

MATIÈRE ◀ NUMÉRIQUE ■

Matériaux, moteurs, systèmes embarqués...  
La science est partout à bord d'un avion.  
De nombreuses recherches visent à le rendre  
plus léger, plus performant, plus sûr et moins  
polluant. Panorama de ces travaux qui  
préparent les avions de demain.

UN DOSSIER RÉALISÉ PAR  
MATHIEU GROUSSON ET JEAN-BAPTISTE VEYRIERAS

# Sur la piste de l'avion du futur



Les avions font partie de ces objets qui concentrent le génie humain. Même si leur allure nous semble presque inchangée depuis cinquante ans, elle cache des évolutions impressionnantes auxquelles une centaine de laboratoires du CNRS a largement contribué. Tous ces engins profitent aujourd'hui de nouveaux matériaux, de structures plus fiables et allégées, d'écoulements optimisés de l'air autour des ailes, d'une meilleure combustion dans les turboréacteurs, d'une diminution du bruit, des émissions nocives et de la consommation de carburant, d'un meilleur contrôle du givrage, d'un freinage plus performant ou encore – n'en jetez plus! – d'une aide au pilotage optimisée. Structure, motorisation, systèmes embarqués : ces trois composantes de l'avion, d'un coût similaire, ont toutes bénéficié des avancées de la recherche.

## La révolution composite

Penchons-nous tout d'abord sur la structure, à savoir le fuselage, les ailes, l'empennage, mais aussi ces ...

### Yves Rémond

est professeur de mécanique des matériaux, polymères et composites à l'université de Strasbourg (ECPM). Il est directeur adjoint scientifique de l'Institut des sciences de l'ingénierie et des systèmes (Insis) du CNRS.



... structures cachées qui confèrent à l'avion sa rigidité et sa résistance. Leurs contraintes sont nombreuses, liées au roulement sur la piste, aux vibrations et à la fatigue créée par les sollicitations en vol, aux variations de température et au vieillissement des matériaux.

Toutes ces structures ont d'abord été entièrement métalliques, puis allégées avec l'utilisation de matériaux de plus en plus performants. Car les métaux sont parfois lourds et inutilement résistants pour l'usage qu'on leur demande. Des alliages plus légers ont donc été rapidement utilisés. Puis, nous sommes entrés dans l'ère des matériaux composites, avec des renforts de fibres de carbone noyées dans des polymères. Pour l'A320 d'Airbus, déjà ancien, on trouvait ainsi près de 4,5 tonnes de structures en composites, permettant un gain de plus d'une tonne par rapport à une structure métallique... et une économie de plusieurs milliers de tonnes de kérosène sur la vie de l'avion. Pour l'A380, la pièce composite sur laquelle viennent s'accrocher ses ailes gigantesques a permis un allègement de l'avion de 3 tonnes. De 5 % de la masse de la structure il y a quarante ans, on dépasse désormais les 50 % de composites sur les derniers avions de ligne. Ces matériaux ont même conquis les freins ! Lointains héritiers des modèles à tambour d'avant 1950, ce sont aujourd'hui des freins en carbone-carbone, capables de garder leurs propriétés jusqu'à 2 000° C et d'évacuer en quelques secondes d'atterrissage toute l'énergie cinétique d'un avion.

Revers de la médaille, les matériaux composites possèdent des modes d'endommagement bien plus complexes à prévoir que les métaux. Pour ces derniers, déjà, l'apparition de fissures dues à la fatigue n'a été comprise que tardivement. C'est en effet suite à des implosions d'avion en plein vol, dans les années 1950, que des études ont permis de découvrir le rôle joué par la fatigue, c'est-à-dire l'effet de sollicitations répétées qui à la longue génèrent des fissures, alors que les mêmes contraintes appliquées en continu auraient été très bien supportées. Ce n'est qu'à partir de là que des calculs en fatigue apparaissent systématiquement pour les avions.

La présence de fissures dans la structure d'un avion est normale et très surveillée, mais il s'agit de prévoir leur propagation, un exercice très complexe qui dépend de nombreux paramètres. Les dernières recherches permettent de l'anticiper avec précision, et donc de prédire la durabilité de l'avion.

Paradoxe intéressant : les matériaux composites se fissurent très tôt dans leur vie, mais résistent bien mieux

à la fatigue que les alliages. En revanche, ils sont davantage sensibles que les alliages métalliques à la présence de trous, qui vont constituer un départ d'endommagement. On se dira qu'il suffit de ne pas faire de trous dans un avion ! Hélas, c'est le mode d'assemblage le plus largement utilisé pour sa construction et l'on a ainsi plusieurs millions de trous dans certains gros avions de ligne actuels. C'est dire si le calcul de la prévision des ruptures au voisinage de ces trous est important. Et au final, les structures trouées des avions étant aussi sollicitées en fatigue, les composites s'en sortent largement mieux que les alliages.

### Des moteurs première classe

La motorisation fait également l'objet de progrès considérables. Pourtant, les phénomènes qui s'y déroulent sont très complexes avec, pêle-mêle, des écoulements turbulents, une combustion à maintenir et des températures très élevées à supporter car plus la température sera haute, meilleur sera le rendement du moteur. Aussi des chercheurs œuvrent à mieux comprendre la combustion, avec un impératif en tête : la société demande à juste titre une diminution des consommations de carburant et des nuisances sonores, et une augmentation de la fiabilité. Le LEAP, très récent dernier-né des moteurs d'avion développé par Safran et General Electric, est un bel exemple de progrès fondé sur des recherches menées depuis des décennies par les laboratoires du CNRS avec ses partenaires. Permettant de réduire la consommation de près de 15 % et les émissions d'oxydes d'azote de 50 %, il équipera la plupart des nouveaux avions monocouloirs et a déjà été vendu à plus de 14 000 exemplaires, ce qui constitue un record.

Terminons par les systèmes embarqués, qui représentent l'ensemble des équipements informatiques de pilotage et de commande, de capteurs, radios, radars, etc., et doivent résister avec une fiabilité absolue à toutes les contraintes du vol : secousses, vibrations, froid intense à l'extérieur, chaleur extrême à proximité de la combustion, durée de vie de plusieurs années, résistance aux intempéries et à la foudre. En outre, ils consomment une énergie qu'il faut réussir à embarquer. Il y a, par exemple, de 400 à 600 kilomètres de câbles dans un A380. Enfin, toutes les connexions demandent à être sécurisées, ce qui représente également un défi permanent... relevé dans de nombreux laboratoires français.

Bien d'autres domaines, parfois étonnants, restent à explorer. C'est le cas notamment des essais sur « mésostructures », qui visent à limiter au maximum le nombre d'essais à réaliser pour concevoir un nouvel avion tout en augmentant la quantité d'informations obtenues. La recherche a encore beaucoup d'idées pour faire voler les avions du futur. ■

*“Les dernières recherches permettent de prédire la durabilité d'un avion.”*

# 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 qui préfigure de nouvelles performances aéronautiques.



L'Airbus A350-XWB, constitué de matières composites, lors d'une démonstration en vol au Salon du Bourget de 2015.

Ils rendent les avions plus résistants mais aussi plus légers, et permettent ainsi de réduire leur consommation. Depuis les années 1980, 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 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 nouveaux matériaux

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, à l'instar de la dernière version de son nouveau concurrent, l'Airbus A350. 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.

« *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, précise le chercheur. 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.* » 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 %.

Sur le plan mécanique, et dans des conditions normales de vol, ces matériaux montrent des propriétés ...

1. 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. 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.

... 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 de carburant.

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 étudient les structures, les systèmes et les 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



© A. DASTÈS/SAFRAN

Contrôle d'une aube fabriquée par tissage en 3D de fibres de carbone, destinée au moteur LEAP, au centre Safran d'Itteville (Essonne).



Le « plug ARCOCE », un cône d'éjection en composite à matrice céramique, a effectué son premier vol en 2015 sur un A320.

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.

### L'usine du futur

Ces limitations actuelles, Philippe Olivier et 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'intéresse 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. À l'instar de la start-up Aurock, « créée par d'anciens doctorants du laboratoire, qui propose aux industriels un processus de mise en forme original et économique à l'aide de moules en béton fibré », témoigne Philippe Olivier.

L'un des facteurs limitants pour l'usinage des pièces composites est 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, ce sont 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 féru 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

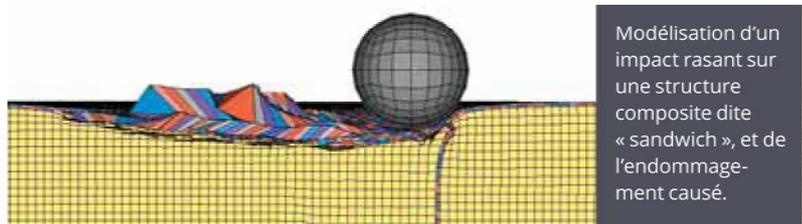
Et même si, compte tenu du grand nombre de paramètres à considérer, les simulations peuvent prendre des jours, voire des semaines, le gain pour les industriels est décisif. « *C'est grâce aux approches numériques, qui se sont largement imposées depuis le début des années 2000, que l'on peut aujourd'hui 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 a présenté les premiers résultats issus de la plateforme lors du Salon du Bourget, en juin 2017. 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 sur 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* », note 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-



Modélisation d'un impact rasant sur une structure composite dite « sandwich », et de l'endommagement causé.

© INSTITUT CLÉMENT AUBER

parties. Une « rupture méthodologique » qui pourrait accélérer à terme l'intégration de nouveaux matériaux composites encore plus performants. « *Cela demeure un défi, 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. || J.-B. V.

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 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.



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.

Poste de pilotage de l'Airbus A350, à l'aéroport de Paris-Charles-de-Gaulle.

# Objectif sûreté pour les logiciels embarqués

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 fut de programmer ce logiciel de telle sorte qu'il traite ce flot de manière simultanée plutôt que séquentielle. Les langages synchrones étaient nés.

« L'idée est aussi puissante que de négliger les frottements en mécanique, explique Marc Pouzet, du département d'informatique de l'École normale supérieure<sup>1</sup> (DI ENS). On sait bien que cela 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, du laboratoire Verimag<sup>2</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 », précise Nicolas Halbwachs. C'est la raison pour laquelle il est rapidement adopté par Airbus pour la programmation des commandes de vol de ses avions. Sous sa forme industrialisée, Lustre devient le logiciel SCADE, utilisé par la suite pour



Lire aussi le portrait d'Ali Zolghadri, médaille de l'innovation 2016 du CNRS, sur [lejournel.cnrs.fr](http://lejournel.cnrs.fr). Cet expert de l'automatique est à l'origine d'un algorithme important utilisé sur l'A350.

« dessiner » les commandes de l'A340, de l'A380, puis de l'A350. 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 des sujets brûlants est de déterminer la façon d'implémenter SCADE sur des processeurs massivement parallèles<sup>3</sup>* », indique Marc Pouzet.

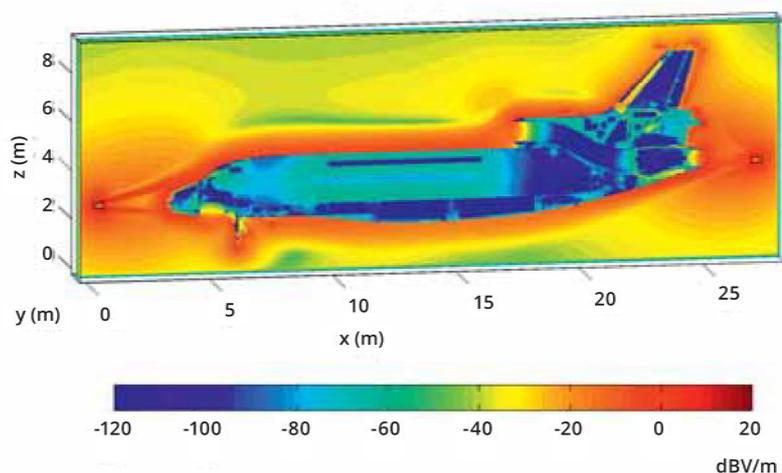
### Prévenir les bugs et les pannes

Par ailleurs, comment garantir qu'un logiciel de contrôle-commande se comporte correctement ? La réponse est donnée par le logiciel Astrée, spécialisé dans les risques d'écriture au mauvais endroit, de division par zéro, 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, lui aussi 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.* »

“*La sûreté des avions doit beaucoup à la communauté informatique française.*”

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. Ce qui n'empêche pas les chercheurs de l'améliorer sans cesse. Xavier Rival, du DI ENS, 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.* » || M. G.

### NIVEAU DU CHAMP ÉLECTRIQUE



Distribution du champ électrique dans un avion Falcon soumis à un test d'attachement de la foudre.

## Le problème de la foudre

L'avion utilisant de plus en plus l'énergie électrique, il faut s'assurer qu'il 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 dommages pour les équipements.

Pour ce faire, les avionneurs soumettent leurs avions à une batterie de tests grandeur nature. De leur côté, Alain Reineix et Christophe Guiffaut, de l'Institut de recherche XLIM<sup>4</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 du champ électromagnétique dans tout l'avion et des courants parasites induits sur les câblages, permettant d'évaluer les contraintes pour les équipements sensibles. « *Nous sommes les seuls à réaliser ce type de modélisation complète* », précise Alain Reineix.

1. Unité CNRS/ENS Paris/Inria. 2. Unité CNRS/Univ. Grenoble-Alpes/Grenoble INP. 3. Un traitement massivement parallèle consiste à utiliser un grand nombre de processeurs pour effectuer un ensemble de calculs simultanément. 4. Unité CNRS/Université de Poitiers/Université de Limoges.

# 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 laboratoires et industriels, et sur les prochains défis 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, enregistrait fin juin plus de 14 000 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 Candell, du Laboratoire d'énergétique moléculaire et macroscopique, combustion<sup>1</sup> (EM2C), à Châtenay-Malabry.

## Petite, mais complexe

Parmi ces éléments, la chambre de combustion joue un rôle majeur : « C'est elle qui fournit à bord de l'appareil toute l'énergie nécessaire au vol, poursuit le chercheur. 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. »

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 Candell. 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 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 Candel, 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 Candel et ses collègues d'EM2C en ont acquis une connaissance 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 la 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. »

“La consommation de kérosène des moteurs a été réduite d'un facteur deux.”

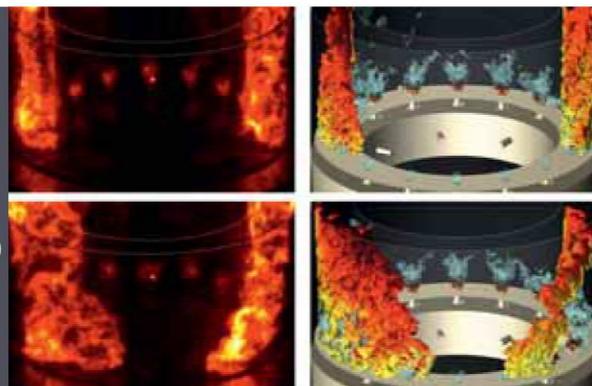
Ces instabilités sont les ennemies des chercheurs et des industriels : « Les améliorations récentes des turbo-réacteurs se sont faites au prix d'une combustion plus sensible aux phénomènes d'instabilité, qu'il faut donc savoir maîtriser », précise Sébastien Candel. La force de son laboratoire est de 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 réjouit-il.

Ces avancées numériques profitent aussi aux ingénieurs. Le logiciel de simulation aux grandes échelles, AVBP, développé par l'équipe de Thierry Poinot, 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 outils 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 », estime 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 ...

Unique en son genre, le foyer Micca (à gauche) a des parois en quartz permettant d'observer la combustion. On voit ici que la simulation (à droite) des deux mêmes phases d'allumage concorde avec la combustion réelle.



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).

... 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 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.

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 du 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.

### Une 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 (Équipex 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 soient 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 ADOPSY, 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

Banc d'essai pour l'étude des performances aérodynamiques, acoustiques et vibratoires d'une soufflante de turboréacteur, dans le cadre de l'Équipex Phare.



© A. CHEZEBEAU, LMFA-TDS-SAFRAN

Pose d'une structure en nid-d'abeilles destinée à piéger les émissions sonores, sur le site de Safran au Havre, spécialisé dans les nacelles pour moteurs d'avion.



© D. JUVÉ

Simulation numérique directe du bruit émis par un jet supersonique heurtant un obstacle. Elle permet de voir les variations de densité dans l'écoulement et sur la paroi ainsi que la pression acoustique rayonnée (laboratoire LMFA).



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. « Toutefois, ajoute-t-il, grâce aux essais en chambre sourde et aux

*simulations numériques intensives, nous sommes parvenus à mieux comprendre les phénomènes aéro-acoustiques à l'œuvre et à proposer des solutions pour la réduction des bruits. »*

#### Des « pièges sonores »

Ces solutions, le Laboratoire acoustique de l'université du Maine<sup>5</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 étudions 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. **II J.-B. V.**



© P. STROPPA/SAFRAN



Retrouvez ces articles et découvrez d'autres textes et vidéos dans notre dossier spécial Avion sur [lejournal.cnrs.fr](http://lejournal.cnrs.fr)

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