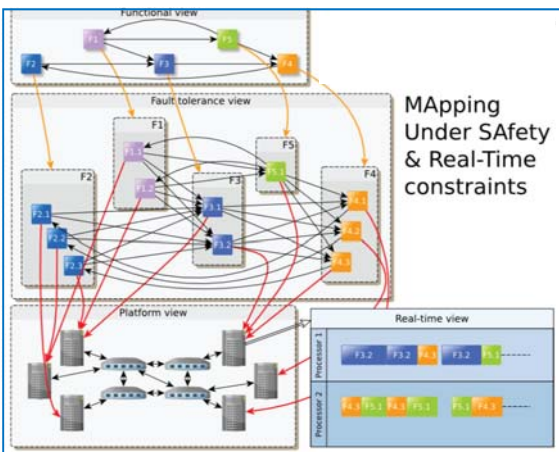
**DROPTER** Drone capable d'adaptation en présence d'obstacles



**R2D2** Reconfiguration de flottes de drones en environnement dynamique



**MaCSIMA** Many/Multi Core, Avionics Systems, Critical Systems



**MAUSART** Déploiement automatique d'applications temps-réel critiques sur plateformes embarquées distribuées, multi- ou many-cœur



**AMBRE** Analyse formelle de systèmes ayant une structure riche et dynamique



Le **PRF DROPTER** a permis d'obtenir, au moyen de divers types de reconfiguration, des solutions de résilience de drones en cas de défaillance de capteur ou de gouverne. La reconfiguration logicielle a été traitée dans le **PR R2D2** qui concerne les flottes de robot de tout type en environnement dynamique.

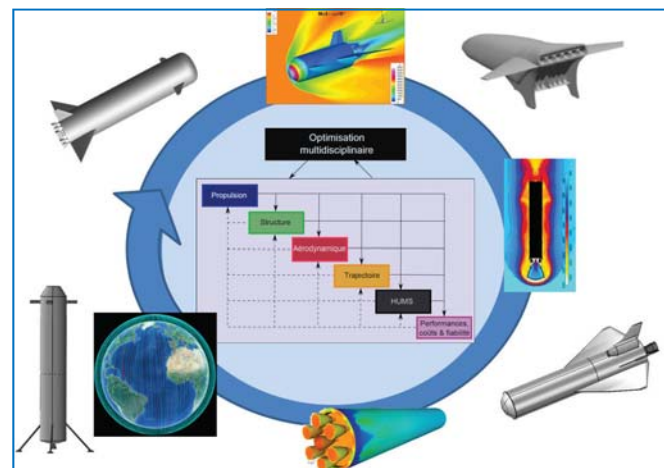
Les travaux des **PRF MaCSIMA** et **PR MAUSART** ont fait progresser les plateformes informatiques embarquées. MaCSIMA s'est traduit par le déploiement de trois applications avioniques sur une architecture informatique massivement parallèle MPPA en évitant les interférences entre les applications. MAUSART fournit de nouveaux algorithmes d'optimisation permettant de maîtriser la qualité, la performance et la sûreté de fonctionnement des plateformes embarquées.

Un savoir-faire en reconnaissance et segmentation d'objet a été acquis grâce au **PRF DELTA**, rendant possible la détection de fissures dans des matériaux composites et facilitant ainsi l'acquisition d'informations nécessaires à la maintenance des engins utilisant ces matériaux. Le **PRF HERACLES** a également conduit à la définition de solutions de contrôle et de méthodes HUMS sur des lanceurs réutilisables.

Concernant l'analyse de systèmes à structure riche et ayant des aspects dynamiques ou comportementaux, le **PR AMBRE** a proposé des solutions s'appuyant sur le langage Electrum plus adaptées que les solutions classiques pour prendre en compte les aspects dynamiques.



**DELTA** Développement et diffusion des techniques d'apprentissage profond pour l'aéronautique



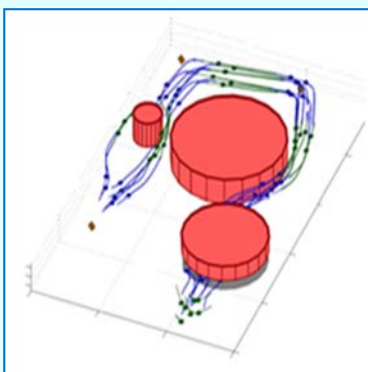
**HERACLES** Évaluer de nouvelles architectures de lanceurs réutilisables



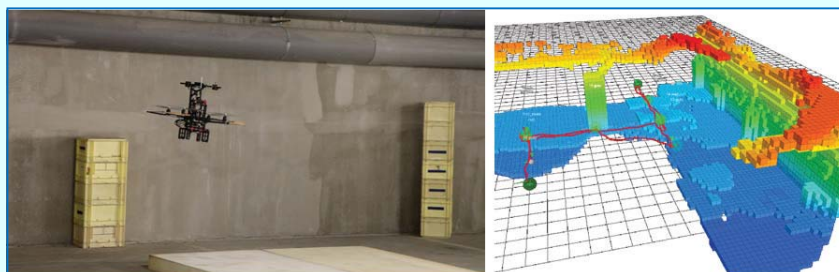
## GUIMAUVE Perception et guidage embarqués pour flottes de véhicules autonomes

Grâce au PR **GUIMAUVE**, une capacité de déploiement d'une flotte de robots mobiles et drones pouvant évoluer de manière autonome en milieu encombré et en l'absence de GPS a été acquise. L'obtention de cette capacité a été permise, entre autres, par la réalisation d'algorithmes de reconstruction de l'espace à partir d'informations provenant de plusieurs types de capteurs et de planification de trajectoire d'exploration. Les défis relevés dans le cadre du projet sont :

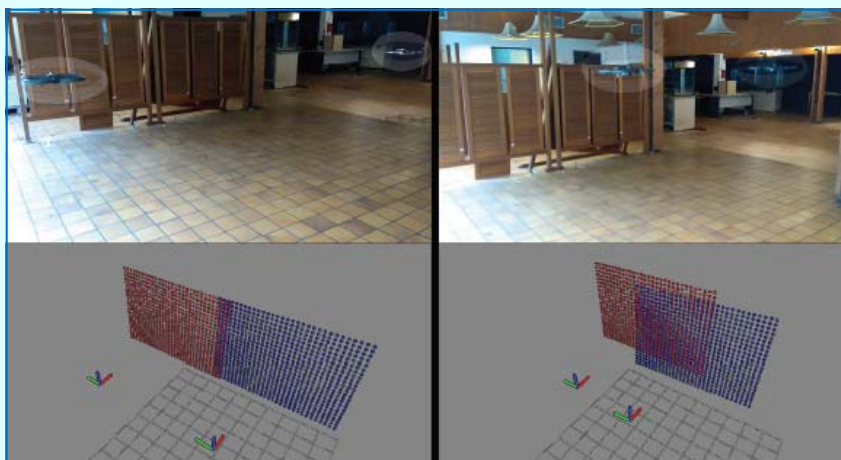
- \* la localisation coopérative : il s'agit d'exploiter tous les capteurs embarqués pour estimer précisément le positionnement relatif et absolu des véhicules, y compris dans des environnements encombrés et en l'absence de GPS
- \* le déplacement en formation : il s'agit de permettre le déploiement de flottes de véhicules plus simples, emportant des capteurs complémentaires et la définition de trajectoires garantissant l'évitement de collisions entre les véhicules et avec des obstacles
- \* l'exploration : il s'agit de réaliser efficacement des missions de couverture de zone par une flotte de véhicules, grâce à l'échange optimisé d'informations permettant d'élaborer des trajectoires minimisant le recouvrement des observations
- \* la localisation de source : il s'agit par exemple de localiser un « point chaud » dans un champ de mesures, sans avoir recours à une exploration exhaustive.



Vol en formation et déploiement sur zone



Exploration autonome et reconstruction 3D



Localisation coopérative

### au-delà des projets ONERA, des faits marquants

#### Gestion du trafic aérien | Succès pour « SINAPS Open Day »

L'ONERA et la DSNA ont co-organisé une journée de présentation de la plateforme SINAPS à destination des contrôleurs aériens de tous les centres de contrôle français. SINAPS est une plateforme d'aide à la décision pour la configuration dynamique des secteurs de contrôle.

SINAPS a été développée par la DSNA et l'ONERA dans le cadre du projet SESAR *Advanced Airspace Management*. Destiné à aider les chefs de salle et leurs assistants dans l'optimisation d'une salle de contrôle aérien, cet outil innovant propose un ensemble de services qui s'adaptent en permanence à l'évolution du trafic aérien et aux ressources disponibles pour proposer une configuration optimale des secteurs à déployer en salle. [DTIS 2019]

### Pilotage, guidage & navigation | Workshop final du projet EU-Japon H2020 VISION à l'ONERA

Le projet VISION propose des systèmes avancés de pilotage, guidage, navigation afin d'améliorer la sécurité de vol d'un avion de ligne et de valider ces solutions sur des plateformes expérimentales. Le consortium du projet a réuni environ 60 participants, dont EASA, Airbus, DLR, TU Delft, TU Braunschweig...

L'ONERA y a développé des lois de commandes adaptatives couplées à une estimation en ligne des principaux paramètres du modèle, permettant par exemple de détecter des pannes d'actionneurs et de reconfigurer les lois de commande. Ces techniques ont été testées en vol sur l'avion d'essais du JAXA, sans doute une première pour une approche couplée de FDD/FTC aussi complexe sur un aéronef piloté.

L'ONERA a développé également un système de navigation pour la phase d'approche finale de l'avion, intégrant un système de vision embarqué pour détecter la défaillance des capteurs (GPS ou ILS) et maintenir ainsi une précision de localisation nominale. Les algorithmes ont été testés en vol sur le K-50, un UAV à voilure fixe, dont l'ONERA a assuré la dronisation avec sa propre avionique, ainsi que l'intégration des charges utiles et la réalisation des campagnes d'essais. [DTIS 2019]



### Gestion du trafic aérien | Succès pour « SINAPS Open Day »

L'ONERA et la DSNA ont co-organisé une journée de présentation de la plateforme SINAPS à destination des contrôleurs aériens de tous les centres de contrôle français. SINAPS est une plateforme d'aide à la décision pour la configuration dynamique des secteurs de contrôle.

SINAPS a été développée par la DSNA et l'ONERA dans le cadre du projet SESAR Advanced Airspace Management. Destiné à aider les chefs de salle et leurs assistants dans l'optimisation d'une salle de contrôle aérien, cet outil innovant propose un ensemble de services qui s'adaptent en permanence à l'évolution du trafic aérien et aux ressources disponibles pour proposer une configuration optimale des secteurs à déployer en salle. [DTIS 2019]

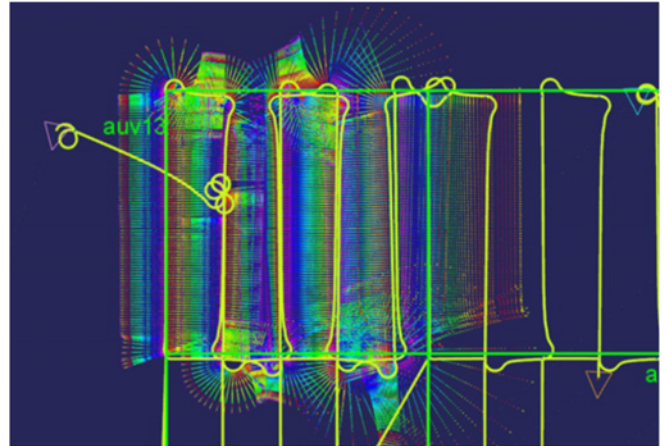
### Robotique navale | Une architecture décisionnelle embarquée ONERA expérimentée en mer Noire – Roumanie

Dans le cadre du projet H2020 SWARMS, l'ONERA a participé à une campagne d'expérimentations mettant en œuvre des véhicules de surface et des véhicules sous-marins. L'ONERA est ici responsable du développement de l'architecture décisionnelle RSOA – *Robot System Onboard Architecture* – dont une version réduite a été implémentée sur deux drones sous-marins (ROV) – et un drone de surface (USV). Ce prototype a également été validé par simulation sur une flottille de 8 robots réalisant une mission de surveillance de zones.

L'architecture logicielle générique intègre la fonction de planification des actions, celle de supervision de ces actions, et enfin celle de monitoring de l'état du véhicule et de l'environnement. Cette

architecture permet aux véhicules de réagir en temps réel à des événements modifiant le plan courant – défaut de propulsion, perte de capteur, courant trop fort...

L'objectif est de permettre l'intervention offshore de véhicules autonomes ou semi-autonomes disposant de moyens complémentaires : mesures par des véhicules sous-marins, relais de communication, surveillance et mesure par des véhicules de surface et intervention par des véhicules télé-opérés. [DTIS 2017]



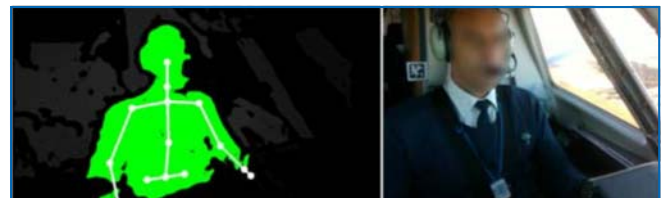
Simulation RSOA avec 8 véhicules navals en surveillance

### Facteurs humains | Campagne d'essais en vol « Caractérisation des mouvements posturaux du pilote »

Fin 2018 s'est tenue sur l'aéroport de Nîmes-Garons une campagne d'essais en vol pour étudier non pas le comportement de l'avion, mais celui du pilote, en particulier lors de phases de vol soumises à de forts mouvements de l'appareil.

L'équipage avait pour mission de réaliser des séries d'approches de la piste, interrompues par des remises de gaz. Forte poussée, importantes accélérations longitudinales, et contexte opérationnel (*e.g.* vols de nuit) sont en effet susceptibles de perturber des mécanismes perceptifs et ainsi d'augmenter les risques d'accident.

L'ONERA a donc équipé l'appareil – un Falcon 20 (AVDef) – d'une centrale inertielle mesurant les accélérations, ainsi que d'une caméra 3D dans le cockpit. Celle-ci, dirigée vers l'équipage et associée à un logiciel d'estimation de pose du corps humain, permettait de mesurer la posture du pilote. Le traitement de ces mesures vise à caractériser les relations entre les mouvements de l'avion et ceux du pilote, et d'utiliser cette compréhension à des fins de conception de systèmes d'assistance à l'orientation du pilote dans des conditions de vol « tout temps ». [DTIS 2018]



### Lutte anti-drone | Lancement du projet ONERA de recherche et développement SHIELD

Le projet SHIELD – Système hétérogène intelligent pour la lutte anti-drone –, vise à monter une plateforme permettant d'étudier et d'évaluer de nouvelles technologies dédiées à la détection et neutralisation de drone. Ce démonstrateur intéresse l'ensemble de la communauté nationale, tant civile que militaire. Il permettra la conduite d'études amont sur des axes scientifiques présentant un

*les thèses soutenues*

\* : renvoie à la rubrique « prix et distinctions aux doctorants »

[TIS 2016]

**Jonathan Sprauel** - Conception sûre et optimale de systèmes dynamiques critiques autoadaptatifs soumis à des événements redoutés probabilistes. *Univ. Toulouse*

**Nicolas Gobillot** - Validation d'architectures temps-réel pour la robotique autonome. *Univ. Toulouse*

**Patrick Bechon** - Planification multirobot pour des missions de surveillance avec contraintes de communication. *Univ. Toulouse*

**Alexandra de Cecco** - Modélisation fluide de réseaux. *Univ. Toulouse*

**Vincent Lecrubier** - Un langage formel pour la conception, la spécification et la vérification d'interfaces homme-machine embarquées critiques. *Univ. Toulouse*

**Victor Gibert** - Analyse d'observabilité et synthèse d'observateurs robustes pour l'atterrissage basé vision d'avions de ligne sur des pistes inconnues. *Univ. Toulouse*

\***Emmanuel Chambon** - Commande de systèmes linéaires sous contraintes fréquentielles et temporelles. Application au lanceur flexible. *Univ. Toulouse*

**Kevin Le Goff** - Agentivité dans les systèmes fortement automatisés. *Aix-Marseille Univ.*

**Hester Knol** - Viser les illusions : la perception de la taille et son effet sur le contrôle moteur. *Aix-Marseille Univ.*

**Hicham Randrianarivo** - Apprentissage statistique de classes sémantiques pour l'interprétation d'images aériennes et satellitaires. *Hesam Univ.*

[TIS 2017]

\***Igor Pontes Duff Pereira** - Approximation des systèmes dynamiques à grande dimension et à dimension infinie. *Univ. Toulouse*

**Christophe Viel** - Lois de guidage coopératives et estimateurs d'état pour système multi-agent avec réduction des communications par méthode event-triggered. *Univ. Paris-Saclay*

**Jan Bolting** - Contributions au vol en formation serrée de petits drones. *Univ. Toulouse*

**José Marcio Pereira Figueira** - De l'utilisation des outils de simulation pour l'estimation des limites d'appontage des hélicoptères. *Aix-Marseille Univ.*

**Mathieu Brunot** - Identification of rigid industrial robots - A system identification perspective. *Univ. Toulouse*

\***Hélène Evain** - Nouvelles configurations de grappes d'actionneurs gyroscopiques pour le contrôle de satellites agiles. *Univ. Toulouse*

\***Quentin Perret** - Exécution prédictible sur processeurs pluri-cœurs. *Univ. Toulouse*

**Fabrice Guet** - Étude de l'application de la théorie des valeurs extrêmes pour l'estimation fiable et robuste du pire temps d'exécution probabiliste. *Univ. Toulouse*

**Kevin Delmas** - Synthèse automatique d'architectures tolérantes aux fautes. *Univ. Toulouse*

**Martin Stolle** - Vers le vol à voile longue-distance autonome basé vision pour drones. *Univ. Toulouse*

**Hélène Roggeman** - Amélioration de performance de la navigation basée vision pour la robotique autonome : une approche par couplage vision/commande. *Univ. Paris-Saclay*

[TIS 2018]

**Quang Huy Truong** - Méthodes d'asservissement visuel pour l'appontage d'hélicoptères. *Univ. Toulouse*

\***Riccardo Bonalli** - Contrôle optimal de systèmes aérospatiaux avec contraintes sur le contrôle et sur l'état et avec retards. *Sorbonne Univ.*

**Guillaume Alcalay** - Développement de capteurs virtuels pour l'estimation et la surveillance des paramètres de vol d'un avion. *Univ. Toulouse*

\***Nicolas Merlinge** - State estimation and trajectory planning using Box Particle Kernels. *Univ. Paris-Saclay*

**Raphaël Cohen** - Vérification formelle et validation des algorithmes d'optimisation convexe appliqués à la commande prédictive. *Univ. Toulouse*

**Jonas Gouraud** - Dynamique de la divagation attentionnelle dans des environnements automatisés et son influence sur les situations de sortie de boucle. *Univ. Toulouse*

**Bertille Somon** - Corrélats neuro-fonctionnels du phénomène de sortie de boucle: impacts sur le monitoring des performances. *Univ. Grenoble Alpes*

**Thomas Solatges** - Modélisation, conception et commande de robots manipulateurs flexibles. Application au lancement et à la récupération de drones à voilure fixe depuis un navire faisant route. *Univ. Toulouse*

**Guillaume Davy** - Génération de codes et d'annotations prouvables d'algorithmes de points intérieurs à destination de systèmes embarqués critiques. *Univ. Toulouse*

**Romain Rincé** - Reconnaissance de comportements sur flux de données bruitées enrichie par des observations structurées. *Univ. Nantes*

**Adèle Boche** - Méthodes indirectes d'adaptation et de prise de décision pour la sécurisation du vol des drones à voilure fixe. *Univ. Toulouse*

[MFE 2019]

**Émilie Jahanpour** - Développement et mise en œuvre d'une approche psycho-physio-acoustique pour le contrôle temps réel de l'impact du bruit en cabine d'hélicoptère. *Univ. Toulouse*

[TIS 2019]

**Torbjørn Cunis** - Modeling, analysis, and control for upset recovery - from system theory to unmanned aircraft flight. *Univ. Toulouse*

**Pauline Kergus** - Data-driven model reference control in the frequency-domain: From model reference selection to controller validation. *Univ. Toulouse*

**Émilien Flayac** - Coupled methods of nonlinear control and estimation applicable to Terrain-Aided Navigation. *Univ. Paris-Saclay*

**Aisha Sahai** - Agentivité conjointe lors des Interactions Homme-Machine : comment concevoir des agents plus coopératifs ?  
*Univ. PSL*

**Hugo Daigmorte** - Analyse des interactions entre flux synchrones et flux asynchrones dans les réseaux temps réel.  
*Univ. Toulouse*

**David Côme** - Analyse de la qualité du code via une approche logique et application à la robotique. *Univ. Toulouse*

**Jeanne Matiedje Tawa** - Extension événementielle d'une méthode formelle légère et application à l'analyse du protocole distribué Chord. *Univ. Toulouse*

**Vincent Bonnemains** - Formal ethical reasoning and dilemma identification in a human-artificial agent system. *Univ. Toulouse*

**Mehdi Othmani-Guibourg** - Supervised learning for distribution of centralised multiagent patrolling strategies. *Univ. Toulouse*

**Jean-Alexis Delamer** - Planification de stratégies de navigation et de guidage pour des drones autonomes dans des milieux encombrés. *Univ. Toulouse*

**Viet Hoang Le** - Une couverture combinant tests et preuves pour la vérification formelle. *Univ. Toulouse*

---

### *prix et distinctions aux doctorants*

---

**Emmanuel Chambon** – Prix de thèse 2017 de la fondation ISAE-Supaéro [TIS 2016]

**Igor Pontes Duff Pereira** – Prix des doctorants ONERA TIS 2016 [TIS 2017]

**Hélène Evain** – Prix Amelia Earhart 2016, Zonta International [TIS 2017]

**Quentin Perret** – Best paper award « Embedded Computing Platform » ERTS 2016 ; prix doctorant ONERA TIS 2017 [TIS 2017]

**Riccardo Bonalli** – Prix des doctorants ONERA TIS 2018 [TIS 2018]

**Nicolas Merlinge** – Prix 2019 des meilleures thèses du GdR MACS et de la section automatique du club EEA [TIS 2018]

**Anthony Bourdelle** – Student best paper award « Flight Physics » EUCASS 2019 [TIS en cours]

**Rodrigo Caye Daudt** – Best student paper Workshop EarthVision 2019 [TIS en cours]

# défi 3

## Souffleries du futur

### Concevoir et préparer les essais de demain dans les grandes souffleries

#### le défi

Ce défi comporte les volets suivants :

- \* être en mesure d'explorer les nouvelles configurations d'aéronefs civils et militaires
- \* développer des moyens d'essais aéroacoustiques de pointe pour la maîtrise du bruit des aéronefs
- \* caractériser en soufflerie les effets dynamiques rencontrés dans les différents régimes de vol des aéronefs
- \* améliorer la fiabilité des essais en renforçant le dialogue mesures-simulations
- \* mieux simuler les conditions réelles de vol

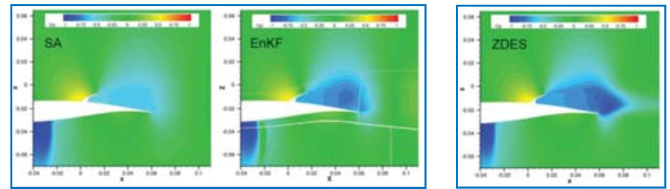
#### le bilan par les projets

Chacun des points de ce défi fait l'objet d'un processus d'amélioration continu. Les projets de recherche internes portant sur le sujet ont été lancés dans une période récente (démarrage des travaux en 2018 ou 2019) et il est encore trop tôt pour en faire un bilan détaillé.

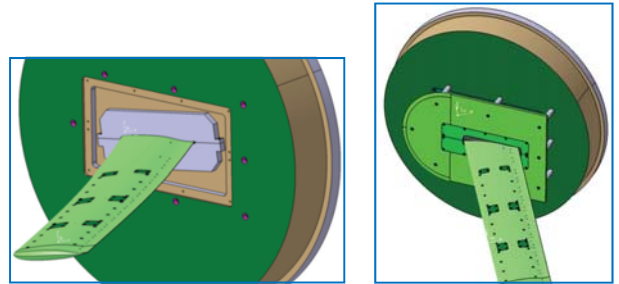
Le **PRF ARENE** a pour objectif de doter l'ONERA de méthodologies d'assimilation de données pour la reconstruction d'écoulements obtenus par techniques expérimentales ou numériques.

Le **PR BOEING** s'attache à étudier le tremblement transsonique sur voilures en flèche et s'articule autour d'essais dans la soufflerie S3Ch avec mesures instantanées et des calculs de restitution de type URANS ou ZDES.

Le **PR IDEE** (voir encadré) vise la compréhension de la génération de bruit dans les écoulements turbulents, dans l'enjeu de rendre les aéronefs plus silencieux. Ce projet s'appuie sur l'utilisation d'une tuyère à flux mélangés élaborée par la Direction des souffleries (DS), qui sera utilisée dans la soufflerie S1Ma (banc IJES).



ARENE Aérodynamique au-delà de la dualité expérience-simulation

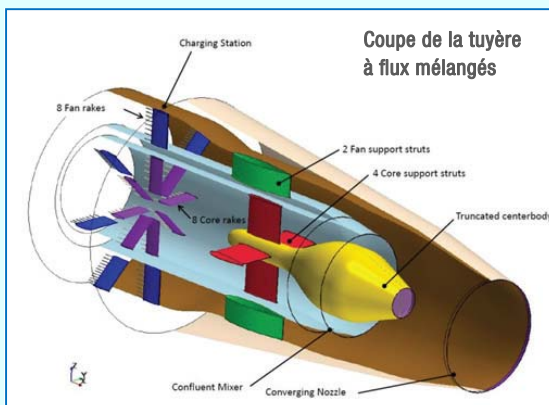


BOEING Comprendre le tremblement

#### IDEE Identification des sources de bruit dans les écoulements turbulents

Ce PR met en œuvre trois approches complémentaires : les expériences en soufflerie avec métrologie avancée, la simulation numérique haute fidélité et la modélisation par analyse de stabilité. La métrologie fera intervenir entre autres la TR-PIV (*Time Resolved PIV*), la BOS 3D, l'antennerie acoustique.

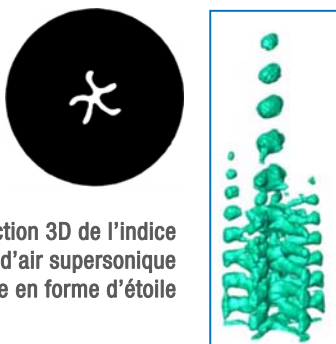
Les travaux en cours portent sur la réalisation d'une base de données expérimentale sur une configuration de tuyère à flux mélangés produisant un jet représentatif d'un écoulement en sortie de moteur d'avion. Par la suite, d'autres configurations (train d'atterrissage, bruit de profil) seront prises en compte.



*au-delà des projets ONERA, des faits marquants***Métrologie optique | Reconstruction 3D d'écoulements complexes instationnaires par holographie numérique**

Pour la caractérisation fine des phénomènes aérodynamiques complexes instationnaires et tridimensionnels, l'ONERA a développé, construit et testé un banc d'interférométrie holographique numérique multidirectionnel à 6 directions de visée simultanées, basé sur l'interférométrie de type Mach-Zehnder (interférométrie proche dans le principe de celle de Michelson, adaptée à la mesure des variations de pression dans l'air, qui se traduisent par des variations d'indice de l'air et donc par des déplacements de franges lumineuses). Les applications sont liées au contrôle des écoulements et à la manipulation des couches limites par des jets ou à la reconstruction 3D d'écoulements supersoniques.

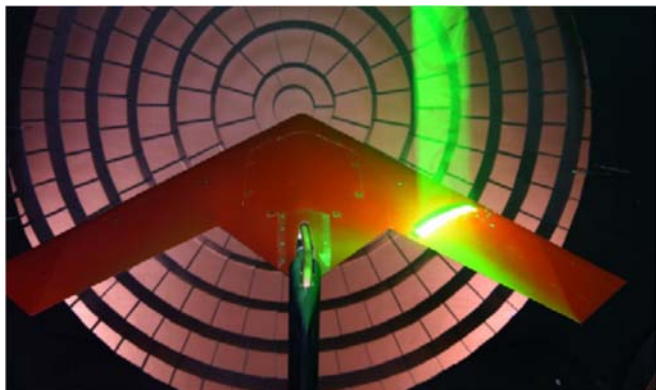
Ces travaux ont été effectués dans le cadre d'une ANR Astrid qui vient de se terminer, avec l'ONERA comme coordinateur et l'Institut Saint-Louis (ISL) et le Laboratoire d'acoustique de l'université du Mans (LAUM) comme partenaires. [DAAA 2018]



Reconstruction 3D de l'indice de réfraction d'un jet d'air supersonique issu d'une buse en forme d'étoile

**Recherche Innovation Défense | La PIV 3D testée à l'échelle semi-industrielle**

Les ingénieurs aérodynamiciens de l'ONERA ont réalisé une campagne de vélocimétrie par images de particules tridimensionnelle (PIV 3D) autour d'une maquette de drone de combat de configuration générique Saccon (spécification OTAN/STO), dans la soufflerie L1 du centre de Lille. Cette première utilisation de la PIV 3D dans le cadre complexe d'une installation d'échelle semi-industrielle a déjà permis aux équipes de progresser dans leur savoir-faire et leurs outils de traitement. Au-delà de la maîtrise métrologique, les données acquises permettent de développer et caractériser des méthodes de détermination des champs de pression volumiques à partir de champs de vitesse. Travaux dans le cadre de l'ANR Astrid EVAPOR impliquant l'ONERA en partenariat avec le laboratoire Pprime (Poitiers). [DAAA 2018]

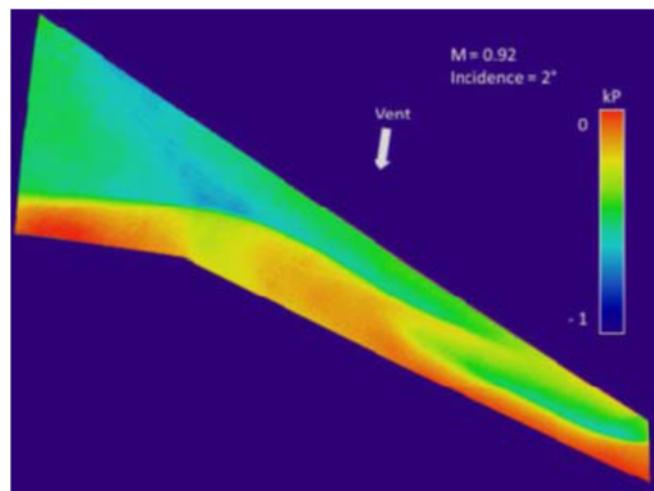


La maquette générique Saccon dans la soufflerie L1, et le volume laser illuminé pour la mesure par PIV 3D

**Métrologie | La PSP – peinture sensible à la pression – opérationnelle dans les souffleries industrielles**

Le projet Carnot OPOSSUM qui avait pour objectif d'améliorer les performances de la PSP utilisée sur maquettes pour visualiser le champ de pression lors des essais en soufflerie – à basse et haute vitesses – est terminé et a été couronné de succès.

Le procédé de synthèse d'un nouveau polymère actif a en effet été validé en laboratoire et transféré avec succès à la société PCAS qui en assure la fabrication à plus grande échelle. La sensibilité à la pression a été sensiblement augmentée tandis que la sensibilité à la température a été nettement réduite à pression ambiante. Ce nouveau produit semble également présenter une stabilité dans le temps améliorée. Le premier essai avec vent de la PSP avec ce nouveau polymère a été réalisé dans la grande soufflerie S1Ma de Modane sur la maquette de référence LRM. Les résultats obtenus jusqu'à Mach 0,92 sont très satisfaisants. [DS, DMPE, DAAA 2018]



Champ de coefficient de pression  $K_p$  sur la maquette LRM à S1Ma

**Souffleries | Une chaîne d'acquisition intégrée en maquette**

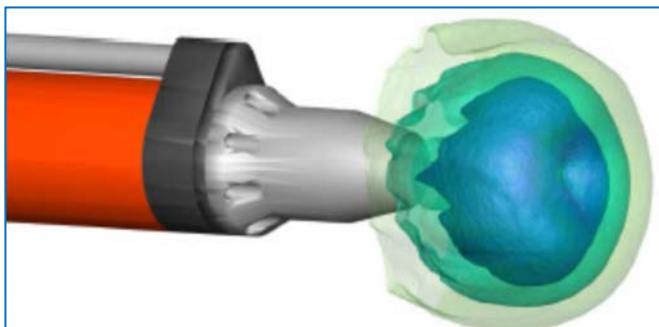
Le projet WIRELESS a pour objectif de développer des réseaux de capteurs intégrés aux maquettes, essentiellement pour les mesures dynamiques. Une première étape a été de développer une chaîne de mesure miniaturisée et embarquée dans les maquettes en soufflerie. L'ONERA a développé et testé avec succès une chaîne d'acquisition de données arborescente de capteurs avec plusieurs étages, des capteurs au PC de traitement. Les essais ont eu lieu sur une maquette d'aile générique dans S2Ma, la soufflerie transsonique et supersonique de Modane.

Ce système d'acquisition à étages a été aussi utilisé pour des applications de trajectographie et des études drone (Lille). Son emploi sera également généralisé à la station sol des drones du laboratoire RESSAC (Toulouse), pour un projet de suspension dynamique, dans le but de restituer un comportement zéro gravité, et possiblement pour la soufflerie verticale de Lille SV4. [DCSD, DS 2016]

**Souffleries | Démonstration de la technique de visualisation BOS3D dans la grande soufflerie S1Ma**

La technique optique de reconstruction numérique des écoulements BOS 3D s'installe dans la grande soufflerie S1Ma, après

des premières mises au point dans la soufflerie F2 du Fauga-Mauzac. La BOS 3D est une technique de mesure récente non invasive, fournissant une reconstruction 3D du champ instantané de masse volumique d'un écoulement. L'ONERA a mis en œuvre cette technique à S1Ma lors du projet Carnot BOS2D-3D. L'expérience a été réalisée sur un jet supersonique se développant à contre-courant de l'écoulement de soufflerie. Les essais ont été menés avec un Mach compris entre 0 et 0,85. [DMPE, DTIS, DS 2016]



Reconstruction du champ de masse volumique à Mach 0,4 et pour un débit de 1 kg/s

### Ingestion de couche limite | Essais à S1Ma d'entrées d'air sur une maquette de type avion d'affaires

Un essai de qualification des niveaux de rendement et de distortion aux entrées moteurs latérales et centrale a été réalisé dans la grande soufflerie de Modane. Deux versions de nacelle centrale ont été testées : une *S-duct* avec piège à couche limite et l'autre « enterrée » avec ingestion de la couche limite du fuselage (BLI – *Boundary Layer Ingestion*). Cette dernière, dessinée par les aérodynamiciens de l'ONERA, ambitionne d'améliorer le rendement propulsif de l'appareil par rapport à une configuration classique. L'effet de variantes géométriques, telle la présence d'un plan canard, ou de paramètres tels que l'incidence, le dérapage, le nombre de Mach ou encore le débit traversant les nacelles, ont été évalués. C'est un projet JTI Clean Sky – SFWA-ITD, sous maîtrise d'œuvre de Dassault Aviation. [DAAA, DS, DMPE 2016]



## les thèses soutenues

\* : renvoie à la rubrique « prix et distinctions aux doctorants »

[MFE 2016]

**Adam Cheminet** - Développement de la PIV tomographique pour l'étude d'écoulements turbulents. *Univ. Paris-Saclay*

[MFE 2017]

**François Nicolas** - Reconstruction de champs instantanés de masse volumique par BOS 3D. Applications à l'étude d'écoulements complexes en grande soufflerie. *Univ. Toulouse*

**Robin Yegavian** - Model-based approaches for flow estimation using Particle Image Velocimetry. *Univ. Paris-Saclay*

\***François Olchewski** - Caractérisation des écoulements instationnaires 3D par tomographie holographique numérique multidirectionnelle. *Univ. Lille*

## prix et distinctions aux doctorants

**François Olchewski** - Prix des doctorants ONERA MFE 2017

[MFE 2017]

# défi 4

## Vers la maîtrise de la turbulence Contrôler les écoulements et tendre vers la maîtrise de la turbulence

### le défi

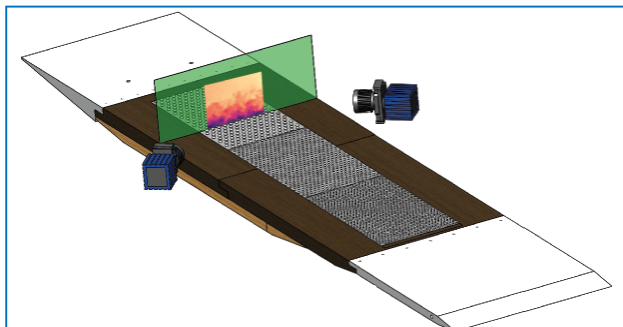
Pour relever ce défi, des actions de différentes natures doivent être menées. Il faut :

- développer les techniques expérimentales et la métrologie pour l'aérodynamique, l'aérothermochimie et l'aéroacoustique
- améliorer la prise en compte de la turbulence dans les simulations numériques, ce qui passe entre autres par la construction de modèles de transition laminaire-turbulent
- comprendre la physique de la turbulence pour être en mesure de développer des actionneurs ou des systèmes de contrôle des émissions tourbillonnaires des avions, du bruit qu'ils émettent ou encore des phénomènes de givrage qui peuvent détériorer leurs performances jusqu'à poser des problèmes de sécurité

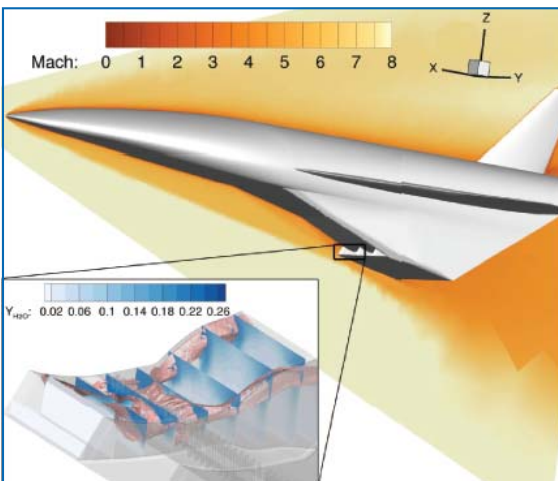
### les partenariats

L'ONERA collabore avec de nombreux laboratoires académiques des Universités de Paris-Saclay, Toulouse, Lille, avec l'Institut Pprime de Poitiers, le Coria de Rouen, le LMFA de Lyon ; à l'international avec : Imperial College, Caltech, NASA, JAXA. L'ONERA participe également à des projets menés en coopération avec les industriels du secteur aéronautique et la DGAC.

### le bilan par les projets



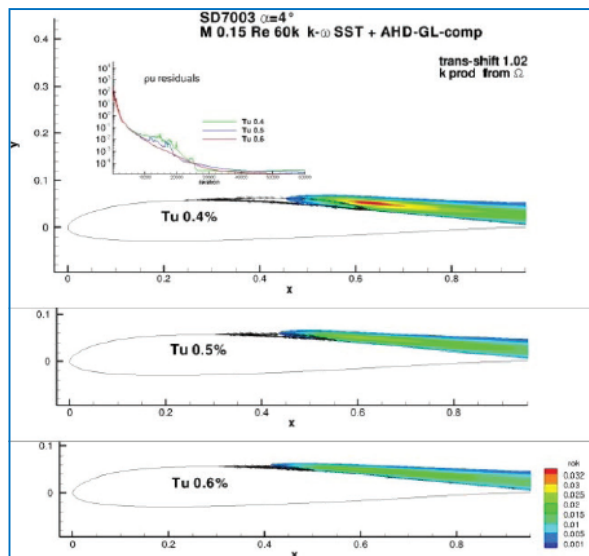
**ROOTT** Caractériser, analyser et modéliser les effets des rugosités sur les échanges en paroi



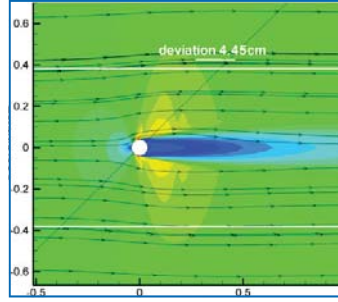
**HYPERTRANS** Améliorer les calculs Nose-to-Tail du bilan aéro-propulsif d'un véhicule hypersonique

La modélisation de la transition laminaire-turbulent est un point clé de la simulation de l'aérodynamique des avions. Elle a donc fait l'objet de plusieurs projets internes qui se sont intéressés à plusieurs aspects du problème : le **PR ROOTT** a été consacré à l'étude de l'influence de la rugosité sur le déclenchement de la transition ; le **PR HYPERTRANS** a fait progresser l'outil CEDRE dans sa capacité à simuler une transition dans une couche limite d'écoulement hypersonique ; le **PR BUDLETIN** a permis d'améliorer les capacités du code d'aérodynamique elsA à prévoir la transition dans les bulbes de décollement.

### BUDLETIN Modélisation et prévision de la transition des bulbes de décollement laminaire





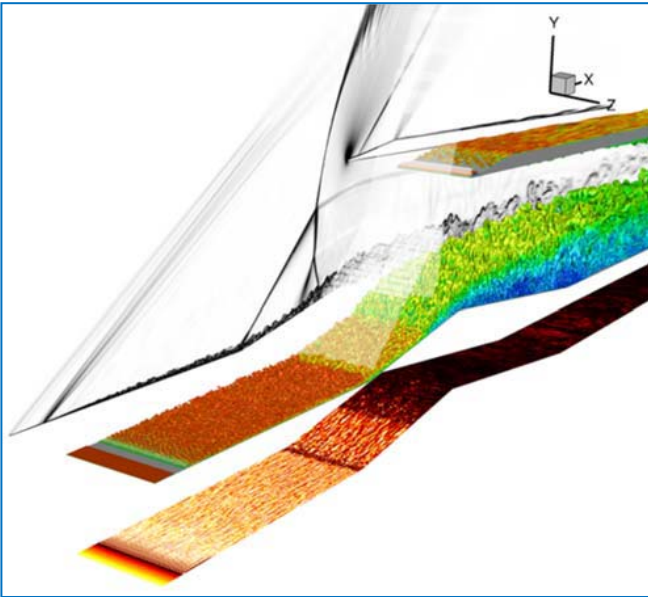


**ACCESS** Maîtriser les conditions d'essai en soufflerie grâce à la simulation numérique

Dans le domaine des mesures, le **PRF MEROVEE3D** (voir encadré) a conduit à une bonne maîtrise des techniques de mesure de vitesse et de masse volumique des écoulements en soufflerie, par PIV 3D et BOS 3D respectivement. Parallèlement, le **PR ACCESS** a permis de renforcer le dialogue expérience/calcul en aérodynamique en proposant une méthodologie de caractérisation interactive expérience/calcul de l'écoulement transsonique autour d'un cylindre.

Le contrôle du pompage dans les entrées d'air supersoniques est le sujet du **PR OPOSSUM**. La technique ZDES y a été adaptée pour restituer numériquement l'entrée en pompage ; des dispositifs de contrôle du pompage font l'objet d'essais en souffleries et de simulations.

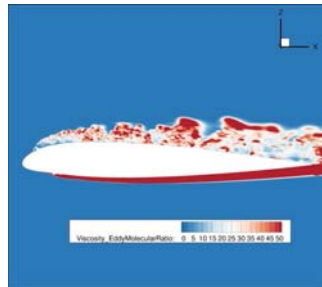
Le travail réalisé dans le **PR SUNSET2** est également en lien avec le contrôle des écoulements. Il s'agit de maîtriser la dégradation de performance d'une aile soumise à des conditions de givrage. Dans ce but, les outils numériques IGL003D et elsA ont été adaptés pour prédire ces dégradations de performance. Parallèlement, des bases de données sur le comportement d'ailes en flèche givrées testées en soufflerie ont été réalisées. Si le PR a permis de progresser, il s'avère qu'un important travail reste à faire, en particulier pour obtenir des modèles capables de reproduire les formes de givre réelles.



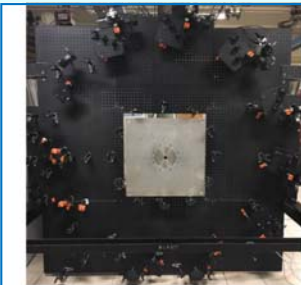
**OPOSSUM** Vers la prévision et le contrôle du pompage en supersonique

Simulation LES à Mach 1,8  
Code HPC ONERA FastS  
260 M cellules,  
2 M heures CPU  
(calcul Genci/Cines)

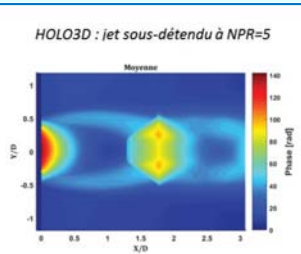
**SUNSET2** Étude de l'accrétion de givre sur ailes en flèches



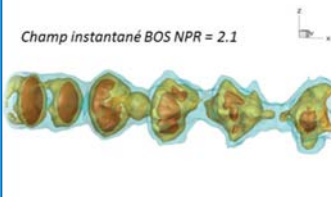
**MEROVEE3D** Mesure 3D de la masse volumique et de la vitesse dans les écoulements compressibles



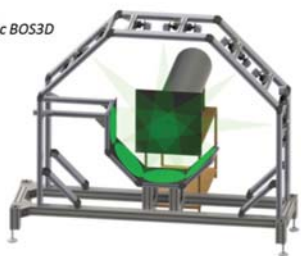
Banc Holo 3D à 6 voies



Banc BOS3D



Champ instantané BOS NPR = 2.1



Ce projet s'est traduit par la réalisation des logiciels de traitement pour la BOS 3D, déposés à l'Agence pour la protection des programmes, et par les développements d'un banc d'holographie 3D et d'un nouveau moyen de mesure du gradient d'indice.

La BOS 3D a été appliquée en grande soufflerie sur des écoulements compressibles dans le cadre d'une thèse. Les effets aéro-optiques sur les mesures de tomographie PIV dans les écoulements compressibles ont été analysés dans le cadre d'une autre thèse.

La figure présente le banc d'holographie appliqué à la visualisation d'un jet sous-détendu obtenu avec une valeur de NPR (*Nozzle Pressure Ratio*) égal à 5 et le banc de BOS 3D appliqué à la mesure de masse volumique dans un jet obtenu avec une valeur de NPR égal à 2,1.

## au-delà des projets ONERA : des faits marquants

### Aérodynamique | Innovations et nouveaux moyens pour la conquête de la laminarité

Dans le cadre de la plate-forme *CleanSky2 Airframe-ITD* et du *Technology Stream « Advanced Laminarity »* sous la responsabilité de l'ONERA :

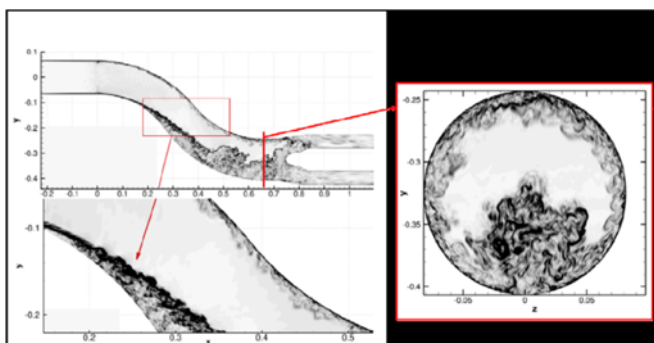
- un workshop organisé à l'ONERA avec une trentaine de partenaires, dont Airbus, Dassault Aviation, DLR, Saab et ONERA, dans le but d'échanger sur l'analyse des essais en vol conduits par Airbus sur le démonstrateur Blade A340-300 muni de deux manchons laminaires aux extrémités de voilure ;
- une campagne d'essais dans la soufflerie F2 de l'ONERA ayant pour objectif de combiner une aspiration et un dispositif passif pour contrôler l'apparition de la transition laminaire-turbulent. [DMPE, DS 2018]



### Aérodynamique | Meilleure prévision des distorsions d'écoulement dans les manches à air coudés d'UCAV

En raison des contraintes de furtivité, il se produit fréquemment un décollement de la couche limite dans les manches à air des drones de combat. Ce décollement est source de distorsions dynamiques néfastes au moteur.

Dans le cadre du projet de recherche ONERA OPA-UCAV, la méthode ZDES mode 3 a été appliquée pour la première fois à une géométrie complexe en aérodynamique interne. Elle a permis d'améliorer de façon significative la prévision de ces distorsions dynamiques dans les manches coudés. [DAAA 2018]



Strioscopie numérique instantanée de l'écoulement dans la manche à air coudée

### Simulation numérique des écoulements | L'ONERA au top de la modélisation de la transition laminaire-turbulent

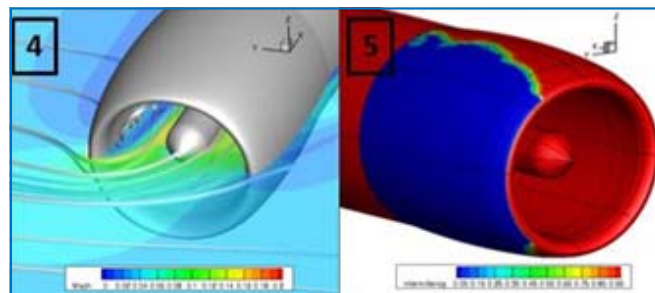
Participation de l'ONERA au workshop organisé par la NASA Langley sur la modélisation de la transition laminaire-turbulent dans les codes CFD, afin d'y présenter l'approche et les outils ONERA (en particulier les fonctionnalités disponibles dans *elsA*). Ceux-ci sont à la pointe dans le paysage actuel ; le haut niveau d'expertise de l'ONERA a été largement salué. [DMPE 2017]

### Aérodynamique | Fin du projet Epice sur la laminarité aux parois d'une nacelle de moteur aéronautique

Fin 2015, Safran Aircraft Engines confiait à l'ONERA la réalisation d'essais en soufflerie et de simulations numériques pour améliorer la connaissance de la transition sur les parois d'une nacelle de moteur aéronautique. Ces travaux ont eu lieu dans le cadre du projet Epice, financé par le Programme d'investissements d'avenir.

Le design aérodynamique a été réalisé en combinant optimisation numérique et calculs RANS 3D avec prise en compte de l'environnement de la soufflerie. Les essais réalisés aux souffleries S2Ma et F1 ont comporté un nombre important de nouveautés, telles que l'utilisation intensive et synchronisée de mesures IR.

Scientifiquement, l'influence de la transition sur des essais d'entrée d'air nacelle a été caractérisée pour la première fois et reproduite numériquement grâce aux nouveaux outils de prévision de transition inclus dans l'ensemble *elsA*. Le projet a permis également la réalisation d'une base de données importante et nouvelle sur l'effet de défauts de surface sur la transition en écoulement compressible. La réussite de ce projet tient notamment à une très bonne collaboration avec Safran Aircraft Engines. [DMPE, DAAA, DS 2017]



### Aérodynamique | Fin du projet Europe-Russie Buterfli sur le tremblement

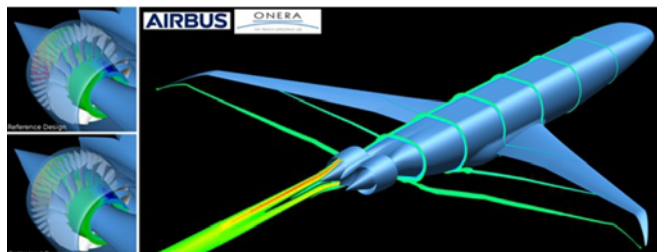
Ce projet, s'inscrit dans l'ensemble des travaux financés par l'UE pour l'amélioration des performances et la réduction des émissions de CO<sub>2</sub> des avions commerciaux en régime de croisière. Le consortium réunissait 12 partenaires avec l'ONERA coordinateur et le TsAGI coordinateur côté russe.

Une des réalisations les plus marquantes est la caractérisation et le contrôle fluide du tremblement sur une aile 2D laminaire – essais en soufflerie ONERA/S3Ch, calculs RANS/URANS et simulation LES. [DAAA 2017]



### Installation motrice | Vers des configurations aéro-propulsives plus performantes

L'ONERA a achevé la seconde phase du projet Nautilus – contrat Airbus – visant à évaluer son concept breveté d'installation motrice à ingestion de couche limite (BLI). Les travaux ont notamment consisté à poursuivre la conception aérodynamique ainsi qu'à affiner la prévision du gain de rendement propulsif. Ils se poursuivront dans le cadre du programme CleanSky2 avec l'intégration de l'aéroélasticité et de l'acoustique. [DAAA 2018]



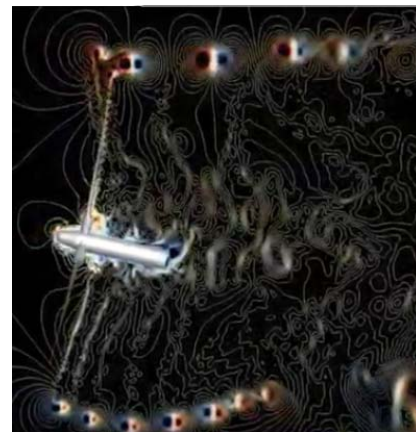
### Transition laminaire-turbulent | Premiers tests en simultané des contrôles passif et actif

Pour la première fois, l'efficacité combinée d'un système passif d'anti-contamination et d'une aspiration active pariétale a été étudiée, lors d'une campagne expérimentale de contrôle de la transition laminaire/turbulent sur la ligne de partage d'une aile. La campagne s'est déroulée de manière optimale dans la soufflerie F2 du Fauga-Mauzac, dans le cadre du projet Nacor, réponse commune ONERA-DLR à l'ITD Airframe du programme CleanSky2. Les résultats obtenus vont nourrir toutes les activités liées à la laminarité, menées en Europe au sein des plateformes Airframe et LPA (*Large Passenger Aircraft*) de CleanSky2. [DAAA 2019]

### Aérodynamique | Une valorisation pour les éoliennes de méthodes de calcul pour hélicoptères

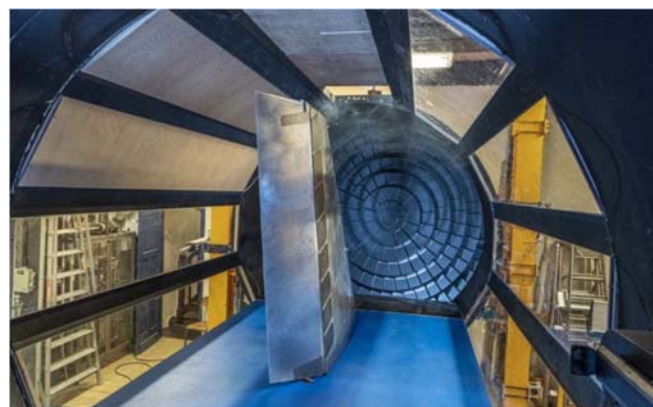
L'effet de deux mouvements simplifiés de houle sur les performances aérodynamiques de l'éolienne NREL 5MW a été évalué avec les logiciels ONERA elsA et Cassiopée (pré-traitement/post-traitement en co-processing), le tout sur des calculateurs du GenCI (1,5 million d'heures de calcul). Ces simulations numériques et l'analyse poussée qui en a été faite ont permis de mettre en évi-

dence des phénomènes complexes d'interactions apparaissant sur ces éoliennes flottantes. Ces calculs représentent une valorisation des méthodes de calcul utilisées sur les applications hélicoptère et soulignent une fois encore le lien étroit existant entre ces deux domaines. [DAAA 2019]



### Aérodynamique | Le contrôle actif des écoulements pour réduire la traînée des avions

Des essais de contrôle du décollement sur une dérive d'avion d'affaire a eu lieu dans la soufflerie L1 de Lille. Objectif du contrôle : augmenter la force latérale générée par la dérive en supprimant le décollement qui apparaît sur la gouverne pour les forts angles de braquage. Des actionneurs de type *sweeping jet*, à air comprimé, ont permis une augmentation de l'effort latéral de 80%, ce qui permettrait de réduire la surface des dérives et en conséquence la traînée des avions (environ 3%). Projet DGA Rapid ASPIC avec la PME Cedrat. [DAAA 2019]



## les thèses soutenues

\* : renvoie à la rubrique « prix et distinctions aux doctorants »

[MFE 2016]

**Amaury Bannier** - Contrôle de la traînée de frottement d'une couche limite turbulente au moyen de revêtements rainurés de type "riblets". *Sorbonne Univ.*

**François Laurendeau** - Analyse expérimentale et modélisation numérique d'un actionneur plasma de type jet synthétique. *Univ. Toulouse*

**Natacha Szulga** - Etude expérimentale et numérique du contrôle de transition de couche limite par actionneurs à plasma froid surfacique. *Univ. Toulouse*

**Pierre Grenson** - Caractérisation expérimentale et simulations numériques d'un jet chaud impactant. *Univ. Toulouse*

**Holly Johnson** - Nonlinear dynamics of wake vortices. *Univ. Paris-Saclay*

**Anthony Arnault** - Reconstruction de champs aérodynamiques à partir de mesures ponctuelles. *Univ. Lille*

**Nicolas Renard** - Simulations numériques avancées et analyses physiques de couches limites turbulentes à grand nombre de Reynolds. *Sorbonne Univ.*

**Alexandre Minot** - Modélisation de la transition laminaire-turbulent par rugosité et bulbe de décollement laminaire sur les aubes de turbomachine. *Univ. Toulouse*

**Javier Rodriguez Sanchez** - Étude théorique et numérique des modes propres acoustiques dans un conduit avec écoulement et parois absorbantes. *Univ. Toulouse*

**Jonas Verrière** - ZDES simulations of propulsive jets: physical analysis and influence of upstream turbulence. *Sorbonne Univ.*

## [MFE 2017]

**Iannis Bennaceur** - Étude numérique de la diffusion d'une onde acoustique par une couche de cisaillement turbulente à l'aide d'une simulation aux grandes échelles. *Aix-Marseille Univ.*

\***Samir Beneddine** - Caractérisation de comportement instationnaire d'écoulements par analyse de stabilité. *Univ. Paris-Saclay*

**Charlotte Bayeux** - Méthode intégrale pour la couche limite tridimensionnelle - Applications au givrage. *Univ. Toulouse*

## [SNA 2017]

**Isabelle Lagrange Marter** - Méthode d'interface immergée pour la simulation directe de l'atomisation primaire. *Univ. Toulouse*

**Loïc Hervo** - Simulation numérique de l'écoulement d'un mélange air et phase dispersée pour l'allumage d'une chambre de combustion aéronautique via un formalisme Euler Lagrange. *Univ. Toulouse*

**Brijesh Pinto** - Wavelet-based multiscale simulation of incompressible flows. *Univ. Poitiers*

## [MFE 2018]

**Cédric Uribe** - Développement d'une approche ZDES à deux équations de transport et application turbomachines. *Sorbonne Univ.*

\***Rémi Roncen** - Modélisation et identification par inférence bayésienne de matériaux poreux acoustiques en aéronautique. *Univ. Toulouse*

**Sylvain Morilhat** - Modélisation des fluctuations de la pression pariétale d'une couche limite turbulente pour des applications en vibro-acoustique. *Univ. Toulouse*

\***Cécile Ghouila-Houri** - Développement de micro-capteurs de frottement pariétal et de pression pour les mesures en écoulements turbulents et le contrôle de décollement. *Univ. Lille*

**Guillaume Bégou** - Prévion de la transition laminaire-turbulent dans le code elsA par la méthode des paraboles. *Univ. Toulouse*

**Nicolas Bonne** - Stabilité de l'interaction onde de choc/couche limite laminaire. *Univ. Paris-Saclay*

**Loïc Jecker** - Prévion de la transition bypass à l'aide d'un modèle à énergie cinétique laminaire basé sur la dynamique des modes de Klebanoff. *Univ. Toulouse*

**Edoardo Paladini** - Étude de l'instabilité du tremblement transsonique. Évolution depuis des profils bidimensionnels aux voilures tridimensionnelles. *Hesam Univ.*

**Geoffrey Tanguy** - Experimental and aerodynamic studies of convoluted intake ducts. *Univ. Paris-Saclay*

\***Ye-Bonne Koyama Maldonado** - Characterisation and aerodynamic impact of leading-edge vortices on propeller blades. *Univ. Paris-Saclay*

\***Benjamin Godard** - Étude et méthodologies de simulation de doublet entrée d'air - soufflante pour la conception de turbofan de nouvelle génération. CIFRE Safran ONcomputational ERA. *Univ. Toulouse*

**Damien Jallas** - Stabilité d'écoulements de sillages périodiques générés par des ailes battante. *Univ. Paris-Saclay*

**Léopold Shaabani Ardalli** - Stability and optimal control of time-periodic flows - application to a pulsed jet. *Univ. Paris-Saclay*

\***Gabriele Perozzi** - Exploration sécurisée d'un champ aérodynamique par un mini-drone. *Univ. Lille*

## [MAS 2019]

**Jean-Lou Pfister** - Instabilités et optimisation de structures élastiques en interaction avec des écoulements laminaires. *Univ. Paris-Saclay*

## [MFE 2019]

\***Luis Bernardos Barreda** - Modélisation de la transition vers la turbulence d'une couche limite décollée. *Sorbonne Univ.*

**Jeanne Methel** - Étude expérimentale de l'influence de défauts de surface sur la transition laminaire-turbulent d'une couche limite aspirée. *Univ. Toulouse.*

**Étienne Gay** - Coherent interferometric imaging in fluid dynamics. *Univ. Paris-Diderot*

**Lucas Franceschini** - Stratégies de modélisation pour la reconstruction d'écoulements aérodynamiques à partir de mesures partielles. *Univ. Paris-Saclay*

**Julien Lallement** - Modélisation et simulation numérique d'écoulements de films minces avec effet de mouillage partiel. *Univ. Toulouse.*

## [SNA 2019]

**Emanuele Arcese** - Numerical modeling of microwave plasma actuators for aerodynamic flow control. *Univ. Toulouse.*

---

*prix et distinctions aux doctorants*

---

**Samir Beneddine** - prix des doctorants ONERA MFE 2016 [MFE2017]

**Cécile Ghouila-Houri** - 2<sup>nd</sup> price at the student paper competition - Flow Control Conference AIAA 2018 ; prix de thèse 2019 de la Fédération de Recherche CNRS Transports Terrestres et Mobilité [MFE 2018]

**Ye-Bonne Koyama Maldonado** - Prix de la meilleure communication - ODAS 2017 [MFE 2018]

**Rémi Roncen** Prix Denis Maugars ONERA-TsAGI 2018 ; prix de thèse 2019 de la fondation ISAE-Supaéro [MFE 2018]

**Benjamin Godard** - Prix de la meilleure communication - ODAS 2018 [MFE 2018]

**Gabriele Perozzi** - Prix de la créativité de la Fédération de recherche transports Terrestres mobilité 2018 [MFE 2018]

**Luis Bernardos Barreda** - Prix doctorant ONERA MFE 2019 [MFE 2019]

**Jahnavi Kantharaju** - Prix Amelia Earhart 2019, Zonta International [MFE en cours]

*le défi*

Relever ce défi consiste à s'atteler aux objectifs suivants :

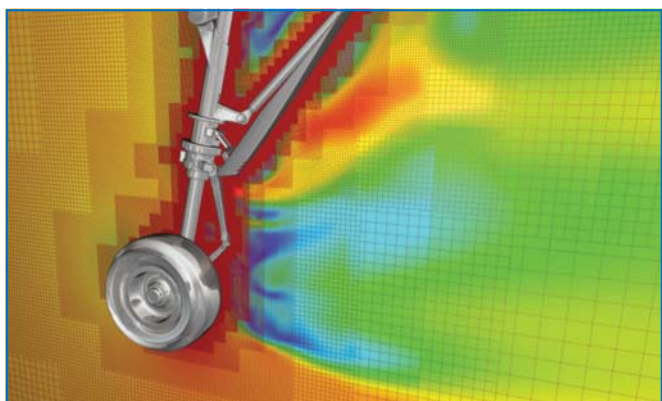
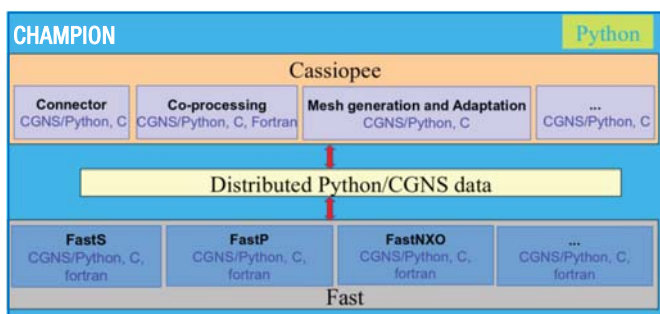
- réaliser des plateformes CFD pour la recherche et l'industrie traitant en stationnaire ou instationnaire des configurations variées multi-échelles impliquant plusieurs types de physique, et intégrant les approches adjointes nécessaires à l'optimisation et l'assimilation ;
- prendre en compte la complexité géométrique avec précision tout en ayant des objectifs de souplesse et d'automatisation dans la réalisation des maillages ;
- maîtriser erreurs et incertitudes pour faire entrer la CFD dans les processus de certification ;
- développer l'hybridation expérience-CFD pour affiner la compréhension des écoulements et compléter les mesures ;
- exploiter au mieux les possibilités du calcul haute performance en maîtrisant les architectures multi-cœurs et leur forte évolutivité.

*les partenariats*

Ces travaux sont menés avec les Universités de Paris-Saclay, Toulouse et Lille, avec le Cerfacs, le Coria, l'Inria, ainsi qu'avec les industriels Safran, Airbus, MBDA.

*le bilan par les projets*

**ODYSSEY** Une offre logicielle ONERA fédérée, lisible et complète pour la simulation numérique de demain



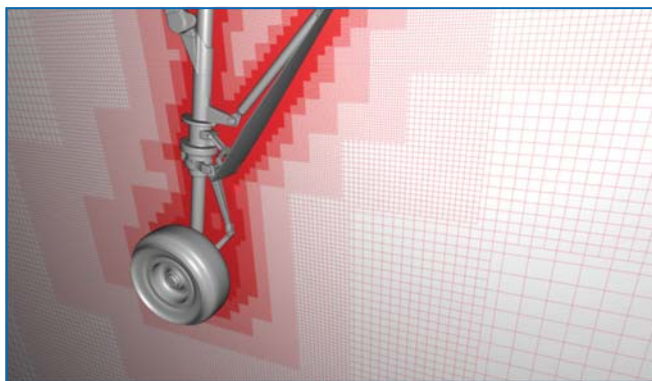
**CHAMPION** Composants HPC pour des simulations multiphysiques interopérables en Python

Si l'on s'en tient aux projets internes, l'aspect plateforme est traité au travers du **PRF ODYSSEY**. La plateforme – ORION – y partage son architecture avec celle de la plateforme Safran MO-SAIC. Les travaux ont démarré en 2019 et il n'est pas encore possible d'en faire un bilan. En 2022, ORION devrait permettre :

- de traiter l'ensemble des physiques impliquées dans les systèmes aérospatiaux ;
- de proposer diverses solutions de couplage entre ses composants ;
- de mutualiser des briques logicielles et des modules de pré et post-traitement ;
- de pouvoir s'interfacer avec des codes extérieurs stratégiques pour l'ONERA.

Le calcul haute performance a fait l'objet du **PRF HPCEDRE** (voir encadré) et du **PRF CHAMPION**. Le premier a porté sur des calculs faisant intervenir plusieurs solveurs numériques et s'est traduit par la simulation d'écoulements à la physique extrêmement complexe comme ceux rencontrés sur le foyer Mascotte (combustion cryogénique) ou dans le banc propulseur ONERA LP6 (combustion de propergol solide et aéro-acoustique).

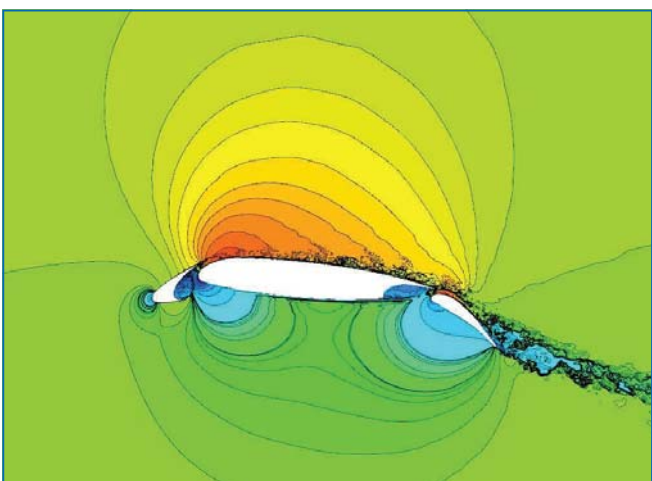
CHAMPION s'est traduit entre autres par de nouvelles techniques de programmation (*cache blocking*, génération de source automatique) permettant à un grand code applicatif comme *elsA* de tirer parti au mieux des possibilités des nouveaux supercalculateurs. Ce PRF a en outre démontré que les modules logiciels Python/CGNS sont bien adaptés au calcul haute performance.



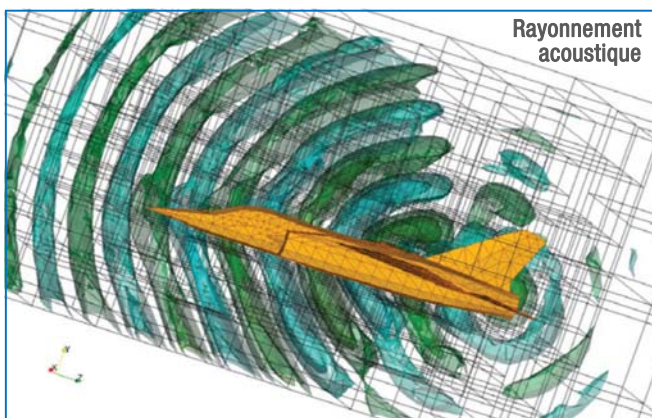
**MEMFIS** Vers une CFD rapide, fiable, avec génération automatique de maillage



**REALITY** Méthodes de haute précision pour la simulation numérique d'écoulements turbulents



**OneLaBZ** Développement des méthodes Lattice-Boltzmann pour les écoulements aéronautiques



**PREVISIO** Visualisation et exploitation rigoureuses des données issues d'un code de haute précision

Le **PR MEMFIS** démarré en 2018 s'intéresse à la méthode des frontières immergées pour traiter les géométries complexes. Les travaux sont capitalisés sous forme modulaire dans la suite logicielle Cassiopée et permettront une génération de maillage plus facile pour les calculs réalisés avec les grands codes applicatifs.

Le **PRF REALITY** démarré en 2017 s'est attaché quant à lui à augmenter le niveau de maturité des méthodes DG (Galerkin discontinu) qui constituent une option pour la montée en ordre des codes CFD. Il a conduit à une importante extension du spectre d'application de ces méthodes ainsi qu'à des travaux d'intégration du code Aghora dans la plate-forme ORION. Le **PR PREVISIO** qui a été consacré à la réalisation d'outils de visualisation précise de résultats fournis par les codes d'ordre élevé en est un bon complément.

Le **PRF OneLaBZ** a permis d'évaluer la méthode LBM (méthode Boltzmann sur réseau) qui se présente comme une solution de substitution à la résolution habituelle des équations de Navier-Stokes. La méthode est très performante pour les écoulements à faible nombre de Mach mais l'est beaucoup moins pour les écoulements rapides. Les progrès réalisés dans le PRF permettent d'envisager d'appliquer la méthode à des configurations complexes du domaine de l'aéronautique.

L'ensemble de ces projets a des besoins importants en termes de mathématiques appliquées et peut dorénavant s'appuyer à cet effet sur le **LMA2S (Laboratoire de mathématiques appliquées à l'aéronautique et au spatial)**, laboratoire sans murs transverse, créé début 2019 au sein de l'ONERA pour rassembler la communauté scientifique répartie dans les différents départements et ainsi apporter une contribution plus efficace aux principaux projets logiciels.

## HPCEDRE Améliorer les performances du code CEDRE vers le massivement parallèle

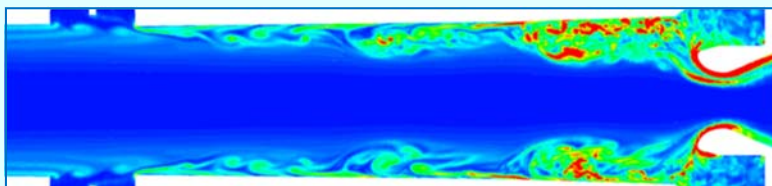
Le code CEDRE voué à l'énergétique et à la propulsion a été utilisé pour la simulation instationnaire d'une flamme cryogénique en conditions subcritiques du foyer Mascotte. La difficulté du calcul est de prendre en compte l'existence simultanée dans l'écoulement d'une phase liquide dense et froide, et d'une phase gazeuse peu dense et chaude, les deux phases pouvant exister en deux points très voisins l'un de l'autre.

Par ailleurs, l'aérodynamique interne d'un propulseur MPS d'Ariane 5 (Moteur à Propergol Solide) a été étudiée sur un maillage d'un milliard de mailles en début de tir et en cours de tir (régression de 6 mm du propergol).

En parallèle, un calcul instationnaire avec un schéma d'ordre 4 en espace prenant en compte le couplage aéroacoustique inhérent à la géométrie de chambre a été réalisé sur le propulseur LP6.



Simulation Mascotte : phase dense (bleu) et spray résultant de l'atomisation du dard liquide (rouge)



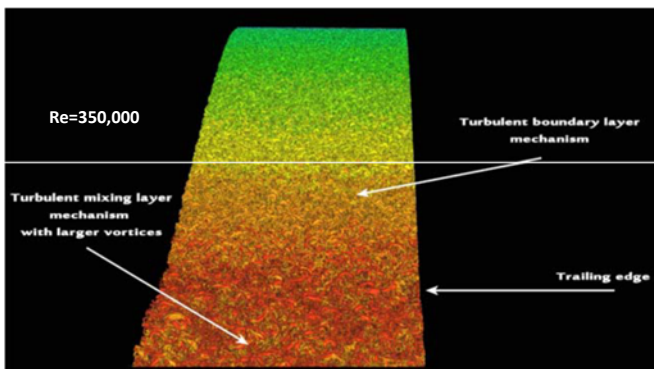
Simulation du propulseur LP6 : vorticitée instantanée de l'écoulement

## au-delà des projets ONERA, des faits marquants

### Aérodynamique | Simulation numérique directe (DNS) de la turbulence en vue de la prévision du décrochage

Une simulation DNS de la couche limite turbulente se développant sur un profil d'aile a été réalisée à l'aide du solveur ONERA HPC FAST et de l'outil de pré et post-traitement ONERA Cassiopée .

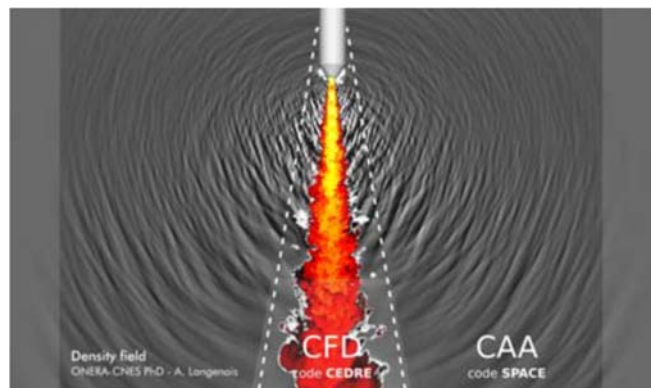
La bonne prévision des phénomènes nécessite de bien initier la turbulence au voisinage du bord d'attaque et de pouvoir résoudre la dynamique des différentes couches limites et du sillage. La transition laminaire/turbulent des couches limites se développant à l'intrados et à l'extrados du profil a été déclenchée à l'aide d'une approche innovante développée à l'ONERA (*Journal of Computational Physics, Vol 363, pp 231-255, 2018*) faisant appel à une technique de frontières immergées.



La résolution nécessaire pour capturer numériquement la dynamique de la couche limite turbulente requiert un maillage d'un milliard de points et les grands moyens de calcul de l'ONERA. [DAAA 2018]

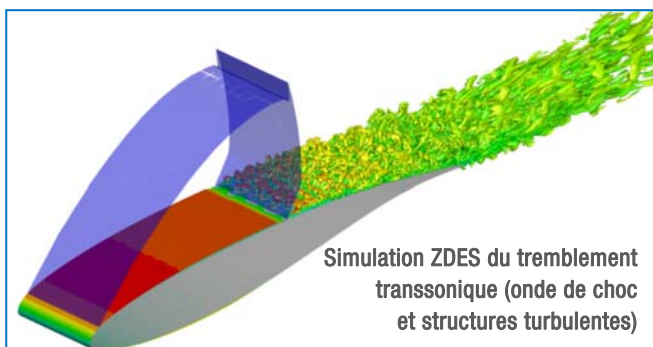
### Lancement spatial | Simulation numérique du bruit de jet

L'ONERA améliore la précision des simulations numériques du bruit généré par les jets des propulseurs spatiaux au décollage. Il a mis en place une méthodologie de couplage fort d'outils avancés – via sa bibliothèque de couplage Cwipi. Ce couplage repose, d'une part sur le logiciel de simulation ONERA CEDRE (CFD) dédié à la simulation du jet turbulent générant les sources acoustiques et à la propagation en champ proche et d'autre part, du logiciel de simulation ONERA SPACE pour la CAA (*Computational AeroA-*



**Calcul intensif | Un nouveau supercalculateur de production**

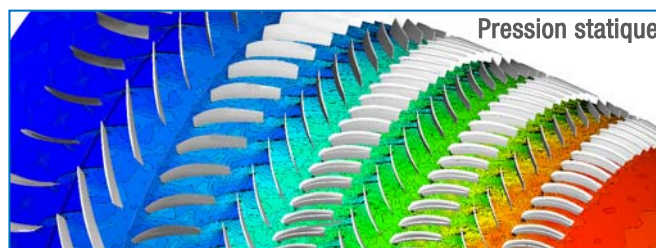
L'équipement, nommé Sator, est un cluster scalaire parallèle de 17 360 cœurs de calcul, fourni par le constructeur japonais NEC. Sa performance « crête » est de 667 Tflops et sa performance Linpack est de 579 Tflops, offrant à l'ONERA un retour dans le classement mondial Top 500 HPC. La machine comporte une partie refroidie classiquement par circulation d'air ambiant dans les baies et une partie comportant des éléments alimentés en eau glacée et permettant de refroidir l'air au plus près des équipements informatiques. [DSI 2017]

**Aérodynamique | L'ONERA en pointe sur l'automatisation des approches RANS/LES pour les applications complexes**

La robustesse des méthodes hybrides RANS/LES représente un enjeu majeur pour leur utilisation automatique dans un contexte applicatif sur des maillages toujours plus fins, et la recherche d'une solution satisfaisante mobilise la communauté scientifique internationale depuis plusieurs années. L'ONERA a ainsi développé une méthode originale dans le cadre de son approche ZDES mode 2 qui n'est pas mise en défaut sur des maillages fins – la protection RANS des couches limites attachées est assurée dans tous les cas. Cette nouvelle méthode permet des avancées dans la simulation des interactions onde de choc/couche limite (prises d'air supersoniques, tremblement transsonique des voilures d'avions...). [DAAA 2019]

**Turbomachines | Très belles performances du logiciel elsA**

Des simulations d'écoulements dans des compresseurs axiaux ont pu être effectuées avec le logiciel elsA dans des maillages de 2 milliards de points en seulement 9h de temps CPU, en utilisant 5456 processeurs du supercalculateur Sator. Ces très bonnes performances proviennent de progrès importants sur la convergence des méthodes numériques grâce à des travaux sur la phase implicite (retombées du PRF REALITY), de travaux d'optimisation CPU sur les processeurs multi-cœurs les plus récents (retombées du PRF CHAMPION) ainsi que d'une scalabilité forte du logiciel. En outre, l'ensemble de la chaîne de simulation, incluant le pré et le post-traitement, a été exécutée sur architectures parallèles distribuées. Ces simulations menées sur les neuf roues complètes (« à 360° ») permettent une compréhension approfondie de l'écoulement dans un compresseur axial. [DAAA 2019]

*les thèses soutenues*

\* : renvoie à la rubrique « prix et distinctions aux doctorants »

[MFE 2016]

**Bruno Maugars** - Méthodes de volumes finis d'ordre élevé en maillages non coïncidents pour écoulements dans les turbomachines. *Hesam Univ.*

**Khalil Haddaoui** - Méthodes numériques de haute précision et calcul scientifique pour le couplage de modèles hyperboliques. *Sorbonne Univ.*

**Asma Toumi** - Méthode numérique asynchrone pour la modélisation de phénomènes multiéchelles. *Univ. Toulouse*

**Matthieu Soismier** - Stratégie de résolution hybride structurée / non structurée pour la simulation d'effets technologiques en turbomachines. *Univ. Grenoble Alpes*

[MFE 2017]

\***Fernando La Puente Cerezo** - Simulations aéroacoustiques de trains d'atterrissage en approche ZDES et maillage non-structuré. *Sorbonne Univ.*

[MFE 2018]

**Romain Alis** - Simulation numérique directe de gouttes et de groupes de gouttes qui s'évaporent dans un écoulement laminaire ou turbulent. *Univ. Toulouse*

[SNA 2018]

\***Ilias Petropoulos** - Study of high-order vorticity confinement schemes. *Hesam Univ.*

**Tobias Horstmann** - Méthodes numériques hybrides basées sur une approche Boltzmann sur réseau en vue de l'application aux maillages non-uniformes. *Univ. Lyon*

[MFE 2019]

**Fabrizio Di Donfrancesco** - Reduced Order Models of the Navier-Stokes equations for aeroelasticity. *Sorbonne Univ.*

[SNA 2019]

**Matthieu Maunoury** - Reduced Order Models of the Navier-Stokes equations for aeroelasticity. *Sorbonne Univ.*



**\*Adrien Langenais** - Adaptation des méthodes et outils aéro-acoustiques pour les jets en interaction dans le cadre des lanceurs spatiaux. *Univ. Lyon*

**\*Fabio Naddei** - Simulation adaptative des grandes échelles d'écoulements turbulents fondée sur une méthode Galerkin discontinue. *Univ. Paris-Saclay*

---

*prix et distinctions aux doctorants*

---

**Fernando de la Puente Cerezo** Prix du meilleur jeune chercheur AIAA BANC-IV Workshop, Lyon [MFE 2017]

**Ilias Petropoulos** *Young CFD investigator award* - ICCFD9, 2016, Istanbul [SNA 2018]

**Fabio Naddei** Prix doctorant ONERA SNA 2019 [SNA 2019]

**Adrien Langenais** Prix jeune chercheur CNES 2017 ; *Most artistic flow visualization animation* - congrès d'aéroacoustique de l'AIAA, 2017 [SNA 2019]

# défi 6

## Matériaux aérospatiaux stratégiques Développer des matériaux stratégiques pour l'aérospatial

### le défi

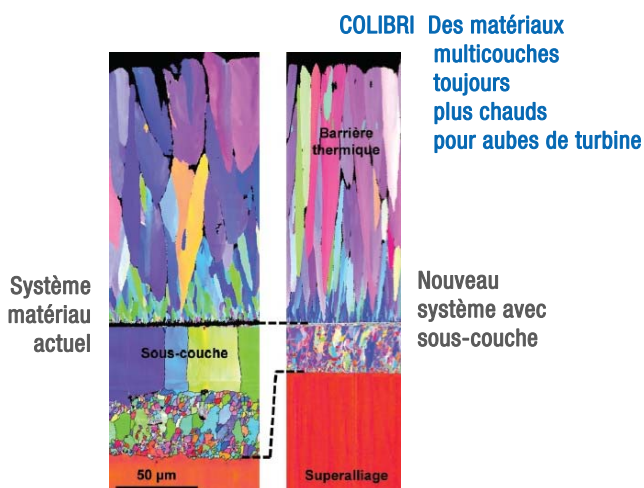
Le développement de matériaux stratégiques pour l'aérospatial est un défi qui demande :

- que l'ONERA soit partie prenante du développement, de la caractérisation et de la modélisation de matériaux à faible densité résistant à très hautes températures, de matériaux pouvant jouer le rôle de protection thermique dans les moteurs d'avion ou de fusée, ainsi que de matériaux et méta-matériaux innovants multifonctionnels associant plusieurs propriétés physiques comme par exemple la résistance mécanique et l'absorption acoustique ;
- que l'ONERA puisse concevoir et maîtriser les outils de modélisation multi-échelle et multi-physique des matériaux en environnements complexes ;
- qu'un socle de compétences interdisciplinaires et expérimentales soit mis en place en vue de concevoir et réaliser des nanostructures et nanomatériaux dont les propriétés à l'échelle du nanomètre ouvrent des perspectives inédites ;
- que le dialogue simulation-expérimentation soit renforcé pour accélérer le développement de matériaux innovants.

### les partenariats

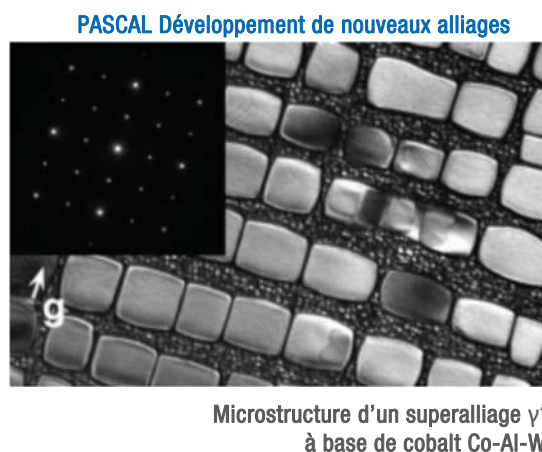
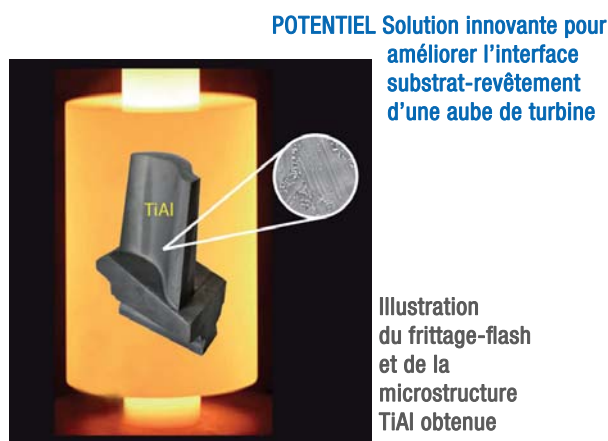
L'ONERA a établi de nombreux partenariats académiques en France et à l'international. On peut citer au niveau européen les partenariats réalisés par l'intermédiaire du Flagship Graphene. Les partenaires industriels et étatiques sont nombreux : Safran, Dassault Aviation, MBDA, Thales, Naval Group, CNES, IRTs, Cetim.

### le bilan par les projets



Des solutions de protection thermique des aubes de turbine et des parties chaudes de moteur ont été proposées dans les **PR COLIBRI** (terminé) et **PR POTENTIEL** (fin en 2019). COLIBRI a proposé de nouvelles nuances de couches de liaison permettant d'assurer une meilleure tenue que les systèmes existants entre la barrière thermique et le substrat métallique à protéger. POTENTIEL s'est intéressé à la caractérisation des phénomènes d'interdiffusion entre le matériau protecteur et le matériau à protéger en évaluant expérimentalement les effets en termes de propriétés mécaniques, de tenue à l'oxydation et de vieillissement.

Le **PR PASCAL** (fin en 2019) s'est intéressé à la métallurgie des poudres comme voie d'élaboration de superalliages base cobalt et d'alliages TiAl pouvant être utilisés dans les parties chaudes de moteurs d'avion.



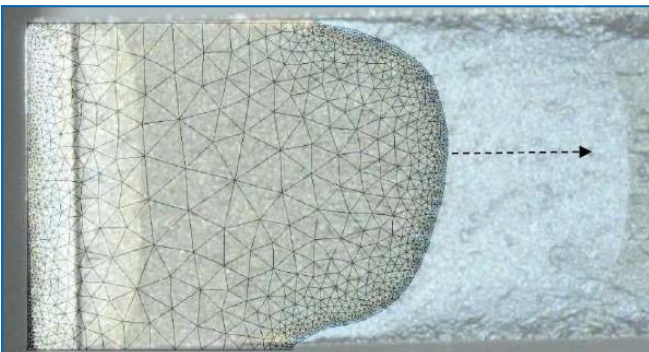
**MODERNE** Optimiser la chaîne de calcul de la durée de vie d'une structure



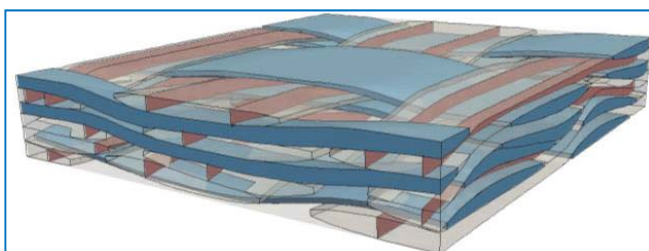
**MATRIS 3D** Nouvelles méthodologies de conception, matériaux et procédé en impression 3D



**MEANDRES** Maîtriser la fissuration des disques de turbine pour la sécurité



**PREMECO** Nouvelles approches pour la prévision de l'endommagement des composites



Observation multi-échelles des endommagements

Le **PR MODERNE** (fin en 2019) s'attache à prendre en compte l'impact de la microstructure des matériaux métalliques, et son évolution, sur les lois de comportement élasto-viscoplastiques. Il s'agit en particulier de modéliser l'évolution géométrique des précipités  $\gamma'$  dans un superalliage monocristallin base nickel soumis à un chargement thermo-mécanique sévère, tel que rencontré dans les parties chaudes des turbomachines, et de prendre en compte la taille des grains et des précipités secondaires dans le comportement non linéaire d'un superalliage polycristallin base nickel.

Le **PRF MATRIS3D** (fin en 2020) s'intéresse à la caractérisation du procédé de fabrication additive LBM et à l'analyse des pièces issues de ce procédé. Un des buts de ce projet est de comprendre l'impact du procédé sur la microstructure du matériau et d'analyser la tenue en fatigue d'éprouvettes et de structures élaborées en fabrication additive en comparant les résultats des essais avec ceux obtenus par une voie d'élaboration classique.

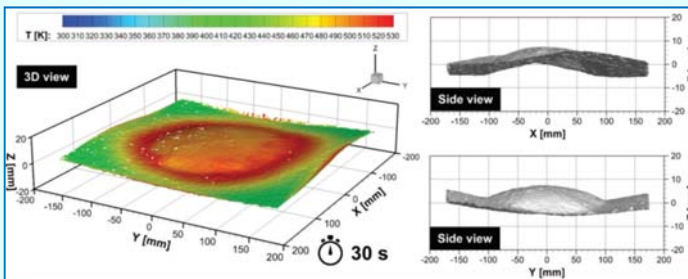
Le **PR MEANDRES** (fini en 2019) est dédié au développement d'outils numériques et expérimentaux afin d'observer et de simuler la propagation de fissure en fatigue avec temps de maintien dans un superalliage base nickel. Ce PR s'attache en particulier à bien prédire les anomalies de propagation de fissures observées expérimentalement, telles que les courbures de front et les déversements. Les essais de propagation de fissures entrepris dans ce PR sont multi-instrumentés en combinant la méthode du potentiel, l'émission acoustique et la corrélation d'images afin de bien mesurer la position de la pointe de fissure. Ces outils sont intégrés dans la plateforme *escale* développée dans le cadre du PRF MECHANICS terminé en 2017.

Le **PR PREMECO** (terminé) a fait progresser la modélisation multi-échelles de l'endommagement dans les matériaux composites tissés, notamment grâce à des méthodes d'observation expérimentales des défauts, et à leurs évolutions, aux différentes échelles (fibre, matrice, torons, nappes). Le **PRF THERMO SOLEX** (voir encadré) s'est traduit par le développement d'un outil basé sur la thermographie infrarouge pour l'analyse de matériaux soumis à des sollicitations complexes.

## THERMOSOLEX Mesures et analyses par thermographie infrarouge jusqu'aux sollicitations complexes

Ce PRF a atteint deux objectifs :

- le développement d'une technique de mesure par thermographie infrarouge ayant un caractère quantitatif grâce à l'augmentation de la résolution spatiale des caméras et la prise en compte des variations d'émissivité angulaire sur des structures complexes
- le développement d'un outil de thermographie lagrangienne qui permet la réalisation de bilans énergétiques locaux pour la caractérisation de la réponse d'un matériau sous charge. Ce développement fait appel à des méthodes de caractérisation d'images développées dans le cadre d'un PRF précédent (MECHANICS). Grâce à cet outil, une meilleure connaissance de l'endommagement sous charges mécaniques est possible.



Suivi de la forme d'une plaque composite soumise au feu. Collaboration entre THERMOSOLEX et la convention ONERA/DGAC PhyFIRE

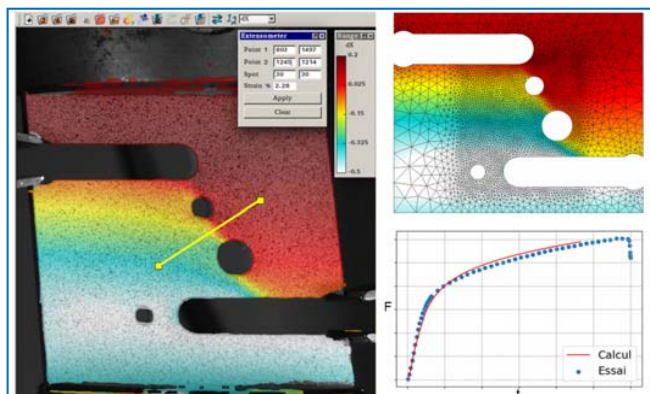


## au-delà des projets ONERA, des faits marquants

### Matériaux | Franc succès des journées MAFUSI co-organisées par la DGA et l'ONERA

Ces 4<sup>es</sup> journées thématiques « Matériaux furtifs et structures intelligentes » ont accueilli à l'ONERA plus de 250 personnes – industriels (Dassault Aviation, MBDA, Naval Group, Safran), DGA, centres de recherche (CEA, Cetim, ONERA), laboratoires universitaires... Ces trois journées ont porté sur : le contrôle santé des structures et la fabrication additive ; la furtivité radar, optique (visible et infrarouge), acoustique ; les fenêtres. [DMAS 2017]

### Mécanique du solide | *escale* plateforme de dialogue calcul-essai



Trois résultats obtenus grâce à *escale* :

- champ de déplacement mesuré (Folki-D)
- calcul Zset/Zebulon mené avec les conditions limites mesurées
- courbe force-temps obtenue à partir du modèle vs expérience

Une journée scientifique a clôturé le projet de recherche ONERA MECHANICS, dont l'objectif était de développer une plateforme de dia-

logue essai-calcul pérenne intégrant des éléments de modélisation phénoménologiques et physiques, ainsi que des données expérimentales de sources différentes pour l'analyse d'images.

Cette plateforme – *escale* – a été validée sur des cas représentatifs, notamment pour l'identification des propriétés matériaux. *escale* est désormais disponible pour une meilleure analyse des essais complexes en mécanique du solide et a déjà été valorisée pour plusieurs campagnes expérimentales. Les premières briques d'*escale* permettent le pilotage d'essais, au travers de la plateforme, par une grandeur issue de l'analyse d'images et/ou du modèle. [DMAS 2018]

### Matériaux | Acquisition d'une nouvelle machine de frittage « SPS »

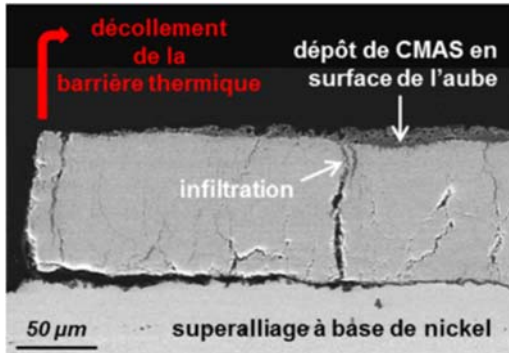
Une machine de frittage assisté par courant électrique (*Field Assisted Sintering Technique*) est en cours d'installation à l'ONERA Palaiseau. Ses capacités de 40 kA et 250 t permettant de réaliser des pièces de 20 mm à 300 mm, en font une machine quasi unique en France. Ce système permet de chauffer des pièces (métaux, céramiques...) rapidement et jusqu'à de très hautes températures (2 500 °C). Il permettra ainsi d'obtenir des pièces denses de matériaux ultraréfractaires tout en conservant une microstructure fine. [DMAS 2018]

### Matériaux haute température | Un banc à gradient thermique de paroi particulièrement innovant

L'ONERA a conçu un banc de laboratoire à gradient thermique de paroi contrôlé avec injection de CMAS (Calcium-Magnesium-AluminoSilicate), permettant d'accéder en environnement sévère à une meilleure compréhension des mécanismes de dégradation des aubes, qui sont situées dans les parties les plus chaudes des moteurs. Ce banc se démarque des autres moyens d'essais disponibles en France par l'utilisation d'un laser de puissance comme

mode de chauffage et la possibilité d'injection de polluants (sable, cendres volcaniques...).

La régulation contrôlée des températures de surface et d'interface assure la réalisation de cycles avec des transitoires thermiques rapides, caractéristiques des conditions en service. Sur la base de ce moyen de laboratoire, un dispositif à caractère industriel pourrait être développé pour des campagnes de caractérisations en vue de la sélection de nouveaux matériaux hautes températures. [DMAS 2019]



Écaillage de la barrière thermique d'une aube de turbine HP ayant volé en environnement sableux

### Fabrication additive | Élaboration de premiers murs en céramique eutectique

L'ONERA et Irepa-Laser ont exploré la faisabilité de l'élaboration de pièces céramiques denses en une seule étape via le procédé de fabrication additive CLAD. Le couplage de l'énergie laser avec l'absorption des céramiques, la mise en forme des poudres pour un acheminement optimal dans le système jusqu'au dépôt et les gradients thermiques à l'origine de la fissuration des pièces en sont autant de paramètres délicats à maîtriser.

Dans ce contexte, l'élaboration de premiers murs en céramique eutectique, dont la structure nanométrique permet l'optimisation des propriétés de ténacité et de dureté, constitue une vraie réussite. L'intérêt de la fabrication additive pour élaborer des pièces à structure géométrique complexe en polymères ou en métaux est avéré et l'optimisation à venir du procédé CLAD, pour la fabrication de pièces de grandes tailles, à géométrie complexe et constituées de plusieurs composés, est une perspective prometteuse ouvrant un large champ d'applications.

Ces travaux ont été réalisés dans le cadre du projet inter-instituts Carnot Cladiator. [DMAS 2019]



### Physique des matériaux | Vers la simulation rapide du comportement des matériaux grâce aux champs de phase

L'ONERA a acquis depuis de nombreuses années une expertise forte et une reconnaissance internationale dans le développement de la méthode des champs de phase, permettant la prévision du comportement des matériaux à partir de la connaissance de leurs caractéristiques microstructurales. Cette méthode consiste à introduire une série de champs représentant les propriétés matérielles d'intérêt, telles que densité, concentrations atomiques, structure cristalline, déformation mécanique, endommagement...

L'ONERA vient de proposer une nouvelle formulation, nommée S-PFM pour *Sharp Phase Field Method*. Afin de coupler la S-PFM à des champs élastiques, un nouveau solveur mécanique a été développé. Mathématiquement stable, il permet de traiter efficacement de fortes hétérogénéités structurelles et élastiques. Globalement, la S-PFM permet de multiplier par un ordre de grandeur les dimensions linéaires accessibles ou, corrélativement, de diviser les temps de calcul par trois ordres de grandeur. [DMAS 2019]

### Matériaux chauds | Nouveau système matériau pour aube de turbine HP (AGATHE)

Financé par Safran Aircraft Engines, le projet AGATHE s'inscrit dans le cadre du marché DGA TURENNE qui vise à développer les technologies nécessaires aux turbines de nouvelle génération des moteurs d'avion d'arme du futur.

L'ONERA propose six nouvelles nuances monocristallines de superalliage à base de nickel performantes mécaniquement à très haute température et résistantes à l'environnement, ainsi que de nouvelles couches de liaison métalliques, et un ensemble de nouvelles compositions de barrière thermique à faible conductivité thermique et résistantes aux dépôts polluants CMAS et autre sable.

Un nouvel alliage, associé à sa couche de liaison spécifique, ainsi qu'une nouvelle composition de barrière thermique, sont d'ores et déjà intégrés dans le nouveau système matériau pour aube de turbine HP de dernière génération qui sera évalué, lors d'essais moteurs dans le cadre d'un nouveau marché DGA. [DMAS 2019]

### Matériaux absorbants acoustiques | Un prototype de liner plus efficace

L'efficacité d'un prototype de liner acoustique conçu par l'ONERA, dans le cadre du projet CleanSky2 IDEAS, a été démontrée expérimentalement sur le banc d'essai de Liebherr Aerospace : une atténuation acoustique sur une très large bande de fréquence a été obtenue, ce qui permet une réduction significative du bruit émis par la « trompe à air » développée par l'industriel pour ses systèmes de conditionnement d'air. Ce dispositif innovant est en effet un système bruyant dans une large gamme de fréquence et l'atténuation efficace du bruit qu'elle émet est un prérequis à son utilisation sur les avions commerciaux.



Cette campagne expérimentale est l'aboutissement de trois années de travaux des équipes de l'ONERA, en lien avec les industriels : caractérisation des sources de bruit, conception d'un matériau absorbant acoustique respectant le cahier des charges industriel, simulation numérique et essai d'un prototype. Elle démontre les capacités et savoir faire de l'ONERA pour la détection modale et la de nouveaux matériaux acoustiques. [DMPE 2019]

### Moteurs du futur | Des matériaux transpirants pour les chambres de combustion

L'ONERA a conçu et caractérisé des matériaux poreux obtenus par fabrication additive (EBM – *Electron Beam Melting*) destinés aux chambres de combustion aéronautiques, en remplacement des parois multi-perforées. Les essais aérothermiques conduits à

l'ONERA ont démontré une amélioration de l'efficacité de refroidissement en zone d'attaque.

Les perspectives de ces travaux pourraient être une élaboration des matériaux par LBM – *Laser Beam Melting* avec l'avantage d'une plus grande finesse des architectures poreuses engendrant une surface d'échange accrue et donc un refroidissement plus efficace. Ce projet – MOSART – est un projet phare de l'ANR (financement DGA (ASTRID), mené avec Safran, SIMaP et Sinter-Tech PORAL®). [DMAS 2019]

### Matériaux haute température | Mesures de champs de déplacement par corrélation d'images numériques (CIN)

Les conditions de températures extrêmes (au-delà de 1500°C) auxquelles sont soumis les matériaux développés pour les missiles

ou les chambres de combustion nécessitent une caractérisation dans des environnements représentatifs. L'accès à des mesures de champs, indispensable à une meilleure compréhension des sollicitations, reste dans ces cas-là un challenge majeur.

La prise en compte des propriétés thermo-optiques des matériaux et le développement d'algorithmes permettant la correction d'images acquises lors d'essais réalisés sur un banc laser de l'ONERA ont permis d'obtenir des mesures de champs robustes en détectant la propagation d'une fissure à ces très hautes températures. Un tel résultat n'avait pas encore été obtenu à ce jour. [DMAS 2019]

## les thèses soutenues

\* : renvoie à la rubrique « prix et distinctions aux doctorants »

[MAS 2016]

**Vincent Popie** - Modélisation asymptotique de la réponse acoustique de plaques perforées dans un cadre linéaire avec étude des effets visqueux. *Univ. Toulouse*

**Ahmed Ghedjatti** - Étude structurale des nanotubes de carbone double parois par microscopie électronique en transmission haute-résolution et absorption optique. *Sorbonne Univ.*

**Pierre-Louis Valdenaire** - Plasticité cristalline : équations de transport et densités de dislocations. *Sorbonne Univ.*

**Amélie Morençais** - Effet du grenailage sur la durée de vie des aubes monocristallines de turbine. *Univ. Troyes*

**Luc Andrea** - Modélisation du transport thermique dans des matériaux thermoélectriques. *Sorbonne Univ.*

**Mikael Planes** - Amélioration de la stabilité du polydiméthylsiloxane en environnement géostationnaire. *Univ. Bordeaux*

[MAS 2017]

**Vincent Guérineau** - Mécanismes et cinétiques d'oxydation de matériaux ultraréfractaires sous conditions extrêmes. *Sorbonne Univ.*

**Laurence Sikorav** - Évaluation du système Nb-Ti-Al + Si : Influence de la composition chimique et du dopage au silicium sur les transformations de phase. *Sorbonne Univ.*

**Laurent Korzeczek** - Modélisation mésoscopique en 3D par le modèle Discret-Continu de la stabilité des fissures courtes dans les métaux CFC. *Univ. Paris-Saclay*

**Léonard Schué** - Propriétés optiques et structurales du nitrure de bore en hybridation  $sp^2$  : des cristaux massifs aux feuillets atomiques. *Univ. Paris-Saclay*

[MAS 2018]

**François Perrudin** - Etude de la dissolution de diverses terres rares dans des liquides silicatés (CMAS) de composition variable – Contribution au développement des barrières thermiques en  $ZrO_2-RE_2O_3$  (RE = La-Lu). *Univ. de Lorraine*.

**\*Vincent Tabouret** - Recherche et élaboration de nouveaux matériaux pour les applications laser non linéaires du moyen infrarouge. *Sorbonne Univ.*

**Chengjie Lu** - Mécanismes de brasage de la céramique  $Ti_2AlC$  utilisant un alliage d'apport à base de nickel. *Sorbonne Univ.*

**\*Carolina Baruffi** - Application d'une dynamique de Langevin sur -amortie pour l'étude des évolutions microstructurales dans les matériaux cristallins. *Univ. Paris-Saclay*

**Hocine Lebdat** - Modélisation de la croissance des structures de Widmanstätten par la méthode des champs de phase. *Sorbonne Univ.*

**Ouafi Mouhoub** - Propriétés structurales et électroniques du graphène, du nitrure de bore hexagonal et de leurs hétérostructures. *Sorbonne Univ.*

**\*Gader Altinkurt** - Apport de la microdiffraction Laue pour la détermination des contraintes internes dans un superalliage à base de nickel grenailé : effets de la microstructure et des traitements thermomécaniques. *Univ. de Lorraine*

**\*\*Florian Monteghetti** - Analysis and discretization of time-domain impedance boundary conditions in aeroacoustics. *Univ. Toulouse*

[MAS 2019]

**Jérémie Derré** - Conception vibro-acoustique de panneaux composites intégrant des structures fractales. *Univ. Toulouse*

**Julie Odinot** - Développement de la fabrication additive directe par procédé DED-CLAD : de la poudre à la mise en forme de pièces céramiques denses. *Univ. Paris-Saclay*

**Thomas Vaubois** - Étude expérimentale du diagramme de phases du système ternaire Aluminium-Titane-Tungstène. *Univ. Paris-Est*

**Anis Doghri** - Vers une maîtrise de la réparation par le procédé CLAD de pièces aéronautiques en Inconel 738 LC : compréhension des mécanismes de fissuration et modélisations associées. *Univ. Lorraine*

**Matthieu Degeiter** - Etude numérique de la dynamique des défauts d'alignement des précipités  $\gamma'$  dans les superalliages monocristallins à base de nickel. *Univ. Lorraine*

**Maoyuan Jiang** - Exploration des effets de la taille et de la forme des grains sur la plasticité cristalline par simulations de dynamique des dislocations. *Univ. Paris-Saclay*

*prix et distinctions aux doctorants*

---

**Gader Altinkurt** Prix de la meilleure présentation GFAC 2016, Toulouse [MAS 2018]

**Vincent Tabouret** Prix doctorant ONERA MAS 2018 [MAS 2018]

**Florian Monteghetti** Prix doctorant ONERA MFE 2018 ; prix de thèse 2019 de la fondation Isae-Supaéro [MFE 2018]

**Carolina Baruffi** Prix Jacques Dalla Torre 2019 de la SF2M [MAS 2018]

**Virgil Malard** Meilleur poster du Colloque Poudres et Matériaux Frittés 2017, Toulouse [MAS en cours]

**Antoine Lacour-Gogny-Goubert** Prix du meilleur poster ICHEME 2018, UK [MAS en cours]

**Pierre Serrano** Prix poster ArcelorMital, colloque « La métallurgie, quel avenir ! », 2019, Nancy [MAS en cours]

# défi 7

## Des structures aérospatiales plus endurantes

Imaginer des structures aérospatiales plus légères et plus tolérantes à leur environnement

### le défi

Ce défi propose des méthodes novatrices dans le cadre du dimensionnement des structures en les rendant plus performantes, en réduisant les délais d'analyses, tout en assurant un niveau de sécurité maximal et un respect des normes écologiques. Il s'agira donc d'intégrer une forte interaction entre les techniques expérimentales, de modélisation, et numériques. Afin de proposer des simulations plus prédictives, il sera nécessaire de modéliser les structures plongées dans leur environnement, ce qui demandera des couplages forts entre les différentes physiques (fluide/structure/foudre/magnétisme/oxydation/...).

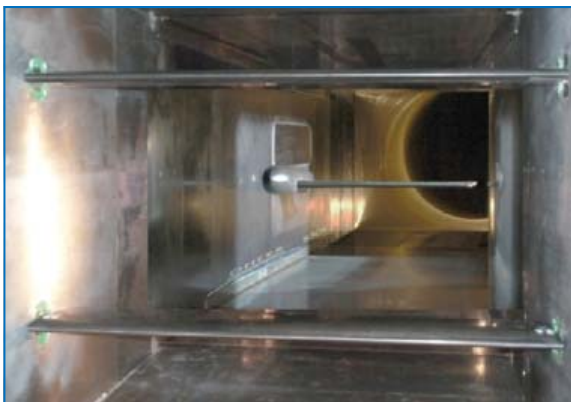
Parmi les nombreux objectifs de ce défi, certains sont déjà en cours de réalisation :

- développer des outils de modélisation et prédiction du comportement des assemblages qui aideront la communauté à concevoir les structures aérospatiales. Cela suppose de prendre en compte les réactions physico-chimiques des matériaux entre eux d'une part et des matériaux avec leur environnement d'autre part. Les outils développés doivent permettre de prédire la durée de vie des structures tout en donnant des pistes de réduction de masse et de coûts de maintenance ;
- identifier, étudier et valider les concepts structuraux du futur. Il faut intégrer à ces concepts des solutions innovantes comme le contrôle santé, les structures hybrides fonctionnelles, des actionneurs intégrés et des matériaux architecturés ou à gradient ;
- étudier les structures dans leur environnement naturel comportant souvent un côté agressif lié à des sollicitations mécaniques, thermiques, voire chimiques ;
- réévaluer le risque de foudre avec l'emploi de plus en plus répandu des matériaux composites et proposer des solutions pour le réduire.

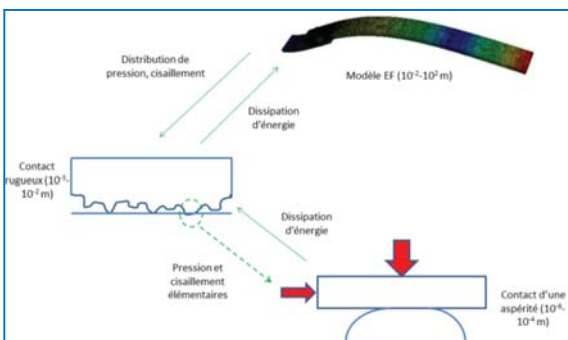
### les partenariats

Principaux industriels du secteur aérospatial : Airbus Group, Alstom, Dassault Aviation, Naval Group, Safran, Thales. Également en lien avec la DGA, l'École polytechnique, l'ENSTA, l'IRT Saint-Exupéry.

### le bilan par les projets



**CARACAL** Mieux prédire et réduire les charges sur des voilures flexibles



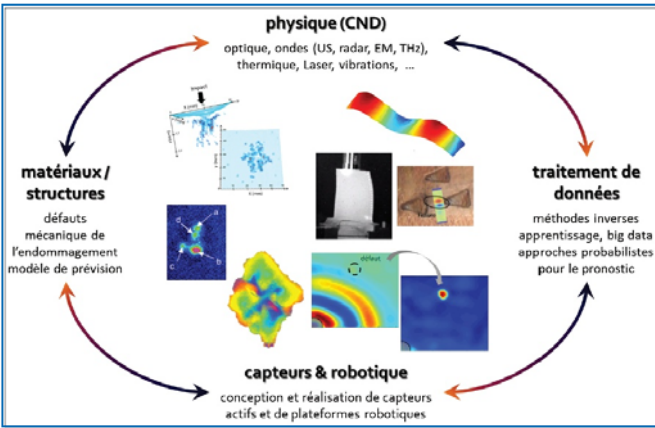
**LASA** Modéliser et identifier l'amortissement induit par le frottement par micro-glisserment au niveau des liaisons

Le **PR ARTIST** (voir encadré) a conduit au développement d'un environnement informatique *elsAMSC NASTRAN* pour l'étude du couplage aéro-élastique sur des structures ayant un comportement non linéaire. Une approche impulsionnelle pour l'analyse de flottement des structures aéronautiques, ainsi que des modèles réduits de déformation de structure non linéaires ont également été mis au point.

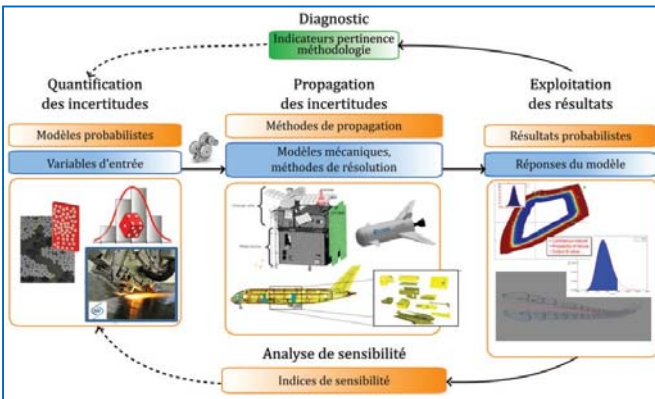
Des travaux sur le même thème se poursuivent dans le cadre du **PR CARACAL** lancé en 2018. En plus du volet numérique, ce dernier comporte un volet expérimental consistant à générer des rafales sur une maquette issue d'un processus de conception aéro-élastique installée dans la soufflerie S3Ch (Meudon).

Le **PR LASA** propose à partir de la description des mécanismes de contact à l'échelle microscopique une modélisation de la dissipation des liaisons à l'échelle de la dynamique des structures. Cette approche est validée par des essais qui se sont traduits par la réalisation d'une base de données sur les liaisons élémentaires.





**CADENCE** Vers un contrôle non destructif intelligent pour une maintenance optimisée

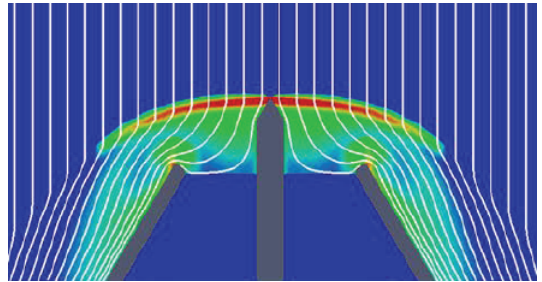


**PRINCAST** Intégrer les incertitudes provenant des données d'entrée

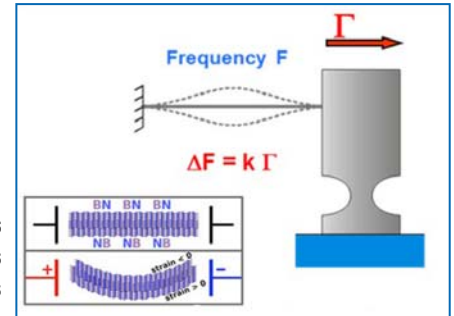
La caractérisation des défauts dans les structures aéronautiques et la prise en compte des incertitudes dans le calcul sont traitées dans les **PRF CADENCE** et **PR PRINCAST** (démarrage 2019).

Le **PR TARANIS** (fin en 2019) a conduit au développement d'un outil permettant de simuler l'impact de la foudre sur un matériau aéronautique. La protection foudre est traitée par le **PRF NANO2D** (fin prévue en 2020) intégré dans le défi 12. Ce PRF a pour objet l'étude des cristaux 2D (dont le graphène) ayant des propriétés physiques particulières, notamment une conductivité électrique élevée.

**TARANIS** Code de calcul unifié pour la foudre et les plasmas



**NANO2D** Les cristaux 2D pour les applications aérospatiales du futur

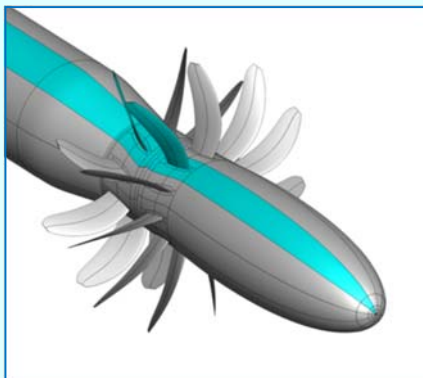


**ARTIST** Prévoir le comportement des structures souples dans leur environnement

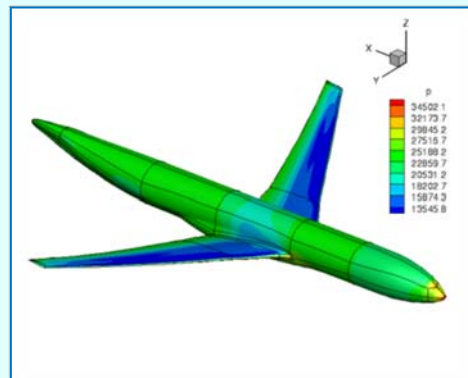
Ce PR a notamment consisté au développement d'outils numériques :

- couplage elsA/MSC NASTRAN pour simulation d'effets aéro-élastiques non linéaires
- développement de l'approche impulsionnelle pour l'analyse de flottements des structures d'avion

- développement et validation de l'outil de déformation de maillage Quantum
- développement de modèles réduits de déformation de structures non linéaires
- démonstration de couplages aéro-élastiques avec elsA



Evaluation des formes à chaud de pale de CROR AIPX7 avec nonlinéarités en grands déplacements



Analyse du flottement de modèle d'avion civil par méthode impulsionnelle

*au-delà des projets ONERA, des faits marquants***Contrôle non destructif | Détection de microfissures par thermographie laser**

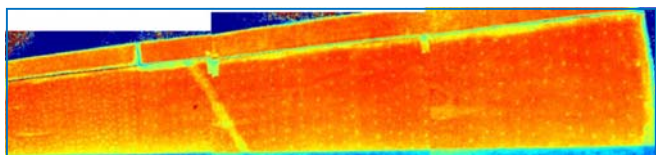
Des microfissures, observables par microscopie électronique à balayage, mais non détectables par les moyens conventionnels de contrôle non destructif ont été révélées par thermographie laser. Le principe consiste à détecter au moyen d'une caméra infrarouge le gradient thermique localement induit par une fissure dans un matériau balayé par un faisceau laser. Ce résultat constitue une avancée majeure en matière de détection de défauts dans les structures. [DMAS 2018]

**Inspection non destructive | 1<sup>re</sup> campagne d'essais en vol du démonstrateur Eole**

Cette campagne a mis en œuvre le démonstrateur Eole de système de lancement aéroporté, développé initialement par l'ONERA et le CNES pour le projet Perseus, portant une maquette instrumentée de lanceur Altair (projet H2020 piloté par l'ONERA).



A l'issue de ces essais, une équipe ONERA de spécialistes de l'inspection non destructive (NDI) est intervenue pour faire passer un « check-up grandeur nature » au porteur Eole. En deux jours, l'équipe a pu appliquer en conditions opérationnelles sa technique de thermographie IR impulsionnelle et validé la robustesse, la rapidité et l'automatisation de ses outils de traitement. L'ONERA renforce à cette occasion son positionnement pour les projets européens à venir. Cette technique NDI représente une opportunité majeure pour le contrôle des parties composites des lanceurs réutilisables. [DMAS, DTIS 2018]



L'inspection non destructive par thermographie IR impulsionnelle – technique inventée à l'ONERA – valide l'intégrité de l'aile d'Éole.

**Valorisation | De la science ONERA dans un logiciel d'optimisation de fabrication de thermoplastiques**

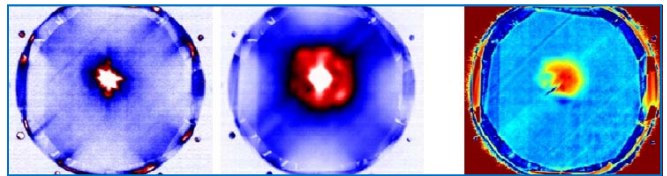
En matière de matériaux et structures, l'ONERA participe au développement de plusieurs logiciels scientifiques. Citons la suite Z-set (ZeBuLoN, Z-cracks, etc.) et Europlexus.

Il réalise de nombreux développements de logiciels métier autour de codes industriels comme Abaqus, MSC Nastran ou la suite Hyperworks d'Altair. Le dernier né des logiciels co-développés par l'ONERA – dans le domaine dédié à l'optimisation des structures composites stratifiées – est le logiciel Cetim QSD®. Il est le fruit de plusieurs années de recherche commune entre l'ONERA et le CETIM, autour du procédé QSP. Ce logiciel est intégré dans la suite logicielle Hyperworks. [DMAS 2019]

**Composites | Suivi et contrôle in situ par thermographie infrarouge d'un impact foudre**

La mise en œuvre de la thermographie IR sur le banc foudre Griffon de l'ONERA permet : de suivre la propagation de la chaleur due à l'arc électrique dans le composite, afin de mieux comprendre et modéliser l'interaction entre la foudre et le matériau ; d'effectuer un contrôle non-destructif aussitôt après le foudroiement, afin d'établir un diagnostic santé du matériau composite

La confrontation entre les cartographies thermiques acquises en temps réel et en inspection post-foudroiement permet d'identifier les mécanismes d'endommagement à cœur du composite (travaux dans le cadre de la convention DGAC PHYLIGHT et du projet ONERA THERMOSOLEX. [DPHY 2017]



Suivi thermique in situ : cartographies à 1s et 5s après l'arc électrique

Contrôle in situ par thermographie flash après essai foudre

**Procédés | Deux nouveaux moyens d'élaboration de pièces**

Un autoclave (pour composites à matrices organiques thermodurcissables et à matrices céramiques, thermoplastiques et géopolymères) et une machine d'impression 3D (composite à fibres de carbone continues) ont été récemment acquis. Ils s'inscrivent au cœur des axes de recherche stratégiques de l'ONERA dans le domaine des matériaux composites : maîtrise des procédés d'élaboration de nouveaux matériaux et prévision de la nocivité des défauts initiaux sur la tenue mécanique des pièces. [DMAS 2019]

**Dynamique rapide | Un protocole d'essais de perforation plus performant**

Une campagne d'impacts, menée avec le DLR sur les bancs de test de l'ONERA Lille (projet Cleansky2-ADEC), a démontré l'intérêt et la robustesse du nouveau protocole expérimental développé par l'ONERA permettant de réduire significativement le nombre d'essais nécessaires à la détermination de la limite de perforation d'une structure. L'utilisation de la stéréo-corrélation sur la face opposée à l'impact permet de déterminer rapidement et efficacement cette limite. Ces travaux serviront à valider les modèles développés par l'ONERA et le DLR à travers lequel ils étudient les performances de nouveaux concepts matériaux et structuraux. [DMAS 2019]



Une bille rigide impacte la face opposée à la mesure ; un mouche-tis a été appliqué sur la plaque afin de mesurer ses déplacements mais également sur la bille ce qui permet d'évaluer sa vitesse résiduelle après perforation

**Soufflerie S1Ma | Identification modale des nouveaux ventilateurs**

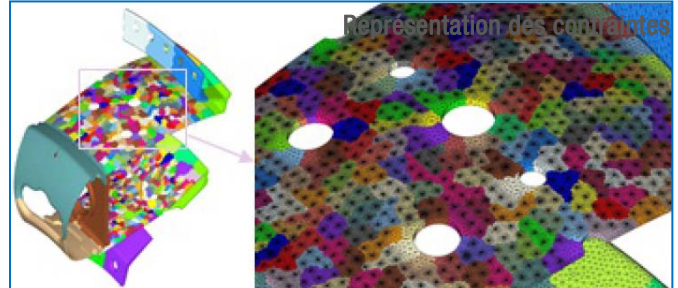
L'équipe *Ground Vibration Testing* de l'ONERA a procédé à la fin de l'été à l'identification modale des nouveaux ventilateurs de la soufflerie S1Ma de Modane-Avrieux. L'objectif était de caractériser *in situ* les modes de vibrations des pales des deux ventilateurs contra-rotatifs et en particulier leurs coefficients d'amortissement. Cette campagne a permis l'identification d'environ 100 modes propres par ventilateur. Une instrumentation de l'ordre de 400 accéléromètres a été déployée. La stratégie d'essai, les moyens d'excitation, de mesures et de traitement habituellement sont ceux utilisés pour les tests de vibration au sol des grands avions. [DAAA, DS 2017]

**Mécanique du solide | Vers la simulation haute fidélité des chambres de combustion**

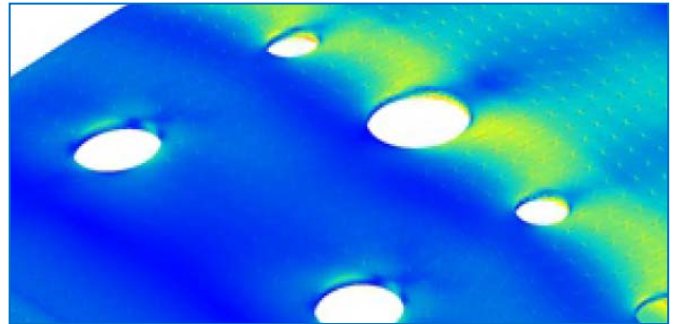
Le calcul d'une portion de chambre de combustion comportant 1200 micro-perforations a été réalisé (projet ANR SEMAFOR). Ces nouvelles simulations haute fidélité prenant en compte toutes les perforations permettront aux industriels d'affiner le design de leurs chambres de combustion.

Le comportement, d'une chambre en super alliage de cobalt (HA188) soumise à un chargement thermomécanique sévère, a été simulé

grâce aux moyens de calcul mis à disposition par le Genci, sur un maillage élément fini de 25 millions de degrés de libertés, avec le code Z-Set (ONERA-Mines ParisTech) et grâce au solveur en décomposition de domaine AMPFETI (*Adaptive MultiPreconditioned Finite Element Tearing and Interconnecting*). La simulation d'un cycle de chargement de 10 000 secondes, dure 13 heures en utilisant une décomposition en 576 sous-domaines et en allouant six coeurs par sous-domaines (3456 coeurs en parallèle). [DMAS 2019]



La portion de chambre simulée et les sous-domaines



Répartition des contraintes

**les thèses soutenues**

\* : renvoie à la rubrique « prix et distinctions aux doctorants »

**[PHY 2016]**

**Paula Aguilera** - Apport de la modélisation numérique pour l'optimisation de la prise en compte des contraintes foudre lors de la conception de systèmes propulsifs. *Sorbonne Univ.*

**Rafael Sousa Martins** - Simulation expérimentale et numérique de l'interaction entre un plasma d'arc de foudre et un matériau aéronautique. *Univ. Paris-Saclay*

**[MAS 2016]**

**Gabriele Bai** - Évaluation par vibrothermographie de l'endommagement des composites tissés. *Univ. Bordeaux*

**Alexis Lasseigne** - Optimisation de structures composites d'épaisseur variable. Application à une pale de CROR. *Univ. St Etienne*

**Giuseppe Pennisi** - Passive vibration control by using nonlinear energy sink absorbers. *Univ. Toulouse*

\***Aurélien Doitrand** - Endommagement à l'échelle mésoscopique et son influence sur la tenue mécanique des matériaux composites tissés. *Univ. Bretagne Occidentale*

**[MAS 2017]**

**Nicolas Tran** - Caractérisation et modélisation du comportement mécanique d'un matériau composite tissé 3D carbone/époxy du quasi-statique à la dynamique. *Univ. Lille*

**Richard Mounien** - Analyse expérimentale et modélisation du comportement en matage de composites à matrice organique tissés 3D. *Univ. Bretagne Occidentale*

**Francesco Bettonte** - Développement d'une stratégie d'identification des paramètres par recalage de modèle éléments finis à partir de mesures par corrélation d'images : vers l'application à un modèle d'endommagement non local. *Univ. PSL*

**[MAS 2017]**

\***Emmanuel Fessler** - Étude des interactions fatigue-fluage-environnement lors de la propagation de fissure dans l'Inconel 718 DA. *Univ. Toulouse*

**Jean-Patrick Goulmy** - Modélisation de l'impact du grenailage sur le comportement et l'endommagement en fatigue de l'Inconel 718. *Univ. Champagne*

**[MAS 2018]**

Xavier Truant - Étude et modélisation du comportement mécanique de panneaux de structure soudés par friction-malaxage (FSW). *Hesam Univ.*

**Magali Castres** - Modélisation dynamique avancée des matériaux composites à matrice organique (CMO) pour l'étude de la vulnérabilité des structures aéronautiques. *Univ. Lille*

**[MAS 2019]**

**\*Narindra Ranaivomiarana** - Optimisation simultanée de la forme et de l'anisotropie des structures aéronautiques. *Sorbonne Univ.*

**Cécile Garcia** - Modélisation de l'endommagement et de la rupture des matériaux composites tissés 3D appliquée aux chapes ceinturées. *Univ. Paris-Saclay*

**\*Dimitri Goutaudier** - Méthode d'identification d'un impact appliqué sur une structure admettant des modes de vibration basse fréquence faiblement amortis et bien séparés. *Hesam Univ.*

**Robin Naylor** - Prédiction des premiers endommagements des composites tissés par modélisation à l'échelle microscopique et validation multi-échelle. *Univ. Paris-Saclay.*

**Victor Médeau** - Rupture des composites tissés 3D: de la caractérisation expérimentale à la simulation robuste des effets d'échelle. *Univ. Toulouse.*

**Laura Muller** - Estimation accélérée des performances en fatigue des matériaux et structures composites thermoplastiques par le suivi de leur autoéchauffement. *Univ. Nantes*

**\*Fabrizio Pagano** - Mécanismes de fatigue dominés par les fibres dans les composites stratifiés d'unidirectionnels. *Univ. PSL*

**Florence Saffar** - Etude de la consolidation interpli de stratifiés thermoplastiques PEKK/fibres de carbone en conditions de basse pression. *Univ. Lille*

**Thibault Archer** - Comportement sous gradients thermiques d'un composite à matrice céramique revêtu. *Univ. Paris-Saclay*

**Jean-Baptiste Layly** - Contacts électriques soumis à de forts courants : Aspects fondamentaux et application à l'interaction foudre - structures aéronautiques. *Univ. Paris-Saclay*

**Pascal Bouda** - Méthode des Champs Virtuels pour la caractérisation du comportement dynamique de matériaux métalliques sous chargement purement inertiel. *Univ. Lille*

**Mikel Balmaseda Aguirre** - Reduced Order Models for Nonlinear Dynamic Analysis of Rotating Structures: Application to Turbomachinery Blades. *Univ. Lyon*

**Valentin Davaze** - Modélisation numérique de l'amorçage et la propagation des fissures dans les tôles métalliques ductiles pour les simulations de crash. *Univ. PSL*

*prix et distinctions aux doctorants*

**Aurélien Doitrand** Prix doctorant ONERA MAS 2016 **[MAS 2016]**

**Emmanuel Fessler** Prix doctorant ONERA MAS 2017 **[MAS 2017]**

**Narindra Ranaivomiarana** Prix Amelia Earhart 2017, Zonta International **[MAS 2019]**

**Fabrizio Pagano** Young researcher award - Conference on Fatigue of Composites 2018, Italy **[MAS 2019]**

**Dimitri Goutaudier** Prix doctorant ONERA MAS 2019 **[MAS 2019]**

**Eva Borakiewicz** Prix Amelia Earhart 2019, Zonta International **[MAS en cours]**

**Oriane Sally** 3<sup>e</sup> prix poster Journées nationales des composites 2019, Bordeaux **[MAS en cours]**

**Louise Sévin** 2<sup>e</sup> prix du meilleur poster scientifique ECERS 2019, Italie ; prix Jeunes chercheurs du CNES 2019 **[MAS en cours]**

# défi 8

## La propulsion dans toute sa complexité

### Répondre aux exigences les plus sévères sur les systèmes de propulsion

#### le défi

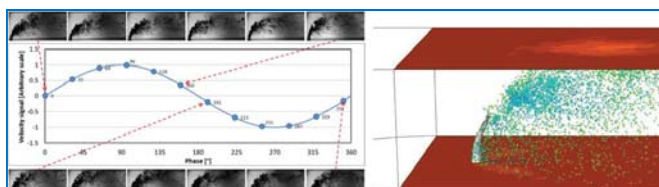
Ce défi revêt plusieurs aspects :

- il s'agit de proposer ou d'accompagner les évolutions des systèmes propulsifs des avions civils, sous-tendues par les améliorations de performance et la diminution de l'impact sur l'environnement : ces évolutions continuent à passer par l'accroissement du taux de dilution et l'augmentation du taux de compression. L'ingestion des régions visqueuses de l'écoulement autour de la cellule est également une piste sérieuse. Ces évolutions doivent être accompagnées de la maîtrise des sources de bruit. L'usage de carburants alternatifs, permettant sur l'ensemble de leur cycle production-consommation de limiter les émissions de CO<sub>2</sub>, fait partie des questions à étudier. Les solutions propulsives hybrides, plus électriques, doivent être évaluées sur le plan des performances et de la gestion de l'énergie à bord ;
- il s'agit également de contribuer à la conception des solutions propulsives des nouveaux missiles et du futur lanceur européen. Cela passe par la maîtrise de la combustion dans les stato- et superstatoréacteurs, ainsi que des technologies de refroidissement des engins évoluant à haute vitesse. Pour la propulsion fusée, le réallumage en vol des moteurs cryogéniques et la réduction des oscillations de pression dans les moteurs à propergol solide restent des sujets d'actualité ;
- pour faire évoluer les solutions propulsives, il est nécessaire de développer des outils de modélisation multi-physiques et de progresser dans la compréhension de l'aérothermochimie des écoulements internes et dans le comportement mécanique des matériaux de moteurs ;
- les matériaux des engins aérospatiaux sont soumis à des conditions sévères en termes de sollicitations thermomécaniques. Il est donc nécessaire de bien adapter ces matériaux à leur environnement.

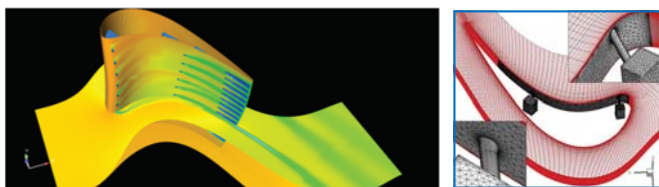
#### les partenariats

Ces travaux sont réalisés avec les partenaires étatiques DGA, CNES, DGAC. Les principaux partenaires industriels sont Safran (Aircraft Engines, Helicopter Engines, Tech, Ceramics), MBDA, ArianeGroup. Les principaux partenaires académiques sont CentraleSupélec, Pprime Poitiers, le Coria de Rouen, le CEA, le Cerfacs (Toulouse), et à l'international le DLR allemand.

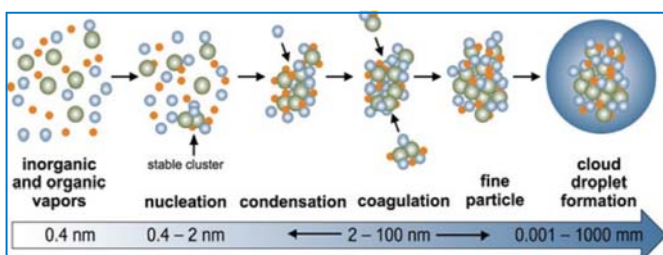
#### le bilan par les projets



**SIGMA** Des moteurs plus stables pour un ciel plus sûr



**ATAR** Toujours plus chaud : amélioration des performances thermiques des moteurs aéronautiques



**EMPIRE** Potentiel de formation d'aérosols de carburants de composition variée

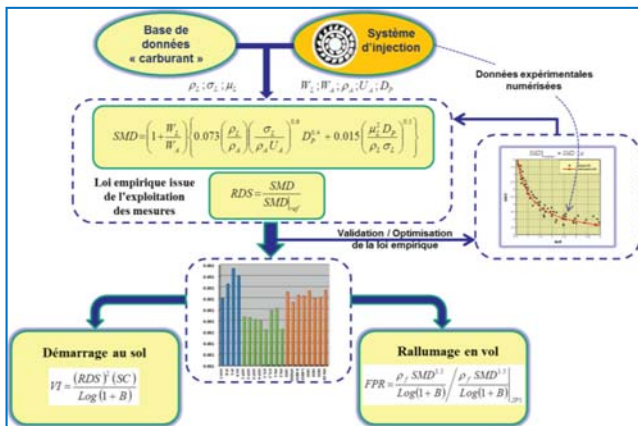
Du fait qu'ils comportent des systèmes d'injection limitant les niveaux d'émissions de NO<sub>x</sub>, les chambres de combustion récentes sont susceptibles de donner lieu à des instabilités. Le **PRF SIGMA** terminé en 2018 a fourni des outils numériques, des méthodologies et des bases de données permettant d'étudier les mécanismes d'instabilité. Des modèles bas ordre peu coûteux aussi bien que des méthodologies de simulation haute fidélité sont disponibles.

De son côté, le **PRF ATAR**, lancé en 2018, permet de progresser dans la simulation des éléments de moteurs soumis à des conditions de température extrêmes, conditions toujours plus sévères du fait de l'augmentation du taux de compression des moteurs.

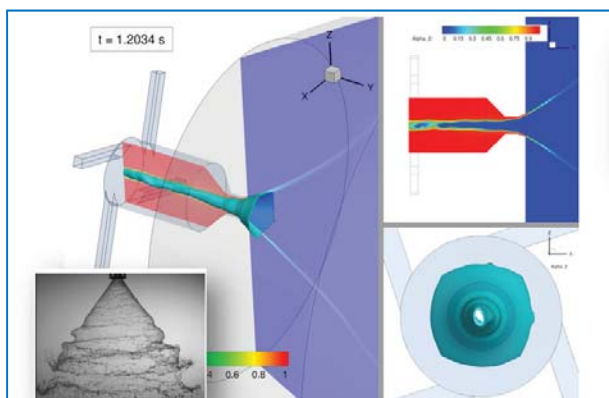
Dans le cadre du **PRF NODATA** terminé en 2018 (voir encadré), des connaissances précieuses sur les conditions de réallumage en vol d'une chambre de combustion aéronautique ont été acquises et de nouveaux concepts d'allumage – bougie « laser » ou « plasma » – ont été étudiés.

Le **PR EMPIRE** (fin en 2020) fournit les outils expérimentaux permettant de caractériser et mesurer les émissions de particules des moteurs d'avion.

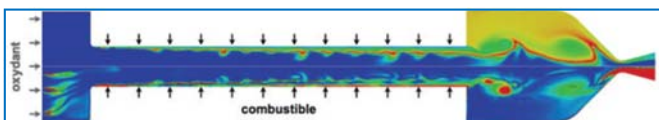
[Lupascu et al., 2015, *Modeling Particle Nucleation and Growth over Northern California during the 2010 CARES Campaign*. Atmospheric Chemistry and Physics]



**PROPHECIE** Modéliser et calculer les propriétés physicochimiques d'un carburant à partir de sa formule chimique



**SATIN** Prévoir le comportement instationnaire de l'injection dans les chambres de combustion



**HYSAC** Vers la modélisation et l'amélioration des propulseurs chimiques hybrides

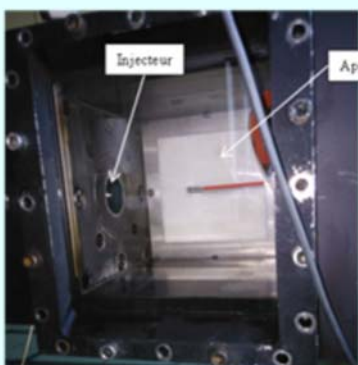


**IMPULSE** Développement et amélioration de moyens expérimentaux pour la propulsion spatiale

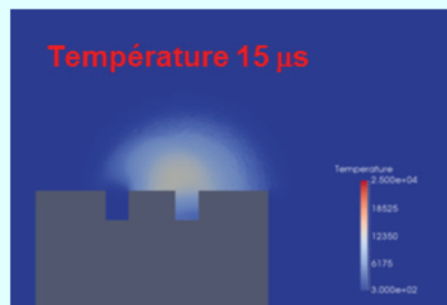
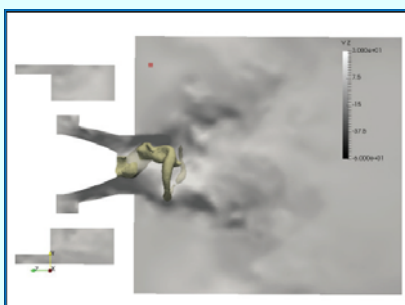
**NODATA** Caractérisation expérimentale de l'allumage et bougies de nouvelle génération

Acquis scientifiques et techniques : caractérisation du claquage dans l'air et dans un brouillard (mesure de température, de richesse), caractérisation du claquage d'une bougie à arc, caractérisation de l'écoulement diphasique au banc Mercato, validation des outils de calcul (solveurs CEDRE et KRONOS).

Réalisations : bougie à décharge de surface avec applicateur chambre et circuit électrique, bougie laser basée sur le concept Mopa, adaptation du banc expérimental Mercato pour des mesures anémométriques PDA en conditions critiques.



Bougie plasma (banc Mercato)



## au-delà des projets ONERA, des faits marquants

### Propulsion spatiale | Première mondiale : 5 minutes de propulsion hybride sur un banc ONERA

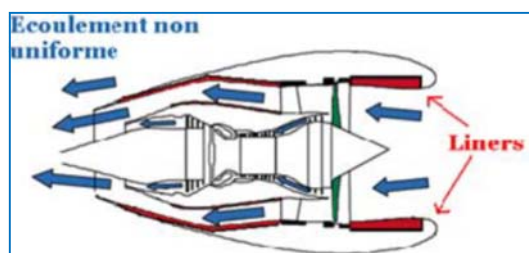
Le projet H2020 Hyprogeo piloté par Airbus Defense and Space s'est achevé en 2018. Son objectif était de développer un moteur propre et non toxique – à propulsion hybride – pour la mise à poste des satellites, avec une poussée faible mais constante pendant une durée de fonctionnement de 2 heures, au lieu des quelques secondes possibles auparavant.

Des essais ont permis d'atteindre 5 mn du fonctionnement souhaité, avec une tuyère conçue et fabriquée à l'ONERA. C'est une première mondiale – les plus longs essais en propulsion hybride répertoriés ayant une durée bien inférieure à la minute. [DMPE 2018]

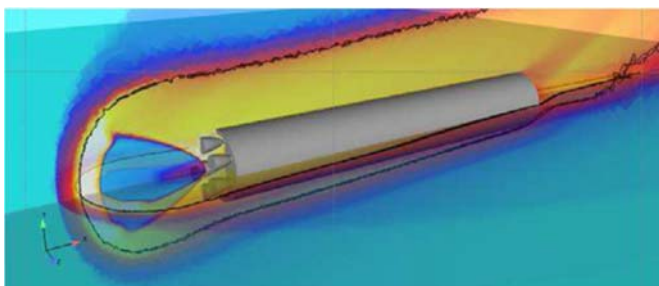


### Bruit aéronautique | La NASA et l'ONERA plangent ensemble sur les liners acoustiques

Dans le cadre d'une coopération bilatérale étroite scellant un partenariat stratégique entre l'ONERA et la NASA pour réduire le bruit des avions, les chercheurs échangent activement sur la modélisation des liners acoustiques, un point délicat mais prometteur pour la réduction à la source du bruit de soufflante. Objectif : consolider les modèles physiques intégrés aux chaînes de simulation numériques d'estimation des nuisances sonores mises en œuvre sur des configurations représentatives des moteurs, au sein desquels les ondes acoustiques se propagent simultanément dans toutes les directions. [DMPE 2018]



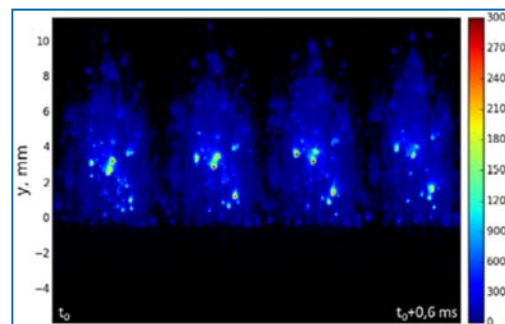
### Lanceurs réutilisables | Simulation numérique du retour *toss back* d'un premier étage



Pour la première fois en Europe, des calculs de type URANS ont été effectués par l'ONERA – avec la chaîne de calcul CEDRE – pour simuler le retour de type *toss back* d'un premier étage de lanceur, pendant lequel le véhicule redescend tuyère en avant en étant freiné par des rallumages successifs d'un de ses moteurs. Ces simulations ont permis de fixer les ordres de grandeur des caractéristiques aérodynamiques et thermiques en différents points de la trajectoire et d'évaluer le domaine de vol où l'allumage du moteur est utile au freinage de l'étage. [DMPE, DTIS 2017]

### Propulsion solide | Première mondiale : l'imagerie LIF rapide de l'aluminium dans les flammes de propergol solide

La LIF – fluorescence induite par laser – à cadence d'acquisition élevée (10 kHz) est développée à l'ONERA pour imager des traceurs chimiques dans des écoulements. Un nouveau banc de LIF rapide a été récemment acquis et mis au point avec une utilisation originale de l'atome d'aluminium (Al), développée dans le cadre d'une thèse. L'application à la propulsion solide, soutenue par le CNES, a donné des résultats particulièrement prometteurs et originaux. En effet, le signal de fluorescence très intense de l'aluminium permet de suivre temporellement les agglomérats formés pendant la combustion avec un très bon contraste, surtout à pression élevée malgré la forte luminosité de la flamme. Ce moyen de métrologie laser apporte des solutions innovantes pour l'analyse non intrusive de milieux réputés difficiles. [DPHY, DMPE 2017]



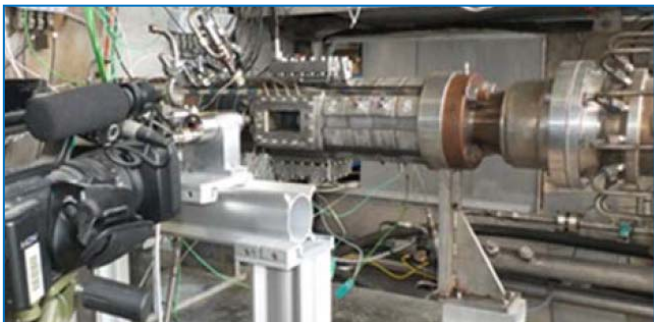
Exemple de quatre images successives enregistrées par le système Al-PLIF haute cadence

### Exploration martienne | Essais de rotors de micro-drones en conditions martiennes

L'ONERA, l'ISAE-Supaero et le CNES se sont associés pour étudier la faisabilité du vol sur Mars d'un micro-drone. Avec la très faible pression de l'atmosphère de CO<sub>2</sub>, les conditions aérodynamiques y sont très particulières. Des rotors optimisés pour ces conditions ont été définis à l'ONERA et testés dans un caisson aux conditions représentatives en pression et en CO<sub>2</sub>. Les performances mesurées, conformes aux prévisions, montrent la supériorité des rotors optimisés pour le vol martien par rapport à des rotors classiques. Ces essais constituent une première nationale et européenne. [DMPE 2018]

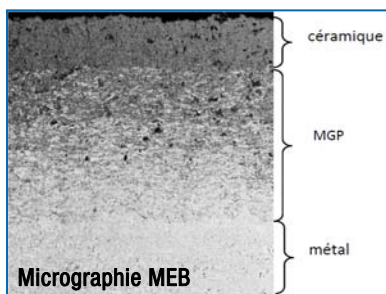


## Satellites | Nouveaux matériaux pour les futurs propulseurs à ergols verts



Montage expérimental sur le banc de combustion Mascotte

Des essais menés sur le banc de combustion Mascotte de l'ONERA ont permis de valider la tenue en température de nouveaux matériaux, dits matériaux à gradient de propriétés (MGP), destinés aux chambres de combustion des futurs propulseurs à ergols verts de repositionnement des satellites. Ces matériaux, qui associent une céramique et un métal réfractaire sont développés par l'ONERA dans le cadre du programme d'intérêt commun ONERA/CNES «Systèmes orbitaux – Propulsion à monergol vert». Le banc Mascotte, équipé pour l'occasion d'un porte-échantillon, a permis de tester ces matériaux innovants en conditions réelles d'utilisation et d'en valider la résistance jusqu'à des températures de flamme atteignant 2 300 K. [DMAS, DMPE 2019]



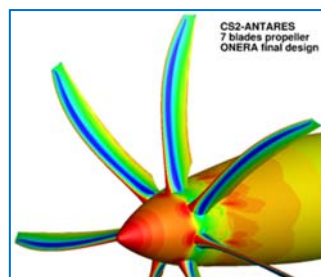
## Réduction des émissions | Des techniques de mesure avancées en sortie de moteur

Pour la première fois, un suivi des émissions particulaires et de gaz ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{SO}_2$ ) en sortie de moteur a été réalisé grâce à des techniques expérimentales avancées mises en œuvre par l'ONERA en partenariat avec Safran Helicopter Engines (SHE). Une campagne de mesures réalisée sur une version modifiée du moteur Ardiden 3 dans le cadre du partenariat Clean Sky 2 - Engines ITD. Ces techniques contribuent à démontrer et valider des évolutions technologiques répondant aux objectifs environnementaux ACARE.

## Turbopropulseurs | L'ONERA conçoit l'hélice, Safran valide les performances

Safran a dévoilé le démonstrateur TechTP équipé d'une hélice performante et silencieuse dessinée par l'ONERA, qui pourra servir à proposer des solutions de propulsion de nouvelle génération pour l'aviation générale et pour les drones.

La contribution de l'ONERA dans le design de cette hélice de 2,5 m de diamètre équipée de sept pales et du *spinner* a permis une forte réduction du bruit – 4,5 dBA par rapport à un design actuel – tout en conservant l'efficacité de l'hélice de référence. Les émissions de  $\text{CO}_2$  et la consommation de carburant de l'ensemble turbopropulsif seront inférieures de 15% aux moteurs équivalents actuels. Ces succès ont été obtenus grâce aux compétences de l'ONERA en aérodynamique, acoustique, mécanique des structures mais aussi en métrologie pour la caractérisation des émissions polluantes du moteur ainsi que des essais de ré-allumage des chambres de combustion. Ces travaux ont été effectués dans le cadre du projet Antares (CleanSky2). [DAAA 2019]



## les thèses soutenues

\* : renvoie à la rubrique « prix et distinctions aux doctorants »

[MFE 2016]

**Matthieu Dubosc** - Modélisation hors adaptation des performances individuelles d'un doublet d'hélices contrarotatives. *Univ. Poitiers*

**Yannis Sadoudi** - Simulation numérique de l'interaction soufflante/nacelle en présence de vent de travers. *Univ. Toulouse*

**Gustavo Arroyo Callejo** - Modélisation thermique avancée d'une paroi de chambre de combustion aéronautique avec dilution giratoire. *Univ. Toulouse*

**Jean-Charles Khou** - Modélisation des traînées de condensation par interaction entre l'aérodynamique, la cinétique chimique et la microphysique. *Sorbonne Univ.*

**Maxime Vicentini** - Mise en évidence expérimentale et modélisation des régimes de combustion diphasique présents dans les foyers aéronautiques. *Univ. Toulouse.*

**Jun Zheng** - Analytical and numerical study of the indirect combustion noise generated by entropy disturbances in nozzle flows. *Univ. Paris-Saclay*

\***Jérôme Messineo** - Modélisation des instabilités hydrodynamiques dans les moteurs-fusées hybrides. *Univ. Toulouse*

**Quentin Dubois** - Approximation volumes finis d'ordre élevé - Flux dissipatifs en maillage quelconque et applications à la LES en aérothermique cavité nacelle à l'arrêt moteur. *Univ. Lorraine*

[MAS 2017]

\***Océane Lambert** - Solutions architecturées par fabrication additive pour le refroidissement de parois de chambre de combustion. *Univ. Grenoble Alpes*



## [MFE 2017]

**\*Maxime Bouyges** - Instabilités dans les moteurs à propergol solide : influence de la géométrie étoilée et étude numérique de la transition laminaire-turbulent. *Univ. Toulouse*

**Thomas Gaillard** - Étude numérique du fonctionnement d'un moteur à détonation rotative. *Univ. Paris-Saclay*

## [PHY 2017]

**Robert George** - Développement de nouvelles stratégies d'allumage laser : application à la propulsion aéronautique et/ou spatiale. *Univ. Paris-Saclay*

## [MFE 2018]

**Paul Zehner** - Etude aéroacoustique de l'interaction orthogonale pale/tourbillon. *Arts et Métiers ParisTech*

**Valentin Dupif** - Modélisation et simulation de l'écoulement diphasique dans les moteurs-fusées à propergol solide par des approches eulériennes polydispersées en taille et en vitesse. *Univ. Paris-Saclay*

**Swann Thuillet** - Simulation multi-échelle de l'atomisation d'un jet liquide sous l'effet d'un écoulement gazeux transverse en présence d'une perturbation acoustique. *Univ. Toulouse*

**Sofiane Bousabaa** - Estimation des fonctions de Green acoustique à l'aide de simulations numériques et application à l'imagerie aéroacoustique en milieu ouvert. *Univ. Paris-Saclay*

**Quentin Binauld** - Modélisation et simulation du rayonnement dans les jets de moteurs à propergol solide à haute altitude. *Univ. Paris-Saclay*

**Théo Vialis** - Développement d'un propulseur plasma à résonance cyclotron électronique pour les satellites. *Univ. Paris-Saclay*

## [MFE 2019]

**\*Ariane Emmanuelli** - Simulation numérique et modélisation du bruit entropique à travers une tuyère et un stator de turbine. *Univ. Paris-Saclay*

**Thibault Désert** - Étude aéropulsive d'un micro-drone à voilure tournante pour l'exploration martienne. *Univ. Toulouse*

**Pierre Doublet** - Conditions aux limites du brouillard en conditions d'allumage. *Univ. Toulouse*

**Nicolas Dellinger** - Modélisation de la formation et de l'évolution des particules de suie en approche hybride Euler-Lagrange pour la simulation de foyers aéronautiques. *Sorbonne Univ.*

**Nicolas Rutard** - Simulation numérique et modélisation de l'influence d'ondes acoustiques de haute amplitude sur un jet diphasique : application au domaine de la propulsion fusée à ergols liquides. *Univ. Paris-Saclay*

**Mathieu Muller** - Modélisation de la combustion de gouttes d'aluminium dans les conditions d'un moteur-fusée à propergol solide. *IP Paris*

**Jean-Étienne Durand** - Développement et validation expérimentale d'une modélisation numérique pour la simulation d'un moteur hybride. *Univ. Toulouse*

**Quentin Levard** - Étude expérimentale et numérique de la décomposition d'un liquide ionique énergétique pour le développement d'un propulseur à monergol vert. *Univ. Toulouse*

**Vincent Drouet** - Modélisation aérothermodynamique des écoulements hypersoniques d'arrière-corps de débris orbitaux. *Univ. Toulouse*

**Matthieu Nugue** - Outils pour l'étude conjointe par simulation et traitement d'images expérimentales de la combustion de particules d'aluminium utilisées dans les propergols solides. *Univ. Paris-Saclay*

**Adrien Chatelier** - Problèmes ouverts de modélisation pour les simulations numériques de chambres de combustion aéronautiques. *Univ. Paris-Saclay*

## [PHY 2019]

**\*Vincent Corbas** - Exploitation tomographique de la spectroscopie d'absorption de plusieurs faisceaux lasers à multi-longueur d'ondes pour la cartographie des espèces chimiques dans les foyers aéronautiques. *Univ. Paris-Saclay*

## [TIS 2019]

**Camille Sarotte** - Improvement of monitoring and reconfiguration processes for liquid propellant rocket engines. *Univ. Paris-Saclay*

---

*prix et distinctions aux doctorants*

**Jérôme Messineo** Prix de thèse 2017 de la Fondation ISAE-Supaéro [MFE 2016]

**Océane Lambert** Prix Amelia Earhart 2016, Zonta International [MAS 2017]

**Maxime Bouyges** Meilleure présentation en propulsion solide - AIAA Joint Propulsion [MFE 2017]

**Ariane Emmanuelli** *Best student poster award* « Noise Reduction » ASME Turbo Expo 2017 [MFE 2019]

**Vincent Corbas** *Best student paper* « Propulsion Physics » EUCASS 2019 [PHY 2019]

le défi

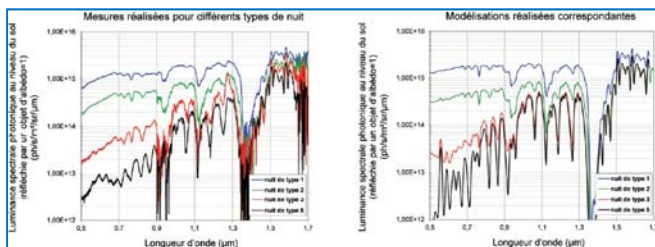
Ce défi comporte les volets suivants :

- améliorer la résolution spatiale et spectrale des appareils de télédétection
- minimiser les effets de la turbulence atmosphérique sur la qualité des images optiques recueillies ;
- maîtriser les fonctions optiques miniaturisées et la nano-photonique, de façon à concevoir de nouvelles sources thermiques, et de nouveaux photo-détecteurs, entre autres pour l'analyse de composants chimiques ;
- développer des nouvelles sources laser et les applications associées : lidar, contre-mesures, spectroscopie ;
- intégrer le traitement des données dès la conception des systèmes optiques et optroniques, en particulier des capteurs ;
- développer la simulation précise de l'environnement et des signatures pour les senseurs de façon à obtenir une évaluation exacte des situations à partir des données recueillies par les capteurs.

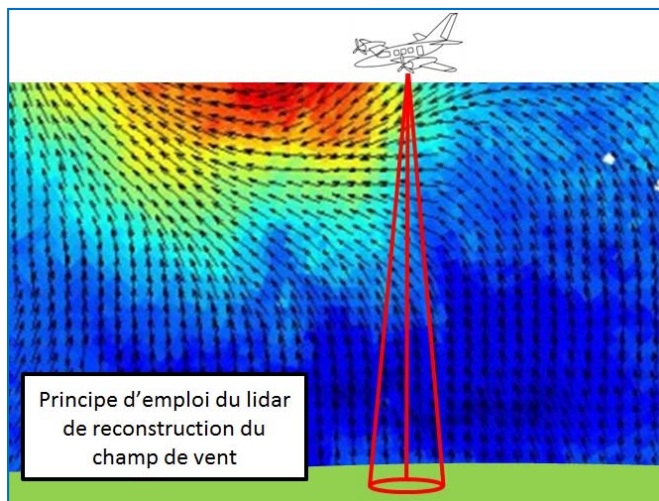
les partenariats

Les activités sont réalisées avec les laboratoires académiques suivants : Latmos, Observatoire de Paris, Universités de Grenoble, Aix-Marseille et Nice, IOGS, CEA-IRFU, CEA-LETI, Institut Langevin. Les partenaires industriels sont, entre autres : Total, Leosphere, Sofradir, Safran Electronics & Defense, Tosa. Des activités sur les nanotechnologies se font dans le cadre du laboratoire commun Mino avec le C2N (CNRS, Univ. Paris-Saclay).

le bilan par les projets



**CANDELA Développer l'expertise des technologies à bas niveau de lumière visible et proche infrarouge**



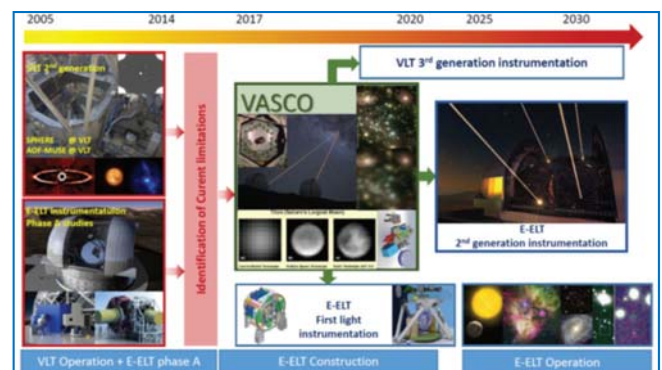
Principe d'emploi du lidar de reconstruction du champ de vent

**NUTELA Démontrer la faisabilité d'un lidar fibré « vecteur vent » longue portée et embarquable**

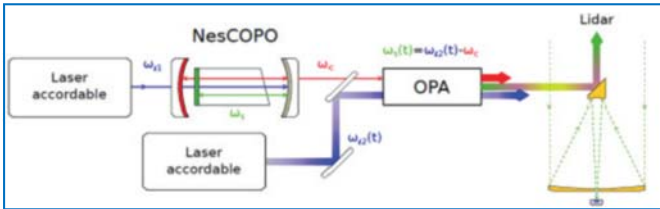
Le **PR VASCO** s'est intéressé à des nouveaux concepts d'optique adaptative permettant aux grands télescopes de s'abstraire des effets de la turbulence atmosphérique et d'améliorer leur résolution spatiale.

Le **PR CANDELA** a permis de développer une expertise dans le domaine des détecteurs à bas niveau de lumière (BNL) passant par la réalisation d'un banc de mesure, la caractérisation de détecteurs BNL émergents et la mise à niveau des modèles et bilans de performance système.

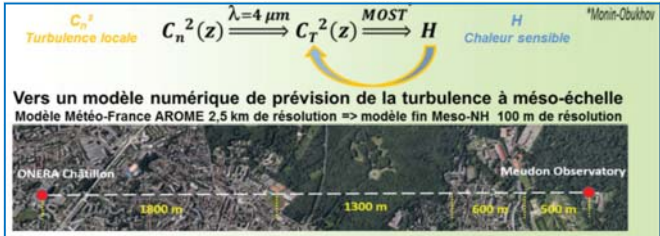
Le **PR NUTELA** a démontré la faisabilité d'un lidar fibré embarqué pour la mesure du champ de vitesse du vent. Un algorithme de reconstruction de champ de vitesse a été développé et des contraintes d'embarquabilité ont été prises en compte.



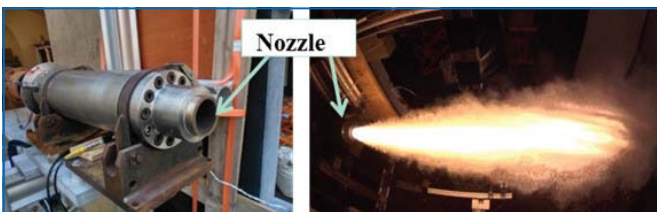
**VASCO Faire mieux que Hubble depuis le sol !**



LAOS Fonctionnalités laser innovantes pour applications lidar gaz



ECLAIR Vers un modèle numérique de prévision de la turbulence à méso-échelle



SIMBA Mesures radar, micro-ondes et IR au banc MOSER



Banc de caractérisation

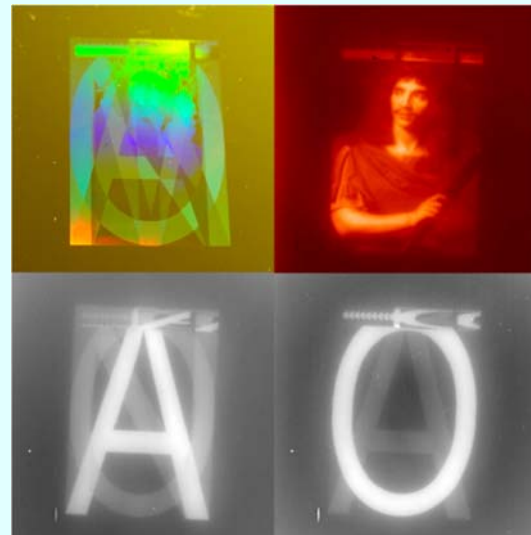
ASF Applications spatiales faible flux

**Nano-MOLIERE Du concept nanophotonique au démonstrateur – anti-contrefaçon, leurrage, identification biochimique**

Sur les trois axes du projet, les principaux résultats du PR démontrés expérimentalement, qui ont fait l'objet de publication, brevet ou/et de proposition de projets complémentaires, sont :

- un dispositif de codage anti-contrefaçon ;
- un dispositif d'imagerie THz utilisant un élément de conversion THz vers infrarouge ;
- un capteur de molécules d'explosifs utilisant le résonateur de Helmholtz optique ;
- des méta-surfaces désordonnées pour manipuler la diffraction et la diffusion de la lumière ;
- des sources nano-structurées de lumière thermiques ou non linéaire.

Ce PR a aussi permis le développement d'outils numériques et de bancs de caractérisation au laboratoire ONDA de l'ONERA.



Contrôle spatial et spectral de l'émission thermique par une méta-surface nano-structurée à l'échelle de la longueur d'onde

## au-delà des projets ONERA, des faits marquants

### Communications optiques en espace libre | Un lien laser très haut débit sol-satellite avec optique adaptative

L'ONERA a effectué la première évaluation en environnement représentatif de l'apport de la précompensation par optique adaptative pour les liens *feeder* GEO pour le compte de l'ESA (contrat FEDELIO). Ces liens entre sol et satellites constituent une brique essentielle du développement de futurs réseaux très haut débit globalisés, à un moment où les bandes passantes des liens radio-fréquences arrivent à saturation.

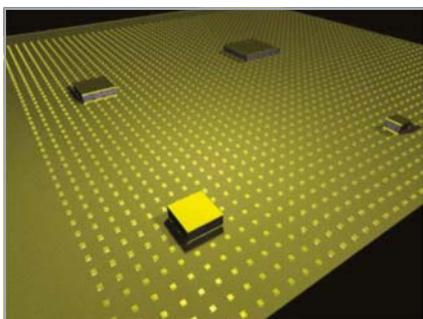
Les résultats obtenus positionnent l'ONERA comme un acteur mondial de premier plan dans le domaine. L'expérience engrangée sera mise à profit dès 2020 pour la conception de la station sol ONERA FEELINGS (*Feeder Links Ground Station*), financée sur fond propre. [DOTA 2019]

### Ophthalmologie | L'optique adaptative pour le traitement de l'œdème maculaire

Le système Clovis3D – programme ANR « Innovation biomédicale » – relève le défi d'être le premier système utilisant l'optique adaptative de manière thérapeutique, notamment chez les diabétiques. Clovis3D intègre un laser de photocoagulation et d'imagerie (Quantel Medical) associé à un système d'optique adaptative ONERA qui permet de mieux contrôler l'impact du laser. Une étroite collaboration entre ces deux partenaires et les médecins du centre national d'ophtalmologie des Quinze-Vingts permettra de procéder à la validation du système Clovis3D. A terme, ce système unique devrait améliorer la qualité des procédures thérapeutiques réalisées aux Quinze-Vingts, grâce à un gain d'efficacité et de temps considérable. [DOTA 2018]

### Imagerie multispectrale | Un imageur térahertz au forum DGA Innovation

Le projet Astrid-Maturation Imhotep a fait l'objet d'une présentation lors du Forum DGA. Imhotep a pour objectif de développer un imageur THz multispectral avec la startup NeTHIS, qui industrialise et commercialise des systèmes de vision multi-spectrale IR et THz. Le rayonnement THz présente un grand intérêt pour la sécurité, la détection d'explosifs ou le contrôle non destructif de matériaux. Un premier démonstrateur a été développé, qui a permis de démontrer l'amélioration des performances, ainsi que la capacité à détecter plusieurs longueurs d'onde entre 0,1 et 3 THz. Les travaux se sont également concentrés sur le développement d'un procédé de fabrication industrialisable ainsi que le transfert vers l'industriel. [DOTA 2018]



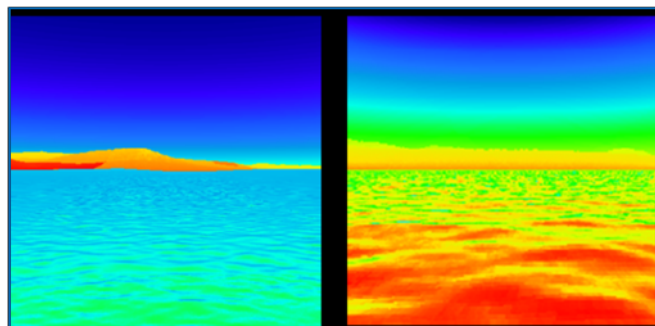
Membrane de conversion du rayonnement THz capté par les nano-antennes en IR

### Lasers ultra-intenses | L'ONERA apporte une brique indispensable à une nouvelle génération de lasers

Durant sa thèse ONERA, Maxime Deprez a conçu, réalisé et utilisé Pistil, un interféromètre analyseur de front d'onde, qui a produit, pour la première fois à notre connaissance, une mesure absolue de la qualité d'un front d'onde laser issu de l'amplification et la combinaison en cohérence des faisceaux lasers pour les nouvelles architectures susceptibles de produire des lasers ultra-intenses. Pistil a été mis en œuvre sur le premier prototype cette nouvelle génération de lasers, appelé XCAN\* (laboratoire LULI, de l'École polytechnique). [DOTA 2018]

### Conception optronique | Livraison du code de transfert radiatif MATISSE 3.5 à la DGA

La dernière version de Matisse, logiciel de propagation et de transfert radiatif atmosphérique de référence pour la DGA, et symbole du rôle de référent environnement de l'ONERA pour la Défense, a été livrée à la DGA. Matisse modélise le rayonnement reçu en entrée d'un capteur, en mode imagerie ou ligne de visée. Il inclut de nombreuses bases de données : profils atmosphériques, nuages, aérosols, fonds. Il est utilisable facilement pour les calculs d'ingénierie courants, intégrable dans les simulations et prévision de performances. Matisse est intégré dans les outils de simulation mis en œuvre dans le cadre de programmes de missiles ainsi que dans l'outil de génération de scène utilisé par la DGA. [DOTA 2018]

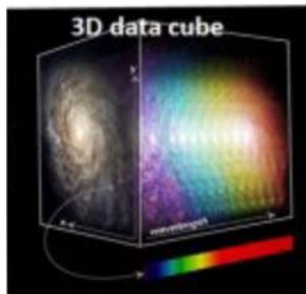


### Téledétection | Mesures simultanées de vent et gaz

L'ONERA a réalisé pour la première fois, à l'aide d'un lidar fibré, des mesures simultanées du méthane atmosphérique, de la vapeur d'eau, et de la vitesse de vent. L'instrument, nommé Vega (pour « Vent et Gaz ») est un lidar pulsé fonctionnant à la longueur d'onde de 1645 nm. Il est développé dans le cadre du projet de recherche industrielle Naomi avec Total pour pouvoir caractériser sur le terrain des fuites accidentelles de méthane, et en mesurer le débit de fuite. Sa conception s'appuie en grande partie sur l'architecture des lidars anémométriques développés à l'ONERA, mais intègre une source laser adaptée à la détection du méthane, spécialement développée au cours d'une thèse. [DOTA 2018]

### Astronomie | L'ONERA prépare pour 2024 les systèmes d'optique adaptative les plus complexes

Harmoni est l'instrument spectro-imageur de première lumière du futur télescope géant européen ELT. Il devra couvrir le visible et le proche infrarouge avec de hautes résolutions spectrale et spatiale. Il intègre deux systèmes d'optique adaptative sous la responsabilité de l'équipe intégrée LAM/ONERA. Ils seront, lors de leur mise en service prévue pour 2024, les systèmes d'OA les plus complexes jamais construits en astronomie. Les deux systèmes ont ainsi été analysés par plus de 20 experts internationaux et les retours sont très positifs. Dès 2025, Harmoni sera couplé avec le plus grand télescope optique jamais construit et participera à une meilleure compréhension de notre univers. [DOTA 2017]

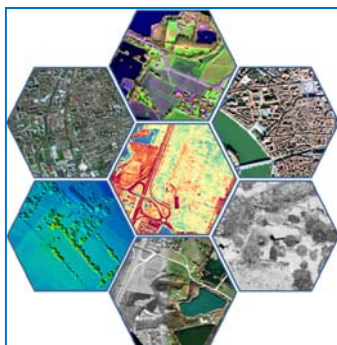


### Laser à haute énergie | L'ONERA sélectionné sur un projet d'armes à énergie dirigée

Le projet TALOS, lancé par l'Agence européenne de défense, concerne le développement d'un effecteur laser à haute énergie. Il est mené par Cilas et réunit 16 sociétés, laboratoires et universités. L'ONERA y étudiera la montée en puissance des lasers à fibres pour arme laser, en utilisant dans un premier temps ses moyens de simulation numérique pour définir les architectures de sources laser fibrées optimales et évaluer les performances attendues, en particulier la puissance laser extractible. Des développements et tests expérimentaux d'étages d'amplification laser fibrés à très haute efficacité seront également menés. [DOTA 2019]

### Environnement | L'ONERA inaugure TERRISCOPE, plateforme de recherche en imagerie aéroportée

TERRISCOPE permet l'acquisition simultanée de données optiques de différentes catégories de capteurs de nouvelle génération : imageurs multi et hyperspectraux, lidar vent, télémétrie à haute résolution spatiale (lidar 3D). Elle favorisera, à terme, le développement de services basés sur la télédétection aéroportée par



drones. Applications : dynamiques métropolitaines, fonctionnement hydrologique et écologique des grandes exploitations agricoles et forestières, gestion des ressources naturelles, inspection et suivi des infrastructures industrielles ou civiles, identification des pertes énergétiques du bâti, détermination du potentiel de production d'énergie renouvelable... [DOTA 2019]

### Alerte avancée | Aboutissement du projet ONERA "Signatures de missiles balistiques"

Plusieurs équipes de l'ONERA ont coopéré pour bâtir un modèle de signature infrarouge et radar de jet de missile balistique, destiné à être utilisé pour dimensionner et analyser les performances d'un futur système d'alerte avancée. Caractérisations de jets supersoniques IR et radar, imagerie multispectrale de propergols en combustion, simulations numériques LES (validées) se sont succédées. Le bilan final, très positif, a été salué par le conseil scientifique, constitué de représentants académiques et industriels, de la DGA, du CNES. [DOTA, DMPE, DEMR, DPHY, DAAA, DTIS 2018]



Mesures PIV, PLIF-OH, OH\* et IR au banc cryogénique Mascotte



Calcul LES Mascotte

### Renseignement militaire | Imagerie haute résolution de satellites en orbite basse

Les améliorations du banc d'optique adaptative de l'ONERA ODIS-SEE, couplées à des algorithmes de post-traitement, ont permis d'obtenir avec un télescope de l'Observatoire de la Côte d'Azur des séquences vidéo de nombreuses cibles de grande qualité, exploitables pour le renseignement militaire.

Les performances du système expérimental permettent d'envisager à moyen terme l'ajout d'une capacité opérationnelle souveraine aux moyens existants actuellement dans le domaine de la surveillance de l'espace. [DOTA 2019]

## les thèses soutenues

\* : renvoie à la rubrique « prix et distinctions aux doctorants »

[PHY 2016]

**Faustine Cantalloube** - Détection et caractérisation d'exoplanètes dans des images à grand contraste par la résolution de problème inverse. *Univ. Grenoble Alpes*

**Michaël Verdun** - Photodétecteurs InGaAs nanostructurés pour l'imagerie infrarouge. *Univ. Paris-Saclay*

**Laetitia Loncan** - Fusion d'images panchromatiques et hyperspectrales à très haute résolution spatiale. *Univ. Grenoble Alpes*

**Clément Tardieu** - Étude de structures sublongueur d'onde filtrantes, application à la spectroscopie d'absorption infrarouge. *Univ. Grenoble Alpes*

**Sébastien Héron** - Nanostructures pour l'exaltation d'effets non linéaires. *Univ. Paris-Saclay*

**Armande Pola Fossi** - Miniaturisation d'une caméra hyperspectrale infrarouge. *Univ. Paris-Saclay*

**Charlotte Revel** - Apport de la prise en compte de la variabilité intra-classe dans les méthodes de démixage hyperspectral pour l'imagerie urbaine. *Univ. Toulouse*

[PHY 2017]

**Antoine Montaux-Lambert** - Conception d'un interféromètre large bande spectrale pour la métrologie et l'imagerie de phase sur sources. *Univ. Paris-Saclay*

**Samuel Bole** - Estimation de la pose du visage du conducteur par caméra thermique. *Univ. St Étienne*

**François Weber** - Modélisation de fonds multispectraux texturés et hétérogènes pour la détection d'anomalies. *Sorbonne Univ.*

**Malik Nafa** - Spectroscopie Drac en régime hybride fs/ps à haute cadence (kHz) appliquée à la thermométrie des gaz. *Univ. Bourgogne Franche-Comté*

**Gautier Vilmart** - Détection de vapeurs d'atomes métalliques par Fluorescence Induite par Laser (LIF) : application à la propulsion solide. *Univ. Paris-Saclay*

**Erwan Cadiou** - Lidar DIAL multi-espèces à base de sources paramétriques optiques pour la détection des gaz à effet de serre depuis l'espace. *Sorbonne Univ.*

**Alexandre Hallermeyer** - Traitement du signal d'un Lidar Doppler scannant dédié à la surveillance aéroportuaire. *Univ. Paris-Saclay*

**\*Jan Dupont** - Imagerie polarimétrique de speckle statique pour l'étude de matériaux, et dynamique pour la détection de micro-vascularisation tumorale. *Univ. Toulouse*

**Florian Prévost** - Combinaison cohérente dans une fibre multi-cœurs pour des applications Lidar. *Univ. Paris-Saclay*

**Philippe Benoit** - Conception et réalisation d'un amplificateur Raman fibré monofréquence à 1645 nm pour la mesure du méthane par Lidar. *Univ. Lille Nord de France*

**Antoine Coyac** - Apport de l'imagerie active 3D à plan focal, embarquable sur drone, pour l'amélioration de la cartographie haute résolution de terrain. *Univ. Toulouse*

**\*Olivier Fauvarque** - Optimisation des analyseurs de front d'onde à filtrage optique de Fourier. *Aix-Marseille Univ.*

**Joël Teixeira** - Développement d'une nouvelle approche de mesure de front d'onde sans analyseur pour la microscopie à deux photons. *Univ. Paris Sciences Lettres*

**Sébastien Vievard** - Développement et validation d'un analyseur de surface d'onde en plan focal pour un instrument multi-pupille. *Sorbonne Univ.*

**Rémy Juvé** - Modélisation et commande pour les optiques adaptatives des VLT et ELT : de l'analyse de performance à la validation ciel. Electrical, Optical, Bio-physics and Engineering. *Univ. Paris-Saclay*

**Anaïs Bernard** - Développement de nouveaux outils de traitement et d'analyse pour l'Optique. *Aix Marseille Univ.*

**Kassem Saab** - Optique adaptative pour les communications optiques en espace libre. *Univ. Paris Sciences Lettres*

**Adrien-Richard Cambouives** - Compensation des effets de la turbulence atmosphérique sur un lien optique montant sol satellite géostationnaire : impact sur l'architecture du terminal sol. *Univ. Paris-Saclay*

**\*Mathilde Makhsiyani** - Nano-émetteurs thermiques multi-spectraux. *Univ. Paris-Saclay*

**Antoine Bierret** - Composants nanostructurés pour le filtrage spectral à l'échelle du pixel dans le domaine infrarouge. *Univ. Paris-Saclay*

**Laurie Paillier** - Élaboration et validation expérimentale de modèles de canal de propagation avec optique adaptative pour les liens optiques satellite-sol. *IPP*

[PHY 2018]

**Frédéric Romand** - Simulation de la signature infrarouge des phénomènes lumineux transitoires en moyenne atmosphère. *Sorbonne Univ.*

**\*Khanh Linh Nguyen** - Mesures optiques de profils de turbulence pour les futurs systèmes d'optique adaptative et d'observation. *Univ. Côte d'Azur*

**Alice Odier** - Combinaison cohérente de convertisseurs de fréquences optiques. *Univ. Paris-Saclay*

**Anasthase Limery** - Étude et réalisation d'un lidar Raman pour la détection d'hydrogène et de vapeur d'eau dans une alvéole de stockage de colis radioactifs. *Univ. Paris-Saclay*

**Lucien Canuet** - Fiabilisation des transmissions optiques satellite-sol. *Univ. Toulouse*

**Maxime Deprez** - Moyen de métrologie pour la conception et l'évaluation de chaînes lasers hyper intenses utilisant la recombinaison cohérente de lasers élémentaires. *Univ. Paris-Saclay*

**\*Pedro Baraçal de Mecê** - 4D exploration of the retina for Adaptive Optics-assisted Laser Photocoagulation. *Sorbonne Univ.*

**Olivier Herscovici-Schiller** - Analyse et correction de surface d'onde post-coronographique pour l'imagerie d'exoplanètes. *Univ. Paris-Saclay*

**Lucie Leboulleux** - Contrôle de front d'onde optimal pour l'imagerie à haut contraste - Application au cophasage de miroirs segmentés. *Aix Marseille Univ.*

**\*Baptiste Fix** - Diodes nanostructurées pour la détection infrarouge par absorption à deux photons. *Univ. Paris-Saclay*

**Jean Nghiem Xuan** - Performances orientées système de détecteurs infrarouges à super-réseaux en cryostat opérationnel. *Univ. Paris-Saclay*

**Aurélien Bablet** - Modélisation de la réflectance spectrale d'un sol nu en fonction de sa teneur en eau dans le domaine réfléchissant solaire (400-2500 nm). *Sorbonne Univ.*

**Thierry Erudel** - Caractérisation de la biodiversité végétale en milieu montagnard et de piedmont par télédétection : apport des données aéroportées à très hautes résolutions spatiale et spectrale. *Univ. Toulouse*

**Josselin Aval** - Automatic mapping of urban tree species based on multi-source remotely sensed data. *Univ. Toulouse*

**Clara Barbanson Graziussi** - Correction des effets de relief en spectro-imagerie aéroportée. *Univ. Paris-Saclay*

**\*Kevin Cossu** - Conception et réalisation de caméras plénoptiques pour l'apport d'une vision 3D à un imageur infrarouge mono plan focal. *Univ. Lyon*

**Julie Armougom** - Nouvelles sources optiques pour la détection d'espèces chimiques dans la bande III. *Univ. Grenoble Alpes*

## [PHY 2019]

**Romain Hoarau** - Nouvelles sources optiques pour la détection d'espèces chimiques dans la bande III. *Univ. Aix-Marseille*

**Helena Gofas Salas** - Manipulation de la géométrie de l'illumination pour l'imagerie fonctionnelle de la rétine par ophthalmoscope plein champ. *Sorbonne Univ.*

**Cédric Taïssir Héritier Salama** - Stratégies d'étalonnages innovantes pour grands télescopes adaptatifs avec analyseurs de front d'onde pyramide. *Univ. Aix-Marseille*

**Ludivine Émeric** - Antennes optiques à nanogap : nouveaux concepts pour des sources de lumière. *Univ. Paris-Saclay*

**\*Claire Li** - Étude des propriétés de champ proche et de champ lointain des nano-antennes infrarouges. *Sorbonne Univ.*

**Étienne Ducasse** - Cartographie fine de l'argile minéralogique par démélange d'images hyperspectrales à très haute résolution spatiale. *Univ. Toulouse*

**Guillaume Lassalle** - Exploitation de données hyperspectrales pour l'analyse de l'état de santé de la végétation exposée aux hydrocarbures. *Univ. Toulouse*

*prix et distinctions aux doctorants*

**Kevin Cossu** *PhD best paper award* OPTRO 2016, Paris [PHY 2018]

**Mathilde Makhsiyani** Prix de thèse DGA 2019 ; Best student paper award SPIE 2016, Bruxelles ; prix doctorant ONERA PHY 2017 [PHY 2017]

**Jan Dupont** Prix de thèse 2017 de la Fondation Isae-Supaero [PHY 2017]

**Olivier Fauvarque** Prix de thèse 2017 de l'ED « Physique et Sciences de la Matière », Aix-Marseille [PHY 2017]

**Baptiste Fix** Best student paper OPTRO 2018, Paris [PHY 2018]

**Pedro Baraçal de Mecê** Prix Favard de la Société Française de Microscopie [PHY 2018]

**Khanh Linh Nguyen** Prix du meilleur article étudiant, SPIE Remote Sensing 2017, Varsovie [PHY 2018]

**Claire Li** *Best student paper* PIERS 2017, Singapour [PHY 2019]

**Léonard Prengere** *Best student paper award* OPTRO 2018, Paris [PHY en cours]

**Laurie paillier** Prix Jeunes chercheurs du CNES 2019 [PHY en cours]

# défi 10

## Électromagnétisme et radar

### Augmenter l'acuité et la richesse de l'observation électromagnétique

#### le défi

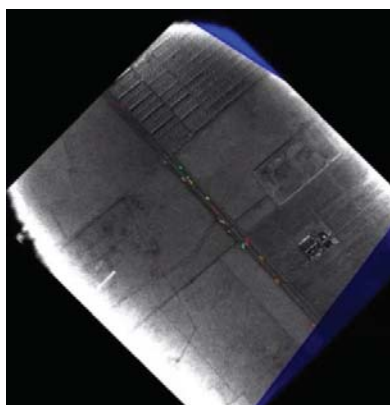
Le défi comporte les objectifs suivants :

- améliorer les radars permettant d'obtenir des informations au-delà de l'horizon, en jouant sur les nouveaux matériaux, les algorithmes, le type de polarisation, les cartes GPU, l'exploitation de divers types de propagation ;
- maîtriser les radars numériques multifonctions, compact, agiles et imageants, avec l'objectif de concevoir des systèmes radar auto-adaptatifs capables de gérer en temps réel le type d'ondes émises en fonction des observations ;
- développer des applications allant au-delà de la fonction surveillance et exploiter des données massives multi-sources ;
- modéliser et maîtriser la propagation jusqu'aux ondes millimétriques ;
- développer la simulation pour réduire les essais de compatibilité électromagnétique, en visant la simulation complète d'un avion de taille moyenne ;
- modéliser les cibles et l'environnement des futurs capteurs et des systèmes électromagnétiques, avec l'objectif de constituer des bases de données couvrant une grande variété de situations.

#### les partenariats

Les activités sont menées avec des partenaires institutionnels comme la DGA, le CNES, l'ESA et l'Agence spatiale indienne. Les partenaires industriels sont Thales et la PME Oktal-SE. Les partenaires académiques sont les universités de Rennes, Limoges, Nice, Toulouse, l'École de l'Air. A l'international, les partenaires sont l'institut Fraunhofer (Allemagne), le FOI (Suède) et DSO (Singapour) par l'intermédiaire du laboratoire commun Sondra.

#### le bilan par les projets



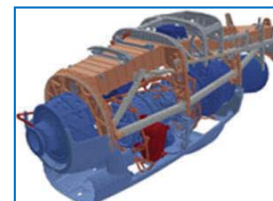
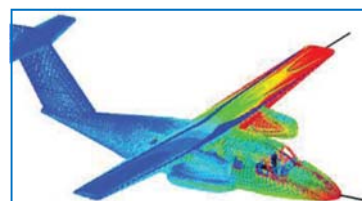
**VERI** Surveillance du champ de bataille

Le **PR VERI** a permis de développer une méthodologie de détection et de pistage de cibles mobiles à partir d'images radar aéroportées et d'en évaluer les performances pour des configurations radar variées.

Le **PR TANGER** (démarré en 2018) s'intéresse aux technologies d'antennes *large bande* pour la guerre électronique et le radar. À terme, il doit conduire au développement d'une antenne réseau imprimée large bande et d'antennes spirales compactes pour l'écoute large bande.

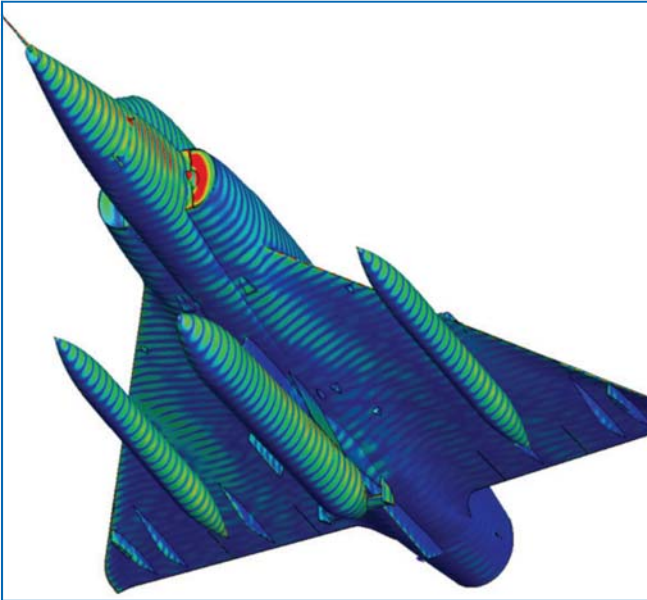
Le **PR AMICEM3D** (fin en 2019) a fait progresser les outils de simulation de la compatibilité électromagnétique (CEM) de l'ONERA par des simulations de cas tests représentatifs de problèmes de CEM industriels. Les simulations, validées pour certaines par des mesures obtenues en laboratoire, constituent une base de données permettant de situer les méthodes par rapport aux attentes des industriels.

**TANGER** Antenne réseau imprimée très large bande et antenne spirale



**AMICEM3D** Méthodes numériques performantes et adaptées aux problèmes de compatibilité électromagnétique



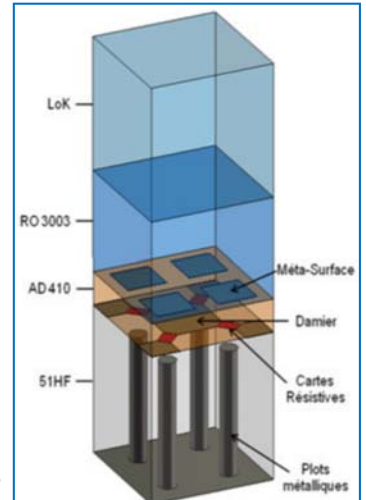


**COFEBELF** Simulation numérique parallèle à haute précision pour les calculs d'antennes et de SER

Le **PR MONICA** (voir encadré) a fait progresser les méthodologies de simulations numériques en électromagnétisme par prise en compte des effets stochastiques. .

Le **PRF COFEBELF** (fin en 2020) est consacré au développement de techniques de couplages entre deux types de méthodes complémentaires de simulation en électromagnétisme : les méthodes d'éléments finis volumiques et les méthodes d'éléments frontières basées sur des formulations intégrales à la surface d'objets diffractants.

**COFEBELF**



Antenne

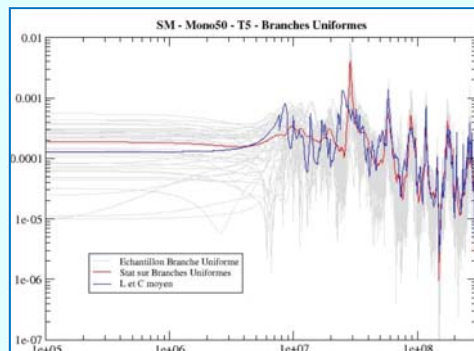
**MONICA Prise en compte des incertitudes de modélisation en électromagnétisme**

Les acquis scientifiques et techniques du projet sont les suivants :

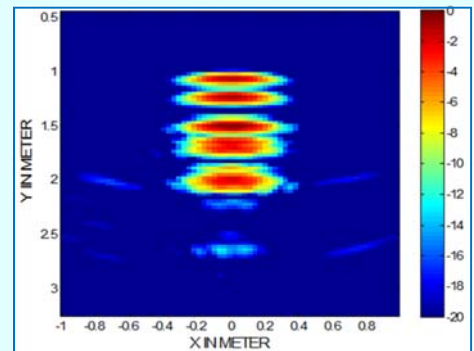
- équations intégrales de frontières : une reformulation d'une équation intégrale sur une surface stochastique sous la forme d'une équation intégrale volumique qui se prête à une solution plus efficace a été réalisée.
- interaction électromagnétique sur architectures de câblages aéronautiques : un état des lieux des méthodes théoriques les plus adaptées au problème a été réalisé et les méthodes de Monte-Carlo ont été évaluées et validées par des simulations de référence.
- équations aux dérivées partielles de Maxwell pour la propagation d'ondes électromagnétiques dans un milieu incertain : les approches Monte-Carlo et de collocation stochastique ont été validées sur des exemples. Une étude de sensibilité aux paramètres a été effectuée dans le but de réduire le coût de calcul de ces approches.
- détection de personnes ou d'objets derrière un mur avec incertitudes : les travaux menés ont permis de mettre en évidence et de quantifier les erreurs de détection et de localisation d'un objet cible dues à la traversée d'un milieu avec constituants aléatoires. La configuration du radar MIMO est identifiée comme un moyen de remédier à l'incertitude de détection.



Complexité des câblages



Coefficients de transmission calculés en fonction de la fréquence ; quelques statistiques



Sensibilité de la localisation d'un objet derrière un mur aux variations de la permittivité relative estimée du mur

## au-delà des projets ONERA, des faits marquants

### Radar | Campagne SAR aéroportée sur frégates

L'ONERA a utilisé son moyen aéroporté Sethi-Ramses NG pour une campagne de mesure SAR en très haute résolution spatiale sur deux frégates de la Marine nationale, d'une part au large en Méditerranée, d'autre part à quai au port de Toulon. Les données recueillies pendant sept vols, dont certains de nuit, sont d'une très grande richesse. Elles permettront de caractériser la réponse radar de ces navires en fonction des configurations d'observation et d'effectuer des comparaisons entre les modélisations et les mesures expérimentales. Cette campagne a eu lieu dans le cadre du contrat DGA-MI Comarem [DEMR 2018]

### Jets propulsifs | Caractérisation d'un jet de moteur à propergol

Plusieurs départements ont collaboré à la mise en place de deux essais de caractérisation du jet d'un moteur à propergol (projet DGA). Les équipements de mesure étaient les suivants :

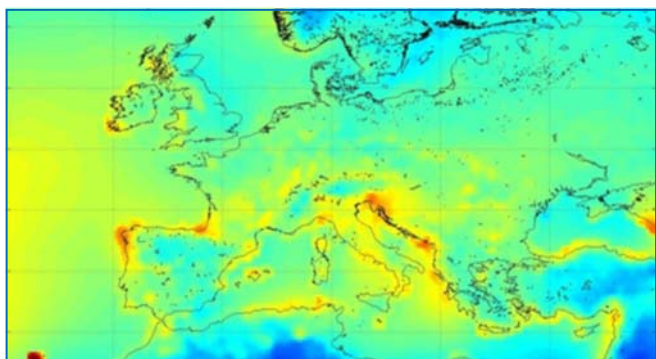
- antennes pour transmission dans 2 bandes de fréquence
- antennes micro-ondes pour transmission densité d'électrons et fréquence de collision, TDLAS
- caméras IR, rapide et radical OH•



Les équipes de calcul ont réalisé les simulations numériques permettant de choisir la configuration du propulseur et les paramètres des techniques de mesure. Les essais se sont déroulés de façon nominale et toutes les mesures ont été acquises avec succès. [DEMR, DPHY 2018]

### Radiocommunications | Un modèle statistique de précipitations ONERA devient norme à l'échelle mondiale

Le modèle statistique d'intensité des précipitations développé par l'ONERA a été adopté en mars dernier par la Commission 3 de l'Union Internationale des Télécommunications comme norme à l'échelle mondiale. Ce modèle permet de calculer l'intensité des précipitations – donnée d'entrée de base des modèles de prévision de l'atténuation due à la pluie pour les liaisons Terre-Espace, Terre-aéronefs et terrestres opérant aux fréquences supérieures à 10 GHz. Les travaux ont été menés par l'ONERA dans le cadre d'un programme d'intérêt commun – ONERA CNES. [DEMR 2017]



### CEM | Expertise ONERA internationalement reconnue

En mars, l'ONERA organisait un séminaire sur les "progrès récents dans la modélisation CEM des câblages électriques des systèmes complexes".

En lien avec le CNES et le GDR Ondes du CNRS, ce séminaire a réuni 80 personnes – industriels des domaines aéronautique, automobile et spatial, laboratoires de recherche, éditeurs de logiciels. La modélisation CEM des câblages est récemment devenue un sujet d'intérêt majeur du fait de la convergence de l'existence de méthodes de calculs puissantes et pertinentes, de la fusion des données de l'EWIS – *Electrical Wiring Interconnection Systems* – avec les données de CAO, et des conditions d'installations d'architectures de mieux en mieux maîtrisées. Ce séminaire a permis de dégager des axes forts permettant de conforter la dynamique de recherche pour les années à venir. [DEMR 2017]

### Téledétection | Une campagne d'imagerie radar et hyperspectrale avec TOTAL

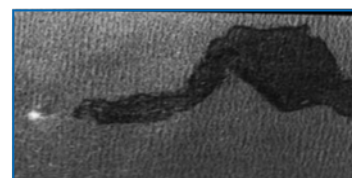
Dans le cadre du partenariat Naomi avec TOTAL, l'ONERA a effectué une campagne d'acquisition aéroportée avec le système SE-THI. L'objectif était d'explorer le potentiel de l'imagerie radar et hyperspectrale pour la caractérisation de la géologie d'une zone semi-aride. Sur zone, quatre équipes aux compétences complémentaires ont participé aux mesures, dont : l'équipe système ONERA qui s'occupait du fonctionnement des équipements aéroportés, de deux caméras hyperspectrales, de trois radars imageurs en bandes X, L et P ; une équipe de radaristes ONERA qui mettait en œuvre des instruments pour mesurer la constante diélectrique des roches et l'humidité des sols. L'aspect multidisciplinaire de la campagne est exceptionnel et les données collectées sont uniques. Elles permettront de progresser sur les techniques de caractérisation des zones arides par téledétection satellitaire, aéroportée ou par drone [DEMR, DOTA 2017]



### Pollutions maritimes | Polluproof, téledétection optique et radar

Le projet ANR POLLUPROOF, piloté par l'ONERA, a pour objectif d'améliorer les capacités des douanes françaises à poursuivre les contrevenants en cas de déversement en mer de substances chimiques nocives. Les équipes ont validé la capacité des moyens de téledétection aéroportés optique et radar à détecter et catégoriser de telles substances.

Les données ont été acquises sur des déversements contrôlés de produits chimiques. Les travaux ont permis de progresser sur l'emploi des capteurs optiques et radars et sur le développement d'une méthodologie qui s'intègre dans le scénario de recueil des preuves mis en œuvre par les douaniers. [DEMR, DOTA 2017]



## les thèses soutenues

\* : renvoie à la rubrique « prix et distinctions aux doctorants »

### [PHY 2016]

**Alice Combernoux** - Détection et filtrage rang faible pour le traitement d'antenne utilisant la théorie des matrices aléatoires en grandes dimensions. *Univ. Paris-Saclay*

**Alexandre Lepoutre** - Détection et pistage en contexte Track-Before-Detect par filtrage particulière. *Univ. Rennes*

**\*Abigael Taylor** - Traitements SAR multivoies pour la détection de cibles mobiles. *Univ. Paris-Saclay*

**Florian Ribaud** - Analysis of multipath channel reduction models for realistic GNSS receivers testing. *Univ. Toulouse*

**Juan Antonio Duran Venegas** - Reconfigurable metasurfaces for beam scanning planar antennas. *Univ. Toulouse*

**Nicolas Deymier** - Étude d'une méthode d'éléments finis d'ordre élevé et son hybridation avec d'autres méthodes numériques pour la simulation électromagnétique instationnaire dans un contexte industriel. *Univ. Toulouse*

### [PHY 2017]

**Zaynab Guerraou** - Rétrodiffusion micro-onde par la surface océanique en incidence élevée : approche conjointe théorique et expérimentale. *Univ. Toulon*

**Charles Antoine L'Hour** - Modélisation de la propagation en milieux inhomogènes basée sur les faisceaux gaussiens – Application à la propagation en atmosphère réaliste et à la radio-occultation entre satellites. *Univ. Toulouse*

**Christophe Charbonnieras** - Mesure d'intégrité par l'exploitation des signaux de navigation par satellites. *Univ. Toulouse*

**Marie-José Abi Akl** - Propagation dans l'ionosphère en présence de turbulences : application aux radars. *Sorbonne Univ.*

**Gaëtan Fayon** - Modélisation statistique de la diversité multi-site aux fréquences comprises entre 20 et 50 GHz. *Univ. Toulouse*

**Benjamin Alzaix** - Analyse mathématique et numérique de l'équation intégrale d'Herberthson dédiée à la diffraction électromagnétique d'ondes planes. *Univ. Bordeaux*

### [PHY 2018]

**\*Florian Mahiddini** - Modélisation couplée CEM - Thermique d'architectures de câblages électriques embarquées. *Univ. Toulouse*

**Jean-Pascal Monvoisin** - Modélisation de la diffraction électromagnétique des surfaces végétalisées avec prise en compte de la topographie. Application à l'étude des forêts tropicales et à la présence d'hydrocarbures sur le sol. *Univ. Toulouse*

**Ahmad Bitar** - Exploitation of sparsity for hyperspectral target detection. *Univ. Paris-Saclay*

**\*Eugénie Terreaux** - Théorie des matrices aléatoires pour l'imagerie hyperspectrale. *Univ. Paris-Saclay*

**Khac Phuc Hung Thai** - Radar « *Around the Corner* » : détection et localisation de cibles masquées en milieu urbain. *Univ. Paris-Saclay*

**Clément Berthillot** - Radar Passif Aéroporté : analyse de l'impact de la propagation sur le traitement des signaux DVB-T. *Univ. Paris-Saclay*

**Aymeric Mainvis** - Modélisation et mesure de l'interaction d'une onde électromagnétique avec une surface océanique. Application à la détection et à la caractérisation radar de films d'hydrocarbures. *Univ. Toulouse*

**Jonathan Vivos** - Méthode de conception de déphaseurs à métamatériaux par l'utilisation de lignes composites équilibrée et non équilibrée. *Univ. Toulouse*

### [PHY 2019]

**Pierre Schickelé** - Modélisation de l'émission EM de faisceaux de câbles complexes dans un environnement 3D. *Univ. Toulouse*

**Clément Rambour** - Structural tomographic approaches for urban area analysis using high resolution SAR tomography: TomoSAR. *Univ. Paris-Saclay*

**Aurélien Galmiche** - Modélisation de la scintillation ionosphérique en zone équatoriale : application à l'inversion de signaux GNSS pour la caractérisation de la turbulence. *Univ. Toulouse*

**Uy Hour Tan** - Méthodologie de conception de formes d'onde pour radars sol – Application au cas du radar MIMO. *Univ. Paris-Saclay*

**\*Ammar Mian** - Contributions to SAR Image Time Series Analysis. *Univ. Paris-Saclay*

**\*Matthieu Patrizio** - Étude et conception d'une stratégie couplée de post-maillage/résolution pour optimiser l'efficacité numérique de la méthode Galerkin discontinue appliquée à la simulation des équations de Maxwell instationnaires. *Univ. Toulouse*

## prix et distinctions aux doctorants

**Abigael Taylor** Best paper award - International Conference on Radar Systems 2017, Belfast [PHY 2016]

**Florian Mahiddini** John McCarthy student award - ICAS 2016, Seoul [PHY 2018]

**Eugénie Terreaux** Prix doctorant ONERA PHY 2018 [PHY 2018]

**Matthieu Patrizio** Meilleur article doctorant - 19<sup>e</sup> Colloque International sur la compatibilité électromagnétique CEM 2018, Paris [PHY 2019]

**Ammar Mian** Prix doctorant 2019 de l'ED STIC Paris-Saclay [PHY 2019]

# défi 11

## Perception artificielle multimodale

### Maîtriser la robustesse de la perception artificielle dans l'analyse des scènes dynamiques

#### le défi

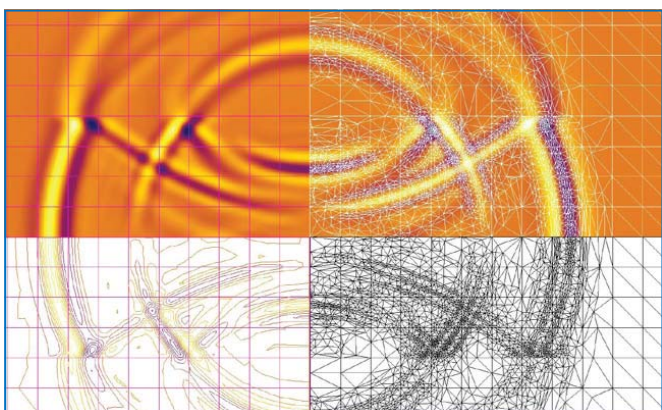
Ce défi est sous-tendu par les objectifs suivants :

- proposer des représentations numériques de réalités physiques aux échelles et précisions adaptées à des besoins divers comme la navigation autonome, la géo-intelligence, la modélisation multi-physique des environnements, la surveillance ;
- construire des informations complètes par fusion d'informations de natures diverses provenant de sources hétérogènes ;
- certifier au moyen de méthodes formelles les systèmes perceptifs basés sur des fonctions critiques de perception ou de fusion ;
- réduire le gap sémantique dans le domaine de la vision par ordinateur ;
- proposer des nouveaux systèmes de télédétection ou vidéosurveillance.

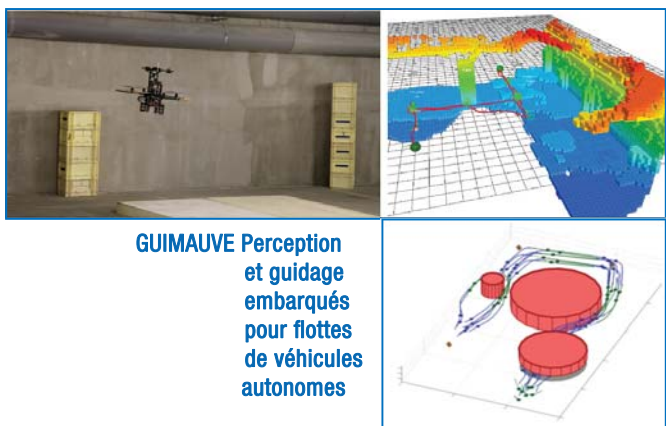
#### les partenariats

Les travaux de recherche donnent lieu à de nombreuses collaborations, notamment avec les établissements de l'Université Paris-Saclay – ENS-TA, IOGS, Télécom-ParisTech, CEA-LIST, ENS Paris-Saclay – ainsi qu'avec des unités mixtes de recherche du CNRS – GIPSA, LAAS, LIP6, ISIR.

#### le bilan par les projets



**PREVISIO** Visualisation et exploitation rigoureuses des données issues d'un code de haute précision



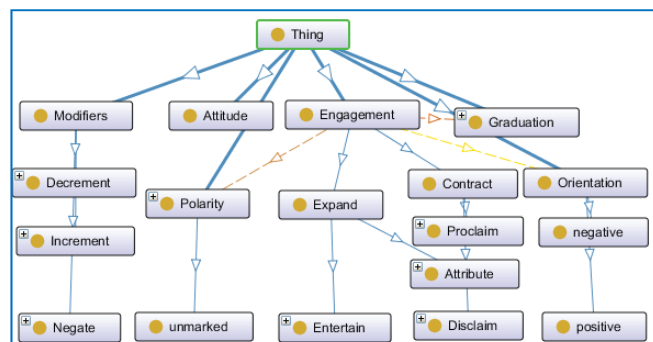
**GUIMAUVE** Perception et guidage embarqués pour flottes de véhicules autonomes

Le **PR PREVISIO** a conduit au développement de méthodologies de visualisation de résultats adaptées aux méthodes numériques d'ordre élevé.

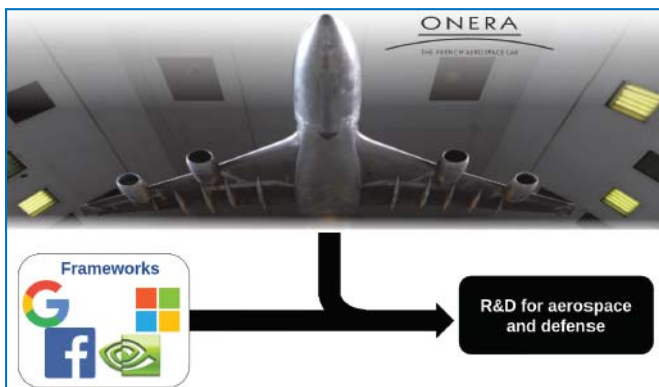
Le **PRF MEDUSA** (fin en 2020, voir encadré) a débouché sur une plateforme de démonstration prouvant la faisabilité de traitements avancés de télédétection en contexte Big Data. Des logiciels de recalage d'images, de détection de changement dans les scènes observées ou encore de débruitage d'images ont été réalisés.

Le **PR GUIMAUVE** a conduit au développement et à la validation en conditions réelles d'algorithmes exploitant toutes les informations issues de capteurs embarqués pour la localisation, la cartographie, la commande et l'estimation dans le cas de systèmes multi-véhicules explorant des zones inconnues (voir aussi défi 2).

Dans le cadre du **PR ROSARIO** (fin en 2019), des méthodologies d'analyse d'informations issues de sources ouvertes ont été développées. Celles-ci sont basées sur des algorithmes de détection de sources d'intérêt ou de traitement d'informations textuelles.



**ROSARIO** Analyse des informations issues de sources ouvertes



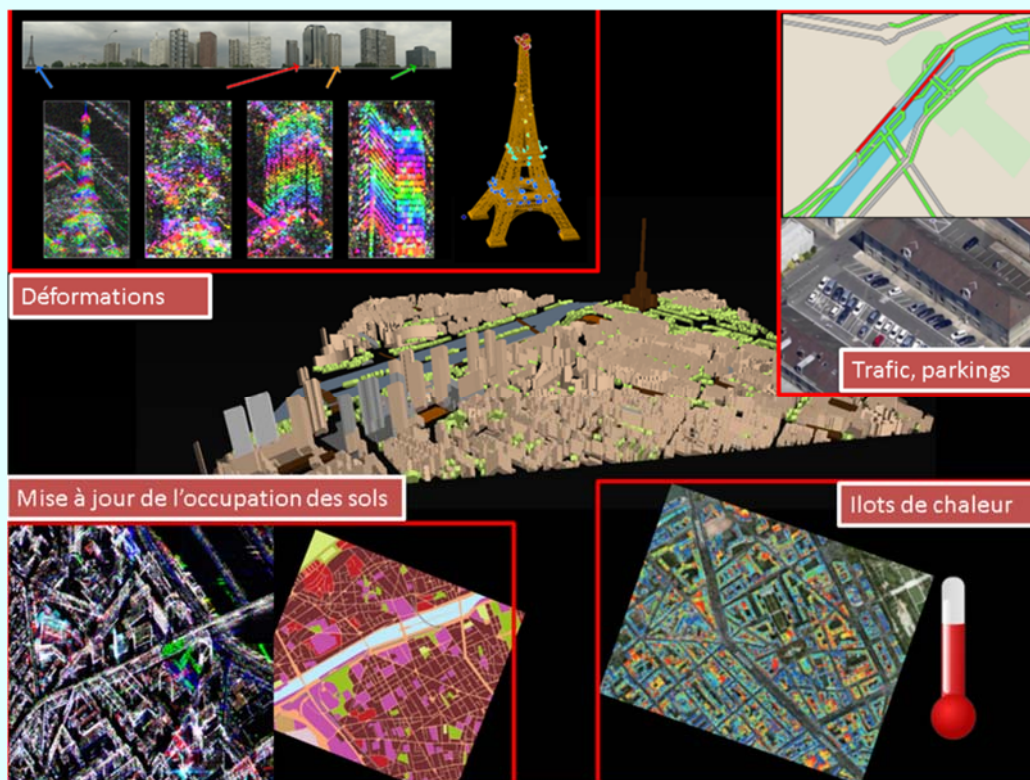
DELTA Développement et diffusion des techniques d'apprentissage profond pour l'aéronautique

Le PRF DELTA a permis d'acquérir un savoir-faire en reconnaissance et segmentation d'objet : il a conduit à la réalisation d'outils informatiques de détection de fissures dans des matériaux composites ou de segmentation d'images de combustion de propulseur.

## MEDUSA Télédétection, Big Data, Smart City, détection de changement à partir de sources ouvertes

Le projet s'est traduit par des avancées majeures en termes de traitements d'images :

- développement de GeFolki, une méthode rapide et robuste de recalage d'images. Ce logiciel a fait l'objet d'un dépôt à l'Agence pour la protection des programmes (APP) ;
- développement de Reactiv, une méthode originale de visualisation des changements à partir de séries temporelles radar. Ces travaux ont fait l'objet de publication avec un prix du meilleur article. Ce logiciel a fait l'objet d'un dépôt APP ;
- démonstration de la possibilité d'utiliser l'imagerie radar pour le calcul de déformations d'infrastructures telles que la tour Eiffel ;
- méthode originale d'*upscaling* permettant d'estimer des paramètres de structures d'une forêt par fusion lidar/radar ;
- méthode originale de débruitage d'images radar par *deep learning*.



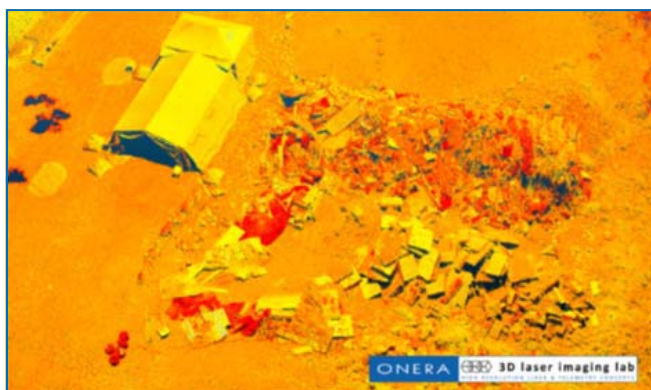
Applications des traitements d'image

## au-delà des projets ONERA, des faits marquants

### Sécurité civile | Fin du projet Inachus : imagerie laser par drone + reconnaissance par *deep learning*

L'ONERA est partie prenante du projet européen Inachus ([www.inachus.eu](http://www.inachus.eu)) visant à développer un système d'imagerie laser 3D à haute résolution embarqué sur drone, afin d'évaluer les dommages liés à un effondrement de bâtiment et planifier les secours. Plus précisément, l'objectif est de reconnaître les parties intactes des structures afin de porter secours aux rescapés qu'elles pourraient abriter. L'enjeu est de fournir des informations fiables qui permettront d'orienter le travail des équipes de secours sur le terrain.

La solution développée par l'ONERA repose sur un système d'imagerie laser porté par un drone avec des techniques de reconnaissance *deep learning*. Les axes de recherche privilégiés sont : la cartographie en 3D de grandes surfaces pour planifier le déploiement des secours en cas de catastrophe ; l'évaluation des dommages structurels pour prioriser leur intervention ; et la localisation de victimes pour optimiser les délais d'assistance. [DOTA, DTIS 2018]



### Autonomie des drones | Forte présence ONERA & démonstration de drone à l'IFAC 2017

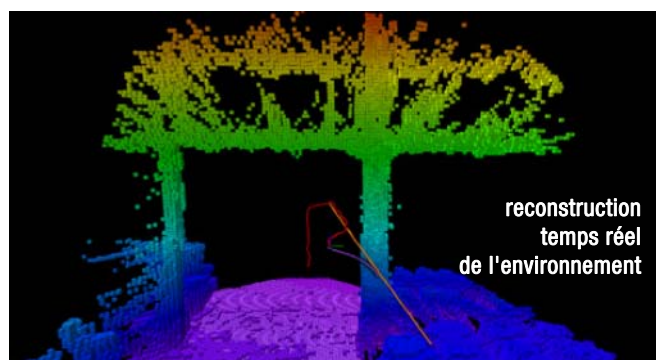
Le congrès mondial d'automatique IFAC2017 a rassemblé à Toulouse plus de 3000 participants. L'ONERA y a présenté une trentaine de communications et a organisé trois sessions invitées avec des sujets tels que : l'atterrissage à base de vision pour avions et hélicoptères, la commande coopérative de flottes de drones, le guidage de lanceurs, l'identification de paramètres pour les robots manipulateurs ou encore la capture de débris spatiaux. [DTIS 2017]

### Drones et SNCF | Démonstration « intelligence du vol » en atelier

En mai, à l'atelier de Sotteville-lès-Rouen, l'équipe Drones Palaiseau de l'ONERA a procédé à la démonstration de scénarios représentatifs de conditions d'emploi opérationnelles de petits drones en intérieur pour l'inspection d'ouvrage : vol sur de longues distances en présence ou non d'obstacles, suivi de trajectoires permettant l'inspection d'un objet d'intérêt, inspection en hauteur, etc.

Décollage, suivi de points de passage ou de trajectoires prédéfinies, localisation et reconstruction temps réel de l'environnement à partir des caméras embarquées, atterrissage ont été démontrés, ainsi que de nouvelles fonctionnalités liées à la sécurité : détection et évitement d'obstacles en cours de vol, retours d'informations aux opérateurs, procédures d'arrêt d'urgence.

Ces travaux, menés dans le cadre du partenariat recherche industrie (PRI) entre l'ONERA et la SNCF, répondent parfaitement à la problématique d'automatisation complète du vol souhaitée par la SNCF. Objectif : faciliter l'exploitation des drones d'inspection en réduisant les contraintes pour les pilotes. [DTIS 2016]



### Deep learning | L'ONERA leader du benchmark Semantic3D pour l'interprétation de scènes laser

3 ingénieurs de recherche à l'ONERA ont présenté au workshop *3D Object Retrieval* du congrès Eurographics une méthode de *deep learning* pour la classification de nuages de points 3D : SnapNet. La méthode de l'ONERA, développée dans le cadre du projet ONERA DeLTA et du projet européen FP7 Inachus est classée première sur le benchmark Semantic3D, qui concerne l'interprétation de données urbaines (par exemple, discrimination automatique de bâtiments, routes...). [DTIS 2017]

### Robotique navale | L'autonomie décisionnelle, une spécialité ONERA

Dans la continuité de l'accord signé en 2016, Naval Group et l'ONERA ont renforcé leur coopération dans le domaine de l'autonomie décisionnelle contrôlée des drones maritimes. Les développements récents ont été intégrés dans le drone de surface Remorina, développé par Sirehna, et testés avec succès à l'occasion des Naval Innovation Days de Lorient. [DTIS 2019]



*les thèses soutenues*

\* : renvoie à la rubrique « prix et distinctions aux doctorants »

**[PHY 2016]**

**\*Flora Weissgerber** - Traitements cohérents d'images RSO multi-modes multi-resolutions pour la caractérisation du milieu urbain. *Univ. Paris-Saclay*

**[TIS 2017]**

**Joris Guerry** - Reconnaissance visuelle robuste par réseaux de neurones dans des scénarios d'exploration robotique. *Univ. Paris-Saclay*

**Guillaume Brigot** - Prédire la structure des forêts à partir d'images PolInSAR par apprentissage de descripteurs Lidar. *Univ. Paris-Saclay*

**Maxime Derome** - Vision stéréoscopique temps-réel pour la navigation autonome d'un robot en environnement dynamique. *Univ. Paris-Saclay*

**[SNA 2018]**

**Florent Bonnier** - Algorithmes parallèles pour le suivi de particules. *Univ. Paris-Saclay*

**[TIS 2018]**

**\*Nicolas Audebert** - Classification de données massives de télé-détection. *Univ. Bretagne Occidentale.*

**\*Maxime Bucher** - Apprentissage et exploitation de représentations sémantiques pour la classification et la recherche d'images. *Univ. Caen Normandie*

**Calum Burns** - Super-résolution de texture pour la reconstruction 3D fine. *Univ. Paris-Saclay*

**David Caruso** - Amélioration des méthodes de navigation vision-inertiel par exploitation des perturbations magnétiques stationnaires de l'environnement. *Univ. Paris-Saclay*

**\*Marcela Pinheiro de Carvalho** - Apprentissage de profondeur par flou de défocalisation : réseaux de neurones pour l'estimation de la profondeur mono-image. *Univ. Paris-Saclay*

**\*Maxime Ferrera** - Monocular visual-inertial-pressure fusion for underwater localization and 3D mapping. *Univ. Paris-Saclay*

*prix et distinctions aux doctorants*

**Flora Weissgerber** Best student paper award - EUSAR 2016, Hambourg ; 2<sup>e</sup> prix de thèse de l'ED Télécom ParisTech, 2017 **[TIS 2016]**

**Nicolas Audebert** *Best Contribution*- ISPRS, Semantic Labeling Benchmark Award @ GEOBIA'2016 ; *2<sup>nd</sup> best student paper award* @ JURSE/IEEE Explore, 2017, Dubai **[TIS 2018]**

**Maxime Bucher** *Best paper award* ICCV 2017, Venise **[TIS 2018]**

**Marcela Pinheiro de Carvalho** Prix du meilleur article RFIAP, 2018, Marne-la-Vallée **[TIS 2019]**

**Maxime Ferrera** Prix doctorant ONERA TIS 2019 **[TIS 2019]**

## le défi

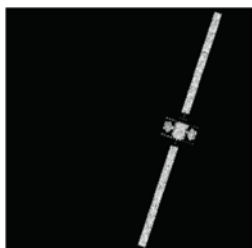
Ce défi a différents objectifs :

- faire progresser l'interférométrie atomique et les senseurs inertiels pour des applications en positionnement, géodésie, détections d'anomalies gravifiques enterrées... avec développement d'instruments opérationnels à bord de véhicules divers ;
- mesurer les accélérations dans l'espace avec une très grande précision pour mieux comprendre la physique ;
- développer de l'expertise dans le domaine de la navigation robuste et autonome de différents véhicules ;
- diagnostiquer et anticiper les risques de tempête magnétique solaire ;
- comprendre et réduire la sensibilité d'équipements de satellites ou de véhicules spatiaux à l'environnement spatial ;
- participer à la définition d'une architecture globale de surveillance de l'espace.

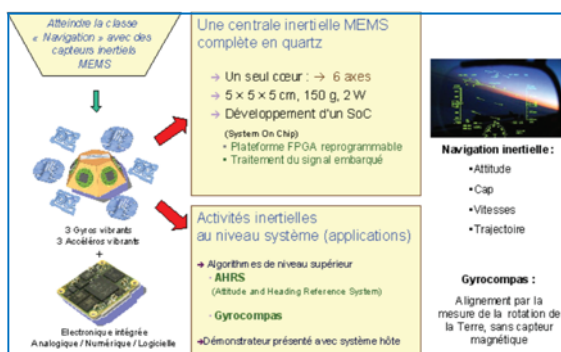
## les partenariats

Ces activités sont menées avec les agences institutionnelles CNES et DGA, avec l'ESA, le CNRS, l'Univ. Paris-Saclay – dont l'IOGS, le C2N et l'IEF – l'OCA, le SYRTE, le SHOM et les laboratoires étrangers NASA-JPL, GFZ et ZARM.

## le bilan par les projets



METOPE Imager, cataloguer ou caractériser des satellites LEO ou GEO



UNIQU Atteindre la classe « Navigation » avec des capteurs inertiels MEMS



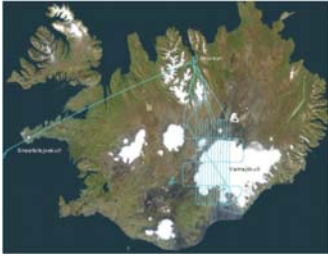
SICIL Développement d'images spectrales avec un accent fort sur l'étalonnage en laboratoire

Le **PRF METOPE** a permis de faire évoluer le banc d'imagerie LEO ODISSEE installé à l'OCA en termes d'automatisation et de traitements d'images. Des mesures de réflectances de matériaux spatiaux ont été réalisées et intégrées à la base de données Mémoires de l'ONERA. La modélisation de la luminance des satellites a été améliorée et divers outils de simulation permettant de progresser dans la conception d'outils pour l'observation en GEO ont été réalisés.

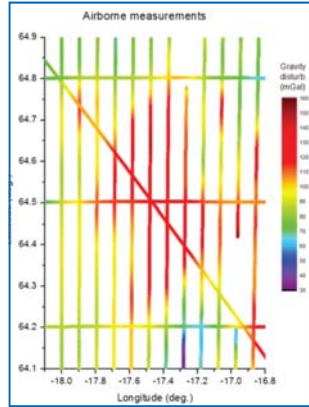
Le **PR SICIL** a porté sur l'amélioration des techniques de détection IR. L'accent a été mis sur l'étalonnage en laboratoire, ce qui a conduit à une meilleure qualité des spectres obtenus sur les instruments de détection IR Sieleters et Microspoc (MWIR). Une configuration Microspoc pour le proche IR a été réalisée et complètera à terme la gamme d'instruments de mesure de signature IR disponibles à l'ONERA.

Les travaux menés dans le cadre du **PR UNIQU** ont montré que les capteurs inertiels MEMS développés à l'ONERA pouvaient se substituer à des équipements complexes et encombrants dans les UMI (unités de mesures inertiels). Le PR a conduit à la réalisation d'un cœur inertiels MEMS intégrant trois accéléromètres et trois gyromètres dans un corps d'épreuve unique. Sur la base de l'UMI ainsi constituée, une plateforme logicielle intégrant des applications inertiels comme le gyrocompas, la restitution du cap et des attitudes ou la trajectoire a été développée.





CHAMO Se positionner grâce à une centrale inertielle à atomes froids



En complément à cette activité, le **PR CHAMO** doit démontrer d'ici 2020 la faisabilité d'une centrale inertielle à atomes froids mesurant les 6 composantes inertielles. Il se traduira par la réalisation d'un gravimètre à atomes froids aéroporté et la réalisation d'une expérience démontrant le concept d'un gradiomètre à atomes froids avec une unique masse d'épreuve.

Le **PR GREMLIT II** a été consacré à la mise au point d'un gradiomètre aéroporté extrêmement précis pour la caractérisation de zones littorales (voir encadré).

Les problématiques de détection de tempête magnétique solaire et de sensibilité d'équipements à l'environnement spatial font l'objet de projets démarrés plus tardivement (SMART-EYES, CONCRET démarrés en 2018), pour lesquels un bilan serait prématuré.

**GREMLIT II Gradiomètre embarqué sur avion pour exploration gravifique**

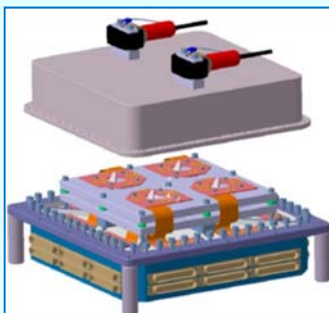
Ce PR fait suite aux études menées au cours du PR GREMLIT (2012-2015), dont les simulations ont confirmé la possibilité d'atteindre l'objectif de 1 Eötvös, en termes de sensibilité, du gradiomètre planaire GREMLIT associé à sa table stabilisatrice. La technologie du gradiomètre est quasi-identique à celle des instruments des missions Grace, Goce, Microscope et GFO. Elle doit être adaptée à une utilisation au sol sous gravité terrestre, et le défi est de la faire fonctionner sur un porteur où les niveaux de perturbation sont très élevés par rapport à ceux d'un satellite.

La gradiométrie planaire aéroportée est du plus grand intérêt de par la facilité de mise en œuvre de la mesure, sa résolution spatiale et son faible coût.

L'étude s'articule autour de la plateforme stabilisatrice, élément essentiel au fonctionnement de l'instrument et à l'obtention des performances. En effet, les contraintes d'environnement vibratoire liées aux conditions d'emport

imposent le développement d'une plateforme stabilisatrice filtrant les vibrations basse fréquence et conservant l'horizontalité du gradiomètre.

GREMLIT II a permis de réaliser un premier prototype de gradiomètre mesurant le gradient dans une direction axiale, ainsi qu'une plateforme asservie à cet axe, l'ensemble devant être testé en vol en 2019. Les résultats d'essai au sol sur ce prototype sont encourageants et donnent confiance en ce qui concerne l'objectif d'atteindre une sensibilité de 1 Eötvös. Ils ont été réalisés en utilisant les moyens d'essais Cassis du département DPHY pour simuler l'environnement du porteur. En parallèle, un gradiomètre 2 axes, en cours d'achèvement, sera associé à la plateforme stabilisatrice pour obtenir un prototype complet. L'ensemble sera d'abord validé au sol puis des essais en vol seront réalisés.



Instrument GREMLIT

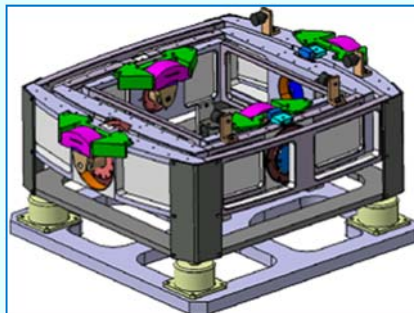
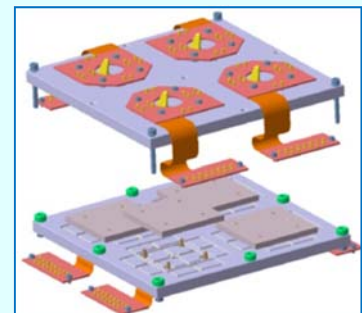


Table stabilisatrice

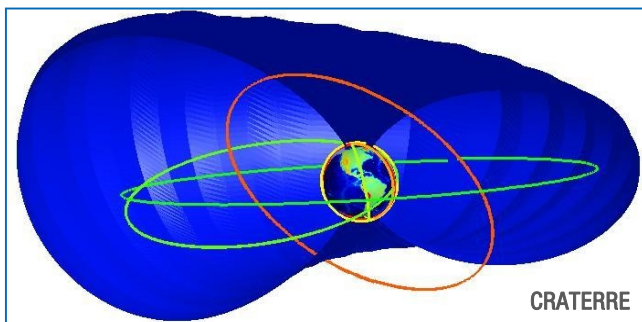


Cœur de l'instrument avec quatre masses d'épreuve

## au-delà des projets ONERA, des faits marquants

### Environnement spatial | L'ONERA développe un modèle global des ceintures de radiation

Un des objectifs du projet CRATERRE démarré il y a quelques années avec le CNES est le développement de modèles de spécification des ceintures de radiation plus précis que ceux mis à disposition par les USA. Pour cela, l'ONERA et le CNES ont mis en place une base de données de mesures in situ, IPODE – *Ionising Particle Onera DatabasE*. Ces modèles sont de renommée internationale et supplantent localement les modèles globaux existants. L'ONERA a proposé le développement d'une première version d'un modèle global. Ce dernier, regroupant les différents modèles locaux disponibles, répond à la demande des industriels en ce qui concerne les calculs de dose sur une mission. [DPHY 2016]



### Environnement radiatif | Un spectromètre neutron en Antarctique

L'ONERA a installé un système opérationnel de spectrométrie des neutrons à la station Antarctique Concordia, action dans le cadre du projet Chinstrap, soutenu par l'Institut Polaire Paul-Émile Victor.

Analogue aux spectromètres exploités depuis 2011 au Pic du Midi et au Pico Dos Dias (Brésil), cette 3<sup>e</sup> station de mesure aux caractéristiques uniques permet de disposer du premier réseau mondial de spectrométrie neutron dédié à l'étude de l'environnement radiatif naturel atmosphérique.

Ce réseau permet d'en étudier les dynamiques à court et long termes (éruption solaire, variation saisonnière), et participe au développement d'un modèle d'environnement global pertinent dans l'analyse et la quantification des effets des radiations atmosphériques sur les systèmes électroniques embarqués et sur les cellules biologiques (dosimétrie). [DPHY 2016]



### Gravimétrie | Les atomes froids de l'ONERA n'ont pas le mal de mer

Les ingénieurs physiciens de l'ONERA ont exploré l'interférométrie à ondes de matière, une technologie « quantique » exploitant le refroidissement d'atomes par laser.

Ils ont proposé à la DGA, avec le SHOM, le projet audacieux de réaliser un gravimètre basé sur ce principe, embarquable sur un navire, capable de cartographier la gravité avec une précision et une rapidité inégalées. Fort d'une première expérience réussie, l'ONERA met au point un premier prototype dont la précision atteint quelque  $10^{-9}$  g en laboratoire, puis l'instrument GIRAFE2,

capable de supporter les conditions de la navigation hauturière. Sur le bâtiment scientifique du SHOM, GIRAFE2 améliorera les valeurs connues du champ de gravité, malgré une houle atteignant 6 m ! Applications possibles : géophysique, cartographie du champ de pesanteur, navigation sans GPS... [DPHY 2016]

### Environnement spatial | Un nouveau moyen pour mesurer l'effet des radiations sur des imageurs CMOS

L'ONERA a développé un nouveau moyen de test dédié à l'étude de l'effet des radiations sur les imageurs CMOS. Ce testeur intègre toutes les fonctionnalités nécessaires à la réalisation de mesures très spécifiques, à savoir le test sur accélérateur de particules.

Compact, portable, il permet le déport du composant sous test et offre des capacités de traitement sur site. L'appareil permet, via une interface dédiée, de mesurer le niveau spécifique de chaque pixel du capteur irradié et de reconstruire la distribution des courants sur l'ensemble du plan de détection. Le nouveau banc de test est à l'œuvre pour mener à bien le programme de campagnes d'essais prévu dans le cadre d'études ESA et EDA. [PHY 2016]

### Foudre | Réalisation d'un moyen d'essai pour l'enregistrement en vol du foudroiement

L'ONERA vient d'achever la conception d'un équipement permettant d'enregistrer en vol des données de foudroiement sur un avion d'affaire, dans le cadre du projet LDSOA (*Lightning Detection System On Aircraft*) signé avec DSO National Laboratories de Singapour. La deuxième tranche consistera à réaliser ce moyen d'essai, qui équipera l'avion lors de ces vols réguliers. [PHY 2016]

### Environnement spatial | La mise en orbite géostationnaire par propulsion électrique

L'ONERA a caractérisé l'environnement spatial rencontré pendant la mise à poste en orbite géostationnaire d'un satellite à propulsion électrique et validé les scénarios définis par les deux partenaires industriels du projet NEOSAT pour les lancements à venir de leurs premiers satellites « tout électrique » : Airbus DS et Thales Alenia Space (TAS). A plus long terme, ces derniers utiliseront cet outil pour optimiser les scénarios de mise en orbite ainsi que les niveaux de blindages nécessaires, ce qui leur conférera un avantage concurrentiel. Ces travaux ont bénéficié d'un contrat PIA du CNES. [PHY 2016]

### Physique spatiale | Publication des premiers résultats de la mission Microscope

Les résultats de cette expérience spatiale montrent avec une précision inégalée, soit  $2.10^{-14}$ , que les corps tombent dans le vide avec la même accélération, quelle que soit leur composition. Le principe d'équivalence



(PE) demeurant à ce stade inébranlable, il s'agit rien de moins que d'une nouvelle confirmation de la relativité générale proposée par Albert Einstein il y a plus d'un siècle.

En effet, après seulement 10% des données acquises, l'équipe d'analyse des données de Microscope a amélioré la précision du test du PE d'un facteur 10 par rapport aux expériences passées ! Ce résultat obtenu par l'ONERA et l'OCA avec le CNES et le ZARM allemand est rapporté dans la prestigieuse revue scientifique *Physical Review Letters*. Il permet de confirmer que l'universalité de la chute libre et donc le principe d'équivalence sont des principes non violés... à ce niveau de précision. [DPHY 2017]

### Gravimétrie | Girafe en mode aéroporté : une première mondiale

Le même gravimètre a été utilisé en vol aux alentours du glacier Vatnajökull en Islande, zone d'intérêt pour étudier la fonte des glaces et les activités volcaniques.



Cette collaboration avec l'université du Danemark s'est faite dans le cadre d'études sur les effets du réchauffement climatique. La mission a permis de valider cette technologie des atomes froids pour cartographier la gravité en mode aéroporté.

Issue d'expériences de physique fondamentale menées dans les années 2000, cette technique donnant des valeurs très précises et absolues a donc débouché sur un démonstrateur technologique utilisable en conditions quasi opérationnelles. [DPHY 2017]

### Accélérométrie spatiale | La NASA renouvelle sa confiance à l'ONERA

Les premiers signaux recueillis par la mission GRACE-Follow On montrent la complète fonctionnalité des chaînes accélérométriques ONERA. Cette mission, importante pour l'étude des océans, de la géologie et du climat de la Terre, est la suite de la mission GRACE qui avait fonctionné pendant 15 ans sans incident, déjà avec des accéléromètres ONERA.



Ces accéléromètres *Super Star* renouvelés par l'ONERA au JPL de la NASA permettent de mesurer la traînée résiduelle en orbite basse, dont la connaissance est la garantie de la précision des mesures gravimétriques [DPHY 2018]

## les thèses soutenues

\* : renvoie à la rubrique « prix et distinctions aux doctorants »

[PHY 2016]

**Quentin Baghi** - Optimisation de l'analyse de données de la mission spatiale Microscope pour le test du principe d'équivalence et d'autres applications. *Univ. Paris Sciences et Lettres*

**\*\*Guillaume Aoust** - Développements de sources infrarouges et de résonateurs en quartz pour la spectroscopie photoacoustique. *École polytechnique*

**Delphine Descloux** - Sources paramétriques optiques à base de cristaux aperiodiques à agilité spectrale ultra-rapide. *Univ. Paris-Saclay*.

**Pierre Li Cavoli** - Étude théorique et expérimentale des effets singuliers induits par les muons atmosphériques sur les technologies numériques d'échelle nanométriques. *Aix-Marseille Univ.*

**Amandine Champlain** - Étude de la dynamique des poussières lunaires et de leur impact sur les systèmes d'exploration. *Univ. Toulouse.*

**Baptiste Maréchal** - Microsystèmes inertiels vibrants pour applications spatiales : apport des fonctions numériques. *Univ. Montpellier.*

[PHY 2017]

**Raphaël Chen** - Étude du bruit des accéléromètres électrostatiques ultrasensibles de la mission GOCE. *Sorbonne Univ.*

**Nicolas Fil** - Caractérisation et modélisation des propriétés d'émission électronique sous champ magnétique pour des systèmes RF hautes puissances sujets à l'effet Multipactor. *Univ. Toulouse.*

**Antoine Brunet** - Modélisation multi-échelle de l'effet d'un générateur solaire sur la charge électrostatique d'un satellite. *Univ. Toulouse.*

**Ahmad Al Youssef** - Étude par modélisation des événements singuliers (SET/SEU/SEL) induits par l'environnement radiatif dans les composants électroniques. *Univ. Toulouse.*

**Marie-Cécile Ursule** - Compréhension des mécanismes physiques à l'origine des dégradations électriques extrêmes des pixels dans les capteurs d'images irradiés. *Univ. Toulouse.*

**Juliette Pierron** - Modèle de transport d'électrons à basse énergie (10 eV-2 keV) pour applications spatiales (OSMOSEE, GEANT4). *Univ. Toulouse.*

**Damien Herrera** - Prise en compte du temps local dans la modélisation des ceintures de radiation terrestres. *Univ. Toulouse.*

**Rémi Benacquista** - Impact des structures du vent solaire sur les ceintures de radiation terrestres. *Univ. Toulouse.*

[PHY 2018]

**\*Marc Villemant** - Modélisation et caractérisation expérimentale de l'influence de l'émission électronique sur le fonctionnement des propulseurs à courant de Hall. *Univ. Toulouse.*

**Oriol Jorba-Ferro** - Étude de l'influence de la propreté électrostatique du satellite sur les mesures du champ électrique basse fréquence de Taranis. *Univ. Toulouse.*

**Thomas Rousselin** - Modélisation et interprétation des effets combinés vieillissement/SEE dans les technologies d'échelles nanométriques appliquées au domaine avionique. *Univ. Toulouse.*

**Rémi Pacaud** - Étude et modélisation numérique de l'effet des radiations spatiales sur l'évolution des propriétés physiques et électriques des matériaux embarqués. *Univ. Toulouse.*

**Adrien Piot** - Étude de la fabrication et de la transduction d'un microgyromètre piézoélectrique tri-axial en GaAs. *Univ. Paris-Saclay.*

**Quentin Nénon** - Étude et modélisation des ceintures de radiations de Jupiter. *Univ. Toulouse.*

**\*Marina Gruet** - Intelligence artificielle et prévision de l'impact de l'activité solaire sur l'environnement magnétique terrestre. *Univ. Toulouse.*

[PHY 2019]

**Clément Diboune** - Développement expérimental d'un capteur inertielle à atomes froids  $^{87}\text{Rb}/^{85}\text{Rb}/^{133}\text{Cs}$ . *Univ. Paris-Saclay*

**Isadora Perrin** - Développement expérimental d'un capteur inertielle multi-axe à atomes froids hybride embarquable. *Univ. Paris-Saclay.*

**Pauline Oudayer** - Caractérisation expérimentale et numérique de l'adhésion et de la charge électrostatique des poussières lunaires. *Univ. Toulouse*

**\*Charles Rigoudy** - Couches minces diélectriques avec des inclusions de nanoparticules d'argent réalisées par voie plasma conçues pour le contrôle du gradient de charges électriques sous irradiation électronique pour des applications spatiales. *Univ. Toulouse*

**Neil Rostand** - Modélisation compacte de l'effet des radiations naturelles des dispositifs sub-28nm pour des applications automobiles et aéronautiques. *Univ. Toulouse*

**\*Pablo Caron** - Étude des événements singuliers induits par les électrons dans les technologies intégrées. *Univ. Toulouse*

**Alexandra Zimpeck** - Approches au niveau du circuit pour atténuer la variabilité de fabrication et les *soft errors* dans les cellules logiques FinFET. *Univ. Toulouse*

**Guillaume Demol** - Étude du comportement physico-chimique et électrique de polymères spatiaux sous irradiation de haute énergie. *Univ. Toulouse*

**Paul Chapellier** - MEMS piézoélectriques pour applications temps-fréquence. *Univ. Toulouse*

**Amina Saadani** - Électrodes à cristaux bidimensionnels pour micro/nano-résonateurs piézoélectriques à très haut facteur de qualité. *Univ. Toulouse*

---

### *prix et distinctions aux doctorants*

---

**Guillaume Aoust** Prix doctorant ONERA PHY 2016 ; prix de thèse 2016 de l'ED Ondes et Matière, Paris-Saclay [PHY 2016]

**Marina Gruet** Prix jeune chercheur CNES 2017 [PHY 2018]

**Marc Villemant** *Best student poster award* - Spacecraft Charging Technology Conference 2018, Kobe ; prix de la meilleure communication orale « Ingénierie des plasmas », journée annuelle de l'ED GEET, Toulouse [PHY 2018]

**Pablo Caron** Prix doctorant ONERA PHY 2019 [PHY 2019]

**Charles Rigoudy** Prix de l'ED GEET 2019 (Toulouse) [PHY 2019]

**Marine Rufenach** Prix Amelia Earhart 2019, Zonta International [PHY en cours]

## Sigles ONERA

### Départements (DTP)

DAAA	Aérodynamique, aéroélasticité, acoustique
DEMUR	Électromagnétisme et radar
DMAS	Matériaux et structures
DMPE	Multi-physique pour l'énergétique
DOTA	Optique et techniques associées
DPHY	Physique, instrumentation, environnement, espace
DTIS	Traitement de l'information et systèmes

### Domaines (DSG)

MAS	Matériaux et structures (DSG)
MFE	Mécanique des fluides et énergétique (DSG)
PHY	Physique (DSG)
SNA	Simulation numérique avancée (DSG)
TIS	Traitement de l'information et systèmes (DSG)

### Autres instances

CEST	Comité d'évaluation scientifique et technique (remplacé par le Hcéres)
COMEX	Comité de direction
DAI	Direction des affaires internationales
DIST	Direction de l'information scientifique et technique
DS	Direction des souffleries
DRH	Direction des ressources humaines (SG)
DSG	Direction scientifique générale
DSI	Direction des systèmes d'information (SG)
DTP	Direction technique et des programmes
DVPI	Direction de la valorisation et de la propriété industrielle
HCS	Haut conseil scientifique

### Autres (ONERA)

ARE	Action de recherche exploratoire ONERA (RG)
ARF	Axe de recherche fédérateur ONERA (RG)
CEBRE	Code de simulation pour l'énergétique et la propulsion (logiciel ONERA)
CODA	Nouvelle plateforme CFD Airbus/DLR/ONERA
COP	Contrat d'objectifs et de moyens
CWUPI	<i>Coupling with Interpolation Parallel Interface</i>
DR	Directeur de recherche
ECRA	<i>Electron Cyclotron Resonance Accelerator</i>
elsA	Ensemble logiciel de simulation aérodynamique (logiciel ONERA)
F1	Grande soufflerie (subsonique, Le Fauga-Mauzac)
F2	Soufflerie de recherche (subsonique, Le Fauga-Mauzac)
FAST	<i>Flexible Aerodynamic Solver Technology</i>
FOLKI	Famille d'algorithmes de flot optique (logiciel ONERA)
HDR	Habilitation à diriger les recherches (logiciel ONERA)
IGLOO 3D	Simulation numérique du givrage (logiciel ONERA)
LEM	laboratoire d'études des microstructures
LMA2S	Laboratoire de mathématiques appliquées à l'aéronautique et au spatial
LMFL	Laboratoire de mécanique des fluides de Lille
MINAO	Laboratoire commun ONERA-C2N Micro et nano optique
MR1, MR2	Maitres de recherche
ODAS	ONERA-DLR Aerospace Symposium

ONDA	Laboratoire de caractérisation opto-électronique
PDev	Projet de développement (RG)
PR	Projet de recherche (RG)
PRF	Projet de recherche fédérateur (RG)
PRI	Partenariat recherche industrie
PIC	Programme d'Intérêt Commun
RG	Ressources générales
RISER	Référente intégrité scientifique et éthique de la recherche
S1Ma	Grande soufflerie S1 (subsonique, transsonique, Modane)
S2Ma	Grande soufflerie S2 (subsonique, supersonique, Modane)
S3Ch	Soufflerie de recherche (transsonique, Meudon)
SPACE	Simulation de la propagation acoustique en écoulement (logiciel ONERA)
SV4	Soufflerie verticale (Lille)
XDSMjs	XDSM generator written in javascript

## Environnement ONERA

### Organisations

ABG	Association Bernard Gregory
AIAA	American Institute of Aeronautics and Astronautics
AID	Agence innovation défense (DGA)
ANR	Agence nationale de la recherche
APP	Agence pour la protection des programmes
ASME	The American Society of Mechanical Engineers
CALTECH	California Institute of Technology
C2N	Centre de nanosciences et de nanotechnologies (UMR Paris-Saclay)
CEA	Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives
CEDAR	Chaire for Eco-Design of AiRcraft
CERFACS	Centre européen de recherche et formation avancée en calcul scientifique (Toulouse)
CETIM	Centre technique des industries mécaniques
CORIA	Complexe de recherche interprofessionnel en aéro-thermochimie (UMR Rouen)
CNES	Agence spatiale française
CNRS	Centre national de la recherche scientifique
DGA	Direction générale de l'armement
DGAC	Direction générale de l'aviation civile
DLR	Centre de recherche allemand pour l'aéronautique, l'espace, le transport, l'énergie
DSNA	Direction des systèmes de navigation aérienne (DGAC)
DSO	Defense Science Organisation (Singapour)
EASA	The European Authority in aviation safety
ECERS	European Ceramic Society
ED	École doctorale
EDA	European Defence Agency
EEA (club)	Enseignants et chercheurs en électronique, électrotechnique et automatique
ENAC	École nationale d'aviation civile
ENS	École normale supérieure
ENSAM	École des arts et métiers ParisTech
ENSTA	École nationale supérieure des techniques avancées
ESA	Agence spatiale européenne
EUCASS	European Conference for Aeronautics and Space Sciences
FOI	Swedish Defence Research Agency
GEM	Institut de recherche en génie civil et mécanique (UMR Nantes)
GENCI	Grand équipement national de calcul intensif
GIPSA	Grenoble Images Parole Signal Automatique (UMR Grenoble)
GFZ	German Research Centre for Geosciences

ICCFD	International Conference on Computational Fluid Dynamics
ICHEM	International Conference on High-Entropy Materials
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
IES	Institut d'électronique et des systèmes
IMACS	Ingénierie mathématique et calcul scientifique
INRIA	Institut national de recherche en informatique et automatique
INSA	Institut national des sciences appliquées
IRFU	Institut de recherche sur les lois fondamentales de l'Univers (CEA)
IRT	Institut de recherche technologique
IOGS	Institut d'optique Graduate School
ISAE	Institut supérieur de l'aéronautique et de l'espace
ISIR	Institut des systèmes intelligents et de robotique (UMR Paris)
ISL	Institut Saint-Louis
JAXA	Japan Aerospace Exploration Agency
JPL	Jet Propulsion Laboratory (NASA)
LAM	Laboratoire d'astrophysique de Marseille
LAUM	Laboratoire d'acoustique de l'Université du Mans
LATMOS	Laboratoire atmosphères, milieux, observations spatiales (IPSL)
LETI	Laboratoire d'électronique et de technologie de l'information (CEA)
LIP6	Laboratoire d'informatique de Paris 6 (UMR Paris)
LIST	Institut des systèmes numériques complexes (CEA)
LLNL	Lawrence Livermore National Laboratory
MACS (GdR)	Modélisation, analyse et conduite des systèmes dynamiques
MI	Maîtrise de l'information (DGA)
NASA	National Aeronautics and Space Administration (USA)
OCA	Observatoire de la Côte d'Azur
OTAN	Organisation du traité de l'Atlantique Nord
PPRIME	Institut polytechnique de Poitiers : recherche et ingénierie en matériaux, mécanique et énergétique
SF2M	Société Française de Métallurgie et de Matériaux
SHOM	Service hydrographique et océanographique de la Marine
SPIE	The international society for optics and photonics
STO	Organisation pour la science et la technologie (OTAN)
SYRTE	Laboratoire Systèmes de référence temps-espace (Observatoire de Paris)
TSAE	Toulouse Graduate School of Aerospace Engineering
TsAGI	Institut central d'aéro-hydrodynamique (Russie)
TU	Université de technologie (en allemand, néerlandais)
UE	Union européenne
X	École polytechnique
ZARM	Center of Applied Space Technology and Microgravity (Brême, Allemagne)
<b>Divers</b>	
AED (ASD)	Aéronautique, espace (spatial), défense (domaine industriel)
AMPFETI	Adaptive MultiPreconditioned Finite Element Tearing and Interconnecting
ASTRID	Accompagnement spécifique des travaux de recherches et d'innovation défense (ANR/DGA)
BLI	Boundary Layer Ingestion (ingestion de couche limite)
BNL	Bas niveau de lumière
BOS 2D, 3D	Background Oriented Schlieren 2D, 3D
BSD	Berkeley Software Distribution
BWB	Blended Wing Body
CAA	Computational aeroacoustics
CEM	Compatibilité électromagnétique
CIFRE	Conventions Industrielles de formation par la recherche

CFD	Computational Fluid Dynamics
CGNS	CFD General Notation System
CLAD	Construction laser additive directe
CMAS	Calcium-Magnesium-AluminoSilicate
CMOS	Complementary Metal Oxide Semi-Conductor
<b>DIAL</b>	Lidar à absorption différentielle
<b>ED</b>	École doctorale
EM	Électromagnétisme
ELT	Extremely Large Telescope (ESO)
EWIS	Electrical Wiring Interconnection Systems
<b>FDD</b>	Fault Detection and Diagnosis
FP7	7e programme-cadre européen pour la recherche et l'innovation
FTC	Fault Tolerant Control
<b>GEO</b>	Geostationary orbit
GEOBIA	Geographic Object-Based Image Analysis
GDR	Groupement de recherche (CNRS)
GNSS	Global Navigation Satellite System
GPS	Global Positioning System
GPU	Graphic Processing Unit
<b>H2020</b>	8e programme-cadre européen pour la recherche et l'innovation
HPC	High Performance Computing
HPCMP	High Performance Computing Modernization Program (USA/DoD)
HUMS	Health and Usage Monitoring System
<b>IFAC</b>	International Federation of Automatic Control
ICCV	International Conference on Computer Vision
IR	Infrarouge
ITD	Integrated Technology Demonstrators (H2020)
<b>JTI</b>	Joint Technology Initiative (H2020)
JURSE	Joint Urban Remote Sensing Event
<b>LabEx</b>	Laboratoire d'Excellence (PIA)
LBM (1)	Lattice-Boltzmann Method (CFD)
LBM (2)	Laser Beam Melting (fabrication additive)
LEO	Low Earth Orbit
LES	Large Eddy Simulation
LIF	Laser Induced Fluorescence
<b>MEB-Iris</b>	Système de microscopie corrélative in situ
MDO	MultiDisciplinary Optimization
MEMS	Microsystème électromécanique
MGP	Matériaux à gradient de propriétés
MIMO	Multiple Input Multiple Output (radar)
MPPA	Massively Parallel Processor Array
MWIR	Midwave infrared
<b>NDI</b>	Inspection non destructive
NPR	Nozzle Pressure Ratio
<b>OA</b>	Optique adaptative
<b>PE</b>	Principe d'équivalence
PDA	Phase Doppler Anemometry (particle analyser)
PIA	Programme d'investissement d'avenir
PIV	Particle Image Velocimetry
PPST	Protection du potentiel scientifique et technique de la nation
PSP	Peinture sensible à la pression
<b>QSP</b>	Quilted Stratum Process
<b>RANS</b>	Reynolds-Averaged Navier-Stokes



RFIAP	Reconnaissance des formes, image, apprentissage et perception
ROV	Remotely Operated Underwater Vehicles
RSOA	Robot System Onboard Architecture
SAR	Synthetic Aperture Radar
SER	Surface équivalente radar
SESAR	Single European Sky ATM Research
SFWA	Smart Fixed Wing Aircraft
SPS	Spark Plasma Sintering
SMT	Surrogate Modeling Toolbox (modélisation de substitution)
STIC	Sciences et technologies de l'information et de la communication
TDLAS	Tunable diode laser absorption spectroscopy
UAV	Unmanned Aerial Vehicle (drone)
UCAV	Unmanned Combat Aerial Vehicle (drone de combat)

Ce document ainsi que le plan stratégique scientifique  
sont consultables en  
<https://www.onera.fr/pss>

ONERA - Direction Scientifique Générale - janvier 2020