

Quel avion pour demain?

Du 13 au 19 juin, les amoureux du ciel feront escale au Bourget, au nord de Paris, à l'occasion du 46^e Salon international de l'aéronautique et de l'espace. En haut de l'affiche, l'aviation civile fera sensation avec, entre autres, les présentations de l'A380 d'Airbus et du 777-200LR, dernier-né de Boeing, symboles de la lutte acharnée que se livrent les deux constructeurs. Mais en coulisses, c'est une autre bataille au long cours qui occupe la recherche. Son enjeu? Créer des avions beaucoup moins polluants mais toujours plus sûrs et résistants. Les chercheurs du CNRS relèvent ces défis en mettant au point de nouveaux matériaux et procédés de combustion dans les réacteurs, en jouant sur l'aérodynamisme des appareils ou encore en améliorant la fiabilité des systèmes embarqués. Enquête sur l'avion du futur.

TRANSPORT AÉRIEN : ÇA PLANE POUR LUI > 19
 LA POLLUTION EN MOINS, LA PERFORMANCE EN PLUS > 20
 DES MATÉRIAUX SUR MESURE > 23
 SÉCURITÉ : TOUJOURS PLUS! > 25



Transport aérien : ça plane pour lui...

Mesquinerie passagère ou étape de plus dans une guerre industrielle de longue haleine? Le 26 avril dernier, à la veille de l'envol de l'A380, dernier-né d'Airbus, le constructeur américain Boeing tente de lui voler la vedette et annonce de nombreuses commandes pour son futur avion moyen porteur. Une certitude : cet épisode illustre bien la bataille psychologique entre les deux constructeurs. Qui pourrait se résumer en ce moment à cette question : existe-t-il un marché pour les gros-porteurs? « Oui, répond Yves Crozet, directeur du Laboratoire d'économie des transports (LET)¹ de Lyon. *Ce type d'avion s'intègre bien à la stratégie des compagnies européennes et asiatiques, à l'opposé de celle des compagnies américaines* » Explications : en Europe, les vols internationaux représentent deux tiers du chif-

fre d'affaires des majors comme Air France ou British Airways. Et les vols entre continents sont au centre de la stratégie de ces compagnies. « Pour cette raison, elles ont opté pour les hubs, de gigantesques plates-formes d'interconnexion comme celle de Roissy, sur lesquelles elles rabattent le plus de passagers possible en provenance des aéroports secondaires européens », analyse Yves Crozet. Dans cette optique, rien de tel qu'un avion comme l'A380 pour réduire les coûts sur de très longs trajets. Aux États-Unis, la situation est différente : pour les compagnies aériennes, l'essentiel des recettes vient des vols intérieurs directs, plus courts que les trajets intercontinentaux. Leur objectif est clair : être sûr de remplir les avions tout en assurant chaque jour une bonne fréquence de vols. Aujourd'hui, ces deux marchés font l'objet d'une guerre commerciale acharnée, qui pourrait laisser des traces :

« Pour faire baisser le prix des avions, l'Europe et les États-Unis se sont entendus pour attribuer des subventions à leurs constructeurs respectifs, explique Marc Ivaldi, directeur de recherche au Gremaq² de Toulouse. Une rupture de ces accords, et c'est le passager qui paiera le surcoût! » Pourtant, le transport aérien semble aujourd'hui sur un petit nuage. Et ce, malgré des mutations récentes, comme le développement des compagnies « low cost », qui usent de multiples astuces pour réduire les coûts, ou les grandes difficultés de certaines compagnies américaines. En effet, le trafic aérien affiche une croissance annuelle à faire saliver bien des ministres des Finances, de l'ordre de 5%! Certes, les terribles événements du 11 septembre 2001 ont provoqué une pause de deux ans dans cette progression. Mais elle a repris de plus belle et ne semble pas devoir s'arrêter. Un exemple? En 2010, 200 millions de Chinois voyageront dans le monde. « Dans les sociétés modernes, les revenus augmentent, et les consommateurs attachent plus d'importance à la valeur du temps, analyse Yves Crozet. Résultat : il y a vingt ans, les périodes de vacances étaient longues et se passaient en un lieu unique. Aujourd'hui, elles sont fractionnées et diversifiées : une semaine en hiver en Tunisie, une autre l'été en Italie, quelques week-ends prolongés... » Les pays étrangers ne sont pas les seules destinations prisées : en France, le rail souffre vivement de la concurrence aérienne. « Malgré l'arrivée du TGV, la ligne Paris-Marseille recommence à perdre du terrain sur l'avion », note ainsi l'économiste. Feu de paille ou début d'un long règne sans partage? Tout dépendra de la manière dont le transport aérien traversera les perturbations qui s'annoncent, à l'image du bras de fer engagé avec les promoteurs de la création d'une taxe ...

Les vols intercontinentaux sont au cœur de la stratégie des grandes compagnies européennes. D'où leur attrait pour les hubs, de grands aéroports (ici Orly) sur lesquels elles rabattent un maximum de passagers.



© G. Halary/Gamma

A380 : LE CNRS À LA FÊTE

De nombreuses équipes du CNRS ont participé à la genèse du nouveau fer de lance de l'aviation civile européenne, l'A380. Parmi elles, le Laboratoire d'analyse et d'architecture des systèmes (Laas), l'Irisa, le Verimag, le Centre d'électronique et de micro-optoélectronique de Montpellier (CEM2), l'Ircycn, le laboratoire Systèmes et applications des technologies de l'information et de l'énergie (Satie) ou encore le Laboratoire d'informatique de l'École normale supérieure (Liens). En Sciences pour l'ingénieur, les laboratoires, trop nombreux pour être cités ici, ont également apporté leur pierre à l'édifice dans le cadre de collaborations au long cours. Dans ces disciplines, les efforts de recherche en aéronautique se déroulent en effet sur de nombreuses années. Plus d'informations sur le site du département SPL

M. R.



→ À voir :
www.spl.cnrs-dlr.fr
www.cnrs.fr/stic

... sur le kérosène. Celle-ci marquerait en effet la fin d'un privilège qui permet à l'avion de rester le moyen de transport le moins cher au kilomètre. « L'idée d'une taxe est dans l'air, d'autant plus que le trafic aérien provoque des dégâts environnementaux », note Marc Ivaldi. Or, cette hausse se retrouverait forcément dans le prix du billet d'avion, ce qui pourrait faire perdre des parts de marché au transport aérien. » Pollueurs, payeurs, en quelque sorte, ce qui est déjà le cas pour les avions trop bruyants, mis à l'amende par certains aéroports. Prévoyantes, les compagnies aériennes font pression depuis longtemps sur les constructeurs pour qu'ils leur fournissent des avions toujours plus propres. Gros ou moyens porteurs, ceux-ci devront consommer moins et mieux, être moins bruyants et plus légers, et garantir une sécurité toujours plus grande. Pour cela, la recherche est largement mise à contribution. Si elle y parvient, l'avion du futur n'en restera pas moins une belle pomme de discorde. Mais il aura le mérite de ne plus faire la guerre à son environnement.

Matthieu Ravaut

1. Laboratoire CNRS / Université Lyon-II / ENTIP.
2. Le Groupe de recherche en économie mathématique et quantitative est commun au CNRS, à l'EHESS et à l'université Toulouse-I.

CONTACTS

→ Yves Crozet
yves.crozet@let.ish-lyon.cnrs.fr
→ Marc Ivaldi, ivaldi@cict.fr

La pollution en moins, la performance en plus

Plus propre, moins bruyant mais tout aussi performant, voire plus rapide : ainsi soit l'avion du futur ! Un immense défi pour nos chercheurs, confrontés à une multitude de problèmes très complexes et intriqués. Première illustration avec la combustion dans les moteurs : d'ici à 2020, les avions devront dégager 80 % d'oxydes d'azote (NOx) en moins. En soi, l'affaire est déjà compliquée... rajoutez-y la nécessité de baisser la consommation et le mystère qui plane autour du remplaçant du kérosène – en voie d'extinction –, et vous obtenez le casse-tête qui occupe les chercheurs réunis par la convention Inca (Initiative en combustion avancée), signée en 2002 par le CNRS, la Snecma et l'Onera. Pour le résoudre, de nombreuses pistes sont explorées. Un exemple ? « Aujourd'hui, les différents réactifs, air et combustible, ne sont pas mélangés avant d'arriver à la chambre de combustion, car le mélange risquerait de prendre feu ! » indique Denis Veynante, directeur de recherche CNRS au laboratoire « Énergétique moléculaire et macroscopique, combustion » (EM2C)¹ de Châtenay-Malabry. Mais nos chercheurs ont bon espoir de maîtriser bientôt ces retours de flamme. Conséquence : ils travaillent déjà à des procédés de combustion avec un prémélange, car « cela permet de contrôler la température de la flamme et donc de réduire les NOx ». Pour les explications, décollage immédiat : plus il fait chaud – et la température n'a cessé d'augmenter ces dernières années dans les moteurs –, plus l'émission de ces substances polluantes est importante. Or, la combustion atteint sa température maximale quand la quantité d'oxygène disponible correspond exactement à la masse de combustible injecté. Pour nos amis scientifiques, la composition du mélange à cet instant porte le doux nom de « stoechiométrie ». Deux solutions permettent d'éviter ce point critique. La première : brûler un mélange riche (contenant plus de combustible) que l'on éteint avant la stoechiométrie, et que l'on refait brûler quand il est devenu pauvre, après dilution avec de l'air. Seconde piste, la combustion directement en mélange pauvre. Mais la physique est facétieuse : « Quand le mélange contient trop peu de combustible, la flamme risque de s'éteindre », analyse Denis Veynante. Notre objectif est donc de nous approcher le plus possible de cette limite sans que la combustion s'arrête. » La solution sortira peut-être de l'EM2C, sous la forme d'un petit plasma² créé par deux électrodes, placé à l'entrée de la chambre de combustion et capable de stabiliser les flammes les plus fragiles ! Le précieux plasma

pourrait aussi améliorer le mode de rallumage des réacteurs en plein vol, quand la température frôle les $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ et que la pression est quasi nulle : « Aujourd'hui, ce mécanisme, assuré par des bougies placées sur les parois, nécessite des chambres de combustion de grande taille, pénalisantes en termes d'encombrement, de poids et de production de NOx », analyse Denis Veynante. Un plasma ou un faisceau laser pourrait être disposé dans la tête d'injection et faciliter ainsi le rallumage. » Gloire aux plasmas, qui, outre l'amélioration des procédés de combustion, pourraient aussi aider à atténuer certains problèmes liés à l'aérodynamisme de l'avion. Comment ? En évitant certains décollements, quand les écoulements d'air qui enrobent l'avion s'en écartent au détour de certaines pièces. Ces instabilités ont notamment pour effet d'augmenter la traînée de l'appareil, cette force qui s'oppose à son déplacement. Améliorez l'aérodynamisme, et vous économiserez du carburant... À Poitiers, des chercheurs du Laboratoire d'études aérodynamiques (LEA)³ travaillent à un tel procédé, qui serait disposé sur les ailes. « Nous pensons que des actionneurs plasmas permettront de recoller les écoulements d'air aux parois de l'avion », note Éric Moreau, chercheur au LEA et pionnier de cette thématique sur laquelle il travaille en collaboration avec l'Onera. Constitué de deux fils métalliques espacés de quelques millimètres, ce dispositif pourrait en outre augmenter sensiblement la portance⁴ de l'avion ! Le contrôle de ces écoulements est un véritable sacerdoce pour le LEA, antenne française du

programme de recherche Cafeda⁵, qui le lie depuis 2004 à Airbus et à d'autres équipes européennes. « Nous travaillons également sur des petits actionneurs qui injecteraient de l'air à certains endroits de l'appareil », confie Yves Gervais, le virevoltant directeur du laboratoire, en décrivant les recherches de son collègue Jean Tensi. Le but est le même : déplacer les points de décollement pour limiter leur impact sur l'avion. » Assurément, les idées fusent au LEA. Confirmation au Centre d'études aérodynamiques et thermiques (CEAT), à quelques kilomètres de là. Ce centre de recherches de l'université de Poitiers abrite les grosses installations du LEA. « Nous disposons ici de souffleries grâce auxquelles nous testons par exemple différents profils d'aile, en deux dimensions pour l'instant », explique Jean-Paul Bonnet, directeur de recherche au CNRS. C'est dans les murs de ce laboratoire qu'est né récemment un procédé révolutionnaire : « Situés à la sortie du jet de pro-



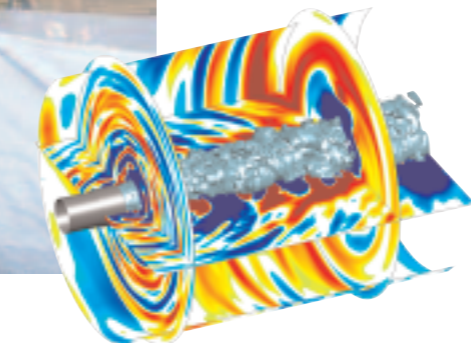
© CORIACNRS

Avec un mélange pauvre, les flammes risquent davantage de s'éteindre (à gauche). Les plasmas permettent de les stabiliser (à droite) et donc d'envisager ce mode de combustion, moins polluant.

À Lyon, la soufflerie du Centre acoustique délivre des jets qui peuvent atteindre Mach 1,6. De quoi analyser les caractéristiques sonores de certaines parties de l'avion. Autre voie explorée : modéliser ces jets pour améliorer les simulations (ci-dessous).



© LMFACNRS

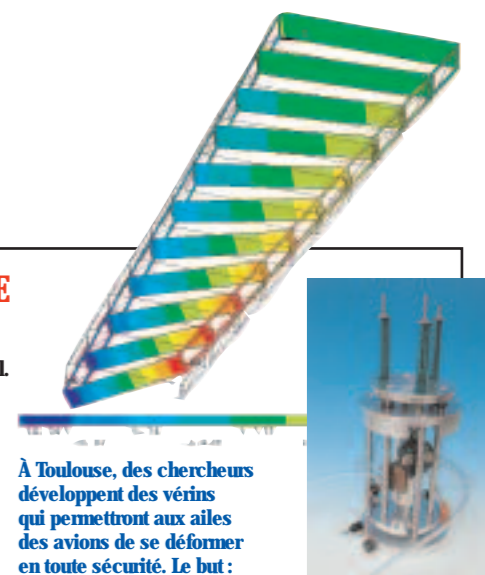


DES ASTUCES DE HAUTE VOLÉE

L'avion du futur pourrait bien modifier son aérodynamisme en plein vol. Ainsi, des chercheurs du laboratoire Femto-ST¹ de Besançon travaillent sur des micro-actionneurs, petits mais costauds, capables de produire un jet d'air, continu ou pulsé, qui interagirait avec les écoulements autour de l'appareil. Aujourd'hui, ces minuscules dispositifs distillent déjà des jets atteignant les 80 mètres par seconde ! « C'est encore insuffisant pour la phase d'atterrissage mais nous sommes en bonne voie, note François Bastien, professeur émérite, de Femto-ST. Reste à régler un certain nombre de problèmes techniques, comme le risque que le trou se bouche. » Ces actionneurs, destinés à ombrer les ailes par milliers, devront aussi être capables d'adapter leur activité

en fonction de l'écoulement local. À une autre échelle, des chercheurs toulousains mettent au point des véris « électroactifs » capables d'agir sur chaque

caisson – sorte de brique élémentaire – des ailes : « La voilure d'un avion se déforme en plein vol, avec une amplitude de plus de 4 mètres en bout d'ailes sur l'A380 ! analyse Bertrand Nogarede, professeur à l'INPT², du « Groupe de recherche en électrodynamique »³. Nos véris en alliages à mémoire de forme exercent une force sur ces ailes pour contrer leur vrillage. » Les chercheurs optimisent en ce moment ce procédé destiné aux versions futures de l'A380, pour



À Toulouse, des chercheurs développent des véris qui permettront aux ailes des avions de se déformer en toute sécurité. Le but : améliorer l'aérodynamisme de l'appareil en plein vol.

qu'il soit utilisable dans différentes conditions de vol. Deux recherches qui pourraient permettre à l'avion du futur de se fondre vraiment dans l'air.

M. R.

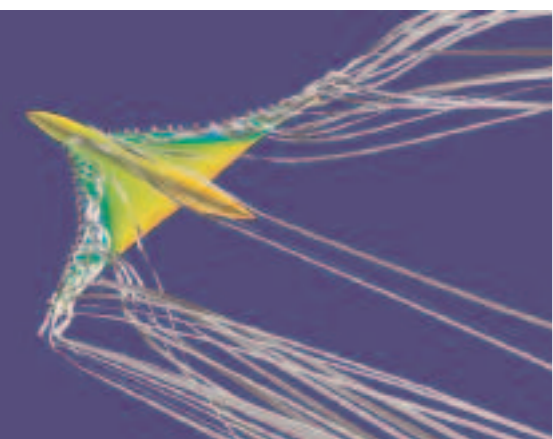
1. Franche-Comté électronique, mécanique, thermique et optique, CNRS / UFC / ENSMM / UTBM.
2. Institut national polytechnique de Toulouse.
3. EM3 de l'INPT / ENSEEIHT / LEEI.

CONTACTS :

François Bastien, fbastien@femto-st.fr
Bertrand Nogarede, bertrand.nogarede@leei.enseeiht.fr

pulsion, des actionneurs permettent d'orienter ce jet dans la direction souhaitée », détaille Erwan Collin, ingénieur de recherche au LEA. Le but ? Accroître les pentes de montée lors des décollages pour gagner plus vite les cieux et, par conséquent, réduire autour de l'aéroport la zone touchée par les nuisances sonores. Protégé par un brevet depuis 2003, ce mécanisme est doublement économe : « Il nécessite très peu d'énergie, confirme Joël Delville, responsable enthousiaste du groupe « Turbulence Analyse Modélisation & Contrôle » du LEA. Et avec ce système dit de « vectorisation », les gouvernes mécaniques classiques de l'avion pourraient même devenir facultatives ! » Reste le bruit des appareils, forcément lié à leur forme. Ici, nos chercheurs ont un objectif précis : atténuer les effets du célèbre bang sonore pour le cas où des avions supersoniques reviendraient dans la course au ciel. Et l'imagination est au rendez-vous : « Dans nos expériences menées en soufflerie, du liquide est éjecté du nez de l'avion, décrit Anton Lebedev, chercheur au LEA. Résultat : les nuisances sonores sont bien moindres ! » Explications : le bang est le fruit de la rencontre entre deux zones de surpression (pression supé-

rieure à celle du milieu environnant), l'une partant de la tête de l'avion et l'autre des ailes. Écartez-les, comme c'est le cas ici grâce au liquide qui prolonge l'avion, et vos oreilles vous en sauront gré. Ce qui explique aussi les premiers résultats de travaux du LEA sur la forme idéale d'un avion supersonique, obtenue à l'aide d'une technique dont ne disposaient pas les concepteurs du Concorde : l'algorithmie génétique. « Par analogie avec la biologie, le génotype de l'avion est un ensemble de paramètres géométriques, précise Itham Salah El Din, qui a récemment soutenu sa thèse au sein du LEA. Dans nos travaux, nous définissons un certain nombre d'"individus" que nous croisons ensemble, par un système de sélection artificielle. L'ordinateur nous renvoie alors la forme idéale de l'avion pour la réduction du bang. » Résultat, cet avion rapide mais discret a une plus grande surface d'aile, un nez pointu et légèrement retroussé. Malheureusement, un avion n'attend pas de dépasser la vitesse du son pour se faire entendre. Six organismes français dont le CNRS⁶ viennent donc de s'unir contre les nuisances sonores, autour du programme Iroqua ...



© Cartier/DAAP/ONERA

Des recherches sont menées sur le comportement aérodynamique de l'avion, pour le rendre plus performant et moins bruyant. De quoi envisager un jour le retour des avions civils supersoniques.

... (Initiative de recherche pour l'optimisation acoustique aéronautique), avec un objectif : les réduire de 10 décibels en 2020, ce qui revient à les diviser par deux. « *Le défi est grand, car le bruit des avions a déjà été réduit de 20 dB en quarante ans*, note Daniel Juvé, directeur du Centre acoustique du Laboratoire de mécanique des fluides et d'acoustique (LMFA)⁷ de Lyon et membre du comité de pilotage d'Iroqua. *De plus, ces bruits sont perçus comme très forts mais ne mettent en jeu qu'une énergie très faible⁸, qu'il est donc difficile de modéliser en vue de la réduire !* » Pourtant, ici, le pessimisme n'est pas de mise. Première étape : mieux comprendre ces bruits et parvenir à une simulation plus précise. Au Centre acoustique, une soufflerie équipée d'un compresseur distille des jets atteignant Mach 1,6 ! Une antenne de 32 microphones permet ensuite d'étudier le comportement acoustique de certaines parties de l'avion, comme les dispositifs hypersustentateurs déployés lors de l'atterrissage. De quoi tester plus facilement les autres idées de méthodes de réduction des bruits développées ici. Une possibilité : utiliser des "antibruits" pour contrer les bruits des moteurs. « *Il est possible d'annihiler un son en lui juxtaposant le son opposé*, explique Daniel Juvé. *Mais il est très difficile de produire l'antibruit d'un son puissant. Une idée plus prometteuse est d'associer ce type de contrôle actif à des absorbants acoustiques, comme des structures en nids d'abeille.* » Autre source de bruit, les écoulements dans la cavité d'un train d'atterrissage sorti. Pour rendre ces écoulements plus stables et donc moins bruyants, nos chercheurs ten-

tent de mettre au point divers actionneurs (volets, jets) et systèmes de contrôle. Qu'on se le dise : la science a relevé le défi.

Matthieu Ravaut

1. CNRS / École centrale de Paris.
2. Aussi appelé « vent ionique », il est constitué d'un bain de particules chargées, électrons et ions positifs, en proportions égales.
3. CNRS / Université de Poitiers / ENSMA.
4. Force exercée par l'air sur la face inférieure des ailes.
5. Control of Aerodynamics Flows for the Environmentally Designed Aircraft.
6. Iroqua rassemble également l'Onera, Airbus, Dassault Aviation, Eurocopter et la Snecma.
7. CNRS / ECL / Université Lyon-1.
8. Certains bruits peuvent paraître insupportables alors qu'ils ne gênent qu'une pression mille fois plus petite que la pression atmosphérique.

CONTACTS

- **Jean-Paul Bonnet**
jean-paul.bonnet@lea.univ-poitiers.fr
- **Yves Gervais**
yves.gervais@lea.univ-poitiers.fr
- **Éric Moreau**
eric.moreau@lea.univ-poitiers.fr
- **Erwan Collin**
erwan.collin@univ-poitiers.fr
- **Daniel Juvé**
daniel.juve@ec-lyon.fr
- **Itham Salah El Din**
itham.salaheldin@lea.univ-poitiers.fr
- **Joël Delville**
joel.delville@lea.univ-poitiers.fr
- **Anton Lebedev**
anton.lebedev@lea.univ-poitiers.fr
- **Denis Veynante**
denis.veynante@em2c.ecp.fr

9 IDÉES QUI NE DEMANDENT QU'À DÉCOLLER

QUEUE
Avec un système de « poussée vectorielle » installé sur les réacteurs (p. 21), les gouvernes classiques de l'avion deviendraient presque facultatives.

VOILETS
Les spoilers, ces volets qu'on voit se relever lors des atterrissages par exemple, pourraient se multiplier comme des petits pains. L'avion du futur pourrait en compter jusqu'à 500 par aile ! (p. 26)

VÉRINS
Des vérins en alliages à mémoire de forme, intégrés aux caissons des ailes, permettraient d'adapter la déformation des ailes aux différentes conditions de vol. (p. 21)

SYSTÈME ANTI-TOURBILLONS
Des chercheurs travaillent sur un dispositif de cette sorte, capable d'atténuer les dangereux sillages turbulents que laissent les avions sur leur passage (p. 26).

PLASMAS ET JETS
Judicieusement disposés, des plasmas (p. 20) pourraient permettre de recoller les écoulements d'air autour de l'appareil... à l'instar de minuscules jets (p. 21) également installés sur les ailes.

MATÉRIAUX
La mue de l'avion se poursuit, tant dans les moteurs que pour le reste de l'appareil. Les matériaux composites sont appelés à jouer un rôle de plus en plus grand (p. 23).

INFORMATIQUE
La multiplication prévue des systèmes embarqués (commandes et autres) s'accompagnera sûrement d'une décentralisation des calculs au sein de réseaux de communication partagés (p. 26).

JET
Pour les avions supersoniques, un jet liquide, expulsé du nez de l'appareil, permettrait de réduire les nuisances sonores liées au bang (p. 21).

TRAIN D'ATTERRISSEMENT
Pour limiter le bruit dû aux écoulements dans la cavité d'un train d'atterrissage, une voie consiste à tapisser celle-ci d'actionneurs (volets, jets) capables d'agir sur ces importants mouvements d'air (p. 22).

Des matériaux sur mesure

SUPERSONIQUE : ENCORE DES MURS À FRANCHIR

Être ou ne pas être supersonique, telle est la question pour l'avion civil du futur. Si certains chercheurs se montrent sceptiques, la plupart laissent la porte ouverte. « *Pour cela, il faudra notamment réduire la pollution de ces avions amenés à voler très haut, diminuer leur consommation et atténuer le bang sonore*, résume Daniel Juvé du LMFA de

Iroqua. *Mais comme ce dernier est aussi lié à la masse de l'appareil, l'idée d'un avion d'affaires supersonique est dans l'air. En tout cas, le marché existe.* » Néanmoins, les avions plus gros pourraient aussi gagner en vitesse et flirter à terme avec le mur du son, en régime transsonique. Une chose est sûre : si le successeur du Concorde n'est pas encore né, les recherches menées depuis 2001 dans le cadre du Réseau de recherche aéronautique sur le supersonique, présidé par Sébastien Candel, de l'EM2C, ont donné lieu à de grandes avancées, notamment dans les méthodes de calcul direct du bruit, dans la compréhension de certains problèmes de combustion ou encore dans l'élaboration de matériaux pour les moteurs. Des progrès qui profiteront à tous les avions de demain.

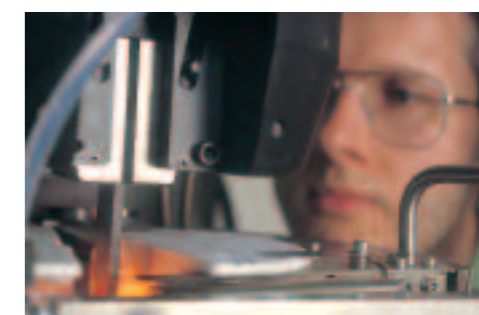
M. R.

CONTACT :
Sébastien Candel, sebastien.candel@em2c.ecp.fr



© Ph. Delafosse/Coil, Musée Air France

Il care en a fait la cruelle expérience : pour se mouvoir tranquillement dans les airs, il ne suffit pas d'avoir des ailes. Encore faut-il qu'elles supportent les terribles conditions des cieux ! Pour rendre les avions toujours plus résistants et plus légers, nos chercheurs jouent sur les structures et les matériaux. Parmi eux, les matériaux composites (formés d'une matrice renforcée par des fibres) semblent promis à un bel avenir, et l'A380, bien mieux pourvu que ses prédécesseurs, en est la preuve volante. « *Airbus a même prévu de doubler d'ici à dix ans la part en masse de composites dans ses avions pour atteindre 50 % !* » note Pierre Ladevèze, directeur du Laboratoire de mécanique et technologie (LMT)¹ de Cachan. Principal atout de ces matériaux : « *on peut les construire en fonction de leur utilisation, et donc des propriétés qu'on souhaite leur donner* », justifie Marie-Christine Lafarie-Frenot. Cette chercheuse du Laboratoire de mécanique et physique des matériaux (LMPM)² de Poitiers travaille sur les mécanismes d'endommagement et de vieillissement des composites à fibre de carbone soumis à des conditions extrê-



© L. Médard/CNRS Photothèque

Des chercheurs tentent de modéliser les comportements des matériaux composites pour réduire la période d'essais réels.

mes et répétées. Avec la clef, des modèles pour prévoir leur comportement en vol. Un autre projet, mené en partie au LMPM, a pour but de réduire les périodes d'essais sur ces matériaux. Aujourd'hui, une pièce destinée à voler 80 000 heures (presque dix ans) serait testée sur la même durée. Mais la crainte de voir le matériau dépassé à la fin du test bloque nombre d'essais. Si nos chercheurs parviennent à mettre au point certains modèles prédictifs, ces ...

Les composites sont promis à un bel avenir dans l'aviation. Parmi eux, les matériaux céramiques (ici, des fibres collées sur un cadre de carbone) devraient intégrer rapidement les structures les plus chaudes des moteurs.



© L. Médard/CNRS-Photothèque

... essais pourront être menés sur des périodes bien plus courtes, de l'ordre de six mois, par exemple. Mais il faudra ensuite parvenir à intégrer ces matériaux à un avion : « Aujourd'hui, nous sommes encore obligés de les assembler avec des métaux, résume la chercheuse. Or, quand ils sont troués pour le boulonnage ou le rivetage, ces composites sont très fragilisés, car certaines de leurs fibres ont été cassées ! » Des travaux sont donc menés pour renforcer la structure au niveau des trous. Une alternative : développer des procédés de collage des éléments entre eux. Alors, à quand un avion entièrement composite ? « Nous en sommes loin, répond Marie-Christine Lafarie-Frenot. On aura du mal à se passer de parties métalliques dans certaines zones où les températures sont extrêmement élevées. » Pourtant, dans des structures très chaudes comme les tuyères, les métaux se feront peut-être voler la vedette par des composites céramiques : « Certains d'entre eux gardent leurs propriétés à des températures extrêmement élevées, jusqu'à 2000 °C ! relate Jacques Lamon, directeur de recherche CNRS au Laboratoire des composites thermostrostructuraux (LCTS) de Pessac³. Soit un gain de plusieurs centaines de degrés par rapport aux métaux, tout en gardant les avantages de ces derniers. » Reste à améliorer leur durée de vie, objet de nombreuses recherches au LCTS. L'espoir est grand d'y par-

AVEC MAIA, LA RECHERCHE S'ENVOLE

Acteurs majeurs de la recherche en aéronautique, la Snecma, l'Onera et le CNRS ont signé en 2003 une convention de coopération nommée Maia (Méthodes avancées en ingénierie mécanique). De l'étude des vibrations à celle des contacts via l'amélioration de la durée de vie des structures, Maia aborde un grand nombre de thématiques autour des matériaux et des structures.

M. R.

venir assez rapidement et de voir ces matériaux, malgré leur coût élevé, intégrer l'avion avant une dizaine d'années. Mais les métaux n'ont pas dit leur dernier mot ! Confirmation au Centre des matériaux⁴ de l'École nationale supérieure des mines de Paris, à Evry, spécialisé dans ce type de structures chaudes. Luc Rémy, directeur de l'unité mixte CNRS, nous expose la philosophie de son laboratoire, partenaire de la Snecma depuis plus de trente ans : « Le moteur est l'objet d'une véritable course entre les acteurs de l'aéronautique, explique-t-il dans un sourire. Autant pour la température, où nous devons gagner 15 °C à l'entrée de la turbine chaque année, que pour la masse du moteur. » Ici, toutes ses parties sont étudiées, comme les disques des moteurs, ces pièces qui tournent en entraînant les aubes. L'enjeu est de taille : si un disque éclate, c'est tout simplement l'avion qui part en morceaux. « Rassurez-vous, cela n'arrive jamais », assure le chercheur au visiteur inquiet. Et pourtant, nos scientifiques perfectionnistes, merci à eux, cherchent en permanence à améliorer la résistance de cette pièce en superalliage à base de nickel. Pour cela, ils doivent concilier trois objectifs : trouver le compromis idéal entre les compositions de sa matrice et de sa phase durcissante⁵, réduire sa sensibilité aux défauts d'élaboration, qui peuvent donner naissance à des fissures, et le rendre plus résistant à la propagation de celles-ci⁶. Mais ce travail de fond ne saurait éclipser une révolution dans la conception des compresseurs. Habituellement, les aubes sont accrochées à un disque, lui-même fixé sur un arbre moteur. Dans le dispositif imaginé par les ingénieurs de la Snecma, en colla-

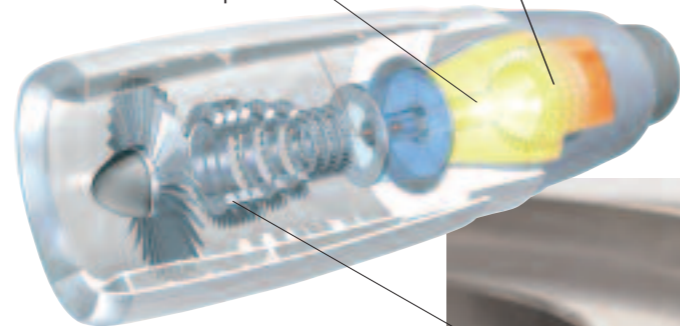
boration avec nos chercheurs et ceux de l'Onera, le disque, l'arbre et les aubes disparaissent au profit d'une seule pièce, un anneau baptisé Anam (Anneau aubagé monobloc). Le régime est sévère pour cette partie de l'avion, qui perd 65 % de son poids ! Autre objet d'étude, la souffrance des aubes dans la turbine du réacteur. Les coupables sont connus : l'oxydation et l'augmentation des températures des gaz, qui constitue un bel enjeu industriel. Si l'introduction des monocristaux de superalliage a permis depuis dix ans de monter en température, nos chercheurs⁷ tentent aujourd'hui d'accroître les performances des aubes en jouant sur le revêtement qui leur sert de garde du corps et de barrière thermique. Sur une période couvrant seulement trois thèses effectuées au laboratoire, la durée de vie d'une aube a été multipliée par vingt ! De quoi donner le sourire aux constructeurs. Pour l'instant, et malgré la concurrence des composites, les métaux gardent donc leur place à bord. Prévoyants, ils ont même trouvé une autre voie d'abordage. Ainsi, dans le cadre de la convention Astra signée en 2004 par l'Onera et le CNRS, de nombreux laboratoires étudient le rôle que pourraient jouer les mousses métalliques : « Ces étranges structures obtenues par bullage sont très légères et capables d'absorber des chocs importants », explique Samuel Forest, chercheur CNRS au Centre des matériaux. Va pour les chocs.

CHAMBRE DE COMBUSTION

À l'avenir, le mélange air-combustibles pourrait se faire avant l'entrée de la chambre de combustion (p. 20). À la clef, une réduction des émissions polluantes.

AUBES DE TURBINE

Les aubes de turbine ont la vie dure. Une solution pour les rendre toujours plus résistantes : optimiser leur revêtement de protection.



© B. Bourgeois

Si certaines recherches portent sur le fonctionnement du moteur, de très nombreux travaux sont consacrés aux matériaux et structures qui le composent. Leur objectif est clair : gagner en résistance... et en légèreté.

QUAND L'AVION PANSERA SES PLAIES

Imaginez une fissure dans le moteur... qui se réparerait toute seule. Impensable ? Pas du tout, et les industriels en rêvent déjà. « C'est en effet une propriété formidable de certains matériaux composites céramiques », confirme Jacques Lamon du LCTS. Si en pratique, l'affaire n'est pas mince, le principe est assez simple : « Quand une fissure apparaît, un processus chimique lié à l'oxydation du matériau donne naissance à un verre qui vient colmater la brèche », explique Pierre Ladevèze, dont le laboratoire, le IMT⁸, mène

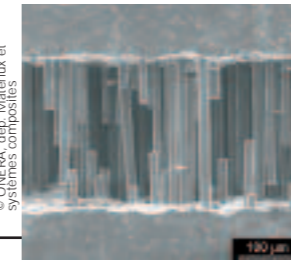
de nombreuses recherches sur les matériaux, en partenariat avec la Snecma et Airbus (voir *Le journal du CNRS*, n° 184, p. 6). Et là, notre chercheur est formel : « Ce mécanisme, qui multiplie par cent la durée de vie du matériau, sera utilisé à court terme pour le moteur. Par la suite, d'autres matériaux

autocicatrisants pourraient être plus largement utilisés pour le reste de l'appareil, notamment pour les parties les plus délicates à surveiller et donc à réparer... »

M. R.

1. Le 12 avril, une nouvelle structure, dont le LMT est un pilier, a été inaugurée à Cachan. Baptisée Inno'Campus et commune aux Écoles normales supérieures parisiennes et à EADS, elle permettra de nombreuses recherches sur les matériaux.

Un jour, ce composite céramique pourra réparer ses éventuelles fissures (ci-contre). Avec des applications précieuses pour l'aéronautique et l'aérospatiale.



© ONERA, dcp, Matériaux et Systèmes Composites

Mais une autre menace, plus pernicieuse, rôde sur les structures : les vibrations. Un exemple ? « Il y a très peu de jeu au niveau de l'assemblage entre les aubes et le stator, la partie fixe du turbo-réacteur, décrit Jean Frêne, chercheur au Laboratoire de mécanique des solides (LMS)⁸ de Poitiers. À force, les vibrations peuvent provoquer un frottement entre ces deux parties : des aubes peuvent alors se casser et détruire le moteur. » Première étape, bien comprendre l'ensemble des phénomènes vibratoires et leur dangerosité pour la structure. Mais les mécanismes sont de plus en plus complexes : « Les matériaux et les contacts

entre deux pièces sont de plus en plus sollicités, en température ou en efforts », expose Philippe Kapsa, directeur de recherche CNRS au Laboratoire de tribologie et dynamique des systèmes (LTDS)⁹, à Lyon. En outre, la tendance actuelle est aux pièces monobloc. Seulement, celles-ci sont plus sensibles aux problèmes vibratoires que les pièces unitaires... Quoi qu'il en soit, deux voies existent pour limiter leurs effets néfastes : « Rendre les structures plus résistantes ou protéger les matériaux par un revêtement de surface ou un lubrifiant », poursuit notre chercheur lyonnais, dont le laboratoire s'attache à explorer les deux

Dans le dispositif Anam, le traditionnel « arbre-disque-aube » est remplacé par un seul anneau qui retient les aubes. Ce dernier est rigidifié par un insert composite en carbure de silicium (ci-dessous).



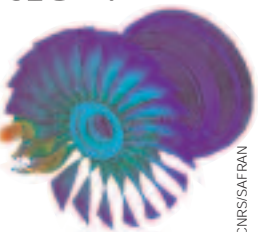
© T. Mambert/SAFRAN

© DMSC/ONERA

Sécurité : toujours plus !

En matière de sécurité à bord d'un avion, la recherche a une politique claire qui pourrait se résumer à un slogan : tolérance zéro pour tous les incidents ! Et ce, qu'ils soient mécaniques ou informatiques... Premier exemple sur un avion en haute altitude, dans le cas où une oie sauvage en migration viendrait à rentrer en collision avec un réacteur : « Que le moteur tombe en panne n'est pas un gros problème, analyse Alain Combescure, directeur du Laboratoire de mécanique des contacts et des solides (Lamcos)¹ de Lyon, qui travaille sur le sujet avec la Snecma. Par contre, il faut maîtriser les conséquences de cet impact, soit en faisant en sorte que les aubes se déforment mais ne cassent pas, soit en les empêchant de traverser le carter. » Rassurez-vous, les moteurs d'aujourd'hui respectent déjà ces contraintes. Mais en prévision de l'arri-

Un choc avec un oiseau peut s'avérer dangereux pour le moteur. Modéliser ce type de situations accidentelles constitue donc un enjeu important pour la recherche.



© Lamcos-CNRS/SAFRAN

vée de nouveaux matériaux plus légers, les chercheurs du Lamcos perfectionnent les procédés de simulation de ce type d'impact. « Aujourd'hui, nous savons dire s'il va y avoir rupture ou non, mais nous ne savons pas comment celle-ci va intervenir », précise Alain Combescure. Si le scientifique cherche en parallèle à simuler les impacts de morceaux de glace, il travaille aussi sur une mésaventure qu'on ne souhaite à personne : l'amerrissage forcé d'un avion de ligne. « L'appareil doit pouvoir amerrir sans que sa structure se déforme trop, explique le chercheur. Pour cela, nous devons parvenir à ...

pistes. Parmi les candidats, nous trouvons ainsi les films amortisseurs : « Il s'agit de remplacer les contacts métal/métal par un palier fluide, de l'huile en général, capable d'amortir les vibrations », explique Jean Frêne. Ce principe général trouve un grand nombre d'applications différentes à bord d'un avion. Une affaire à suivre donc, comme toutes les recherches précédentes. Leur but commun ? Envoyer aux oubliettes les incidents dus aux matériaux aériens.

Matthieu Ravaut

1. CNRS / ENS Cachan / Université Pierre et Marie Curie.
2. CNRS / ENSMA.
3. CNRS / Université Bordeaux-I / Snecma / CEA.
4. CNRS / ENSM Paris.
5. Éléments chimiques qui, grâce à une suite de réactions lors de l'élaboration du superalliage, lui donnent sa résistance.
6. Le Cemef participe également à ces travaux.
7. En étroite collaboration avec la Snecma et l'Onera.
8. CNRS / Université de Poitiers.
9. CNRS / ECL / Enise.

CONTACTS

- Samuel Forest
samuel.forest@ensmp.fr
- Jean Frêne
jean.frene@lms.univ-poitiers.fr
- Philippe Kapsa
philippe.kapsa@ec-lyon.fr
- Pierre Ladevèze
pierre.ladeveze@lmt.ens-cachan.fr
- Marie-Christine Lafarie-Frenot
lafarie@ensma.fr
- Jacques Lamon
lamon@lcts.u-bordeaux1.fr
- Luc Rémy, luc.remy@ensmp.fr

... simuler l'ensemble du choc : comment, par exemple, certains rivets vont s'arracher et quelles déchirures ils vont provoquer. »

Côté informatique, les systèmes embarqués sont amenés à jouer un rôle toujours plus grand dans le déroulement du vol. On pourrait craindre que cette dépendance croissante ne fragilise l'avion en cas de panne. Pas d'inquiétude : leur fiabilité est extrême... au détriment parfois de leurs performances : à bord, les processeurs sont par exemple beaucoup moins rapides que sur votre ordinateur. « Un des buts pour l'avion du futur est d'avoir des codes certifiés² qui tournent plus vite, car les programmes devront scruter toujours plus de capteurs avec une fréquence plus élevée », analyse Nicolas Halbwachs, directeur de recherche CNRS au laboratoire Verimag³ de Grenoble, qui connaît bien la question : il a tout simplement créé le langage qui programme les commandes de vol et les systèmes de pilotage des avions Airbus, depuis l'A340 jusqu'à l'A380 ! « Celui-ci est fondé sur les pratiques des automaticiens qui sont à la base de la conception de l'avion, confie le chercheur. Ce qui permet de mieux répondre à leurs attentes. » Mais qui dit multiplication des systèmes embarqués, dit aussi équipements et bus de communication⁴ de plus en plus nombreux... Pas si sûr : « Sur l'A380, nous avons travaillé à la mise en place du premier réseau AFDX (Avionics Full Duplex) de type Ethernet commuté », décrit Christian Fraboul, chercheur de l'Institut de recherche en informatique de Toulouse⁵. L'idée est simple : répartir les logiciels systèmes sur plusieurs calculateurs, eux-mêmes connectés sur un

réseau de communication partagé. Oubliés, les nombreux équipements hétérogènes et les trop nombreux câbles de communication ! « Question sécurité, nous avons contribué à prouver que les informations issues des différents systèmes arrivent toujours à traverser le réseau AFDX dans une limite de temps bien définie », narre le scientifique. Toujours dans la ville rose, des chercheurs travaillent sur une architecture informatique qui autoriserait en toute sécurité une innovation majeure : à très long terme, les ailes des avions pourraient contenir des centaines voire un millier de petits spoilers (les volets que l'on voit aujourd'hui se lever avant l'atterrissage) en lieu et place de la dizaine actuelle. « Là aussi, les commandes de ce système ne seront pas centralisées et devront se baser sur un réseau de communication numérique utilisant des nœuds intermédiaires, explique Yves Crouzet, chercheur au Laboratoire d'analyse et d'architecture des systèmes (Laas)⁶. Avec ce concept, on peut tolérer plus facilement la perte d'un petit nombre de spoilers. » Nos chercheurs étudient les nouvelles familles d'erreurs engendrées par l'utilisation de ces nœuds intermédiaires, pour proposer des techniques de codage

Les pilotes n'ont pas toujours bien vécu la prolifération de l'informatique dans le cockpit...

Pour multiplier les systèmes embarqués mais pas les câbles, on peut répartir les calculs sur un réseau de communication partagé.



© G. Collignon/SAPFRAN



© Digital Vision/Getty Images

de l'information permettant d'y faire face. Ils ont déjà vérifié par la simulation que ce type d'architecture avait le niveau d'intégrité exigé par les constructeurs. Pas de doute, le CNRS est expert en la matière : le Laboratoire d'informatique de l'École normale supérieure (Liens)⁷ a ainsi participé à la

réalisation de l'analyseur statistique Astree⁸, qui a démontré la fiabilité absolue de la commande de vol électrique de l'A380, tout simplement le logiciel le plus critique de cet avion !

Mais comment cette invasion informatique est-elle vécue par les premiers intéressés, à savoir les pilotes de ligne ? « Ils sont partagés entre le désir d'être assistés par l'informatique (systèmes météo ou anticollision) et une certaine perplexité face à l'hypercomplexité des systèmes embarqués », répond Victor Scardigli, directeur de recherche émérite CNRS à l'Institut de recherche interdisciplinaire en socio-économie (Iris)⁹, qui codirige le groupe de recherche « Aéronautique et société ». Nos sociologues ont été les premiers au monde à observer le comportement de l'équipage en vol réel, au cœur du cockpit ! C'était au début des années quatre-vingt-dix, et notre chercheur se souvient très bien des incertitudes des pilotes face aux 80 systèmes embarqués :

« Quand ils ne comprenaient pas une information de l'ordinateur ou une réaction de l'avion, ils tentaient parfois de s'en sortir de manière un peu empirique, et parfois inappropriée, voire dangereuse », narre le sociologue. Que l'on se rassure : la conception de ces fameux systèmes a intégré depuis les habitudes de travail des pilotes. « De son côté, la communauté des pilotes a intégré l'automatisation dans ses savoir-faire et sa vision du monde », précise Victor Scardigli. Pourtant, un décalage persiste entre la vision des concepteurs et celle des pilotes : « Ces deux communautés n'ont pas la même vision du temps, de l'espace, des dangers. Face à un risque immédiat, les pilotes doivent avoir des réactions très rapides, qui ne correspondent pas toujours aux solutions

cartésiennes envisagées par les concepteurs. » S'élève alors une question délicate mais légitime : y aura-t-il encore un pilote dans l'avion du futur ? « Impossible à dire, répond Victor Scardigli. Ce ne sont pas les progrès techniques qui en décideront, mais l'issue d'un véritable choc des cultures entre les différents acteurs (pilotes d'essai, pilotes de ligne, concepteurs, contrôleurs aériens...). Ceci dit, le frein psychologique est immense : qui monterait aujourd'hui dans un avion sans humain aux commandes ? » En effet, la vision semble effrayante. Une raison de se rassurer : selon notre sociologue, cette idée de vol sans pilote revient de manière cyclique mais s'est, jusqu'à présent, toujours effacée devant la vision plus rassurante de l'homme aux manettes.

Matthieu Ravaut

1. CNRS / INSA Lyon.
2. Pour les programmes informatiques destinés aux avions, les normes de certification essentielles à leur utilisation sont extrêmement élevées.
3. CNRS / Université de Grenoble-I / INP Grenoble.
4. Système de communication entre les différentes parties d'un ordinateur ou entre plusieurs ordinateurs.
5. INP Toulouse / Universités Toulouse-I et III / CNRS.
6. CNRS / Université Toulouse-III / INSA Toulouse / INP Toulouse.
7. CNRS / ENS.
8. Collaboration CNRS / ENS / École polytechnique.
9. CNRS / Université Paris-IX.

CONTACTS

- Alain Combescure
alain.combescure@insa-lyon.fr
- Yves Crouzet, yves.crouzet@laas.fr
- Christian Fraboul
christian.fraboul@enseiht.fr
- Nicolas Halbwachs
nicolas.halbwachs@imag.fr
- Victor Scardigli
victor.scardigli@dauphine.fr

UN TRAFIC SOUS CONTRÔLE

La sécurité aérienne se joue en grande partie sur terre, dans les centres de contrôle chargés de surveiller les routes des avions et de prévenir les risques de collision. Des recherches sont menées pour assister les contrôleurs dans leur mission de plus en plus difficile. Première escale au Laboratoire d'Automatique, de mécanique et d'informatique industrielles et humaines (Lamih)¹, où des chercheurs, en collaboration avec le Cena², mettent au point une plate-forme technologique prometteuse : « Il s'agissait au départ de répartir le travail entre l'opérateur et le logiciel, ce dernier se contentant de résoudre les conflits les plus simples, résume Patrick Millot, pilier de ces travaux. Cet outil n'est pas destiné à remplacer l'opérateur mais à lui permettre de déléguer tout en gardant le contrôle sur la situation. » Une condition sine qua non pour que les contrôleurs l'acceptent, car ils sont pénalement responsables de tout incident survenant dans leur zone ! Aujourd'hui, au centre

de contrôle de Bordeaux, nos automaticiens expérimentent pour la troisième fois leur plate-forme baptisée Amanda. Avec de nouvelles idées en tête, comme celle d'un dispositif capable d'appliquer des solutions schématisées proposées par l'opérateur, tout en renseignant celui-ci sur la pertinence de telle ou telle solution. Seconde halte à Palaiseau, où des chercheurs du Laboratoire d'informatique de l'École polytechnique (LIX)³ se sont lancés un autre défi. Aujourd'hui, chaque centre de contrôle se voit assigner un secteur aérien de surveillance, le découpage étant recalculé de temps en temps. Le but de ces recherches ? « Remodeler les secteurs au fil de la journée, au gré du trafic, pour équilibrer la charge de travail entre les différents centres, explique Philippe Baptiste, chercheur CNRS au LIX qui mène ces travaux en collaboration avec Vu Duong, directeur du département recherche innovante d'Eurocontrol⁴. Il existe en effet de grandes divergences entre les activités des différentes zones. » Malgré de nombreuses contraintes, les premiers résultats sont très encourageants... à l'image d'autres travaux menés au LIX. Leur ambition : développer une méthode pour organiser de manière plus rationnelle le trafic aérien, en vue notamment de réduire les retards, si hominis des usagers. Et par la même occasion, d'améliorer encore la sécurité à bord.

M. R.

1. CNRS / Université de Valenciennes.
2. Centre d'étude de la navigation aérienne.
3. CNRS / École polytechnique.
4. Organisme chargé de la gestion des centres de contrôle en Europe.



© V. Paul/Getimagesev.com

Les contrôleurs aériens disposeront bientôt de nouveaux outils informatiques qui les assisteront dans leur tâche, rendue plus difficile par l'augmentation du trafic.



© LAMIH

CONTACTS :

- Philippe Baptiste
philippe.baptiste@polytechnique.fr
- Patrick Millot, patrick.millot@univ-valenciennes.fr

GARE AUX TOURBILLONS !

12 novembre 2001. Dans un New York traumatisé, un avion s'écrase quelques instants après son décollage. Résultats de l'enquête : l'appareil a sûrement décollé trop tôt et s'est retrouvé dans les turbulences provoquées par l'avion précédent. « Chaque avion en vol laisse derrière lui

un sillage turbulent, constitué principalement de deux tourbillons de sens contraires, très énergétiques, qui peuvent persister pendant plusieurs minutes après le passage de l'avion », analyse Thomas Leweke, chercheur CNRS à l'Institut de recherche sur les phénomènes hors équilibre (IRPHE)¹ de Marseille et coordinateur du projet européen FAR-Wake. Un espoir : ce scientifique a découvert l'existence d'une instabilité, présente au cœur de ces tourbillons, qui semble accélérer leur désintégration. Du coup, nos chercheurs travaillent sur un dispositif, un objet non profilé (un cylindre, par exemple) sur les ailes ou les volets, qui exciterait

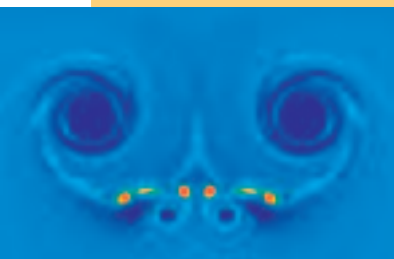
de manière ciblée cette instabilité pour qu'elle se développe plus vite. Objet d'un brevet², ce dispositif est testé sous différentes versions dans le cadre du projet européen Awiator. Avec une ambition assumée : « Trouver la meilleure solution applicable d'ici à deux ou trois ans. » Celle-ci assurera donc un peu plus de sécurité pour tous les avions... qui ne décollent pas les premiers.

M. R.

1. CNRS / Université Aix-Marseille-I et II.
2. Commun au CNRS, à Airbus France S.A. et au Centre européen de recherche et de formation avancée en calcul scientifique (Cerfacs).

CONTACT :

- Thomas Leweke
thomas.leweke@irphe.univ-mrs.fr



© O. LEBEDE/DSMA/ONERA

Un avion laisse derrière lui un sillage turbulent qui peut représenter un danger pour les appareils qui le suivent.

POUR EN SAVOIR PLUS

À LIRE

- > Pourquoi les avions volent-ils ?, Jean-Baptiste Touchard, éd. Le Pommier, « Les petites pommes du savoir », 2003
- > Un anthropologue chez les automatistes, de l'avion informatisé à la société numérisée, Victor Scardigli, PUF, 2001
- > Comment naissent les avions, ethnographie des pilotes d'essai, Victor Scardigli, Marina Maestrutti et Jean-François Poltorak, L'Harmattan, 2001
- > Histoire de l'aviation, Bernard Marck, Flammarion, 2001
- > Les avions, Patrick Facon, Larousse, 2001
- > Le ciel en héritage : un siècle d'industrie aéronautique et spatiale française, Patrick Guérin, Gérard Maoui, Le Cherche Midi, 2002
- > Aéronautique et espace : bilan et perspectives à l'aube du XXI^e siècle, Pierre Sparaco, Éditions Larivière, 2003
- > Histoire mondiale des avions de ligne depuis 1908, Alain Pelletier, E.T.A.I, 2004

EN LIGNE

Site de la Direction générale de l'aviation civile
www.aviation-civile.gouv.fr