



www.cnrs.fr

---

**DOSSIER DE PRESSE**

---

# QUEL AVION POUR DEMAIN ?

**Conférence de presse**  
Jeudi 8 juin 2017 à 10h  
au CNRS

**Contact**

---

Presse CNRS | Anne-Sophie Boutaud | T 01 44 96 46 06 | [anne-sophie.boutaud@cnrs.fr](mailto:anne-sophie.boutaud@cnrs.fr)



[www.cnrs.fr](http://www.cnrs.fr)

---

## **Sommaire**

---

**> Invitation presse**

**> Les intervenants (biographies)**

**> Leurs présentations**

**> Dossier CNRS Le Journal**

**> Aller plus loin : articles et actualités CNRS**

**> Ressource vidéo**

---



www.cnrs.fr

---

## INVITATION PRESSE | PARIS | 1<sup>er</sup> JUIN 2017

---

**Conférence de presse**  
**Jeudi 8 juin 2017 à 10h**  
**Au CNRS – 3, rue Michel-Ange – Paris 16<sup>e</sup>**  
**Métro Michel-Ange Auteuil (Lignes 9 et 10)**

Du 19 au 25 juin prochains, amateurs et professionnels de l'aviation feront escale au Bourget pour le 52<sup>e</sup> Salon international de l'aéronautique et de l'espace. En coulisse, en mettant au point de nouveaux matériaux et procédés de combustion, en jouant sur l'aérodynamisme des appareils ou encore en améliorant la fiabilité des systèmes embarqués, la recherche a permis des avancées technologiques remarquables ces dernières années pour créer des avions moins polluants, plus sûrs et plus résistants.

A l'occasion de la sortie d'un dossier de CNRS Le Journal sur le sujet, le CNRS vous invite à une conférence de presse le jeudi 8 juin à 10h.

### Programme :

**Introduction** par **Yves Rémond**, directeur adjoint scientifique de l'Institut des sciences de l'ingénierie et des systèmes (INSIS) du CNRS et professeur à l'université de Strasbourg – ECPM.

**Moteurs et aspects acoustiques : les pièges sonores** par **Yves Aurégan** directeur de recherche CNRS au Laboratoire d'acoustique de l'Université du Maine (Université du Maine/CNRS/Ecole supérieure électronique de l'ouest).

**Énergie, systèmes embarqués et réseaux de bord : les défis de l'électrification des avions** par **Xavier Roboam**, directeur de recherche CNRS au Laboratoire plasma et conversion d'énergie de Toulouse (INP Toulouse/Université Toulouse – Paul Sabatier/CNRS).

**Matériaux composites : quand les avions de lignes perdent du poids** par **Francisco Chinesta**, chercheur à l'Institut de recherches en génie civil et mécanique (GeM, CNRS/Ecole Centrale de Nantes/Université de Nantes).

**Interaction homme-machine dans les systèmes critiques** par **Philippe Palanque**, enseignant-chercheur à l'Institut de recherche en informatique de Toulouse (IRIT - CNRS/Université Toulouse 1 Capitole/Université Toulouse 2 Jean Jaurès/Université Toulouse 3 Paul Sabatier/INP Toulouse).



www.cnrs.fr

Pour assister à la conférence de presse, merci de vous inscrire avant le **6 juin** en indiquant votre nom, prénom, nom du média, téléphone portable et mail à : [anne-sophie.boutaud@cnrs.fr](mailto:anne-sophie.boutaud@cnrs.fr)

***En raison du plan Vigipirate, une pièce d'identité (CNI, passeport) vous sera demandée à l'entrée. Les cartes de presse ne sont pas acceptées comme cartes d'identité.***

### Contact

---

Presse CNRS | Anne-Sophie Boutaud | T 01 44 96 46 06 | [anne-sophie.boutaud@cnrs.fr](mailto:anne-sophie.boutaud@cnrs.fr)



www.cnrs.fr

## Les intervenants (biographies)

---



**Yves Rémond** est directeur adjoint scientifique à l'Institut des sciences de l'ingénierie et ses systèmes (INSIS) du CNRS. Il est également professeur de mécanique des matériaux (PRCE2) à l'université de Strasbourg (Ecole de chimie, polymères et matériaux). Ancien élève de l'ENS Paris Saclay, il est agrégé de mécanique après avoir obtenu son doctorat en 1984 au Laboratoire de mécanique et technologie (LMT, CNRS/UPMC/ENS Paris Saclay) sur des modélisations de matériaux et structures composites pour l'aérospatiale. Il effectue ses recherches dans le domaine de la modélisation et de la simulation du comportement mécanique des matériaux inertes ou vivants, à l'aide notamment de modèles multi-échelles. Le laboratoire qu'il dirige de 2001 à 2010 s'associe aux autres laboratoires en sciences de l'ingénierie strasbourgeois pour créer, en 2013, le Laboratoire des sciences de l'ingénieur, de l'informatique et de l'imagerie (ICube – CNRS/Université de Strasbourg/INSA Strasbourg/ENGEES). Après avoir présidé l'Association nationale pour les matériaux composites (AMAC) et le comité d'évaluation du programme « matériaux et procédés » de l'ANR, Yves Rémond est en charge au CNRS de la mécanique des matériaux et des structures, de l'acoustique, de la biomécanique et de la robotique.

### Contact

T 01 44 96 47 82 / [yves.remond@cnrs-dir.fr](mailto:yves.remond@cnrs-dir.fr)



Directeur de recherche au CNRS, **Yves Aurégan** a dirigé le Laboratoire d'acoustique de l'université du Maine (Université du Maine/CNRS/Ecole supérieure électronique de l'ouest) de 2004 à 2011. Après une agrégation de mécanique à l'Ecole normale supérieure de Cachan puis un doctorat d'acoustique, il s'est tourné vers la recherche. Il enseigne l'aéroacoustique dans plusieurs universités françaises (Le Mans, Ecole Centrale de Lyon) et à l'international. Yves Aurégan s'est d'abord intéressé à la production du ronflement humain et travaille désormais sur l'effet de l'écoulement sur la propagation dans les conduits traités avec des matériaux absorbants. Yves Aurégan a coordonné de nombreux contrats avec des institutions publiques et des industriels français comme AIRBUS, Snecma Propulsion Solide, Snecma moteur ou EDF. Il a reçu en 2016 une Étoile de l'Europe pour la coordination du projet FlowAirS visant à réduire les bruits dans les domaines des transports, du bâtiment et de la génération de puissance.

### Contact

T 02.43.83.35.09 | [yves.auregan@univ-lemans.fr](mailto:yves.auregan@univ-lemans.fr)



www.cnrs.fr



**Xavier Roboam** obtient un doctorat de l'Institut national polytechnique de Toulouse en 1991. Entré en 1992 au CNRS, il est directeur de recherches au Laboratoire plasmas et conversion d'énergie (LAPLACE) à l'université de Toulouse où il développe des recherches autour des méthodologies de conception systémique (analyse, optimisation) orientées vers des dispositifs hétérogènes, complexes et multiphysiques. Ses recherches s'appliquent à deux domaines principaux : les micro-réseaux intelligents pour applications stationnaires couplées aux énergies alternatives intermittentes et les réseaux embarqués d'énergie, en particulier pour l'avion plus électrique, pour lequel les recherches évoluent des systèmes non propulsifs à l'avion à propulsion hybride. Autour de ce thème, il fut notamment expert-consultant pour la société Airbus entre 2006 et 2016. Ses travaux visent la minimisation de la masse embarquée, synonyme de gains en consommation, mais aussi le respect de la fiabilité des systèmes soumis à des contraintes environnementales spécifiques comme la foudre, l'altitude ou la température.

#### Contact

T 05 34 32 24 22 / 06 08 16 09 22 | [xavier.robaoam@laplace.univ-tlse.fr](mailto:xavier.robaoam@laplace.univ-tlse.fr)



Professeur en Informatique à l'université Paul Sabatier – Toulouse III, **Philippe Palanque** est responsable de l'équipe ICS (Interactive Critical Systems) au sein de l'Institut de recherche en informatique de Toulouse (IRIT - CNRS/Université Toulouse 1 Capitole/Université Toulouse 2 Jean Jaurès/Université Toulouse 3 Paul Sabatier/INP Toulouse). Après une licence en mathématiques, il s'est orienté vers l'informatique et a obtenu un doctorat sur les langages de description de systèmes interactifs en 1992. Ses recherches dans le domaine de l'Interaction Homme-Machine portent sur les méthodes, outils et techniques pour construire des systèmes interactifs fiables, utilisables et résistants aux erreurs humaines. Ces travaux ont été réalisés en collaboration avec les acteurs des systèmes critiques interactifs comme Airbus pour les cockpits d'avions civil, le Centre national de recherche spatiale pour les segments sols de satellites ou encore Eurocontrol pour les systèmes de contrôle aérien.

#### Contact

T 05 61 55 69 65 | [philippe.palanque@irit.fr](mailto:philippe.palanque@irit.fr)



www.cnrs.fr



Chercheur à l'Institut de recherche en génie civil et mécanique (GeM – CNRS/ECN/Université de Nantes) et professeur à l'Ecole centrale de Nantes (ECN) au sein de l'Institut de calcul intensif, **Francisco Chinesta** est co-titulaire, depuis 2013, d'une chaire en modélisation et simulation avancées des matériaux, procédés, structures et systèmes (ECN/ESI Group). Il est membre de l'Institut universitaire de France, de l'Académie royale des sciences de l'ingénierie d'Espagne et président de l'association française de mécanique numériques (CSMA) et du Groupement de recherche CNRS (GdR) sur la réduction de modèles en sciences et ingénierie. Entre 2008 et 2012, il était titulaire d'une chaire d'enseignement et de recherche du groupe AIRBUS dans la simulation avancée des procédés de fabrication des structures composites pour des applications aérospatiales. Il a publié plusieurs centaines d'articles sur la modélisation et simulation en physique et ingénierie dans des revues internationales. Il est notamment l'auteur de l'ouvrage « La vie intime des matériaux composites » (avril 2011).

#### Contact

T 0670799072 | [francisco.chinesta@ec-nantes.fr](mailto:francisco.chinesta@ec-nantes.fr)



[www.cnrs.fr](http://www.cnrs.fr)

## **Leurs présentations**

---

Voir les présentations d'Yves Aurégan, Xavier Roboam et Philippe Palanque, imprimées à part.



www.cnrs.fr

## Dossier CNRS Le Journal

---

Ce dossier sera publié en ligne sur <https://lejournal.cnrs.fr/>.

### **Le régime minceur des avions de ligne**

**En quelques années, les chercheurs et ingénieurs qui travaillent sur les structures et les matériaux des avions sont parvenus à réduire le poids de ces appareils de plusieurs tonnes. Une avancée majeure due aux progrès de fabrication, à l'essor des matériaux composites et à l'arrivée des outils numériques, qui préfigurent de nouvelles performances aéronautiques.**

Ils rendent les avions plus résistants mais aussi plus légers, et permettent ainsi de réduire leur consommation. Depuis les années 80, le succès des matériaux composites ne se dément pas. Leur proportion dans la structure des avions de ligne ne cesse en effet de croître, dépassant même les 50% sur certains modèles récents. Cantonnée aux pièces secondaires dans un premier temps (bords d'attaque<sup>1</sup>, volets mobiles<sup>2</sup>, etc.), leur utilisation s'étend désormais au fuselage et aux ailes, et même aux parties les plus sollicitées de l'avion, c'est-à-dire la liaison ailes-fuselage. *«Mais sans la modélisation et la simulation de pointe développées par les chercheurs et les ingénieurs, les matériaux composites n'auraient pas prospéré aussi rapidement»*, souligne Francisco Chinesta, chercheur à l'Institut de calcul intensif et à l'Institut de recherche en génie civil et mécanique<sup>3</sup> (GeM).

#### **L'envol des composites**

Avec sa forme de chauve-souris géante et un poids n'excédant pas les 300 kilogrammes, «Éole», l'avion conçu par l'ingénieur Clément Ader (1841-1925) pouvait s'élever de 20 centimètres au-dessus du sol sur presque 50 mètres. Un avion doublement précurseur puisque sa structure, de bois et de tissu, intégrait déjà des matériaux composites naturels. En 2011, soit 121 ans après le premier vol d'Éole, le Boeing 787 fend les airs avec la moitié de son poids en matériaux composites. De même composition, l'Airbus A350 devrait rejoindre bientôt son concurrent dans les airs. Entre-temps, pourtant, le métal avait largement remplacé toile et bambou. Dans les années 1970, le célèbre et imposant Boeing 747 n'était, lui, constitué que d'alliages d'aluminium.



Cône d'éjection en composite à matrice céramique.  
© SAFRAN

« Les travaux sur l'utilisation de matériaux composites dans l'aéronautique ont démarré dans les années 1970 », se souvient Olivier Allix, professeur au Laboratoire de mécanique et technologie<sup>4</sup> (LMT-Cachan) et coresponsable du laboratoire commun EADS-ENS « Inno-Campus ». « Les composites dans un avion sont principalement constitués d'une matrice organique renforcée par des fibres de carbone, pour les pièces de la structure comme le fuselage ou les ailes. Outre leur légèreté, leur immense avantage est d'être insensibles à la corrosion et très peu sensibles à la fatigue, à la différence des métaux. On voit également émerger des composites à matrice en céramique, restreints à certaines pièces de moteur, et seuls à même de supporter de fortes températures », précise le chercheur. Enfin, des architectures tissées très résistantes aux impacts sont aujourd'hui utilisées dans un moteur comme le LEAP de Safran, qui permet des gains de consommation et de pollution de l'ordre de 30 %.

### Composites versus métaux

Sur le plan mécanique, et dans des conditions normales de vol, ces matériaux montrent des propriétés supérieures pour ce qui est du rapport poids-résistance en comparaison des alliages métalliques. « La résistance, on la doit aux fibres de carbone tissées, un peu comme du tissu, explique Francisco Chinesta. C'est résistant, mais cela ne tient pas la forme, tout comme le tissu

*d'un vêtement. On imprègne alors les fibres avec une matrice organique, généralement un polymère, qui va permettre de maintenir les fibres et de fixer une forme. » Bilan : ces matériaux sont non corrosifs, plus légers et plus résistants que les métaux. Dès lors, l'utilisation de ces composites a été fortement encouragée après les chocs pétroliers des années 1970 afin, notamment, de réduire la facture en carburant des avions.*



*Métier à tisser la fibre de carbone utilisée pour la fabrication du moteur LEAP.  
©Adrien Daste/SAFRAN*

Mais ces avantages ont aussi leurs revers. Ainsi, les composites semblent moins adaptés aux imprévus de vol tels que la foudre ou les oiseaux. Leur faible capacité à conduire le courant, à la différence des métaux, oblige en effet les constructeurs à « ajouter, par exemple, de grandes poutres en cuivre dans le fuselage pour jouer le rôle de masse et dissiper le courant lors d'un foudroiement en plein vol », évoque Philippe Olivier, directeur de l'Institut Clément-Ader<sup>5</sup>, dont les équipes s'attachent à l'étude des structures, des systèmes et des procédés mécaniques en aéronautique. La capacité des composites à absorber des chocs violents lors d'une collision en vol avec des oiseaux ou des projectiles est également moindre que celle des métaux. Enfin, l'usinage des pièces et la réparation de structures endommagées peuvent se révéler plus délicats et plus coûteux.



www.cnrs.fr

## L'usine du futur

Ces limitations actuelles, Philippe Olivier et toutes les équipes de l'Institut Clément-Ader souhaitent les dépasser. En lien étroit avec les industriels, dont Airbus, ce groupe de chercheurs répartis entre Toulouse, Albi et Tarbes, s'intéressent de près à la fabrication des pièces composites. Afin de rendre l'usinage de ces pièces plus rapide et moins onéreux, des procédés de fabrication à bas coût ont été conçus au sein de l'Institut. *« La start-up Aurock est un bel exemple de ces travaux, se félicite Philippe Olivier. Elle a été créée par d'anciens doctorants du laboratoire et propose aux industriels un processus de mise en forme original et économique à l'aide de moules en béton fibré. »*

L'un des facteurs limitants pour l'usinage des pièces composites est généralement le temps de chauffage nécessaire pour leur imprimer leur forme définitive. *« Pour accélérer la cadence, nous avons d'autres machines en cours d'évaluation »,* indique le chercheur. Du chauffage par induction ultrarapide aux infrarouges en passant par le « formage superplastique », emboutissant une pièce par simple pression de gaz : autant de pistes pour faire baisser le coût tout en réduisant le cycle de production.

En tant que spécialiste des procédés de fabrication des composites, Francisco Chinesta connaît bien les problématiques d'usinage : *« Mon travail consiste à comprendre puis à modéliser les procédés industriels de mise en forme des pièces finales de l'avion. Et ce faisant, à déterminer "la trace" mathématique du matériau dans la machine,* précise ce chercheur fêru de simulations numériques. *Une fois que j'ai transcrit le procédé en équations, je teste sur ordinateur des milliers de scénarios afin de faire encore mieux : enlever quelques kilogrammes, fabriquer plus vite ou avec moins d'énergie. »*

## Des matériaux conçus *in silico*

Et même si, compte tenu du grand nombre de paramètres à considérer, les simulations peuvent prendre des jours, voire des semaines, le gain pour les industriels est décisif. *« C'est grâce aux approches numériques, qui se sont largement imposées depuis le début des années 2000, que l'on peut aujourd'hui envisager l'étude de nouveaux matériaux composites mieux à même de résister au foudroiement ou aux impacts »,* se réjouit Francisco Chinesta.

Les approches numériques sont également au cœur de la nouvelle plateforme STIMPACT dont Olivier Philippe a contribué à la création. Grâce à l'utilisation de lanceurs à air comprimé, uniques en leur genre et conçus par le chercheur et son équipe de Toulouse, elle offre la possibilité d'étudier tous les types d'impacts que peut subir, à faible ou à grande vitesse, un avion. En outre, *« l'utilisation de caméras à très haut débit, capables de filmer 100 000 images par seconde, nous permet de réaliser des analyses spatio-temporelles sans précédent »,* indique le scientifique. Il



www.cnrs.fr

présentera les premiers résultats issus de la plateforme lors du salon du Bourget, du 19 au 25 juin. Les avancées conjointes des instruments et des méthodes de traitement informatique permettent également à Philippe Olivier et à ses équipes de proposer aux industriels des processus mobiles mieux adaptés à la réparation de pièces composites détériorées.

*« L'endommagement des matériaux composites est désormais bien mieux compris et prédit grâce aux approches numériques, qui permettent d'intégrer tout le savoir accumulé sur la physique complexe de ces matériaux »,* rappelle Olivier Allix. Les travaux pionniers menés au LMT-Cachan sous l'impulsion de Pierre Ladevèze ont permis le développement d'outils désormais *« intégrés dans la plupart des codes industriels »*. Toutefois, les avancées les plus récentes dans le domaine ne sont pas encore utilisées en routine : *« Lorsque les industriels effectuent des simulations, leurs outils ont au moins dix ans de retard par rapport à ceux de la recherche. Ce n'est que lorsqu'un essai se passe mal que nos outils numériques de dernière génération viennent à la rescousse pour éclairer ce qui s'est passé »*, explique le chercheur.

Si la révolution numérique chemine plus lentement du fait de la rigueur des processus d'homologation, elle fera la différence dans les années à venir. *« Le nombre de données acquises depuis les années 2000 grâce à ces nouvelles techniques expérimentales croît plus vite que la loi de Moore<sup>6</sup> »,* souligne Olivier Allix. Couplées à des bancs d'essais de plus en plus précis dans leurs mesures, ces approches *in silico* pourraient permettre de simuler la tenue des matériaux en considérant l'avion dans son ensemble et non plus seulement ses sous-parties. Une *« rupture méthodologique »* qui pourrait accélérer à terme l'intégration de nouveaux matériaux composites encore plus performants. *« Cela demeure un challenge, mais la possibilité de réaliser plus rapidement et avec un plus grand réalisme les tests d'endommagement par simulation est désormais en ligne de mire »*, se félicite Olivier Allix.

### **Vers des avions 3.0**

Un horizon numérique que Francisco Chinesta voit encore plus riche en données. *« On demande désormais aux matériaux davantage que par le passé. La légèreté et la tenue en vol ne suffisent plus, il faut à présent qu'ils jouent un rôle actif »,* souligne le chercheur. Les successeurs du futur A350 pourraient bien être ces premiers *« avions connectés »*, bardés d'une myriade de capteurs intégrés au sein même des matériaux : *« C'est le début de l'ère du big data et du « diagnostic en ligne » : toutes les informations que l'on va récolter à chaque moment du vol nous renseigneront sur la tenue de la structure, nous permettront d'affiner les modèles et en retour de prévenir les problèmes. L'intelligence artificielle au cœur même des matériaux, voilà la grande révolution à venir »*, s'enthousiasme Francisco Chinesta. Pour ainsi dire, et paradoxalement, le constituant phare de nos avions semble désormais bien être ce nouvel alliage fait de carbone, de polymères et... d'immatériel.



www.cnrs.fr

**Jean-Baptiste Veyrieras**

### **Notes**

1. Sur un avion, il s'agit de la surface saillante à l'avant d'une aile sur laquelle l'air vient se diviser pour s'écouler de part et d'autre de l'aile. Cette partie est encore plus aiguisée pour les appareils supersoniques. Les hélices aussi possèdent des bords d'attaque.
2. Actionnés en bout d'aile ou à l'arrière de l'empennage, ils permettent au pilote de diriger l'appareil dans les airs.
3. Unité CNRS/Univ. de Nantes/École centrale de Nantes.
4. Unité CNRS/ENS Paris-Saclay/UPMC.
5. Unité CNRS/Univ. de Toulouse Paul-Sabatier/Insa Toulouse/Institut supérieur de l'aéronautique et de l'espace/École des mines d'Albi-Carmaux.
6. Elle a été formulée en 1965 dans le magazine Electronics par l'ingénieur et cofondateur d'Intel, Gordon E. Moore. C'est une loi dite « exponentielle » : elle prédit le doublement annuel des capacités des microprocesseurs d'ordinateur à coût constant. Rares sont les évolutions technologiques qui vont plus vite que cette loi, à l'exception notable lors de cette dernière décennie des instruments de séquençage de l'ADN.



www.cnrs.fr

## Avion : la quête du moteur idéal

**Les moteurs à réaction des avions de ligne consomment moins, font moins de bruit et ont une fiabilité accrue. Gros plan sur les améliorations récentes réalisées grâce au lien étroit entre les laboratoires et les industriels et sur les défis qui restent à relever.**

Pour fendre les cieux, il faut savoir s'appuyer sur l'air. Et sans une propulsion efficace, la portance n'est rien. Symbole de ce couplage essentiel, les avions civils affichent sous leurs ailes d'imposants moteurs à réaction. Ceux-ci sont le théâtre de phénomènes complexes que les scientifiques veulent toujours plus maîtriser et optimiser. Dans ce domaine, le CNRS a tissé un partenariat efficace avec l'industrie. Tant et si bien que le groupe Safran, qui a connu le plus grand succès commercial de l'aviation civile avec son célèbre CFM56, enregistre déjà 11 500 commandes pour son nouveau moteur LEAP, aboutissement de recherches de longue haleine.

*« Le LEAP a été conçu comme le CFM56 en partenariat avec General Electric. Il est le fruit d'avancées technologiques portant sur chaque élément du moteur »,* indique Sébastien Candel, du Laboratoire d'énergétique moléculaire et macroscopique, combustion<sup>1</sup> (EM2C), à Châtenay-Malabry. *« Parmi ces éléments, la chambre de combustion joue un rôle majeur, poursuit le chercheur. C'est elle qui fournit à bord de l'appareil toute l'énergie nécessaire au vol : l'énergie issue de la combustion du kérosène et de l'air est transformée en énergie mécanique pour la propulsion et en énergie électrique pour les systèmes de commande de vol et pour ceux qui assurent le confort des passagers. »*



Ligne d'assemblage dédiée à l'assemblage final du moteur LEAP. ©Cyril Abad/CAPA Pictures/SAFRAN



www.cnrs.fr

### **Petite, mais complexe**

Pourtant, la chambre de combustion ne représente qu'une toute petite partie des imposants turboréacteurs. Elle prend la forme d'un foyer annulaire proche de la taille d'une roue de voiture. Rien à voir, toutefois, avec la chambre de combustion des moteurs à explosion qui équipent nos automobiles : « *À l'inverse d'un moteur à explosion où la combustion se fait de façon cyclique avec un allumage à chaque cycle, celle d'un turboréacteur doit être assurée en permanence. C'est un problème complexe car la flamme doit être stabilisée dans un écoulement à grande vitesse* », explique Sébastien Candé. Pour ce faire, les chercheurs et les industriels n'ont eu de cesse de rendre la solution de plus en plus élégante et performante : « *Pour nous, l'objectif est double : assurer à la fois la stabilité de la flamme et une combustion la plus complète possible avec les émissions de polluants les plus réduites* », souligne-t-il.

À cette fin, la chambre de combustion possède une géométrie particulière : « *D'une part, la multi-perforation des parois permet d'assurer la tenue de la chambre malgré les très hautes températures qui existent dans la zone de combustion. D'autre part, la combustion est induite par un grand nombre d'injecteurs aérodynamiques qui alimentent la chambre en kérosène et en air. Au moyen de plusieurs vrilles, le flux d'air entraîne avec lui le nuage de gouttelettes de kérosène. Cette rotation de l'écoulement induit une zone dans laquelle les gaz chauds de la combustion sont mis en recirculation afin d'initier en continu la combustion du mélange frais issu de l'injecteur* », précise le physicien. L'énergie thermique ainsi produite est alors transformée en énergie mécanique au moyen d'une turbine couplée au compresseur et à la soufflante<sup>2</sup>. Au final, c'est l'éjection des gaz en sortie de réacteur via la tuyère qui induit la force de propulsion : leur expulsion vers l'arrière se traduit alors en une poussée vers l'avant pour l'avion.

Le principe de la « propulsion à réaction » est en fait connu depuis... Issac Newton (1643-1727) et sa troisième loi dite d'action-réaction. Celle-ci permet en effet de montrer que la force propulsive est directement reliée au débit-masse du moteur et à la différence entre la vitesse des gaz éjectés et la vitesse de l'air en amont du moteur (la vitesse de l'avion). C'est aussi un Anglais, sir Frank Whittle, qui au début des années 1930, ayant compris qu'il fallait comprimer le flux d'air pour tirer un travail à partir du cycle moteur et obtenir la force de propulsion, avait donné corps au premier turboréacteur : « *Depuis les premiers brevets de Franck Whittle, la technologie a beaucoup évolué*, souligne Sébastien Candé, *et une distance énorme sépare son travail des architectures actuelles.* »

### **Combustion *in vitro* et *in silico***

Cette complexité grandissante des turboréacteurs a été rendue possible par une maîtrise accrue de l'aérodynamique interne, de la mécanique, des matériaux et, bien sûr, de la combustion. Et cet « art du feu », Sébastien Candé et ses collègues d'EM2C en ont acquis une connaissance



www.cnrs.fr

théorique et pratique qui les place au meilleur niveau international. En premier lieu, grâce à un banc expérimental unique en son genre : un foyer annulaire aux parois en quartz, dénommé MICCA, mimant une petite chambre de combustion d'un réacteur. Sa particularité : là où les matériaux employés pour les réacteurs d'avion sont opaques, le quartz laisse passer la lumière : *« On peut ainsi observer la dynamique de combustion, analyser au moyen d'essais l'allumage circulaire du foyer à partir de l'étincelle d'une bougie, déterminer les mécanismes qui conduisent au couplage entre la combustion et les modes acoustiques du système, explique Sébastien Candel. Le système est idéalisé mais il nous permet de réaliser des avancées importantes, notamment sur la question des instabilités de combustion. »*

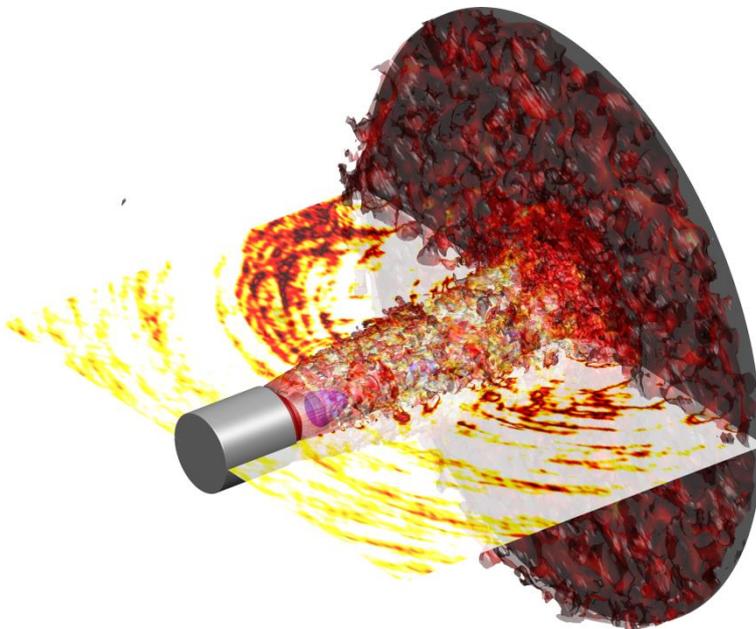
Ces instabilités sont les ennemis des chercheurs et des industriels : *« Les améliorations récentes des turboréacteurs se sont faites au prix d'une combustion plus sensible aux phénomènes d'instabilité qu'il faut donc savoir maîtriser »,* précise Sébastien Candel. La force de son laboratoire est de pouvoir coupler l'expérimentation, la théorie et la simulation numérique au moyen du calcul à haute performance. Et les progrès dans ce domaine sont *« fantastiques »* : *« On est à présent capable de simuler avec une bonne précision ce qui se passe à l'intérieur de la chambre de combustion au moment de l'allumage du foyer. Et la concordance entre les simulations et les observations est même surprenante »,* se félicite-t-il.

Ces avancées numériques profitent aussi aux ingénieurs. Le logiciel de simulation aux grandes échelles, AVBP, développé par l'équipe de Thierry Poinsot du Cerfacs<sup>3</sup> de l'IMFT<sup>4</sup> à Toulouse, et les modèles élaborés dans les laboratoires du CNRS sont directement partagés avec les ingénieurs de Safran. Cette boîte à outil est un atout pour relever les défis à venir : *« Grâce à des avancées scientifiques et technologiques, l'industrie a réussi à réduire d'un facteur deux la consommation de kérosène des moteurs. Il faut compter aujourd'hui un peu plus de quatre litres par passager transporté et par 100 kilomètres, soit un ordre de grandeur comparable à celui d'une automobile. Or, le passager vole à 900 kilomètres/heure. Mais on peut encore progresser, notamment pour réduire les émissions de dioxyde d'azote et de particules de suie »,* évoque Sébastien Candel.

### **Plus gros mais moins bruyant**

Même si Safran et Airbus ont annoncé en 2011 le lancement de recherches sur des moteurs hybrides alliant combustion et énergie électrique, il demeure pour le moment difficile de changer de paradigme : *« L'énergie obtenue par kilogramme de kérosène est environ 40 fois plus élevée que celle qui est stockée dans un kilogramme des meilleures batteries et, même en tenant compte du rendement thermodynamique, il reste un facteur 15 entre les deux »,* prévient Sébastien Candel. Pour remplacer les 240 tonnes de kérosène d'un A380, il faudrait ainsi 3 600 tonnes de batteries. Et l'amélioration du rapport puissance-poids est l'objectif premier des motoristes et des aviateurs. Les imposants turboréacteurs double flux, qui sont devenus la

norme dans l'aviation civile, sont de ce point de vue remarquables et ils semblent donc avoir encore de beaux jours devant eux. D'autant que l'utilisation d'un double flux d'air en entrée couplé à l'augmentation du diamètre de la soufflante a permis d'améliorer le rendement, de diminuer la consommation et d'atténuer le bruit d'éjection en sortie de réacteur.



*Simulation numérique directe du bruit émis par un jet supersonique impactant un obstacle.  
©Daniel Juvé*

À chaque décollage, les habitants situés à proximité des aéroports ont ainsi pu constater une réduction « *de plusieurs dizaines de décibels au cours des trente dernières années* », indique Daniel Juvé, directeur du Centre lyonnais d'acoustique, laboratoire d'excellence. Mais le passage aux réacteurs double flux n'est pas la seule explication. Les travaux de Daniel Juvé et de ses collègues Laboratoire de mécanique des fluides et d'acoustique<sup>5</sup> (LMFA) y ont également contribué. « *La question clé désormais est de savoir si l'on pourra encore baisser significativement ce bruit ou si l'on approche d'un plafond de verre pour ces types de motorisation* », précise-t-il. Une réponse d'autant plus attendue que la réglementation internationale sur les nuisances sonores va continuer à se durcir. De nouvelles architectures d'avion, avec des moteurs implantés au-dessus des ailes par exemple, ou de façon plus prospective, de type « aile volante », sont d'ailleurs étudiées à la fois par les chercheurs et les industriels.



www.cnrs.fr

## Cartographie des bruits

Pour mieux cerner les sources de bruit des réacteurs, le LMFA s'est équipé d'un impressionnant banc d'essai pour l'étude des performances aérodynamiques et du bruit des soufflantes de réacteurs (Equipex Phare). Une maquette à l'échelle 1/3 d'une soufflante (la partie amont du moteur, qui est la plus bruyante) est ainsi installée dans une chambre sourde. Cette dernière permet de mesurer les sons émis sans que ceux-ci ne soit réfléchis par les parois et sans que le bruit extérieur ne vienne troubler la mesure : « *En son sein, des réseaux de plusieurs centaines de microphones permettent alors de localiser les différentes sources du bruit* », décrit Daniel Juvé. La chaire industrielle ADOPSYS, cofinancée par l'Agence nationale de la recherche et le groupe Safran, a permis de doter le laboratoire de nouveaux équipements encore plus performants, couplant mesures multi-microphoniques et caractérisation des écoulements par des méthodes optiques.

Car pour cartographier au mieux les sources de nuisance, les chercheurs doivent associer l'acoustique à la mécanique des fluides dans leurs mesures et leurs calculs. « *Les nacelles des turboréacteurs deviennent de plus en plus grosses et l'interaction entre les jets propulsifs et la voilure augmente, multipliant les sources de bruit* », explique Daniel Juvé. « *Grâce aux essais en chambre sourde et aux simulations numériques intensives, nous sommes toutefois parvenus à mieux comprendre les phénomènes aéroacoustiques à l'œuvre et à proposer des solutions pour la réduction des bruits* », se réjouit-il.

### Des « pièges sonores »

Ces solutions, le Laboratoire acoustique de l'université du Maine<sup>6</sup> les connaît mieux que personne. « L'idée est simple : une fois les sources identifiées, on cherche à les neutraliser », indique Yves Auregan. La solution phare consiste à placer autant de « pièges sonores » possibles à proximité des sources de bruit du moteur. En premier lieu, un jeu de parois perforées d'une myriade de petits trous au-dessus d'une structure en nid-d'abeilles. Chaque petit trou joue alors le rôle d'un résonateur de Helmholtz<sup>7</sup>, piégeant les fréquences sonores ciblées. Mais cette approche atteint désormais ses limites : « *L'évolution vers des moteurs de diamètre de plus en plus grand s'accompagne d'une augmentation de bruits plus bas en fréquence, plus difficiles à atténuer. En parallèle, les contraintes imposées sur la taille des nacelles ne permettent plus d'augmenter l'épaisseur des structures en nid-d'abeilles* », souligne le chercheur.

Face à cette impasse, le laboratoire d'Yves Auregan s'est associé au groupe Safran au sein d'une nouvelle chaire industrielle, MACIA, dédiée aux matériaux acoustiques innovants : « *Notre objectif est d'optimiser au maximum l'existant tout en explorant des solutions de rupture à l'aide de nouveaux matériaux moins encombrants et plus absorbants comme les métamatériaux*<sup>8</sup>. Nous



www.cnrs.fr

*études aussi la possibilité d'utiliser des matériaux qui transforment le son en électricité pour mieux dissiper le bruit », détaille-t-il.*

### **La glace, ennemie des moteurs**

Si nos oreilles sont sensibles au bruit, les moteurs, eux, n'aiment pas le givre. En s'accumulant à l'entrée du réacteur, la glace peut se révéler fatale si des morceaux se détachent et sont aspirés par le moteur. Au risque alors d'endommager sa structure interne, voire d'en provoquer l'arrêt. Ce phénomène de « givrage moteur » est désormais bien compris, mais les outils d'évaluation de la résistance au givrage des appareils demeurent rudimentaires.

Basé au Laboratoire des sciences de l'ingénieur, de l'informatique et de l'imagerie<sup>9</sup> (ICube) de Strasbourg, Yannick Hoarau a mis à profit une collaboration avec l'université de Montréal pour apporter une solution innovante à la modélisation des phénomènes de givrage. « *Les modèles numériques des industriels ne prennent pas en compte facilement la modification des trajectoires de l'air induites par les couches de glace. Or, les points d'impact des gouttes d'eau qui viennent geler à la paroi dépendent de ces flux d'air qui les transportent* », explique-t-il. Dans un article remarqué<sup>10</sup>, Yannick Hoarau a montré qu'il était possible d'utiliser des approches numériques intégrant naturellement le changement de forme des parois de l'avion à mesure que la glace s'y accumule.

Ces récentes contributions sont autant d'innovations transversales qui seront, à n'en pas douter, au cœur des moteurs de demain.

**Jean-Baptiste Veyrieras**

### **Notes**

1. Unité CNRS/CentraleSupélec.
2. Elle est le seul élément visible d'un moteur pour les passagers d'un vol commercial. Positionnées à l'avant du réacteur, ses larges pales en rotation aspirent l'air ambiant et l'envoient dans le réacteur pour générer la poussée.
3. Centre européen de recherche et de formation avancée en calcul scientifique.
4. Institut de mécanique des fluides de Toulouse (CNRS/Univ. Paul-Sabatier/INP Toulouse).
5. Unité CNRS/Univ. Jean-Monnet/Univ. Claude-Bernard/École centrale de Lyon/INSA Lyon.
6. Unité CNRS/Univ. du Maine/ÉSÉO.
7. Si vous avez déjà soufflé dans le haut d'une bouteille vide, vous connaissez le principe de ce dispositif créé dans les années 1850 par le scientifique allemand Hermann von Helmholtz (1821-1894). Il fut le premier à formaliser ce phénomène de résonance de l'air dans une cavité. Un principe aujourd'hui utilisé aussi bien dans les voitures ou les avions que dans les instruments de musique.



[www.cnrs.fr](http://www.cnrs.fr)

8. En acoustique, il s'agit de matériaux artificiels dont les propriétés physiques facilitent le contrôle de certaines fréquences sonores.

9. Unité CNRS/Univ. de Strasbourg/INSA Strasbourg/ÉNGEE Strasbourg/Inria/Télécom ParisTech.

10. D. Pena, Y. Hoarau, É. Laurendeau (2016), « A Single Step Ice Accretion Model Using Level-Set Method », *Journal of Fluids and Structures*, vol. 65, pp. 278-294.



www.cnrs.fr

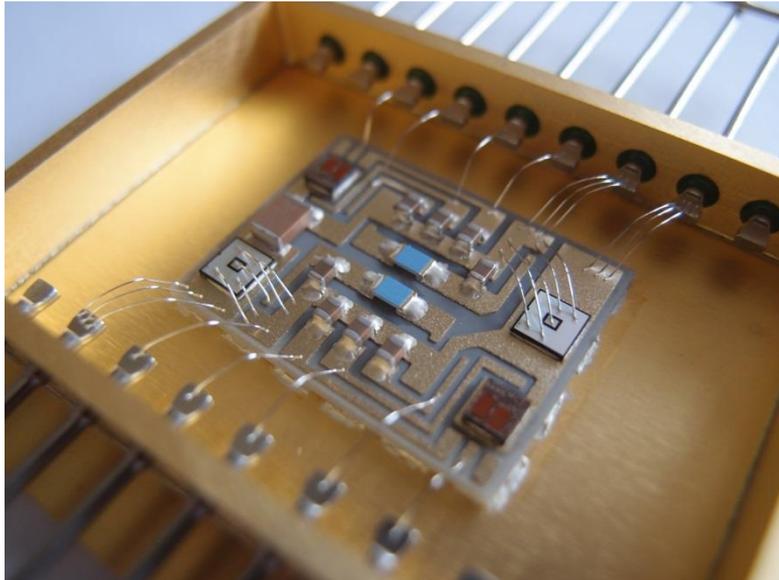
## Les défis de l'électrification des avions

**L'avion se fait de plus en plus électrique. Maître mot de cette évolution : l'optimisation, du simple composant à l'avion tout entier, en passant par l'ensemble des systèmes et des réseaux.**

Traditionnellement, un avion comporte quatre vecteurs d'énergie : thermique, hydraulique, pneumatique et électrique. « *Cette hétérogénéité complexifie la maintenance et n'est optimale ni en matière de poids ni en matière de performances* », explique Xavier Roboam, du Laboratoire plasma et conversion d'énergie<sup>1</sup>. D'où la conversion progressive de l'aviation à la fée électricité. Un exemple ? Historiquement, trois réseaux hydrauliques indépendants permettaient d'actionner les gouvernes d'un avion. Désormais, sur les A380 et A350, l'un d'eux est électrique. D'un mot, les avions les plus récents sont devenus de véritables petites centrales volantes, totalisant 1 mégawatt de puissance et parcourues par 500 kilomètres de câbles. Et elles n'ont pas le droit de tomber en panne !

### Parer aux perturbations

Dans ce but, scientifiques et industriels travaillent de concert, comme l'illustrent les travaux de Christian Voltaire, spécialiste de la compatibilité électromagnétique au Laboratoire Ampère<sup>2</sup>. L'enjeu est de concevoir des systèmes électriques capables de fonctionner dans un environnement électromagnétique éventuellement perturbé, sans générer eux-mêmes de perturbations. « *La problématique est cruciale pour les éléments d'électronique de puissance qui fonctionnent en "tout ou rien" et engendrent de ce fait d'importantes émissions électromagnétiques* », estime le chercheur. Son groupe travaille actuellement à définir le réglage optimal – à la fois efficace, mais pas trop lourd et surtout sûr – pour quatre prototypes de convertisseurs fournis par différents industriels. « *C'est un travail à base d'algorithmes d'optimisation agissant sur des modèles mathématiques des phénomènes physiques à l'œuvre dans le convertisseur, détaille Christian Voltaire. La grosse difficulté réside dans la multiplicité des fréquences des émissions envisageables.* »



Module utilisé pour réaliser des convertisseurs pouvant fonctionner à des hautes températures. ©Laboratoire AMPERE

### Une optimisation multi-échelle

Multi-fréquences, multi-échelles, multi-physiques... Telles sont les problématiques auxquelles se frottent les scientifiques. À l'échelle des composants, le groupe de Fabrice Thouverez, du Laboratoire de tribologie et dynamique des systèmes<sup>3</sup>, s'intéresse par exemple au vieillissement des cartes électroniques et des connectiques associées soumises aux contraintes du vol : « *Température, vibrations, environnement atmosphérique... Notre objectif est de parvenir à prédire l'évolution dans le temps de ces matériels, à partir de quoi nos partenaires industriels définissent les spécifications associées* », précise le physicien.

À l'autre bout du spectre, les études de Xavier Roboam se situent à l'échelle d'un système entier (réseau électrique, commande de vol...). L'enjeu : optimiser pour le réseau complet les problématiques de réduction de masse, de performance et de sécurité de l'ensemble. Or, comme l'indique le spécialiste, « *l'optimum global n'est pas la somme des optimums locaux.* » Par exemple, optimiser un moteur électrique indépendamment de l'environnement dans lequel il est placé ne suffit pas à garantir l'optimisation du système dans sa totalité.

Pour y parvenir, Xavier Roboam et son équipe développent ainsi, d'une part, des modèles mathématiques permettant de décrire physiquement les différents éléments d'un système, et ce en fonction de l'échelle considérée, d'autre part de puissants algorithmes d'optimisation. Dans le cadre d'un projet financé par la DGAC<sup>4</sup>, en partenariat avec l'entreprise Liebherr, ces approches



www.cnrs.fr

sont par exemple mises à profit pour le système de conversion de puissance d'un compresseur d'air<sup>5</sup>, soit la plus grosse charge de puissance non propulsive dans un avion.

### Le problème de la foudre

« Tout électrique » oblige, il faut s'assurer qu'un aéronef est immunisé contre la foudre. Autrement dit, qu'en cas de foudroiement – ce qui survient environ toutes les 3 000 heures –, le courant parasite induit sur la structure et qui se couple au réseau revient bien à la masse sans dommage pour les équipements.



© photoncatcher36/FOTOLIA

Pour ce faire, les avionneurs soumettent leurs avions à une batterie de tests grandeur nature. De leur côté, Alain Reineix et Christophe Dufour, de l'Institut de recherche XLIM<sup>6</sup>, ont mis en place, en partenariat avec Dassault Aviation, un logiciel capable de modéliser toute la topologie de câblage et la complexité de la structure d'un avion. Résultat : une cartographie de champ électromagnétique dans tout l'avion et les courants parasites induits sur les câblages, à partir de quoi évaluer les contraintes pour les équipements sensibles. « *Nous sommes les seuls à réaliser ce type de modélisation complète* », précise Alain Reineix. De quoi préparer au mieux l'avènement de la fée électrique dans l'aéronautique.

**Mathieu Grousseau**



[www.cnrs.fr](http://www.cnrs.fr)

### **Notes**

1. Unité CNRS/INP Toulouse/Univ. Paul-Sabatier.
2. Unité CNRS/École centrale de Lyon/Univ. Claude-Bernard/Insa Lyon/Inra.
3. Unité CNRS/ École centrale de Lyon/ENI Saint-Étienne/ENTPE.
4. Direction générale de l'aviation civile.
5. Il s'agit d'un compresseur pour le conditionnement d'air dans la cabine.
6. Unité CNRS/Université de Poitiers/Université de Limoges.



www.cnrs.fr

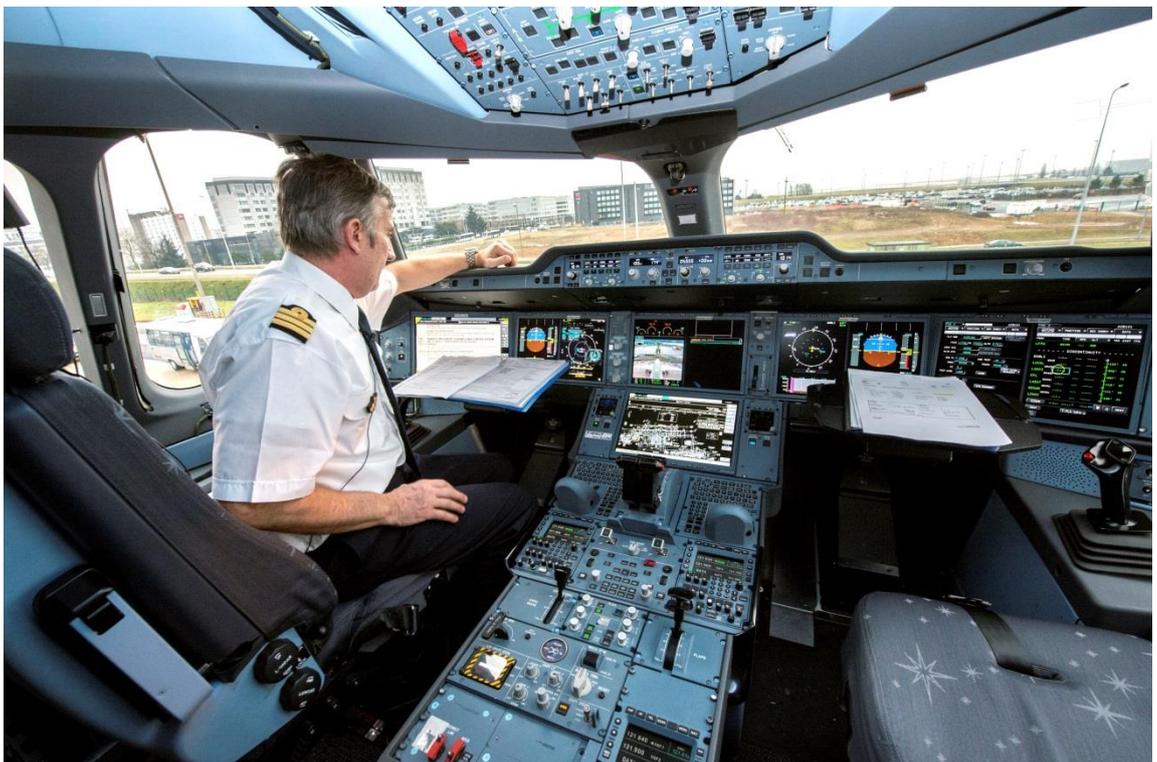
## Objectif sûreté pour les logiciels embarqués

**Les avions d'aujourd'hui sont truffés d'ordinateurs. Les scientifiques sont aux avant-postes pour s'assurer de leur bon fonctionnement et les prémunir contre les bugs.**

Commandes de vol, pilote automatique, communications entre la machine et l'équipage... À bord d'un avion, de nombreux éléments logiciels sont critiques et n'ont aucun droit à l'erreur. Depuis 30 ans, leur sûreté doit beaucoup à la communauté informatique française, championne des langages dédiés au contrôle-commande et des logiciels anti-erreur.

### Un langage adapté aux flots de données

Tout commence dans les années 1980 par une intuition géniale de plusieurs informaticiens. Les spécialistes le savent bien : un logiciel dit de contrôle-commande doit prendre périodiquement des décisions en un temps limité à partir d'un flot continu d'informations extérieures. L'idée a été de programmer ce logiciel de telle sorte qu'il traite ce flot de manière simultanée plutôt que séquentielle. Les langages synchrones étaient nés.



Poste de pilotage de l'Airbus A350. Aéroport Paris Charles de Gaulle. ©Gilles ROLLE/REA



www.cnrs.fr

Comme l'explique Marc Pouzet, du département d'informatique de l'École normale supérieure (DIENS), « *l'idée est aussi puissante que de négliger les frottements en mécanique. On sait bien que ça ne décrit pas la réalité, mais cela permet de construire une théorie robuste sur laquelle s'appuyer* ». En l'occurrence, ici, d'écrire des programmes indépendamment des processeurs sur lesquels ils seront exécutés.

Cette idée est notamment au cœur du langage Lustre, développé par Nicolas Halbwachs et Paul Caspi au laboratoire Verimag<sup>1</sup>. Sa force ? « *Il a la même logique que celle adoptée par les automaticiens, habitués à raisonner en termes de flots de données traversant des composants électroniques* », explique Nicolas Halbwachs. C'est la raison pour laquelle il est rapidement adopté par Airbus pour la programmation des commandes de vol de ses avions.

### **Un standard industriel**

Sous sa forme industrialisée, Lustre devient le logiciel SCADE, utilisé par la suite pour « dessiner » les commandes de l'A340, de l'A380, puis de l'A350. En 2003, le logiciel devient la propriété d'Esterel Technologies, société fondée par Gérard Berry, médaillé d'or du CNRS en 2014. Le langage synchrone qu'il a inventé, Esterel, est complémentaire de Lustre et alors intégré à SCADE. « *Lustre est tout à fait adapté au fonctionnement nominal d'un contrôle commande, alors qu'Esterel gère très bien les changements de mode, comme il peut s'en produire par exemple lors de la défaillance d'un élément du système* », détaille Marc Pouzet.

Aujourd'hui, SCADE est utilisé partout dans le monde. « Ce logiciel et ceux qui s'en inspirent sont désormais une évidence dans l'univers du contrôle-commande », poursuit l'informaticien. D'où une évolution permanente. « *Exploré en collaboration avec Airbus, un sujet brûlant vise par exemple à déterminer la façon d'implémenter SCADE sur des processeurs massivement parallèles<sup>2</sup>* », cite Marc Pouzet. Autre sujet de recherche actif : le couplage de SCADE avec la simulation numérique du système qu'il doit contrôler.

### **Prévenir les bugs et les pannes**

Par ailleurs, comment garantir qu'un logiciel de contrôle-commande se comporte correctement ? La problématique a notamment été posée dès le début des années 2000 par Patrick et Radhia Cousot, également au DIENS, et leurs collaborateurs. Leur réponse : le logiciel Astrée, spécialisé dans les risques de division par zéro, d'écriture au mauvais endroit, de problèmes liés aux opérations en virgule flottante et autres sources potentielles de plantage. « *Dans l'absolu, on sait depuis Turing qu'une telle ambition est vouée à l'échec, relativise David Monniaux, également chercheur à Verimag et impliqué dans le développement d'Astrée. Mais dans le cadre plus restreint des programmes de contrôle-commande, Airbus nous a d'abord sollicités pour une preuve de concept.* »



www.cnrs.fr

Le résultat est au-delà des espérances et Airbus applique la première version d'Astrée aux commandes de vol de l'A340-600, puis de l'A330. Par la suite, la start-up Absint, spécialiste de la détermination des temps d'exécution des logiciels de contrôle-commande, prend en charge la diffusion du logiciel anti-fautes. Il est alors mis à profit notamment lors de la conception de l'A380. « *Par rapport à ses concurrents, Astrée ne produit quasiment aucune fausse alerte, particulièrement chronophage pour l'industrie* », précise David Monniaux.

Ce qui n'empêche pas les chercheurs de l'améliorer sans cesse. Xavier Rival, du DIENS, détaille : « *La communauté informatique travaille sur plusieurs fronts. Par exemple, l'adaptation d'Astrée aux langages asynchrones, utilisés dans l'aviation pour l'analyse des pannes ou les annonces audio et visuelles aux pilotes. L'amélioration des diagnostics lors de la détection d'un bug potentiel fait également l'objet d'importants transferts technologiques. Enfin, l'extension d'Astrée à des preuves de sécurité – vulnérabilité d'un programme face à des attaques extérieures, robustesse d'une plateforme informatique quel que soit le logiciel qu'on y installe... – est un domaine très actif.* » Et le chercheur de conclure : « *Les possibilités d'évolution sont sans limite !* » Tout comme, pour le plus grand bien de l'aviation, l'imagination des informaticiens !

**Mathieu Grousseau**

#### **Notes**

1. Unité CNRS/Univ. Grenoble-Alpes/Grenoble INP.
2. Un traitement massivement parallèle consiste à utiliser un grand nombre de processeurs pour effectuer un ensemble de calculs simultanément.]

Retrouvez ces articles et découvrez d'autres textes et vidéos dans le dossier spécial Avions de CNRS Le journal : <https://lejournal.cnrs.fr/node/1595/>



www.cnrs.fr

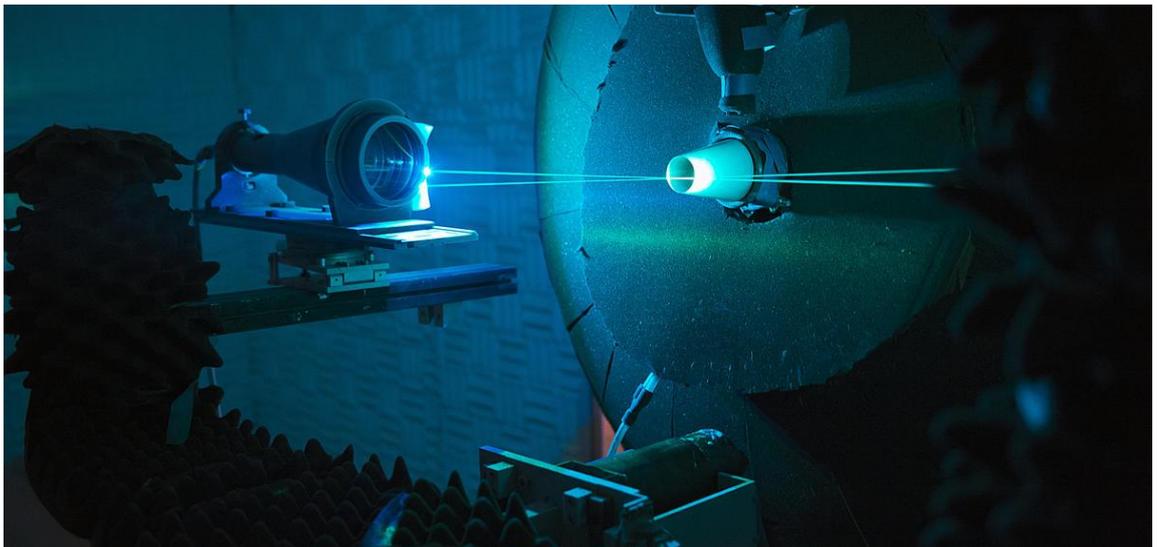
## Aller plus loin : articles parus dans CNRS le Journal

---

Article publié le 3 mars 2016 sur [CNRS le Journal](#)

### Prométée, la plateforme de l'extrême

23.03.2016, par Vahé Ter Minassian



*Soufflerie à rafale. Les études menées sur ce moyen d'essai concernent les domaines de l'aéronautique civile et du spatial.*

©C.FRESILLON/CNRS PHOTOTHEQUE

À Poitiers, la plateforme Prométée va bientôt rassembler un ensemble d'équipements et de bancs de tests destinés à l'étude du comportement des turbines, réacteurs et autres engins aéronautiques dans des conditions extrêmes.

Des bâtiments d'un ou deux étages alignés les uns à côté des autres. Un haut mur d'enceinte. Vu de l'extérieur, par une matinée froide et pluvieuse, le Centre d'études aérodynamiques et thermiques (CEAT), près de l'aéroport de Poitiers Biard, a des allures de caserne. De fait, raconte Yves Gervais, directeur de l'Institut Pprime (P')<sup>1</sup> du CNRS, auquel le CEAT est rattaché, « *le site appartenait à l'origine à l'armée qui, dans les années 1960, l'avait aménagé afin d'y réaliser des études d'aéro-hydrodynamique destinées à la conception des premiers sous-marins français lanceurs d'engins* ». Laisse à l'université de Poitiers, il accueille pour quelques temps encore un parc important de grosses installations expérimentales dédiées à la recherche civile dans les domaines de l'aéronautique, du spatial, des transports et de l'énergie.



www.cnrs.fr



*Vue d'architecte de la plateforme Prométhée.*

©GROUPE A5 INFOGRAPHIE/GAUDIN RIBOULOT ARCHITECTES

Mais l'heure du passage du flambeau a sonné pour le CEAT : d'ici six mois, dans le cadre d'un ambitieux chantier de 14 millions d'euros baptisé Prométhée<sup>2</sup>, ses équipements seront démontés, améliorés et réinstallés dans un bâtiment flambant neuf de 2 500 m<sup>2</sup>, qui a été inauguré le 25 janvier dernier, à une quinzaine de kilomètres de là, au cœur de la technopole du Futuroscope de Poitiers.

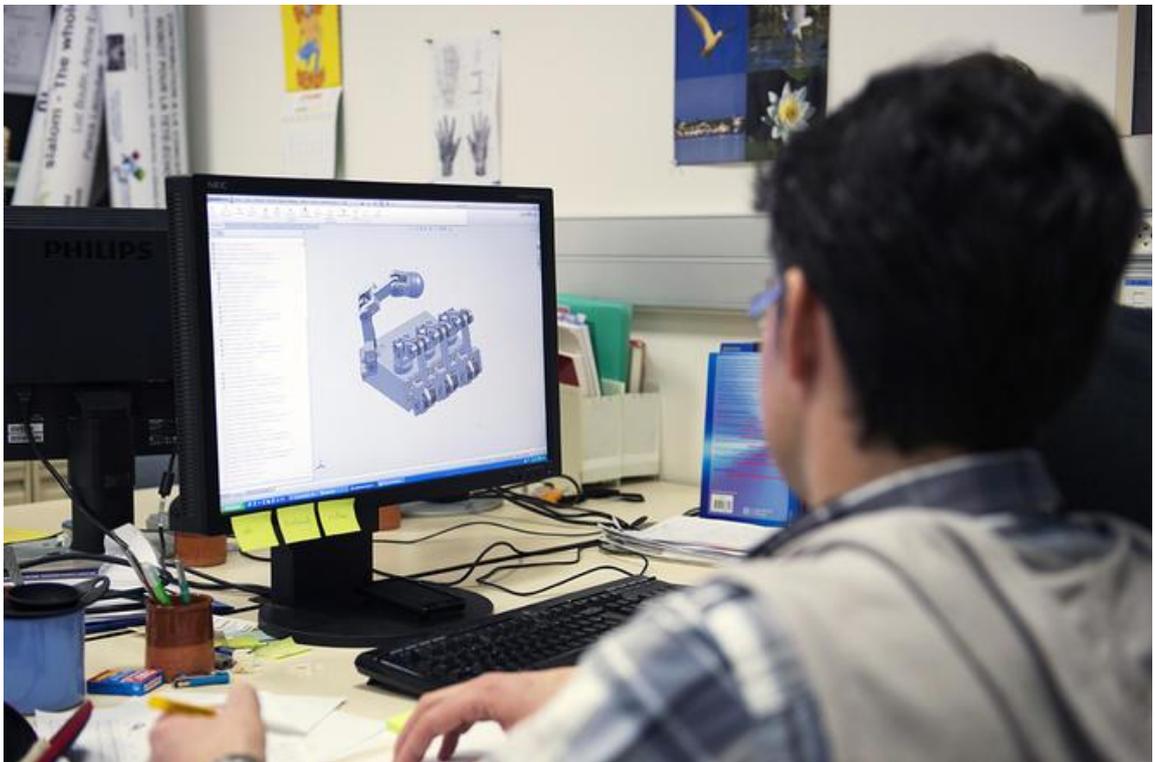
### **Un pôle pour les sciences de l'ingénieur**

Tout cela, pour quoi faire ? Des sciences de l'ingénieur ! Né en 2010 de la fusion de six laboratoires du CNRS, l'Institut Pprime est, en France, l'un des hauts lieux de ce domaine. Pas moins de 300 personnes y travaillent au sein de ses trois départements sur divers thèmes, dont la physique des matériaux – notamment ceux soumis à des conditions extrêmes –, la mécanique des fluides chauds et turbulents, la combustion, la détonique ou encore le génie mécanique, avec un intérêt poussé pour les problèmes de lubrification hydrodynamique des moteurs et des turbines.



www.cnrs.fr

Hélicoptère, avion, fusée ou encore véhicules à hydrogène sont les mots clés de ce laboratoire qui s'intéresse également aux dispositifs de production d'énergie des centrales EDF. Mais s'il est vrai que la plupart des installations que l'on trouve ici ont été financées dans le cadre de conventions signées avec des industriels, on cherchera en vain dans ces locaux un réacteur d'A-380 ou un booster d'Ariane 5. « *La vocation de Pprime n'est pas de faire de la R & D, mais de la recherche en amont sur de nouveaux concepts* », tient à préciser Yves Gervais.



*Conception assistée par ordinateur d'une main robotique de nouvelle génération destinée à être embarquée à l'extrémité d'un bras manipulateur.*

©C.FRESILLON/CNRS PHOTOTHEQUE

Les moyens à mettre en œuvre pour cette science n'en demeurent pas moins lourds. En tout cas, exceptionnels parmi les laboratoires de recherche publique français, ceux de l'Onéra<sup>3</sup> exceptés. Ainsi, la plateforme Prométée sera, comme c'est déjà le cas du CEAT, équipée d'un réseau en air comprimé maintenu à 200 bars. D'un maniement délicat, nécessitant de longues années d'expérience, il devrait être l'un des plus vastes d'Europe. Et servira à alimenter, selon les besoins des utilisateurs, les diverses expériences du site.

**Une soufflerie pour tester les fusées**



www.cnrs.fr

Par exemple, la fameuse soufflerie S150 que présentent au CEAT avant son démontage, et non sans fierté, l'ingénieur Steve Girard et le technicien Alexandre Royer. Montée dans un antique hangar conçu à l'origine pour accueillir un compresseur haut de trois étages aujourd'hui disparu, la machine est alimentée en air comprimé par le réseau via un système de vannes piloté par l'informatique. Constituée d'un bidon en acier où la pression est maintenue en permanence à plusieurs dizaines de bars, elle sert à produire, dans un brouhaha infernal, des jets de gaz de vitesse supersonique. « *Jusqu'à Mach 3.5 !* », précise Steve Girard. Lui et ses collègues emploient ce dispositif afin d'étudier sur des maquettes certains phénomènes de vibration pouvant survenir sur des réacteurs de fusées. Comme des problèmes de décollement de tuyères. La vocation de Pprime n'est pas de faire de la R & D, mais de la recherche en amont sur de nouveaux concepts.

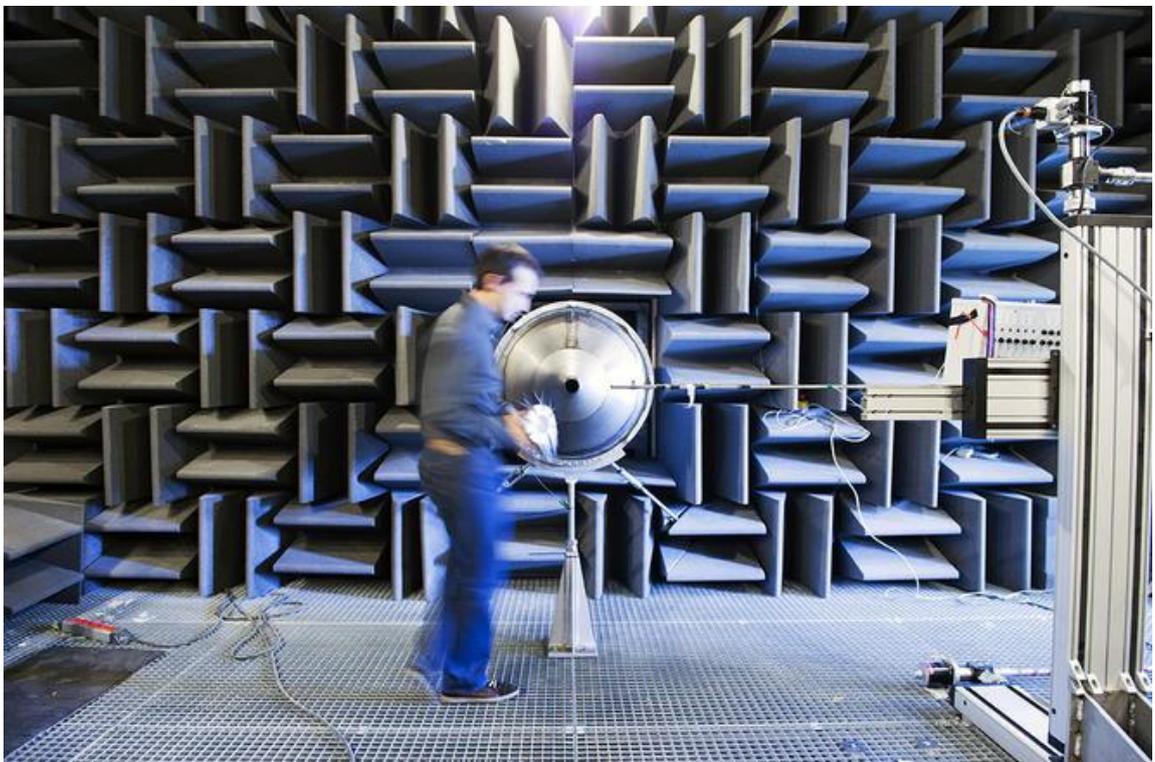
« *Le moteur central d'Ariane 5 est conçu pour fonctionner efficacement en altitude là où la pression atmosphérique est faible, explique le chercheur. La poussée nécessaire au décollage étant fournie par les boosters, il n'est au départ que de peu d'utilité. Mais il doit être allumé au sol pour des raisons de sécurité.* » Résultat : le jet de gaz chaud sorti du réacteur lorsque l'engin spatial est encore sur le plancher des vaches peut devenir instable et turbulent générant d'importantes charges latérales sur les tuyères qui se mettent à vibrer. Que celles-ci fendent la jupe de l'engin, et adieu la fusée ! L'équipe de Steve Girard espère identifier des régimes de fonctionnement du moteur à même de limiter ce risque.

### **Mettre en sourdine les réacteurs**

Non loin de là, l'ingénieur Patrick Berterretche est un autre grand utilisateur du réseau d'alimentation en air comprimé du CEAT. Tout comme ses confrères de la soufflerie S150, il s'intéresse aux fusées. Au fond d'une vaste dépression cachée par un talus où est installée une sorte de cahute rappelant vaguement un pavillon de chasse, il présente l'un des clous de la collection des instruments expérimentaux du centre : le banc Martel. Construit en 1996, grâce à des financements du Cnes, ce spectaculaire dispositif, installé en plein air, a été conçu pour rien de moins que mettre une sourdine à Ariane 5 ! « *En effet, explique le chercheur, une fusée au décollage produit un bruit d'une formidable intensité : de l'ordre de 160 dB.* » Les vibrations générées par ce grondement sont si fortes qu'elles secouent le lanceur dans tous les sens au moment du décollage. Conséquence : le satellite qu'il embarque peut être endommagé.

D'où la mise au point, par plusieurs agences spatiales, d'un système d'atténuation du bruit consistant à injecter, lors du lancement, de l'eau en grande quantité dans le jet brûlant sortant du réacteur. Une vapeur qu'il s'agit ensuite d'évacuer par un système de tunnel débouchant sur une ouverture placée plus loin sur le pas de tir : le carneau. La fonction du banc Martel, qui est équipé d'un propulseur capable d'éjecter du gaz chaud – jusqu'à 2 273 °C – à des vitesses

supersoniques, d'une batterie de canons à eau, d'une série de capteurs de vibration et de microphones, est de reproduire l'opération à petite échelle afin de mieux dimensionner le dispositif en vue de le rendre plus efficace en termes de diminution du bruit. Un pari déjà tenu pour Ariane 5 – dont le pas de tir est doté d'un carneau mis au point au CEAT – mais qu'il s'agit maintenant de relever pour Ariane 6 !



*Soufflerie anéchoïque destinée à modéliser le bruit généré par les moteurs d'avion. La capacité des constructeurs aéronautiques à réduire ce bruit tout en conservant les performances propulsives est un enjeu majeur de compétitivité.*

©C.FRESILLON/CNRS PHOTOTHEQUE

L'espace n'est pas la seule vocation des installations du CEAT versus Prométée. D'un bâtiment à l'autre, on découvre toutes sortes d'instruments destinés aux applications les plus diverses. Ici, un banc de fatigue thermomécanique sert à tester la résistance aux hautes températures des matériaux utilisés pour la fabrication des aubes d'hélicoptère. Là, des machines d'essais mécaniques, des cellules de perméation et de vieillissement sont employées pour mesurer la fragilisation, à la suite d'un contact prolongé avec de l'hydrogène ou du gaz carbonique sous pression, des aciers et des polymères rentrant dans la composition des pipelines et des flexibles des futurs véhicules à pile à combustible. Ailleurs, c'est une soufflerie anéchoïque destinée à



[www.cnrs.fr](http://www.cnrs.fr)

modéliser le bruit généré par les moteurs d'avion ou un banc de tribologie conçu pour tester l'étanchéité des turbines de centrales nucléaires qui retiennent l'attention des chercheurs.

Tout cela, en attendant le grand déménagement qui, insiste Yves Gervais, va comprendre une phase de modernisation des instruments déjà existants. En s'installant à Prométée, les nostalgiques du CEAT ne perdront donc rien au change....

### **Notes**

1. L'Institut Pprime est un laboratoire du CNRS créé en 2010 en partenariat avec l'Isae-Ensma et l'université de Poitiers.
2. Programmes et moyens d'essais pour les transports, l'énergie et l'environnement bénéficiant du soutien de l'État, des collectivités territoriales, du fonds européen Feder, du programme Investissements d'avenir, de l'industriel Safran et du Cnes.
3. L'Office national d'études et de recherches aérospatiales (Onéra) est le centre français de recherche aérospatiale.



www.cnrs.fr

Article publié le 4 octobre 2016 sur [CNRS le Journal](#)

## Dans les secrets de la combustion

04.10.2016, par Julien Bourdet



Grâce à des expériences en laboratoire et à des simulations sur ordinateur, les scientifiques tentent de percer les secrets de la combustion. Objectif : mettre au point des moteurs à la fois moins polluants et moins gourmands en énergie.

*Le foyer MICCA, du laboratoire EM2C, comporte 16 injecteurs et est alimenté avec un prémélange air/propane. Le rayonnement de la paroi interne donne une idée de la répartition de température.*

© EM2C

Article publié le 11 mai 2016 sur [CNRS le Journal](#)

## Ali Zolghadri, l'art de l'automatique

11.05.2016, par Louise Mussat



Il est notamment à l'origine d'un algorithme important utilisé sur l'A350 : retour sur les travaux d'Ali Zolghadri, expert de l'automatique qui fait partie des quatre lauréats de la médaille de l'innovation 2016 du CNRS.

© F. PLAS/CNRS PHOTOTHEQUE



www.cnrs.fr

Article publié le 2 février 2016 sur [CNRS le Journal](#)

## Les robots humanoïdes se mettent au travail

12.02.2016, par Arby Gharibian



*Un robot humanoïde vérifiant la fonctionnalité d'un panneau de commande.  
©Joint Robotics Laboratory (CNRS/AIST)/AIRBUS SAS 2015*

Des robots humanoïdes devraient à l'avenir travailler sur les lignes d'assemblages des avions de ligne grâce à un programme de recherche franco-japonais lancé avec le groupe Airbus. Ils permettront de décharger les opérateurs humains des tâches les plus laborieuses ou dangereuses.

Article publié le 2 février 2016 sur [CNRS le Journal](#)

## Y a-t-il un pirate dans l'avion ?

15.06.2015, par Simon Castéran



©BRUNO135\_406/FOTOLIA.COM

Tandis qu'une équipe de hackers annonce être parvenue à prendre le contrôle d'une Jeep, enquête auprès des chercheurs qui développent les systèmes anti-intrusion qui équiperont les transports de demain.



www.cnrs.fr

---

## **Aller plus loin : actualités des laboratoires CNRS**

---

### **[Aéronautique : une nouvelle chaire industrielle ANR dédiée aux matériaux acoustiques innovants](#)**

**13.04.2017**

La chaire industrielle ANR **Matériaux acoustiques innovants pour l'aéronautique (MACIA)** a été inaugurée le 13 avril 2017 à l'Université du Maine, au Mans. Portée par Safran et le Laboratoire d'acoustique de l'Université du Maine (LAUM), elle vise à développer des traitements acoustiques innovants pour réduire le bruit des moteurs d'avion et d'hélicoptère.

### **[Inauguration de la plateforme STIMPACT \(Institut Clément Ader\) d'essais d'impact en aéronautique](#)**

**16.03.2017**

La plateforme mutualisée d'essais d'impact à haute vitesse sur matériaux et structures pour l'aéronautique **STIMPACT** a été inaugurée le 16 mars 2017, à l'Institut Clément Ader, à Toulouse. Ce nouvel équipement permettra à l'industrie aéronautique de bénéficier d'un nouveau moyen pour faire émerger des solutions technologiques de matériaux et structures plus légères, plus sûres et moins coûteuses.

### **[Embarquement immédiat à bord de l'A350 !](#)**

**16.04.2015**

Une méthode de surveillance du système de commandes de vol des avions civils, dite « à base de modèle », développée au sein du Laboratoire de l'intégration, du matériau au système<sup>1</sup>, en partenariat avec Airbus, a été certifiée pour être embarquée à bord du long courrier de nouvelle génération d'Airbus : **l'A350 XWB (eXtra Wide Body)**. Le premier vol commercial a eu lieu le 15 janvier 2015, opéré par la compagnie Qatar Airways (Doha-Frankfort).



www.cnrs.fr

## Ressource vidéo

---

### Les ailes du futur



2015

7 min 15

Grand public

Couleur, sonore

Version : français, anglais

Réalisateur : Claude Delhaye

Producteur : CNRS Images

**Pour inventer les avions de demain, les chercheurs se tournent vers la nature. Mais comment imiter les muscles, plumes et cerveau qui font d'un oiseau un animal volant si efficace ? Pour y parvenir, les chercheurs se tournent vers des technologies innovantes telles que le "morphing électro-actif", les matériaux "piézo-électriques" et les capteurs "avec retour en temps réel".**

Intervenants :

**Marianna Braza**, directrice de Recherche CNRS, Institut de mécanique des fluides de Toulouse (CNRS / Université Toulouse Paul Sabatier) et coordonnatrice des projets Morphing de la plateforme SMARTWING

**Jean-François Rouchon**, professeur à l'Institut national polytechnique de Toulouse, directeur de l'École nationale supérieure d'électrotechnique, d'électronique, d'informatique, d'hydraulique et des télécommunications (ENSEEIH), chercheur au Laboratoire plasma et conversion d'énergie (LAPLACE -CNRS / Université Toulouse Paul Sabatier/ INP Toulouse)

**Karl-Joseph Rizzo**, post-doctorant en électrodynamique et aérodynamique

**Christophe Cros**, Ingénieur Airbus, Emerging Technologies and Concepts - Toulouse