

LES PÉPITES DE L'ONERA

CONTRIBUTIONS À L'INDUSTRIE AÉROSPATIALE DE LA FRANCE ET DE L'EUROPE



Deuxième édition

ONERA

THE FRENCH AEROSPACE LAB

ONERA



THE FRENCH AEROSPACE LAB

En 1946, l'État crée l'ONERA comme instrument d'une politique ambitieuse d'excellence de notre industrie aéronautique et de notre Défense. Il place l'ONERA sous la tutelle unique du ministère de la Défense. Afin de hisser la France au meilleur niveau mondial d'excellence scientifique et technologique dans l'aéronautique civile et militaire, il lui donne notamment pour missions de développer et d'orienter les recherches dans le domaine aéronautique, de concevoir, réaliser, et mettre en œuvre les moyens nécessaires à l'exécution de ces recherches et d'en favoriser la valorisation par l'industrie. Ces missions seront quinze ans plus tard élargies à la dissuasion et au spatial, en lien étroit avec la DMA (devenue DGA) et le CNES créés par le général de Gaulle. En 2016, l'ONERA a fêté ses 70 ans et a signé un nouveau contrat d'objectifs et de performances avec l'État s'appuyant sur un nouveau plan stratégique scientifique. Ces documents confirment nos missions et notre stratégie.

Des pépites "ONERA inside"

TOUS les grands programmes civils et militaires (aviation de chasse et de transport et leurs équipements, missiles tactiques, missiles de la force de dissuasion, hélicoptères, drones, lanceurs, satellites, surveillance de l'espace...) qui ont donné à notre industrie, et à travers elle à la France et à l'Europe, sa force technologique et économique actuelle, comportent une très forte dose d'« ONERA inside ».

La première édition des pépites a permis à ses lecteurs de découvrir quelques fruits de l'excellence de nos équipes. Aussi, devant le succès rencontré, et face à la frustration d'avoir dû écarter de très belles réalisations, nous avons décidé d'ajouter dans cette deuxième édition, quelques pépites supplémentaires qui ont fait, font et feront la fierté de nos chercheurs.

Sans recherche, plus de programmes

Les recherches menées par l'ONERA ont contribué à façonner notre industrie aéronautique et spatiale, civile et militaire, et à ses succès passés et présents. La mission confiée par l'État a donc été bien remplie, et nous comptons poursuivre pour 70 nouvelles années d'excellence.

Nos industriels rappellent souvent que les programmes s'inscrivent dans des cycles longs qui nécessitent de bien préparer, et donc de soutenir financièrement, également dans la durée, les technologies nécessaires. Ils rappellent, à juste titre, que « sans technologies il n'y aura plus de programmes », précisant parfois que c'est une question de distance et de vitesse de la lumière. Je suis parfaitement d'accord avec cette affirmation, qu'il faut toutefois compléter par « sans recherche pas de technologies ». Il est donc fondamental de soutenir également celle-ci.

Je vous invite à venir découvrir ou redécouvrir la source de cette lumière, qu'elle soit passée, présente, et souhaitons-le à venir, des succès et de l'excellence de notre secteur.



Bruno Sainjon
Président-directeur général
de l'ONERA

- 6 Les grandes souffleries, berceau de l'aéronautique française**
- 8 Le silence rêvé des hélicoptères**
- 10 La réduction du bruit : l'autre enjeu environnemental**
- 12 La saga des statoréacteurs (et des superstats)**
- 14 Systèmes de défense : de la simulation avant l'action**
- 16 Le temps de la dissuasion n'est pas dépassé**
- 18 Des radars pour détecter au-delà de l'horizon**
- 20 La veille spatiale française ne s'endort jamais**
- 22 La furtivité en toute discrétion**
- 24 Elsa fait toute l'aérodynamique**
- 26 La guerre à la traînée n'est jamais terminée**
- 28 Turbulence et transition, les délicatesses de l'aérodynamique**
- 30 Voir dans l'eau pour comprendre dans l'air**
- 32 La CFD nouvelle alliée des essais en soufflerie**
- 34 Cedre n'oublie aucune physique**
- 36 Aux bancs de combustion, on traque les polluants**
- 38 L'art pariétal des souffleries**
- 40 Champions de la mesure non intrusive**
- 42 Les carburants alternatifs sont-ils aéro-compatibles ?**
- 44 Le flottement : mieux vaut prévenir que guérir**
- 46 Zset-Zebulon, crack de la mécanique des matériaux**
- 48 Superalliages superstars**
- 50 Les composites, une des clés du transport aérien durable**
- 52 Matériaux extrêmes pour applications bien ciblées**

| | |
|------------|--|
| 54 | Crash, chocs, feu : objectif survivabilité |
| 56 | Bien connaître la foudre, c'est prévenir des catastrophes |
| 58 | Agir contre le givrage |
| 60 | Des avions plus sûrs, plus fiables. Merci qui ? |
| 62 | Pod Reco-NG : une belle pépite sous le Rafale |
| 64 | Qui dit autonomie dit capacité de décision |
| 66 | Et l'humain dans tout ça ? |
| 68 | Expert ès drones et anti-drones |
| 70 | À l'ONERA, les drones naviguent à vue |
| 72 | Les systèmes de transport aérien du futur à l'épreuve |
| 74 | Ampere ou le pari de la propulsion électrique distribuée |
| 76 | Nouveaux enjeux, nouvelles conceptions |
| 78 | Les lidars se ressource pour de nouvelles applications |
| 80 | Caméras miniaturisées, visions augmentées |
| 82 | De l'air à la mer |
| 84 | Les atomes froids de l'ONERA n'ont pas le mal de mer |
| 86 | Une optique adaptative cinq étoiles |
| 88 | Nouvelles télédétections, nouvelles vues sur la Terre |
| 90 | Les experts de la bande Ka (prononcer K-A) |
| 92 | Lanceur réutilisable : du concept au démonstrateur |
| 94 | Préparer les satellites à une vie d'agressions |
| 96 | La propulsion spatiale passe au tout électrique |
| 98 | L'accélérométrie spatiale, un leadership mondial de l'ONERA |
| 101 | Principales abréviations utilisées |

Sommaire



Les grandes souffleries, berceau de l'aéronautique française

L'ONERA possède le plus grand parc européen de souffleries de grandes dimensions. S1MA, installée dans les Alpes, est la plus grande soufflerie sonique du monde : elle peut souffler un vent à presque Mach 1, soit la vitesse du son, ou encore près de 1200 km/h dans un conduit de 8 m de diamètre ! Tous les avions des gammes Airbus et Dassault Aviation sont passés par S1MA, notamment pour évaluer leurs performances en vol de croisière.

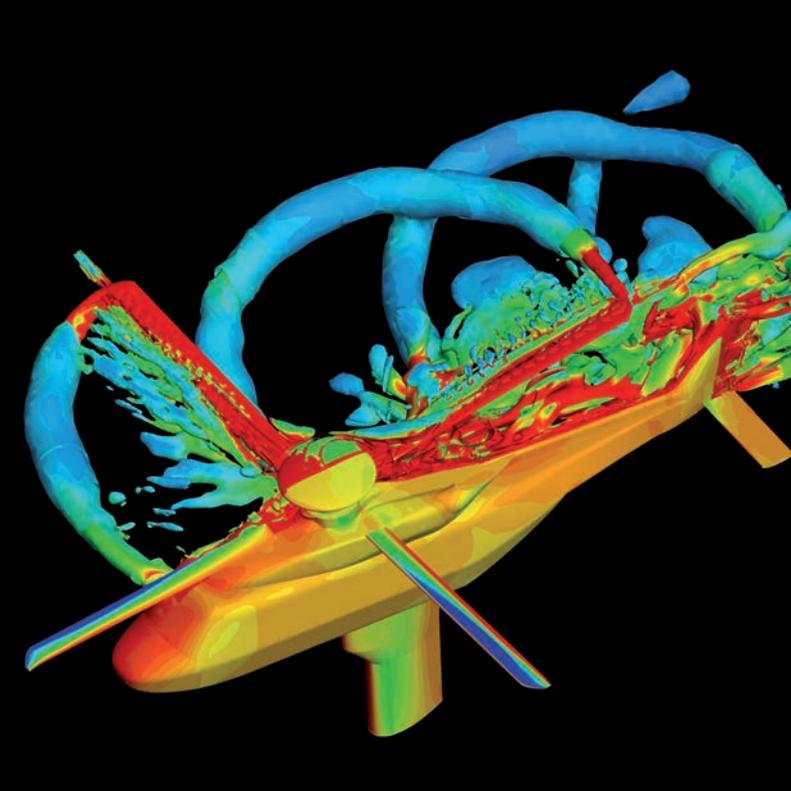
F1, sur la commune de Mauzac près de Toulouse, a été conçue pour simuler le vol au décollage et à l'atterrissage. S2MA et S4MA sont notamment utilisées pour la simulation d'appareils militaires et des lanceurs, avec des écoulements d'air pouvant aller respectivement jusqu'à Mach 3 et Mach 12. Ces moyens hors normes sont bien sûr équipés d'instruments de mesure et de visualisation.

La mesure des efforts, une affaire de balances

La mesure « reine » de la soufflerie est la mesure des efforts : 6 composantes qui sont la portance, la traînée (ou résistance à l'avancement) capitale pour évaluer la performance en vol de croisière, la force latérale et trois moments (roulis, tangage, lacet) qui tendent à faire pivoter l'avion.

Ces mesures sont effectuées simultanément par les balances, instruments qui mesurent les efforts par déformation de jauges (extensométrie). L'ONERA en maîtrise conception, fabrication, étalonnage et elles sont parmi les plus performantes du monde. Ces balances participent pour une large part à l'excellence de la précision de mesure des essais réalisés dans les souffleries de l'ONERA.





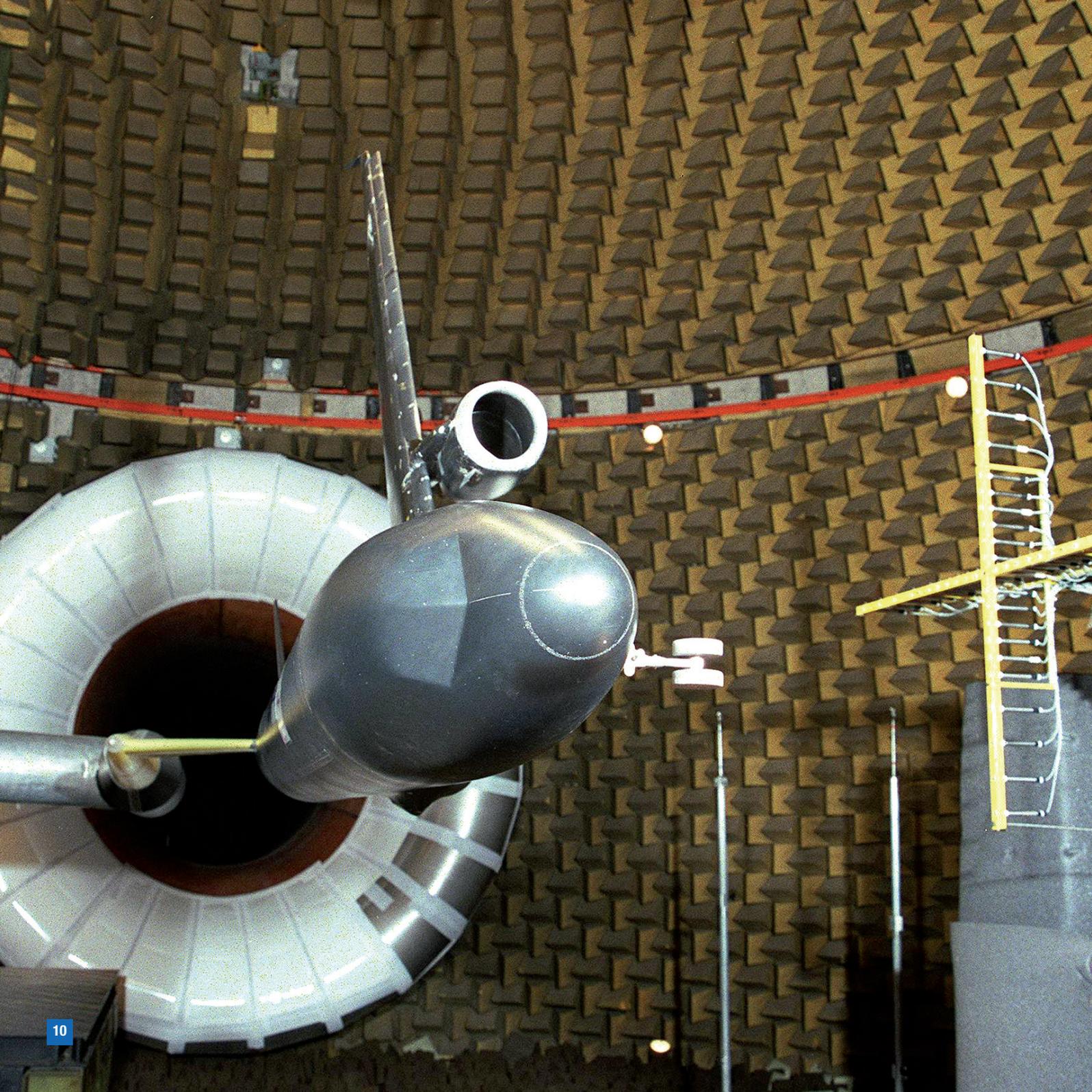
Le silence rêvé des hélicoptères

Gazelle, Écureuil, Dauphin, Super-Puma, Tigre, NH90 : tous les rotors d'hélicoptères de la lignée Aérospatiale, Eurocopter, Airbus et NHIndustries ont des pales dont les profils ont été définis par les aérodynamiciens de l'ONERA. Les extrémités paraboliques et les fameux profils "OA" ont permis au Dauphin de battre en 1991 un record du monde de vitesse à 371 km/h. Depuis 1992, l'ONERA s'est engagé dans la chasse au bruit avec son partenaire homologue allemand le DLR, en développant modèles numériques et mesures en souffleries pour une forme radicalement nouvelle, Erato. Résultat : la sortie en 2015 du H160, l'appareil d'Airbus Helicopters au bruit réduit de moitié avec des performances aérodynamiques encore supérieures aux modèles précédents. Le défi de l'hélicoptère (presque) silencieux est relevé !

Révolution silencieuse chez Airbus Helicopters

1994 La DGA notifie à l'ONERA le contrat Erato dans l'objectif de mettre au point une pale d'hélicoptère acoustiquement optimisée, sans dégradation de performances. **1996** L'ONERA, grâce à la maturité de ses modèles numériques, définit une pale révolutionnaire dépassant le cahier des charges. Les essais en soufflerie ONERA et DLR confirment les excellentes performances. **2001** Après de longues discussions pour convaincre Eurocopter, un contrat avec l'industriel est passé, puis un brevet commun est déposé. **2008** Les essais en vol montrent de très bonnes performances aéroacoustiques. **2010** Airbus dévoile officiellement la pale Blue Edge®, fruit de la collaboration Industrie-ONERA-DLR. **2015** Airbus Helicopters dévoile son nouveau modèle révolutionnaire quasi-silencieux H160.





La réduction du bruit : l'autre enjeu environnemental

La lutte contre le bruit des avions est née avec l'essor du transport aérien civil dans les années 60. Les progrès en motorisation se sont traduits par une division par 4 du bruit perçu en une cinquantaine d'années.

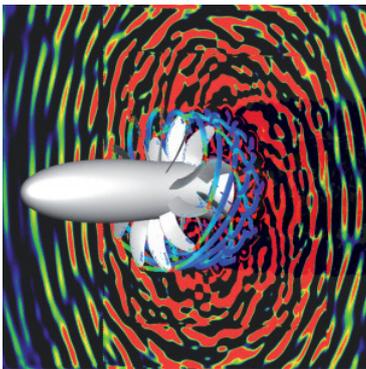
L'ONERA accompagne depuis des décennies motoristes et avionneurs en étudiant la production et la propagation des bruits aéronautiques, afin de les réduire ou d'en modifier la perception. Cette guerre contre le bruit se déroule sur plusieurs fronts : moteurs (jet, soufflantes, combustion), structures (trains d'atterrissage, spoilers, becs et volets), gestion des trajectoires, et aussi perception par les riverains des aéroports eux-mêmes. Les grands logiciels de l'ONERA (Cedre, Elsa) simulent les sources sonores. Des logiciels spécifiques calculent la propagation. De nouveaux matériaux-structures sont élaborés. La simulation du trafic est prise en compte grâce à la plateforme lesta.

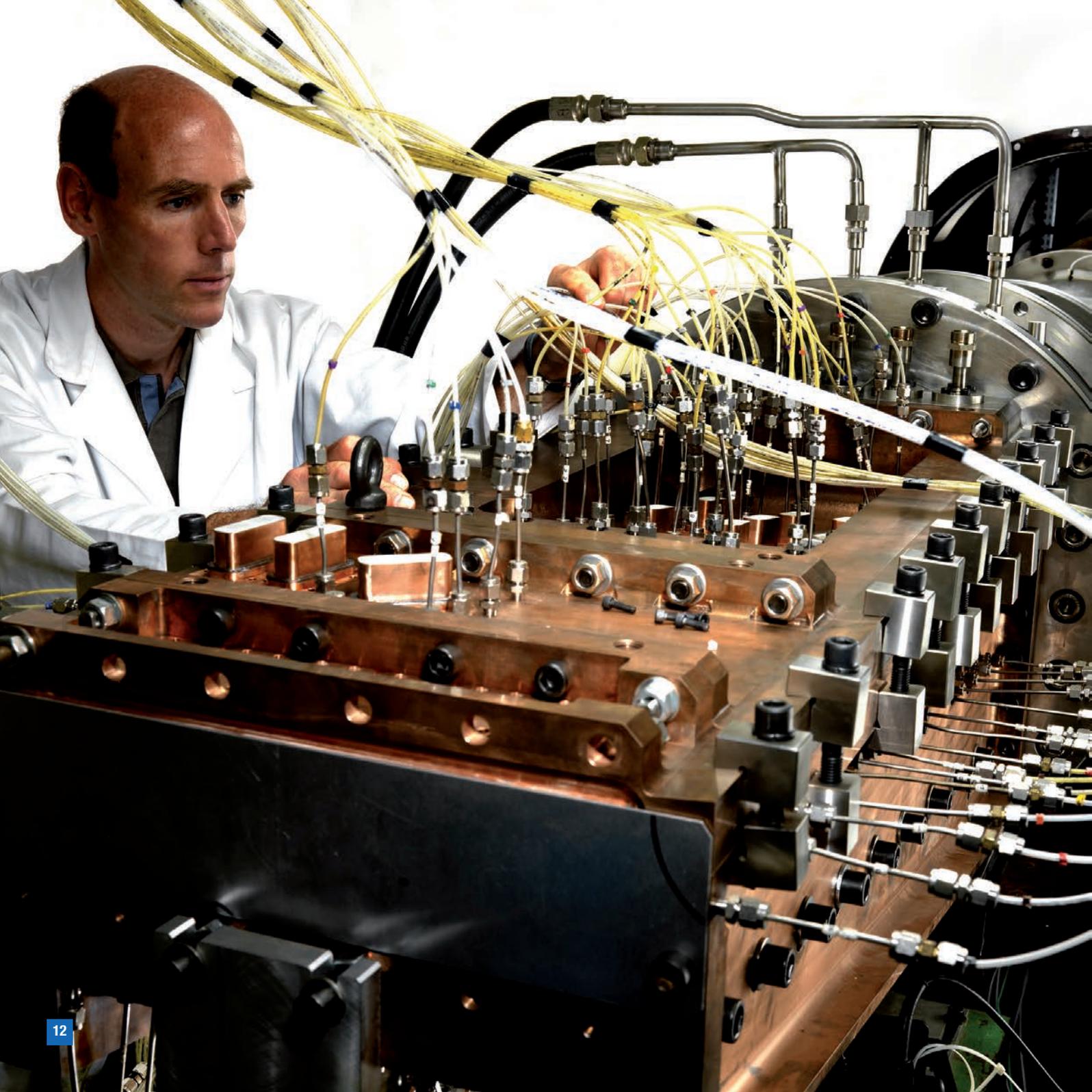
La soufflerie « anéchoïque » Cepra19 est un lieu de vérification expérimentale des études sur le bruit à basse vitesse. Les grandes souffleries de l'ONERA comme S1MA à Modane s'équipent pour intégrer cet aspect de la performance aéronautique.

Iroqua : tous ensemble contre le bruit

En Europe, le conseil consultatif pour la recherche aéronautique ACARE a fixé dès 2001 des objectifs environnementaux ambitieux. Pour fédérer en France les efforts concernant le bruit des aéronefs, le réseau Iroqua s'est constitué. Il est piloté par l'ONERA et comprend Airbus, Dassault Aviation, Safran, le CNRS, Air France et Aéroports de Paris, ainsi que des dizaines de PME et des laboratoires de recherche.

Iroqua, en liaison avec le CORAC français (Conseil pour la recherche aéronautique civile) est devenu le cercle d'expertise de référence sur l'impact du bruit des avions.





La saga des statoréacteurs (et des superstatos)

Le statoréacteur est un moteur simple dans son principe : il ne comporte pas de pièce mobile comme un turboréacteur, mais il ne fonctionne qu'aux vitesses largement supersoniques. Il permet d'aller très vite et assez loin car il est relativement léger. Il ne fonctionne en effet qu'avec du kérosène et l'oxygène de l'air, une fois accéléré au démarrage généralement par un moteur à poudre.

Il y a 40 ans, la technologie du statoréacteur, déjà très bien connue à l'ONERA, était retenue pour propulser l'ASMP, premier missile stratégique aéroporté (Mach 2 à 3, portée jusqu'à 300 km). Ce vecteur a été remplacé récemment par une version modernisée, l'ASMPA, pour lequel l'ONERA est resté co-traitant de l'industriel MBDA.

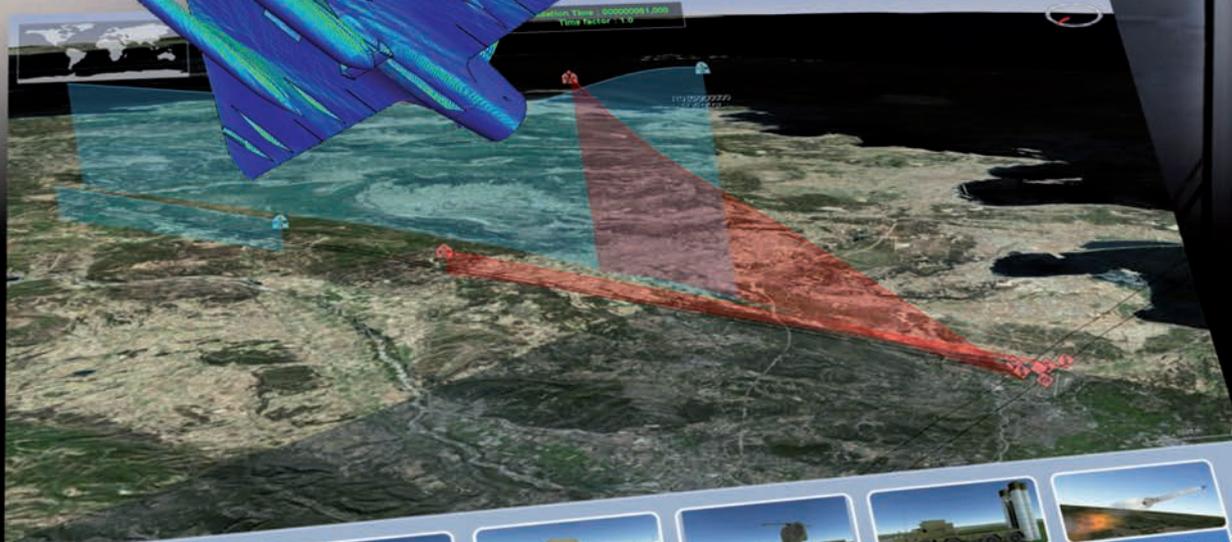
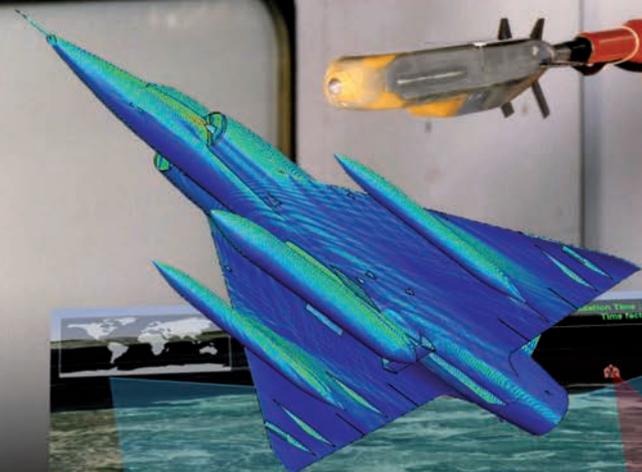
Aujourd'hui, l'ONERA, avec les industriels, prépare l'avenir avec des bancs d'essais simulant au sol la propulsion d'engins jusqu'à Mach 10 à 12, et bien sûr, des simulations numériques toujours plus prédictives. A ces vitesses, on ne parle plus de statoréacteurs mais de superstatoréacteurs.

L'accroche-flammes, clé du succès de l'ASMP

La chambre de combustion d'un statoréacteur évoque un tuyau où l'air passe à grande vitesse, et où brûle le carburant. La conception classique conduit à disposer dans la chambre des accroche-flammes qui entretiennent la combustion sans extinction. Mais la présence des accroche-flammes impose de placer l'accélérateur à poudre à l'extérieur de l'engin, le prolongeant de manière réhibitoire (près de 10 m en tout) pour être porté par un avion chasseur.

Un coup de génie des ingénieurs de l'ONERA a été de concevoir des entrées d'air latérales permettant de placer les injecteurs à la paroi, avec la même efficacité, sans accroche-flammes. Du coup, l'indispensable accélérateur a pu être intégré dans la chambre, et la longueur du missile pratiquement divisée par deux. L'emport sous avion – Super-Étendard, Mirage IV, Mirage 2000 puis Rafale – devenait possible.





Missile assaillant



Commandement



Radar de Pistage



Radar de Veille



Lance missiles



Intercepteur



Systemes de defense : de la simulation avant l'action

La simulation « physique », tant numérique qu'expérimentale, est indispensable pour imaginer et évaluer les concepts et matériels futurs dans un environnement représentatif de situations opérationnelles. L'ONERA capitalise sur une connaissance approfondie de la physique des phénomènes, des technologies et des processus, développée dans les différentes branches métier de l'ONERA : matériaux et structures, physique, mécanique des fluides et énergétique, traitement de l'information et systèmes.

Par ailleurs, les études et recherches sur l'efficacité des moyens de défense face à un adversaire, la défense anti-missile, la surveillance du champ de bataille, ou les systèmes de drones ont besoin d'une simulation complète et réaliste des acteurs et de leur environnement. Ce type de simulation « système » est par nature interdisciplinaire et plus proche des besoins opérationnels des armées.

Blade, le "battle lab" de l'ONERA

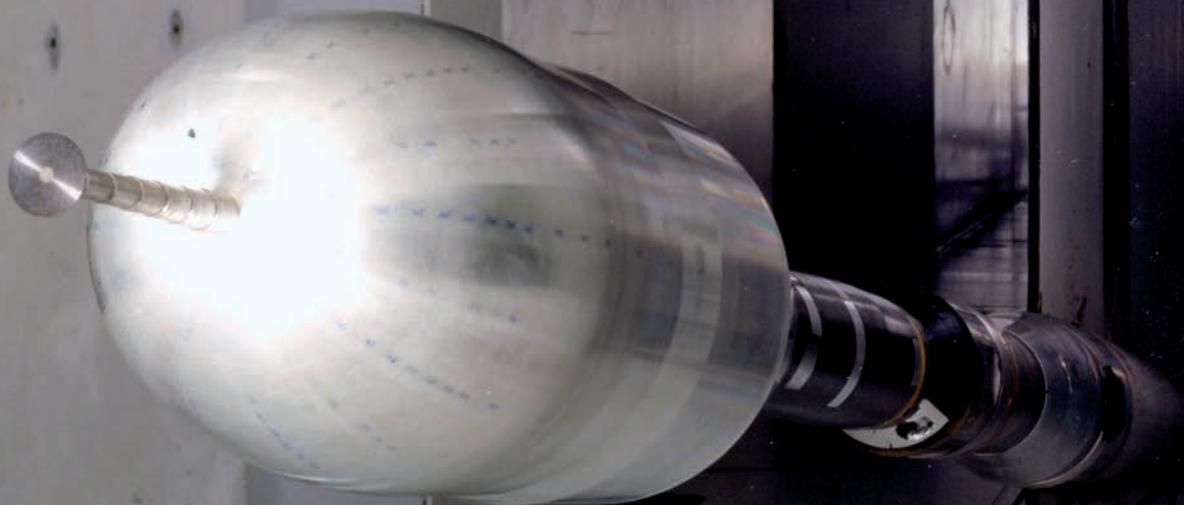
L'ONERA développe l'outil de simulation Blade, qui permet d'évaluer en situation les performances de systèmes, d'architectures, d'organisation et de concepts d'emploi. Blade permet d'intégrer des modèles ONERA concernant des capteurs, des systèmes d'armes, des aéronefs, des satellites... et aussi du traitement de l'information et de la communication. La structure informatique permet le contrôle de la simulation et la visualisation 3D.

Cet outil, complètement maîtrisé, est ouvert et parfaitement interopérable au travers d'un réseau sécurisé : systèmes opérationnels des trois armées, OTAN, laboratoire technico-opérationnel de la DGA, autres battlelabs des industriels. Des applications ont déjà été mises en œuvre : pénétration de systèmes de défense par des missiles, tenue de situation tactique sur le champ de bataille.



ONERA

S2 Modane



“Le temps de la dissuasion n'est pas dépassé”

(François Hollande, discours sur la dissuasion nucléaire, Istres, 19 février 2015)

La force de dissuasion nucléaire de la France a deux composantes : l'océanique, avec des missiles balistiques intercontinentaux M51 lancés depuis des sous-marins, et l'aéroportée, avec des missiles ASMPA de croisière supersoniques à moyenne portée, largables depuis un Mirage 2000 ou un Rafale.

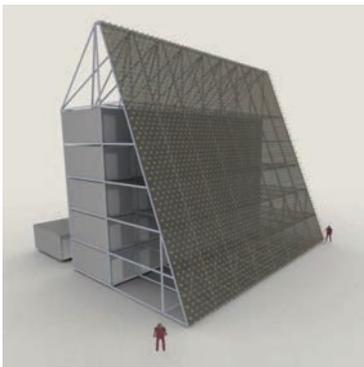
S'agissant des missiles balistiques (M4, M51 et suivants), l'ONERA apporte son expertise à la DGA, en matière d'augmentation des performances, de propulsion « solide », de guidage-pilotage et de pénétration stratégique. Pour les missiles aéroportés (ASMP et suivants), l'ONERA contribue en co-traitance avec l'industriel MBDA, notamment sur l'aéro-propulsion par statoréacteur mais aussi sur l'aérodynamique, la furtivité, les matériaux, la navigation inertielle et la pénétration des défenses adverses.

DAMB - défense anti-missile balistique

La DAMB ou défense anti-missile balistique est une réponse à la prolifération de missiles d'une portée de plusieurs milliers de kilomètres. Elle s'appuie sur trois piliers : le dispositif d'alerte (drones, satellites, radars), le système de commandement et de contrôle et les moyens d'interception-neutralisation.

L'ONERA apporte son expertise à la DGA pour évaluer, analyser la menace, mais aussi pour réagir à toute question sur le positionnement de la France dans ce domaine (notamment au sein de l'OTAN). Un « battle lab » numérique ONERA fait partie des moyens de mise en œuvre de cette expertise.

L'ONERA est impliqué sur l'alerte avancée, avec les développements de capteurs infrarouges embarquables et d'un radar de très longue portée déployable, le TLP (avec Thales et la DGA).





Des radars pour détecter au-delà de l'horizon

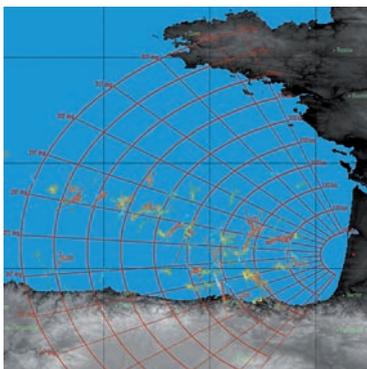
Le Nostradamus de l'ONERA voit loin. Ce démonstrateur radar est en effet capable de visualiser depuis le centre de la France tout l'espace aérien au-dessus de la Méditerranée. Peu de pays explorent la voie OTH – *Over The Horizon*, parmi lesquels l'Australie, les États-Unis et la Russie.

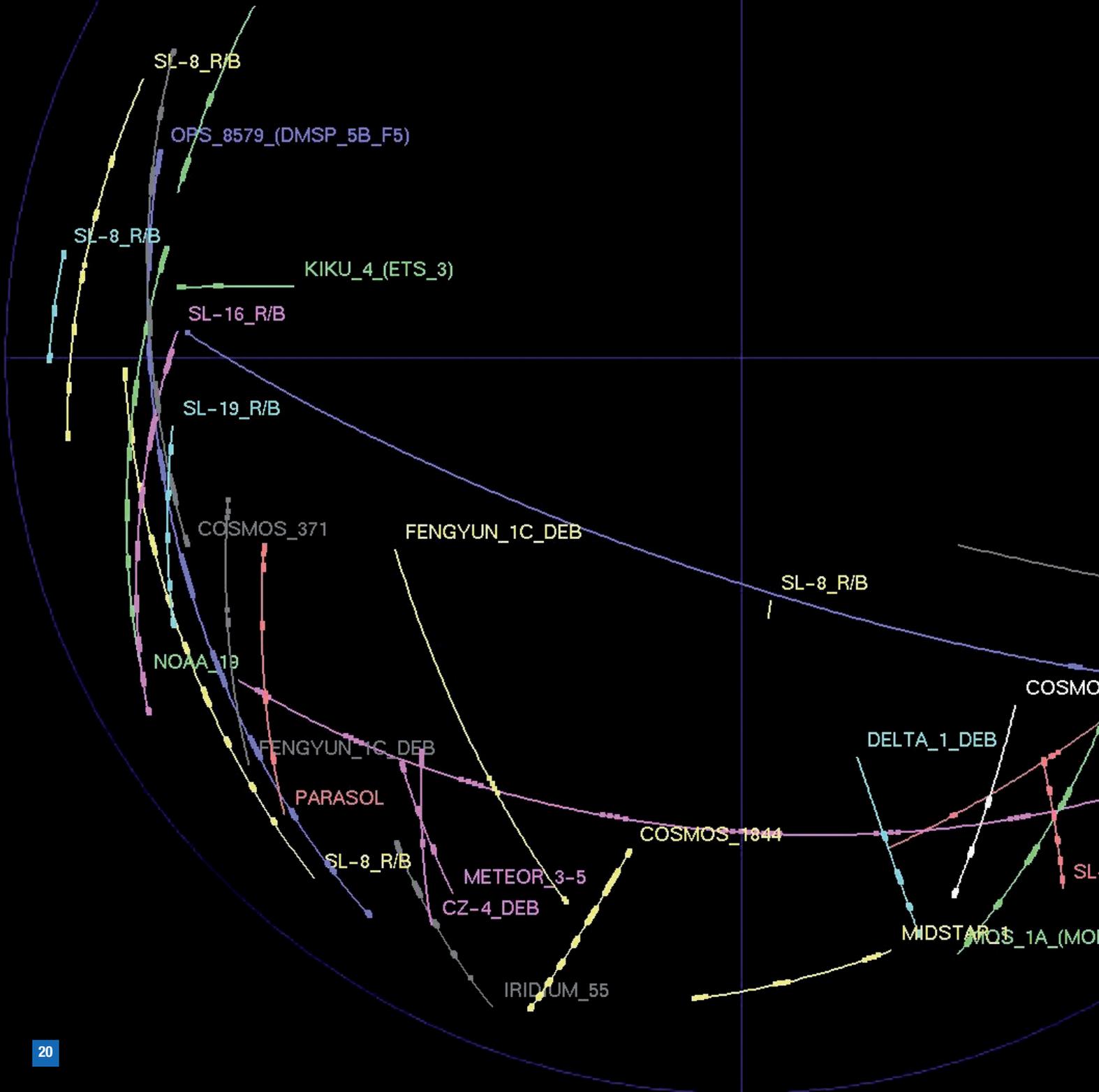
Nostradamus utilise de puissantes antennes grandes ondes pour émettre des trains d'ondes qui se réfléchissent sur l'ionosphère (haute couche atmosphérique où circulent des particules chargées) pour scruter les zones visées. Les signaux de retour sont reçus par les antennes de la plateforme Nostradamus située près de Dreux, et traités en temps réel. Une amélioration de performances est d'ores et déjà en cours de réalisation.

Les ROS - radars à onde de surface, ont un usage maritime

Ces radars émettent des ondes qui ont la propriété de se propager à la surface de la mer, bien au-delà de l'horizon. La technologie ROS, transférée à Thales, permet de surveiller les zones économiques exclusives (ZEE, jusqu'à 370 km des côtes). On peut alors suivre trajectoire et vitesse des navires et détecter les comportements anormaux. Une deuxième génération ROS permet de détecter de petites embarcations à moins de 200 km. Une innovation dont profitera le programme national Spationav, destiné à rénover le système côtier de surveillance et de sécurité.

Le savoir-faire, pour ces applications radar, se trouve dans les algorithmes numériques de traitement du signal. Ils puisent leur puissance dans ce qui caractérise l'ONERA : une connaissance approfondie de la physique et de l'environnement.





La veille spatiale française ne s'endort jamais

Pourquoi surveiller l'espace ? Parce que tous les jours, des milliers de satellites ou objets de plus de 10 centimètres orbitent autour de la Terre. Parmi eux, des satellites espions et des débris qui font peser des risques de collisions. Avant les années 90, seuls les Américains et les Russes disposaient d'un système de veille spatiale. La France, grâce à l'ONERA, a rejoint ce club très fermé depuis 2002.

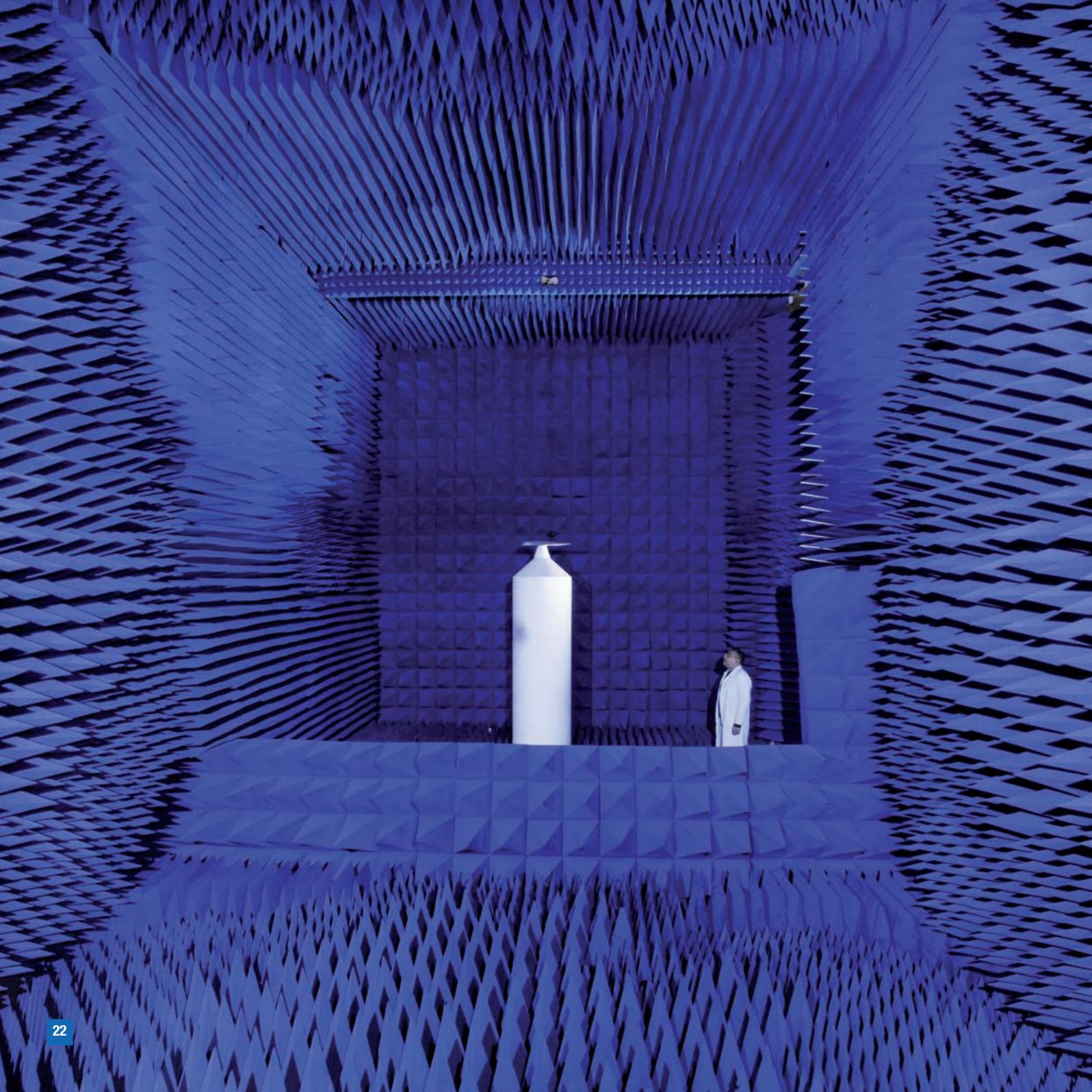
Développé sous contrat du Ministère de la Défense, le système Graves (Grand réseau adapté à la veille spatiale), composé d'un radar dédié et d'un traitement automatisé, assure en toute autonomie la création et la mise à jour d'une base de données de trajectoires d'objets observés. Grâce à sa multidisciplinarité – radars, environnement spatial, modélisation et analyse orbitales – l'ONERA a conçu de A à Z un système qui détecte mais aussi reconnaît et identifie les objets. Une contribution décisive à la souveraineté de la France. Depuis 2005, Graves, opéré par l'Armée de l'Air, observe et catalogue des milliers d'objets. Réactif, le système détecte tout changement de situation en moins de 24h.

Un moyen économique qui fait de grandes choses

Comparé aux systèmes américains dont le budget se compte en milliards de dollars, le système français Graves n'a coûté « que » 35 millions d'euros et il voit la plupart des satellites d'intérêt. En plus d'une conception économique, c'est le prototype de démonstration ONERA qui a été transformé à peu de frais en système opérationnel pour la Défense ! En outre, Graves peut se targuer d'être respectueux de son environnement radioélectrique puisque son fonctionnement par fréquence unique n'engendre quasiment pas de pollution des ondes.

La performance du système Graves, son coût optimal et sa discrétion ont conquis les états-majors : l'ONERA est mandaté pour pérenniser le système Graves et le mettre à niveau pour répondre aux nouveaux besoins de la Défense.





La furtivité en toute discrétion

La furtivité, c'est-à-dire le fait d'être invisible ou peu identifiable aux radars, est une qualité très recherchée des aéronefs militaires.

L'ONERA a commencé en 1975 des études en vraie grandeur sur des missiles (missiles de croisière, ASMP...). Plus tard, l'ONERA se dotait de deux chambres anéchoïques, Camera et Babi, destinées à caractériser les échos radar dans le but de réduire les signatures des aéronefs. Les bases de données qui y sont produites fournissent un socle fiable pour la validation des logiciels de simulation « maison ».

Ces installations ont vu se succéder des missiles comme l'ASMP ou l'Apache-Storm Shadow, des hélicoptères (Gazelle, Tigre), des avions (Rafale) et des drones. L'ONERA est aussi l'expert de la DGA sur ce thème et participe aux évaluations en vol des signatures radar des différents aéronefs, comme récemment le Neuron.

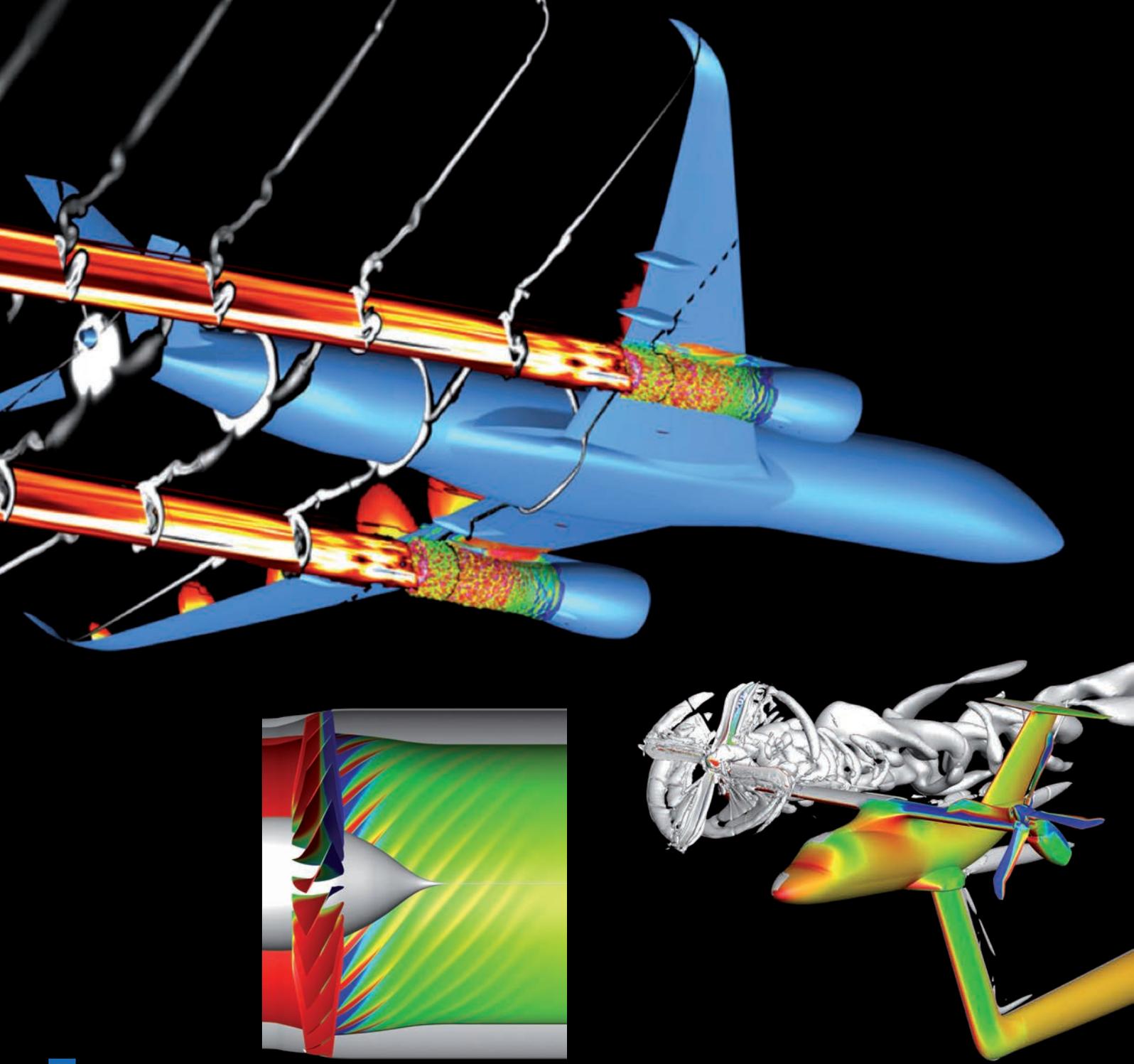
Éoliennes vs radars : les retombées civiles de la furtivité

Les parcs éoliens fleurissent sur le territoire national et il y en a bien davantage à l'étude. Selon leurs implantations, les nouvelles installations sont susceptibles de perturber les radars existants, qu'ils soient météorologiques, aéronautiques, civils ou militaires. Des permis de construire peuvent alors être refusés, sans réelle base objective. Et les tribunaux sont souvent sollicités !

Aussi la DGA a demandé à l'ONERA, son expert signature et furtivité, de développer le logiciel de simulation Dempere, permettant aux radaristes de trancher objectivement sur les implantations futures, selon la discrétion des éoliennes au radar.

L'ONERA met également son expertise au profit des constructeurs d'éoliennes en adaptant les pales pour les rendre « furtives ».







Elsa fait toute l'aérodynamique

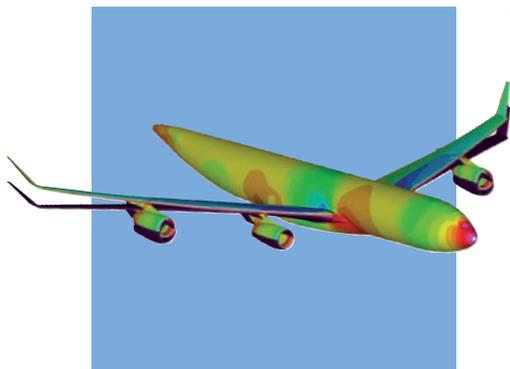
Elsa est la grande plateforme logicielle de mécanique des fluides non seulement de l'ONERA mais aussi de l'industrie aéronautique française. Un accord de coopération ONERA-Airbus-Safran a d'ailleurs été signé en 2015 afin de fournir le cadre le plus favorable au développement de ce logiciel stratégique.

Le secret de la puissance d'Elsa : l'intégration des méthodes numériques les plus adaptées, fruit des recherches de l'ONERA et de ses partenaires académiques. Elsa simule les écoulements relatifs aux configurations les plus variées aussi bien en aérodynamique externe qu'interne : avion complet, hélicoptère complet, hélices, turbines et compresseurs (carénés ou non), train d'atterrissage... Elsa simule aussi l'aéroélasticité et fournit les données d'entrée aux logiciels de propagation aéroacoustique. Cette capacité à modéliser les configurations les plus complexes s'appuie notamment sur la vérité expérimentale des très riches bases de données d'essais en soufflerie de l'ONERA, ainsi que sur l'écoute des industriels du secteur.

L'aéroélasticité, science de l'interaction fluide-structure

Les structures aéronautiques, toujours plus ou moins souples, vibrent, se déforment, quand elles sont soumises aux efforts aérodynamiques. Le logiciel Elsa offre la possibilité d'étendre le calcul aérodynamique à ces phénomènes au travers de simulations aéroélastiques « haute-fidélité », par couplage entre modèle aérodynamique et modèle de structure.

Les simulations aéroélastiques améliorent la prédiction de la performance aéronautique en tenant compte de la déformation en vol. Elles garantissent l'intégrité de la structure en vérifiant l'absence de phénomènes catastrophiques (flottement) et permettent de prédire le comportement dans certaines situations, comme une rafale de vent.





ONERA
St. Mandé

La guerre à la traînée n'est jamais terminée

En vol de croisière, la poussée des moteurs est exactement égale et opposée à la traînée, synthèse des forces aérodynamiques qui s'opposent à l'avancement. Aussi, toute action permettant d'en réduire une fraction se traduit par une moindre consommation de kérosène, ce qui est à la fois plus économique pour l'exploitant et plus respectueux de l'environnement.

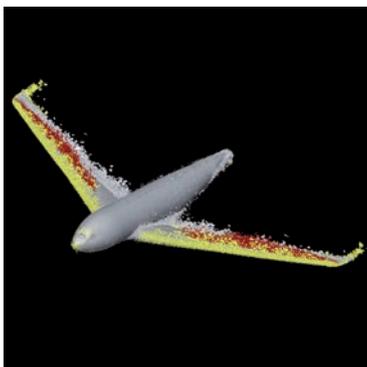
La réduction de la traînée a mobilisé des générations de chercheurs à l'ONERA. Des avions qui sont les plus sobres et performants au monde sont la meilleure récompense à leur réussite. Après des travaux sur la forme (allongement, winglets), puis sur l'état de surface (riblets, « peau de requin »), ceux menés aujourd'hui sur le contrôle d'écoulement (pour empêcher l'écoulement de devenir turbulent, pour le dévier, pour l'empêcher de se décoller de la paroi...) ouvrent les plus belles perspectives.

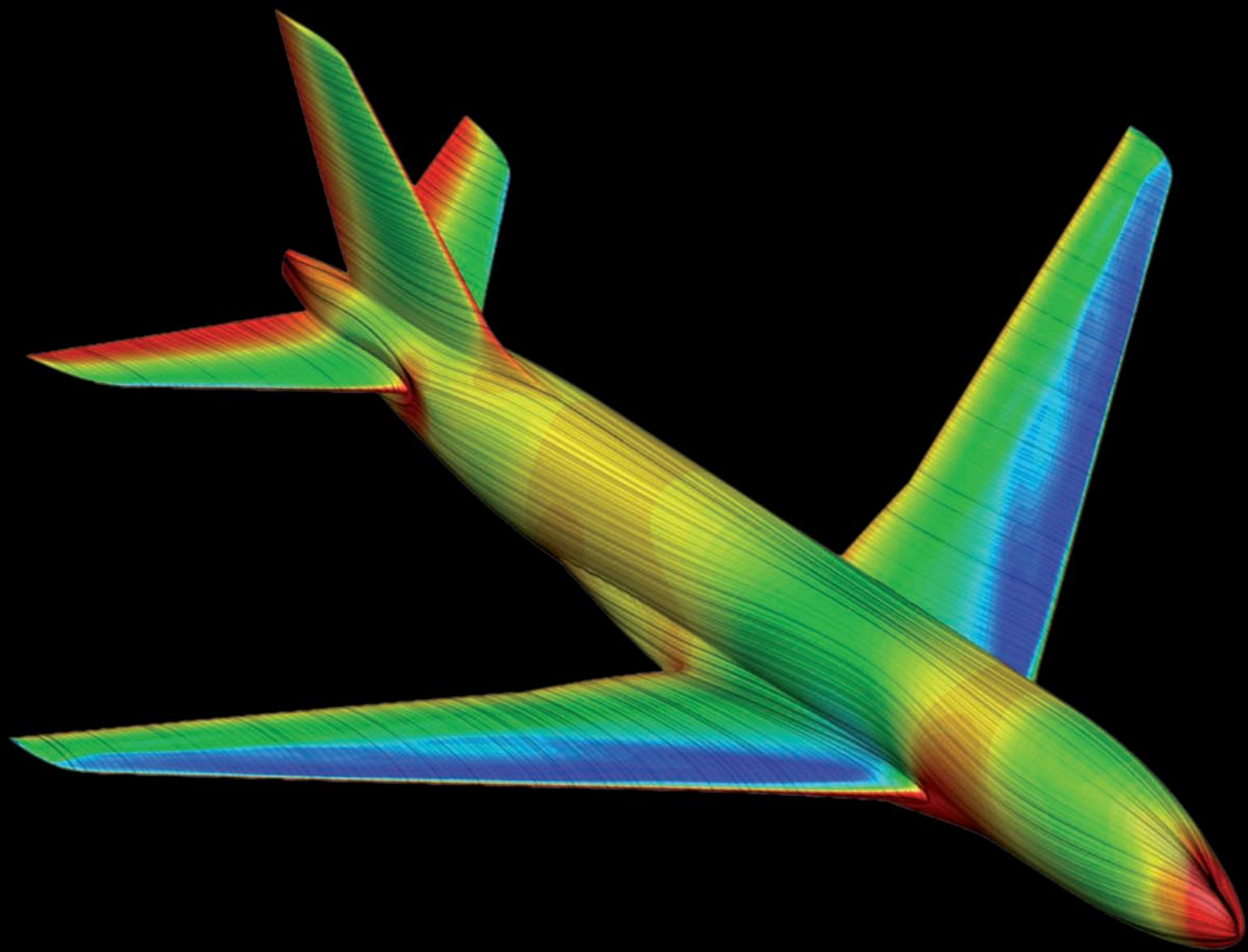
FFD ou l'extraction intelligente de la traînée

La traînée d'un aéronef résulte de plusieurs phénomènes créant de la résistance à l'avancement : effets de la forme de l'aile et de la répartition de portance (traînée induite), effets de viscosité (frottement, pression...), effets de compressibilité (pour les vitesses proches de la vitesse du son).

Le logiciel FFD (*Far Field Drag*) opère sur le champ d'écoulement autour d'un aéronef obtenu par une simulation numérique du type Elsa. Il calcule les différentes contributions de la traînée à partir des effets de l'aéronef sur le fluide. La décomposition obtenue a un réel sens physique et est très utile aux concepteurs de formes. Elle permet aussi d'identifier les sources locales de traînée.

La famille de logiciels FFD est couramment utilisée par les constructeurs Airbus et Dassault Aviation.





Turbulence et transition, les délicatesses de l'aérodynamique

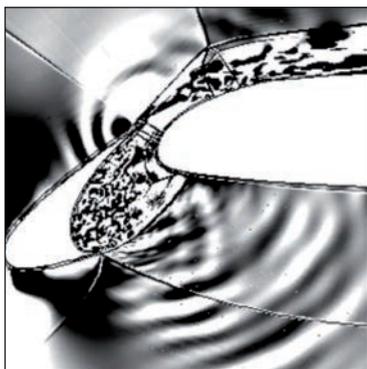
Il se forme, à la surface d'un aéronef en vol, une fine « couche limite », dans laquelle l'air est très ralenti. Son épaisseur va de quelques millimètres à quelques dizaines de centimètres. Au début de sa formation, cette couche est très calme, on la dit laminaire. Puis les filets d'air se mettent à osciller – c'est la transition, avant de devenir très perturbés et de se mélanger – c'est la turbulence. L'état de la couche limite doit être connu avec précision car il détermine les lois de frottement de l'air sur les surfaces. Ce frottement de paroi contribue à environ la moitié de la traînée des avions.

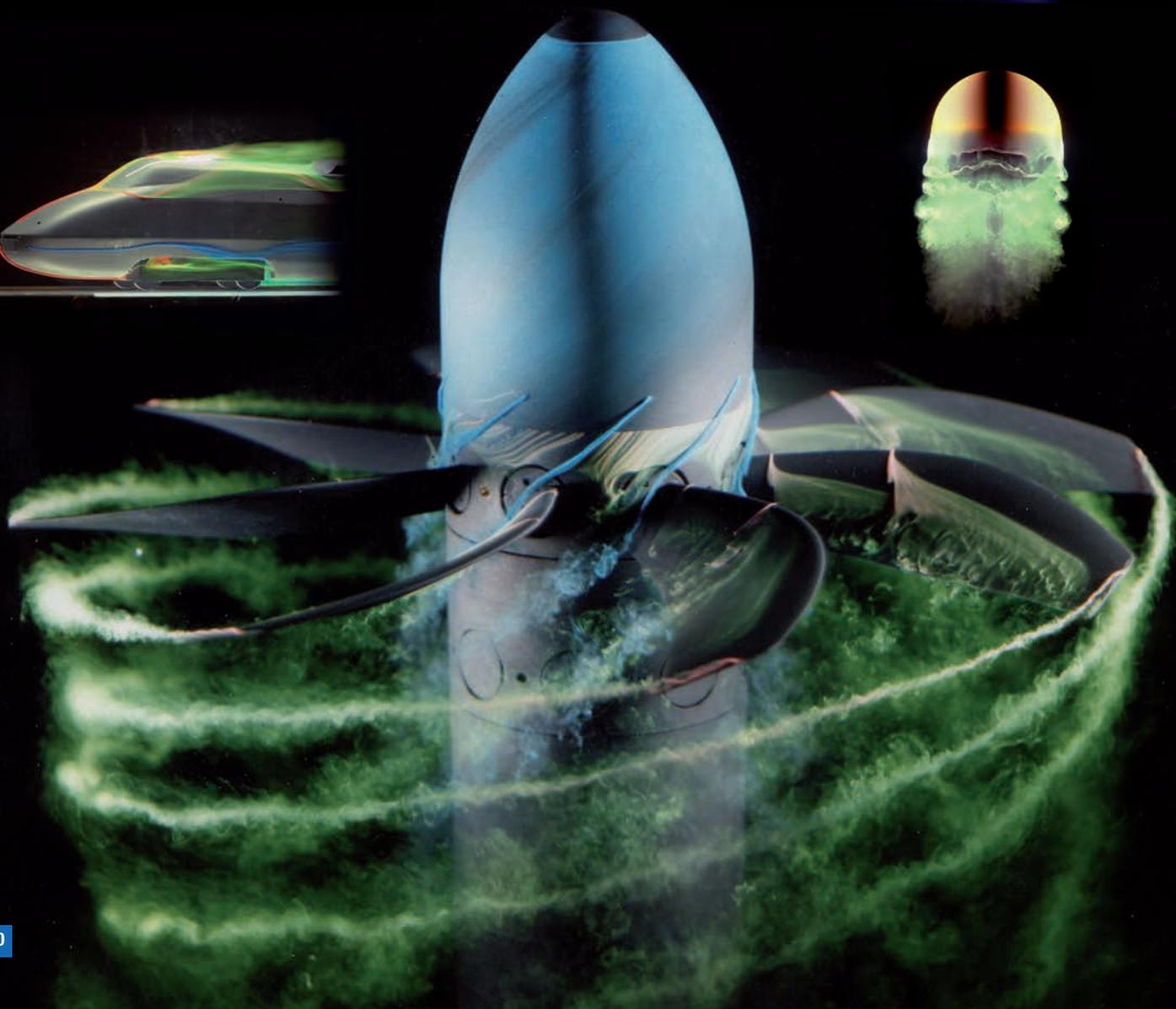
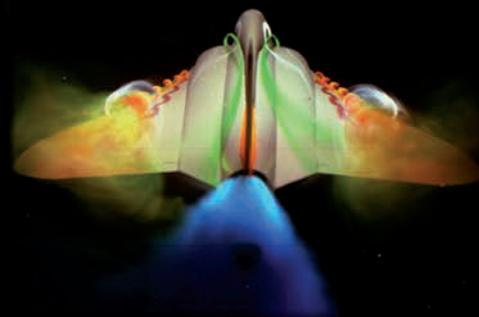
L'ONERA est reconnu mondialement pour ses développements théoriques permettant de prévoir transition et mélange turbulent dans la couche limite. Ces modèles sont intégrés dans les logiciels ONERA Elsa et Cedre, ce qui permet aux industriels de les utiliser pour caractériser l'écoulement autour de configurations complexes (avion complet...) en tenant compte de la physique « délicate » de la couche limite, sans pour autant calculer exactement les petites fluctuations temporelles de la turbulence (réhibitoire pour une configuration complète).

La ZDES : à chaque zone sa modélisation

La prévision des sources aéro-acoustiques responsables des nuisances sonores est un exemple où la connaissance précise du champ fluctuant dans un écoulement turbulent est nécessaire. Pour un aéronef complet un tel niveau de précision est réhibitoire en nombre de points et temps calcul.

Pour répondre à ce défi, l'ONERA a développé une méthode multi-résolution appelée ZDES (*Zonal Detached Eddy Simulation*). Cette méthode permet de faire cohabiter dans une même simulation une modélisation moyennée dans le temps peu coûteuse et une modélisation plus avancée pour résoudre les fluctuations turbulentes. Cela signifie que le modèle le plus performant n'est utilisé que là où il est vraiment nécessaire, permettant des temps de simulations compatibles avec les moyens informatiques actuels.





Voir dans l'eau pour comprendre dans l'air

Le responsable de la photothèque est formel : les demandes les plus récurrentes sont des demandes d'autorisation du monde entier pour reproduire dans des ouvrages de mécanique des fluides des visualisations des tunnels hydrodynamiques de l'ONERA. Une dissémination qui participe au renom international de l'ONERA, longtemps après l'arrêt de cette production d'images (années 80).

La visualisation s'effectuait à l'aide de traceurs liquides colorés, de bulles d'air ou d'hydrogène dans un tunnel de verre vertical, où l'eau s'écoulait uniformément. Dans ces conditions, les écoulements hydrodynamiques à basse vitesse reproduisaient bien les champs aérodynamiques, en particulier les décollements et les tourbillons, ce qui permettait de comprendre visuellement bon nombre d'aspects délicats de l'aérodynamique... et de dégrossir les concepts au stade des avant-projets.

Aujourd'hui, la simulation numérique et des méthodes de visualisation en soufflerie comme l'imagerie par images de particules PIV ont rendu désuet l'usage du tunnel hydrodynamique.

Les sous-marins et les souffleries de l'ONERA

Si l'expérience visuelle dans le tunnel hydrodynamique est plus explicite que dans l'air, il s'avère intéressant de mesurer en soufflerie les performances des sous-marins, d'y étudier leur comportement en manœuvre. Les maquettes de la plupart des sous-marins nucléaires d'attaque (SNA), dont le Barracuda, et des sous-marins nucléaires lanceurs d'engins (SNLE) sont ainsi passées par les installations de Meudon, Saclay et Lille.

Avec l'air, on peut générer un flux tout à fait représentatif d'un écoulement d'eau réaliste pour un sous-marin. La soufflerie a alors de sérieux avantages par rapport aux bassins de traction et tunnels hydrodynamiques du naval : on y bénéficie de l'instrumentation aérodynamique – prises de pression, laser et fumées, balance 6 composantes... sans problème d'étanchéité ; et surtout la caractérisation dynamique complète d'un sous-marin peut se faire en quelques jours... plutôt qu'en quelques mois.





La CFD nouvelle alliée des essais en soufflerie

Loin de sonner le glas des essais en soufflerie, la CFD, *Computational Fluid Dynamics* ou mécanique des fluides numérique leur donne une nouvelle dimension.

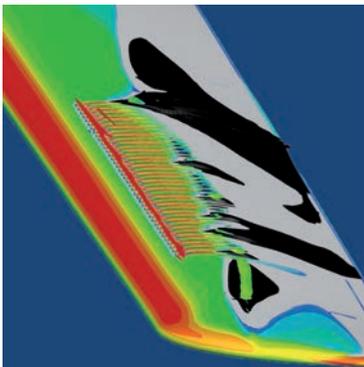
Le futur est en effet à l'utilisation conjointe de la CFD et des essais. Cette association permettra de vaincre le mur de difficultés auquel se heurte la théorie. Pour des calculs et essais effectués sur une même configuration, l'opération de « fusion assimilation » permet d'aider la théorie à améliorer – ou régler – ses modèles et à créer le chaînon manquant là où le calcul est incertain ou la modélisation trop simplifiée.

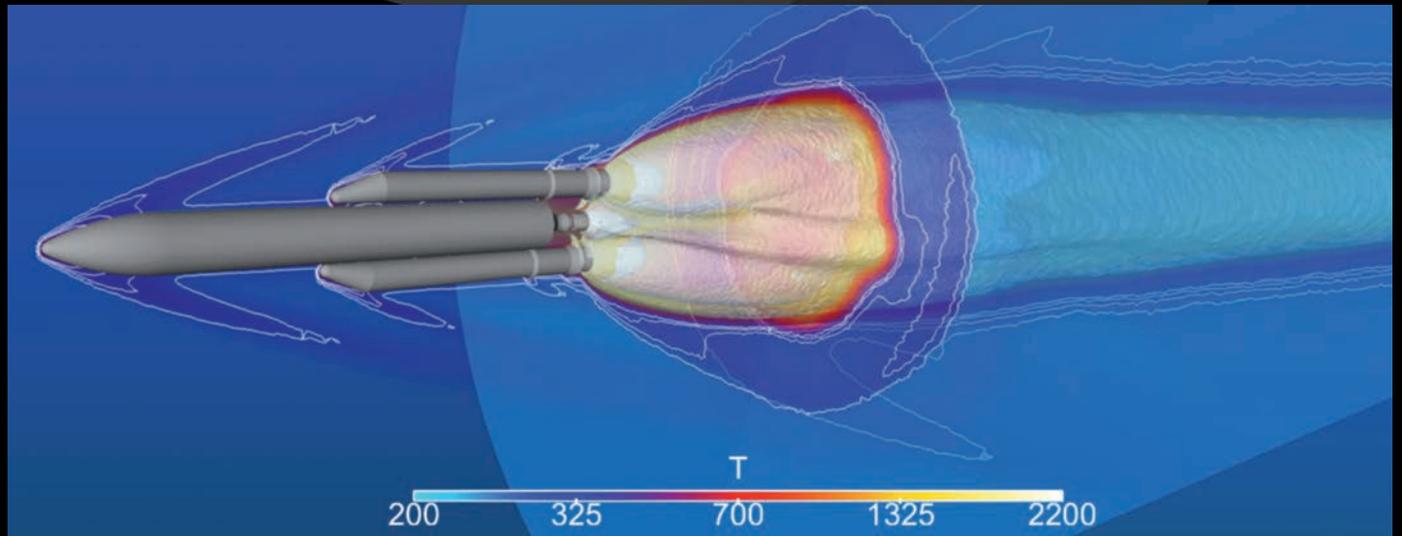
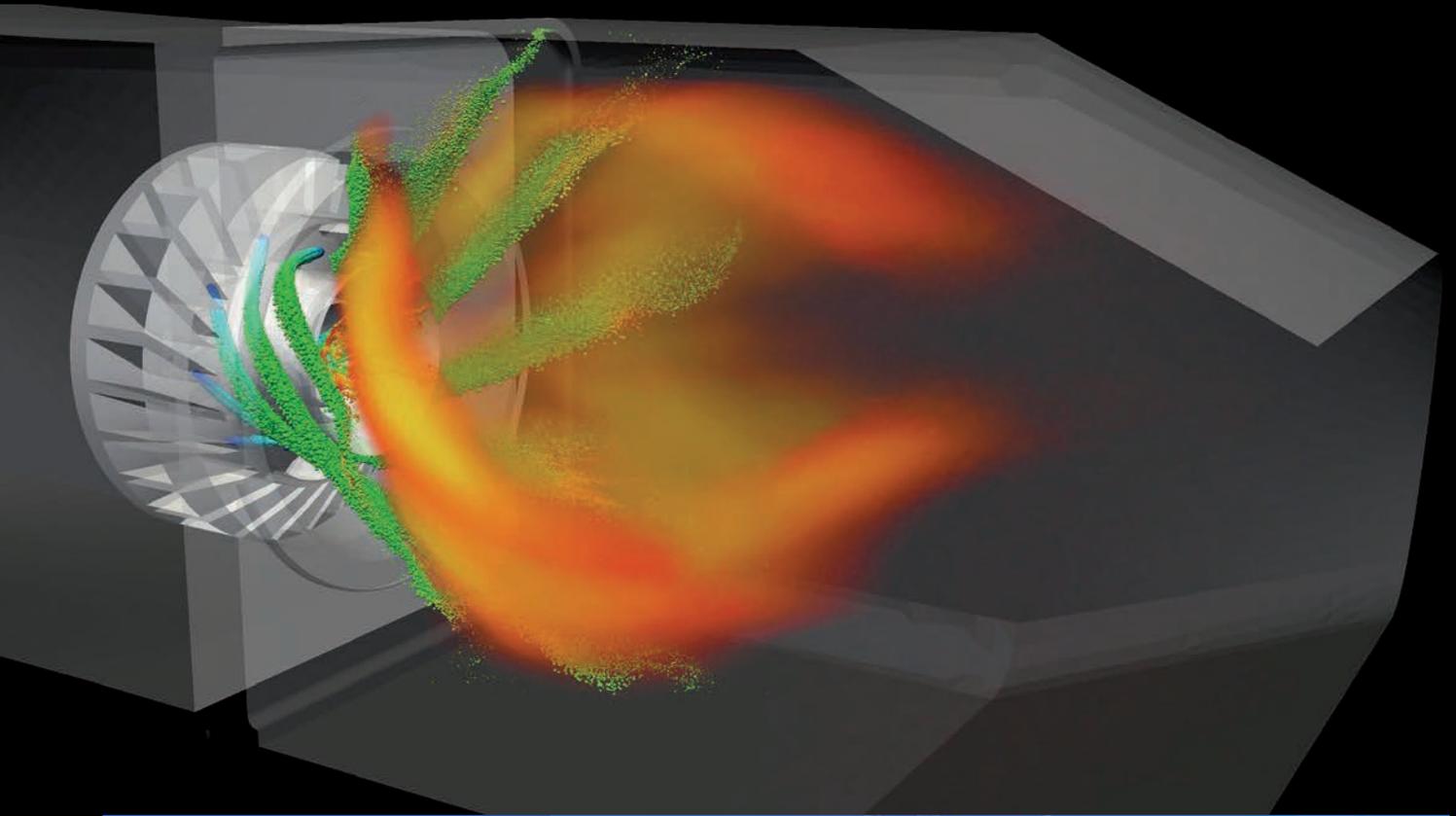
Inversement, la CFD aide les ingénieurs d'essais à fournir de meilleurs résultats. En effet, là où la soufflerie biaise les résultats par effets des parois et des supports (dard, mâts), les calculs de l'écoulement autour de la maquette installée en soufflerie, comparés à ceux de la maquette seule dans un environnement idéal, permettent d'améliorer la transposition des résultats de la soufflerie vers le vol.

Un environnement favorable au contrôle actif

L'ONERA est l'un des rares établissements de recherche au monde à avoir les compétences en aérodynamiques expérimentale et numérique d'un niveau aussi élevé et aussi rapprochées.

Cette proximité est un atout pour développer et mettre au point des innovations en matière de contrôle actif, un des grands principes prometteurs de l'aérodynamique dont l'objectif peut être par exemple de réduire la traînée ou contrôler les vibrations. Le contrôle actif repose sur des mesures faites par des capteurs, et des contrôles exercés sur l'écoulement par des actionneurs. La CFD est très utile pour simuler, optimiser, comprendre les phénomènes, et concevoir les dispositifs qui seront validés et mis au point dans la vérité de l'écoulement de la soufflerie.







Cedre n'oublie aucune physique

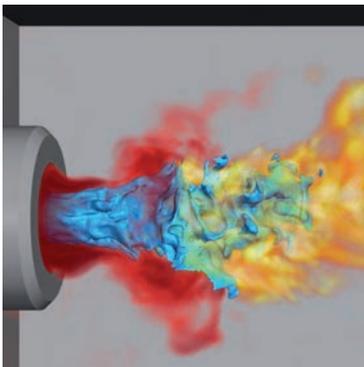
En 2002, DGA, CNES et ONERA décidaient d'instituer un logiciel national fédérateur de calcul apte à traiter l'ensemble des problèmes de l'énergétique et de la propulsion aérospatiale. Compte tenu de ses fonctionnalités et de ses potentialités la nouvelle chaîne de calcul de l'ONERA Cedre était retenue. Aujourd'hui, le développement de Cedre se poursuit grâce à des programmes ONERA et nationaux. Ses capacités multi-physiques en font un outil apprécié dans de nombreux projets de recherche et industriels aux niveaux national, européen, international. Le logiciel est distribué à Safran (Snecma, Herakles...), MBDA, CNES, Airbus Defence and Space...

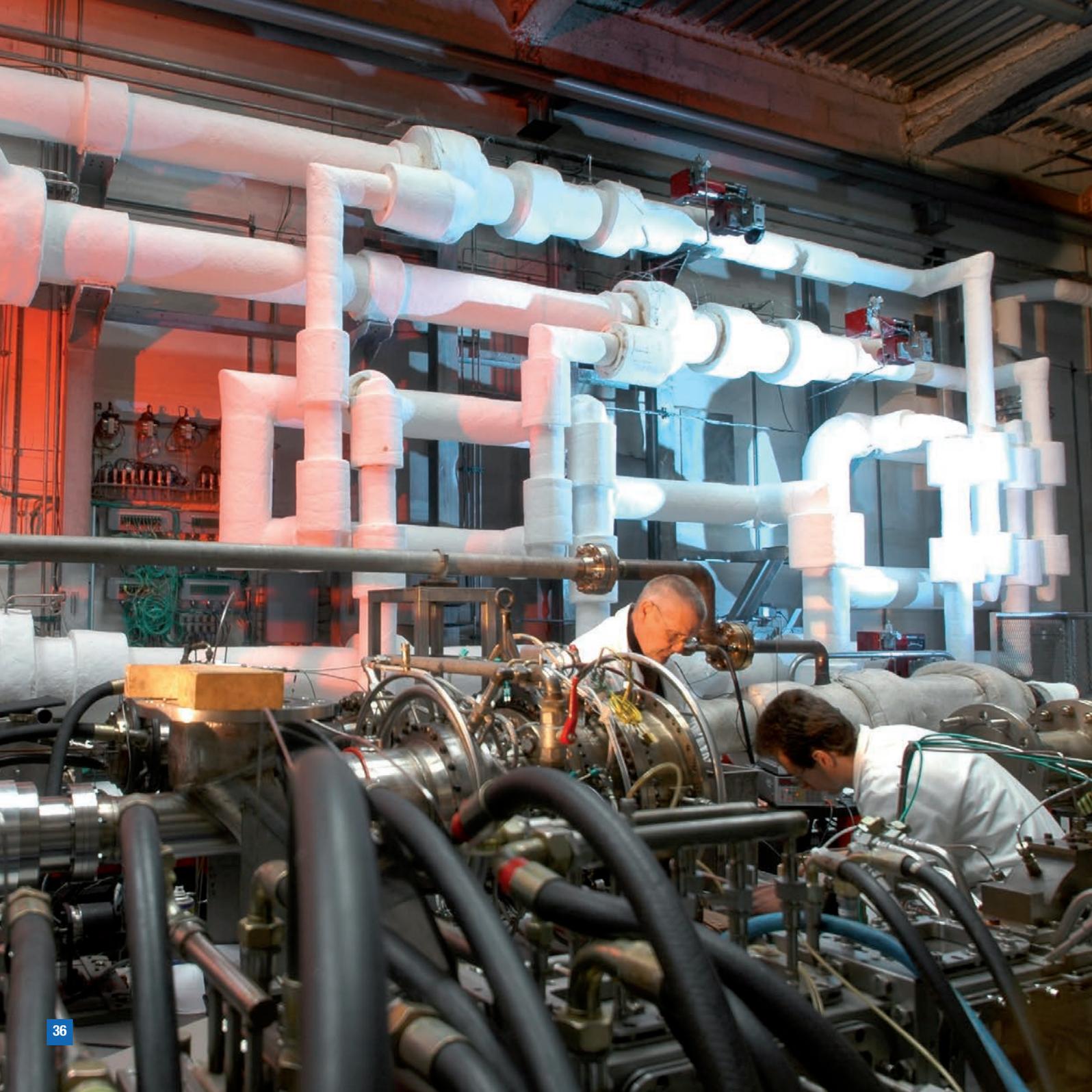
Cedre capitalise des décennies d'expertise en matière d'expériences et de modélisation multi-physique pour toutes sortes d'applications : missiles, statoréacteurs, lanceurs, avions civils ou militaires, sondes spatiales...

Multi-physique, kézako ?

L'énergétique est la science de l'énergie. Dans le processus de combustion (simplifié), l'énergie arrive sous forme chimique, concentrée dans le carburant (kérosène, ergols, propergol), pour être transformée en chaleur (énergie thermique) et enfin se transformer en poussée (énergie mécanique).

Les modèles de Cedre décrivent les physiques de la chimie, de la thermodynamique, de l'aérodynamique. Il faut aussi des modèles d'interactions : thermochimie, aérothermodynamique, liquide-gaz, transfert radiatif... Cedre, doté de « solveurs » spécialisés prend en compte toutes ces physiques et leurs interactions. Par ailleurs, Cedre peut être couplé à d'autres logiciels de physiques plus éloignées : mécanique du solide, acoustique... La réalité est par nature multi-physique...





Aux bancs de combustion, on traque les polluants

Les bancs de l'ONERA ne sont pas destinés à tester les moteurs avant leur premier vol ! Ce sont des moyens où l'on teste les performances environnementales et économiques de concepts de chambres de combustion innovantes, sur des maquettes-démonstrateurs.

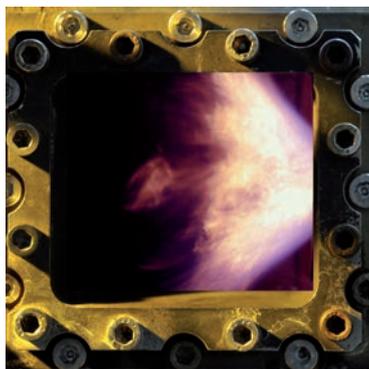
Ces outils de recherche simulent des conditions de fonctionnement moteur réalistes : vol de croisière, décollage, réallumage, etc. L'ONERA y met notamment en œuvre une de ses spécialités : la métrologie laser de la combustion, qui permet de visualiser le kérosène vaporisé, les radicaux OH (marqueurs de flamme), les polluants, les concentrations de suie... Les données de ces expérimentations sont précieuses : elles permettent de qualifier les concepts, et servent de base de validation aux modèles numériques de la combustion. Ces modèles, intégrés dans des logiciels comme Cedre, permettent d'améliorer encore la conception des futurs foyers de moteur.

Tosca : une architecture *low NOx* à l'épreuve

Les NOx, ou oxydes d'azotes, sont une importante source de pollution de l'air. L'Union européenne a demandé que les NOx émis par les moteurs soient réduits de 90 % d'ici 2050 (base année 2000).

Safran Snecma a conçu Tosca, une architecture de chambre de combustion dans le but de réaliser une partie de ce défi. Tosca est dotée de deux zones de flamme concentriques : la principale - pauvre, faible productrice de NOx, une centrale - riche mais à plus faible débit, stabilisant la combustion de la zone principale.

L'ONERA a testé cette chambre au banc M1 et a pu proposer au motoriste des optimisations d'architecture. Résultat global : un gain de 60% sur les NOx, en conservant toutes les qualités d'opérabilité et de sécurité, dont le réallumage en haute altitude.





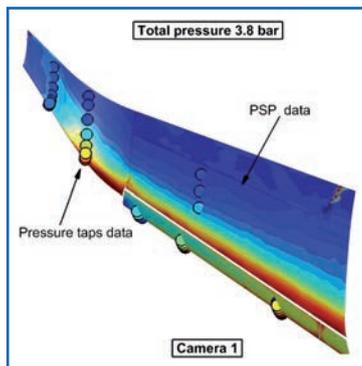
L'art pariétal des souffleries

Dans les années 90, l'ONERA fait l'acquisition, via le Tsagi (centre de recherche homologue de l'ONERA en Russie), de ce type de peinture sensible à la pression, qui permet l'analyse d'écoulements aérodynamiques à la surface des maquettes testées en soufflerie. L'ONERA décide très vite de développer sa propre peinture afin d'avoir l'entière maîtrise de cette technique. Dès 1995, les grandes souffleries de l'ONERA s'approprient ce nouveau moyen de mesure de pression et l'adaptent aux exigences des essais industriels. L'avantage est réel : obtenir des cartographies précises de pressions sur l'intégralité de la surface d'une maquette, permettant d'explorer des zones maquette impossible à équiper auparavant. La précision atteinte avec la peinture PSP permet de recalculer les efforts sur certains éléments portants, procurant un réel avantage pour les industriels.

L'ONERA à la pointe en matière de PSP

L'ONERA, avec le concours du CSEM (centre de recherche et développement suisse), a développé un nouveau type de peinture appelée uPSP (pour « unsteady » PSP). Cette nouvelle peinture, nano-poreuse, permet des mesures de phénomènes instationnaires, c'est à dire variables dans le temps jusqu'à 5 000 Hz. Une innovation majeure qui permet d'explorer d'autres domaines de l'aérodynamique, comme les instabilités et la turbulence.

Ces nouveaux moyens d'essais ont poussé l'ONERA à développer ses capacités de métrologie. D'importants développements ont été menés sur le traitement des images, car si la peinture nano-poreuse permet de très hautes cadences d'acquisition, elle implique aussi de traiter des milliers d'images, traitements rendus possibles par l'utilisation de calculateurs massivement parallèles (GPU).



Évaporation d'un brouillard de gouttes de combustible
(imagerie par fluorescence induite par laser)

Champions de la mesure non intrusive

Effectuer une mesure non intrusive dans un écoulement est doublement intéressant : on n'a pas à introduire de matériel dans un milieu qui peut être hostile (très chaud, hyper-vélocé), et on ne perturbe pas l'écoulement. Le laser se comporte en effet comme une sonde immatérielle qui vient à la rencontre de molécules ou de particules : il renvoie des informations les concernant vers un détecteur, comme vitesse, température, concentration d'espèces...

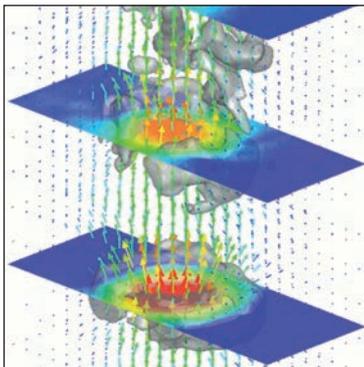
À l'ONERA les techniques de mesure laser sont développées depuis plus de 30 ans. On y dispose d'une panoplie de méthodes performantes (LDV, Drasc, LIF, FFE, PIV...) bien adaptées à toutes sortes de milieux. L'ONERA réussit souvent des premières mondiales, au bénéfice de ses chercheurs en physique, énergétique, aérodynamique. Quelques mesures spectaculaires : le dosage des espèces gazeuses émises par une chambre de combustion aéronautique, la température d'une flamme à 60 bars dans de l'oxygène liquide en combustion, la mesure du flux d'atomes à la sortie d'un moteur de satellite...

PIV3D et BOS3D : la mesure assistée par ordinateur

En matière de métrologie par imagerie, la PIV (*Particle Image Velocimetry*) fournit le champ des vitesses d'un fluide et la BOS (*Background Oriented Schlieren*) est sensible aux variations de densité d'un écoulement compressible. Ces méthodes sont couramment utilisées pour visualiser des sections planes d'un écoulement.

L'utilisation de nouvelles techniques d'illumination laser, de systèmes d'acquisition multi-caméras et surtout le recours à l'ordinateur permettent désormais de faire de la mesure de volume, c'est-à-dire d'obtenir des représentations numériques instantanées 3D des structures d'un écoulement.

L'ONERA est en pointe dans ces techniques de PIV3D et de BOS3D, avec des expérimentations uniques et des méthodes numériques performantes implémentées sur calculateurs massivement parallèles tels que des GPU (*Graphical Processing Unit*).





Les carburants alternatifs sont-ils aéro-compatibles ?

Les biocarburants proviennent de la biomasse (bois, certaines plantes, micro-algues...). Ils complètent un carburant fossile (kérosène Jet A-1, mondialement utilisé dans l'aviation civile). Ils sont renouvelables, ce qui se traduit par un bilan CO₂ global très avantageux. Ils sont aussi un atout pour la survie du secteur à l'heure où les ressources en pétrole sont comptées. Les biocarburants doivent s'adapter aux moteurs aéronautiques, et non l'inverse : être « drop in », prêts à l'emploi dans les moteurs existants. Les chimistes de l'ONERA explorent le comportement du carburant de référence dans toute sa chaîne de fonctionnement et mettent en place les outils pour s'assurer de la conformité des nouveaux. Exemple de contraintes : rester liquide à -47°C, ne pas être trop visqueux, pas trop acide, posséder une densité d'énergie à la hauteur du Jet A-1.

Les avions militaires devront aussi y passer

L'ONERA est expert auprès de la DGA pour examiner et préparer une prochaine certification des moteurs (Snecma) des avions Mirage 2000 et Rafale (Dassault Aviation) à l'usage des carburants alternatifs.

En effet, lors d'exercices ou d'opérations conjointes avec les États-Unis, ces appareils pourront être amenés à se ravitailler en carburant contenant déjà une bonne proportion d'alternatif. Il faudra donc que moteurs et avions soient dûment certifiés pour être utilisables dans un tel contexte d'interopérabilité.





Le flottement : mieux vaut prévenir que guérir

1946, renaissance de l'aéronautique française. De nouveaux avions aux performances inédites prennent leur envol. Certains sont endommagés voire détruits en vol. L'ONERA est appelé à se pencher sur le problème. Souvent responsable : le flottement, un phénomène de vibration de l'aile ou des empennages, d'origine aérodynamique, qui s'amplifie et peut déformer la structure jusqu'à sa ruine. L'ONERA a appris à prédire, sur chaque nouvel aéronef, les conditions d'apparition du flottement afin de définir un domaine de vol sûr, ou même de faire modifier la structure.

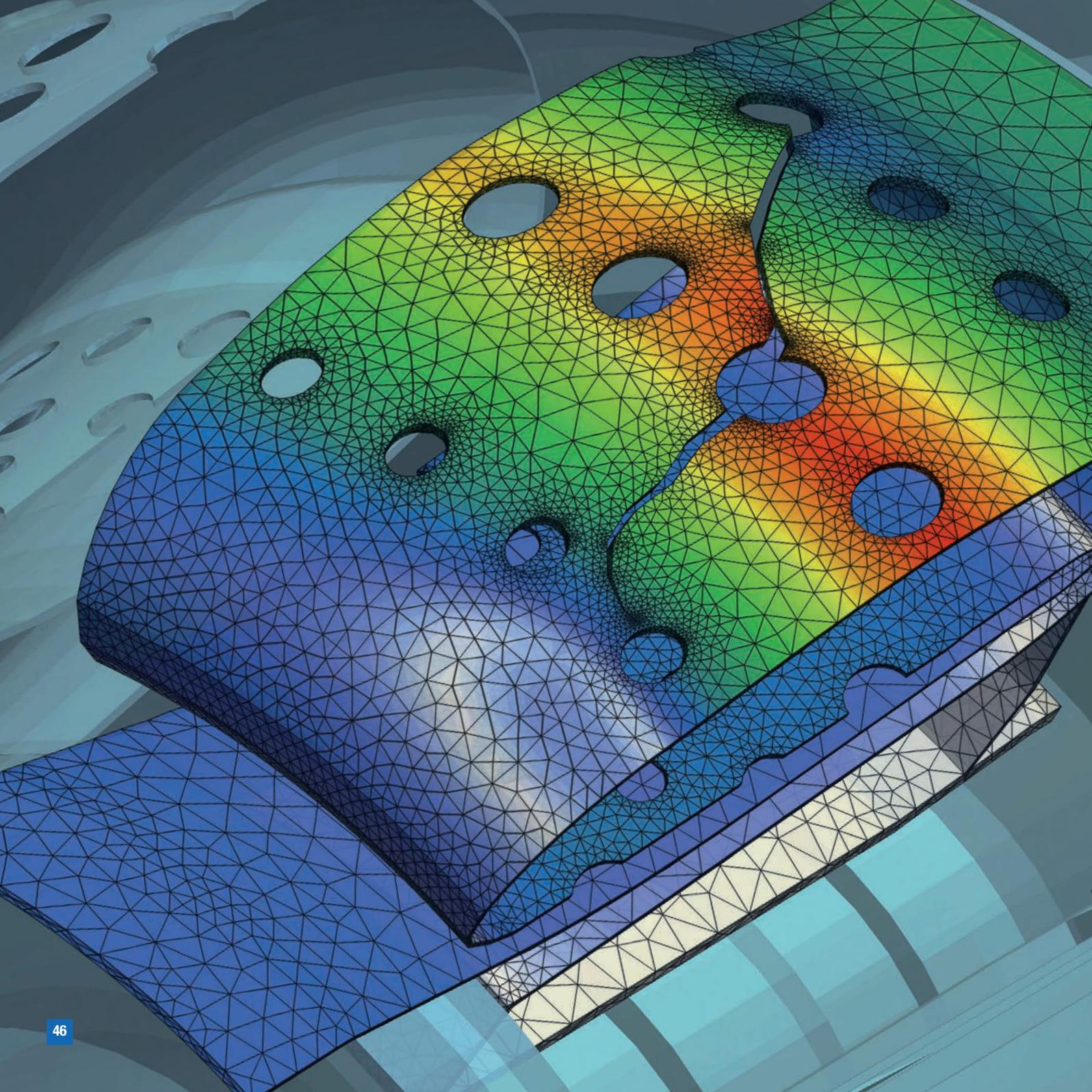
Aujourd'hui, l'ONERA a la confiance d'Airbus sur ce thème critique : calculs et essais en soufflerie en phase de conception, essais de vibration au sol avant le premier vol. L'ONERA fournit également les procédures d'identification et les outils d'analyse du comportement de l'avion soumis aux essais en vol d'ouverture de domaine et de certification.

Les essais de vibrations au sol : derniers tests avant envol

Un événement important dans la vie d'un avion de transport est celui qui précède le vol inaugural : ce sont les essais de vibrations au sol ou GVT – *Ground Vibration Testing*. Ces essais, en ce qui concerne la gamme Airbus, sont effectués par une équipe de l'ONERA, associée à une équipe de son homologue allemand le DLR.

Pour ce véritable check-up structural, l'avion est secoué en tous sens avec des actionneurs selon des modes qui le font vibrer. Des centaines de capteurs (accéléromètres) mesurent les réponses aux différentes excitations. Des giga-octets de données sont analysées sur site et transmises à l'avionneur qui pourra alors recalibrer son modèle numérique et vérifier par simulation que l'avion est effectivement prêt à voler en toute sécurité.





Zset-Zebulon, crack de la mécanique des matériaux

Dans un moteur aéronautique, il y a des pièces très sollicitées à des températures très élevées (certaines aubes de turbine tournent à plus de 20 000 T/mn à 1200°C). Dès la conception, il importe au constructeur d'avoir une bonne idée de la durée de vie de ces pièces critiques.

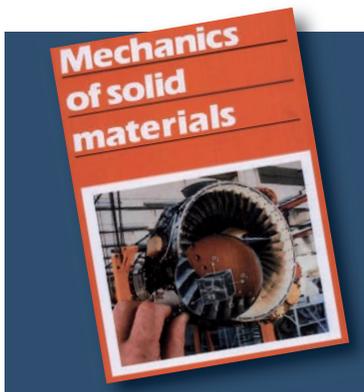
Zset-Zebulon est l'outil pour cette prédiction. Fruit d'une collaboration de plus de 30 ans avec l'École des Mines, cet ensemble logiciel capitalise et permet d'utiliser une quantité de modèles de comportement dans les calculs de structures. Il peut être couplé aux logiciels de mécanique des fluides (Elsa, Cedre) dans une démarche globale, multi-physique.

La suite Zset est commercialisée. Les clients historiques sont du secteur aérospatial (Safran), des industries automobiles (Renault, PSA, GM...), de l'énergie (CEA, EDF, Areva), des matériaux (Saint-Gobain, 3M, ArcelorMittal).

L'école française de mécanique des matériaux

Avez-vous entendu parler des modèles de Chaboche ? Si vous êtes ingénieur, professeur ou étudiant en mécanique des matériaux, c'est probable. Ce chercheur de l'ONERA a publié avec son professeur Jean Lemaître en 1985 « Mécanique des matériaux solides », une référence unanime dans les amphis et les bureaux d'études du monde entier. Ces deux spécialistes ont fondé une dynamique d'excellence, une véritable « école » française de mécanique des matériaux et de l'endommagement.

Les travaux de Jean-Louis Chaboche et de ses collègues ont produit des publications capitales ainsi que de nombreux modèles de Zset-Zebulon (évolutions non-linéaires, fatigue, endommagement, fissuration...). En 2014, le Prix Erea (Association des centres européens de recherche aéronautique) leur a été attribué.





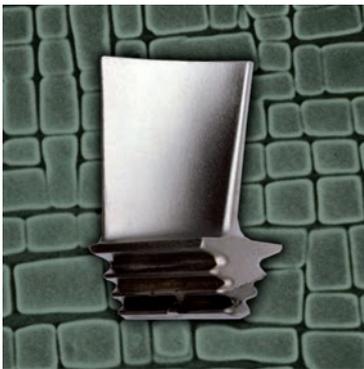
Superaliages superstars

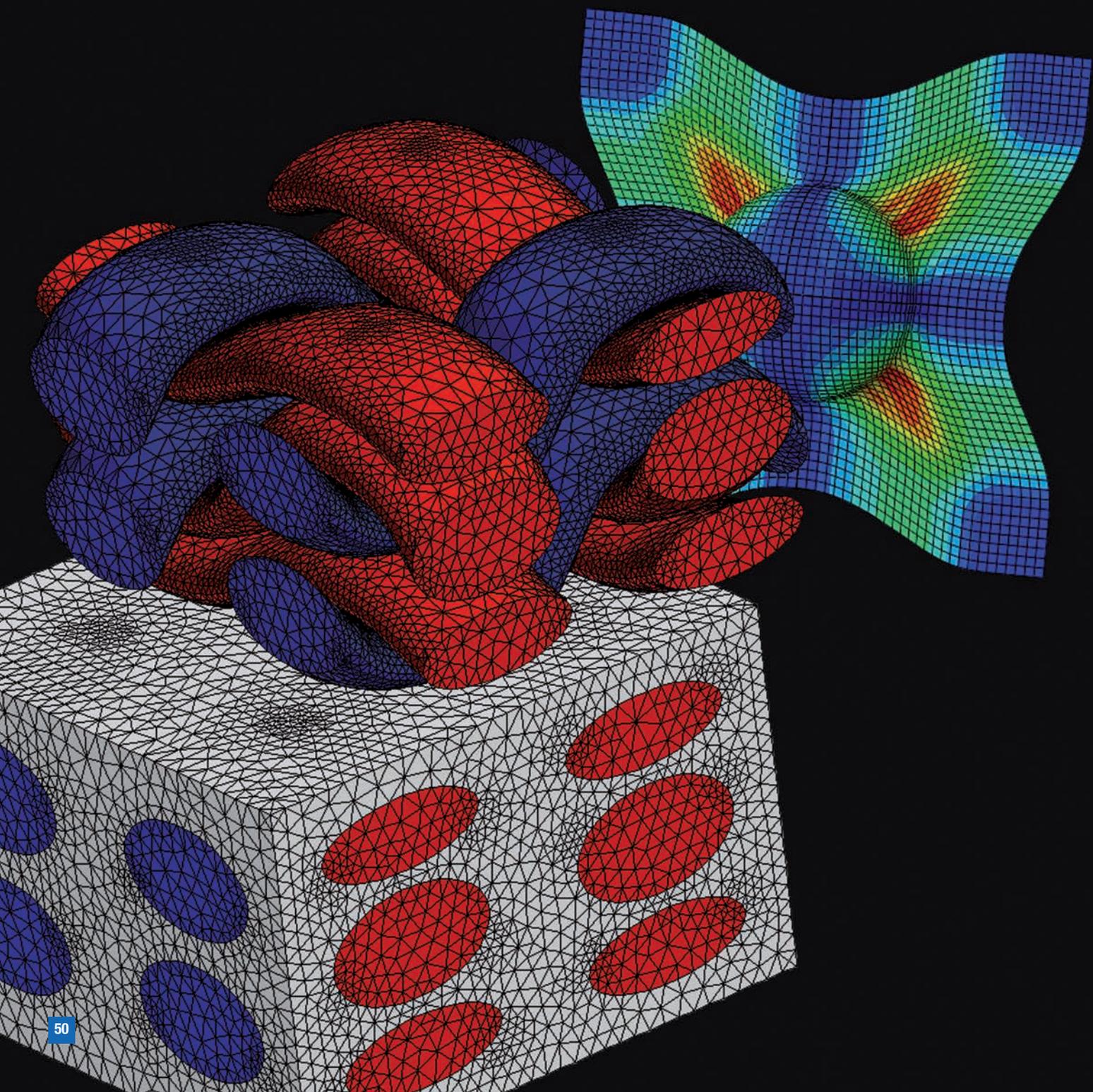
Les moteurs d'avion sont constitués de pièces en alliages métalliques. Certaines sont soumises à des températures extrêmes (jusqu'à 1200°C) et peuvent en cas de rupture compromettre le moteur, voire l'avion entier. Les superalliages, alliages aux propriétés exceptionnelles obtenus par précipitation de composants durcissants, sont très résistants à la chaleur, mais aussi à la corrosion et aux déformations.

Depuis les années 70, l'ONERA, qui a fait breveter de nouvelles compositions, dispose de savoir-faire complets : chimie – conception de l'alliage, mécanique – modélisation de la durée de vie des pièces, métallurgie compréhension de la microstructure. Ainsi, l'ONERA est le partenaire des motoristes du groupe Safran, soucieux de développer des moteurs aux rendements toujours améliorés.

Les superalliages de l'ONERA sont dans l'air

Les superalliages brevetés (ou co-brevetés) par l'ONERA sont utilisés les motoristes Safran Snecma et Turbomeca. Ainsi les matériaux AM1 et N18 constituent respectivement les aubes et disques de turbines du moteur M88-2 du Rafale. Les aubes des moteurs TP400 (A400M), SaM146 (Sukhoï Superjet 100) et Silvercrest (Citation Longitude et Dassault Falcon 5X) sont en AM1. Les turbines Arrius 2 et Arriel 2 qui propulsent les hélicoptères d'Airbus Helicopters, Agusta, Bell... contiennent les superalliages ONERA MC2 et AM3. En cours de développement : le N19, dans la lignée du N18, dont l'objectif est la prolongation de la durée de vie en fatigue.





Les composites, une des clés du transport aérien durable

Un matériau composite est un assemblage d'au moins deux composants solidaires dont les propriétés se complètent. Les composites de l'aéronautique – souvent à base de fibres de carbone et de résine, apportent légèreté, résistance à la corrosion, facilité de mise en forme et tenue dans le temps. S'ils répondent aux enjeux actuels (environnement, coût), ils sont plus sensibles que les alliages métalliques aux agressions extérieures (grêle, foudre, petits chocs).

Qui a su mettre au point des méthodes innovantes pour tester ces matériaux ? Qui a le recul nécessaire pour tenir compte des problématiques techniques et industrielles ? Qui a compris qu'il ne s'agissait pas seulement d'un « matériau de plus », mais véritablement d'un nouveau domaine méritant ses propres méthodes de la conception à la certification ? L'ONERA.

Fort d'une expérience de 40 ans et pratiquant un dialogue permanent entre numériciens et expérimentateurs, l'ONERA est un des laboratoires les plus experts au monde sur les composites.

L'expertise ONERA levier d'innovation dans l'automobile

L'ONERA partenaire du Centre technique des industries mécaniques, a conçu et testé un triangle de suspension « tout composite » pour PSA Peugeot-Citroën, ce qui constitue une première mondiale. Le secteur automobile s'est intéressé à nos recherches pour bénéficier de notre expertise aérospatiale, dans le but d'économiser la masse et de consommer moins de CO₂, tout en mettant au point des procédés industriels à productivité « automobile ».

Pour prévoir le comportement de la pièce une fois en place, l'ONERA a mis en œuvre ses modèles numériques, ainsi que des installations expérimentales nécessaires à leur évaluation.

Ce savoir-faire « composites » ONERA, unique, est de plus en plus recherché hors du domaine aérospatial, comme dans le transport (PSA, Renault, Valeo...) et l'énergie (CEA, Areva, Technip...).





Matériaux extrêmes pour applications bien ciblées

Les composites à matrice céramique (CMC) ont de l'avenir dans les applications à haute température : moteurs aéronautiques (turbomachines), structures échauffées par la vitesse, alors que les composites à matrice organique (CMO) sont couramment utilisés pour les structures (ailes, fuselage, ...).

Pour les arrière-corps de moteurs, l'ONERA développe des CMC oxyde-oxyde, en partenariat avec une PME. Ils sont moins lourds, ils tiennent mieux la température que le titane habituellement utilisé (1200°C vs 650°C) et coûtent aussi beaucoup moins cher à fabriquer.

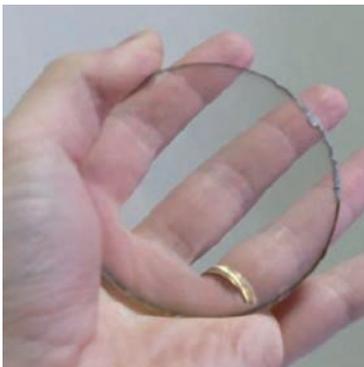
Autre matériau à bas coût, une céramique issue de polymères, conçue pour MBDA, destinée à des ogives de missiles hyper-véloces (Mach > 5) et capable de résister quelques minutes à une température de 1200°C.

Enfin, l'ONERA développe des composites « eutectiques » pour la fabrication d'aubes de turbines sans canaux de refroidissement. Ils ont de très bonnes propriétés mécaniques et sont capables de supporter des températures de 1600 °C. C'est là un défi R&T à plus long terme.

Haute température, très solides... et transparents !

L'ONERA développe des céramiques très transparentes aux excellentes propriétés thermomécaniques, à partir de poudres d'alumine (Al_2O_3) et de spinelle ($MgAl_2O_4$) compressées à chaud (pour densifier le matériau et réduire la porosité au maximum). Les applications de défense vont des fenêtres pour missiles transparentes à la lumière visible et infrarouge, aux vitrages blindés (pour hélicoptère de combat, par exemple). Ces céramiques transparentes offrent, avec une épaisseur trois fois moindre, un blindage équivalent à un vitrage pare-balle classique.

L'ONERA produit également des cristaux pour des lasers infrarouges accordables (OPO) utilisés pour des applications de contre-mesure, très sollicitées thermiquement et mécaniquement. L'ONERA est le seul en Europe à savoir fabriquer ce matériau stratégique.





Crash, chocs, feu : objectif survivabilité

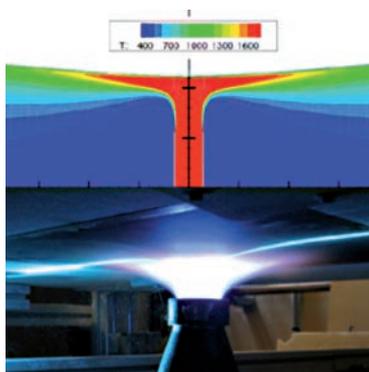
Étudier les crashes dans le domaine des structures, ce n'est pas seulement s'intéresser à la résistance du fuselage, des ailes ou des moteurs aux impacts, comme ceux d'oiseaux, de grêlons ou de débris... C'est aussi augmenter la survivabilité, c'est-à-dire les chances de survie des passagers dans les conditions sévères d'un atterrissage forcé, avec risque d'incendie ou d'immersion.

Les autorités internationales (FAA, EASA) fixent les objectifs sécuritaires aux constructeurs. L'ONERA, avec la DGA et la DGAC, aide les industriels européens à les atteindre, de la façon la plus performante techniquement et économiquement. L'ONERA étudie les sollicitations dynamiques externes depuis l'échelle la plus fine des matériaux jusqu'à la qualification des structures (aile, fuselage). Les outils numériques tels que Abaqus, Radioss, utilisés par les acteurs internationaux du domaine, sont des standards que l'ONERA contribue à améliorer. Les recherches font l'objet de développements logiciels par exemple avec le CEA et le centre de recherches commun de la Commission européenne (JRC Ispra).

Le feu, première cause de mortalité en cas de crash

Un des grands défis liés à la conception des structures aéronautiques est la tenue des matériaux au feu. L'utilisation croissante de matériaux composites implique la prise en compte d'effets combinés aérodynamiques, thermiques, chimiques et mécaniques.

Alors que la certification au feu de ces matériaux est établie expérimentalement au moyen d'essais feu standards (normes ISO et FAR), l'ONERA mène des recherches pour comprendre les phénomènes physiques en jeu, assurer une meilleure gestion des marges de sécurité et anticiper les problématiques nouvelles. L'ONERA développe en particulier des modèles numériques intégrant les contraintes industrielles, sans négliger la confrontation avec l'expérience à l'échelle du laboratoire.





Bien connaître la foudre, c'est prévenir des catastrophes

La foudre et ses conséquences, c'est une expertise de l'ONERA reconnue mondialement, une compétence nourrie pendant 40 années d'expériences en laboratoire et en vol, de développements théoriques et d'échanges avec les industriels et opérateurs aéronautiques.

Dans les années 70, on observait le foudroiement dans les nuages en y lançant des roquettes reliées au sol par un fil métallique. Aujourd'hui les industriels viennent à l'ONERA chercher la meilleure expertise pour concevoir des structures en composites et des équipements électroniques qui ne soient pas vulnérables. Les chercheurs provoquent la foudre "in silico" (par simulation informatique) et constatent des endommagements virtuels. Le banc expérimental permet de se recalibrer par rapport à une physique complexe, pour des modèles toujours plus précis et plus fiables.

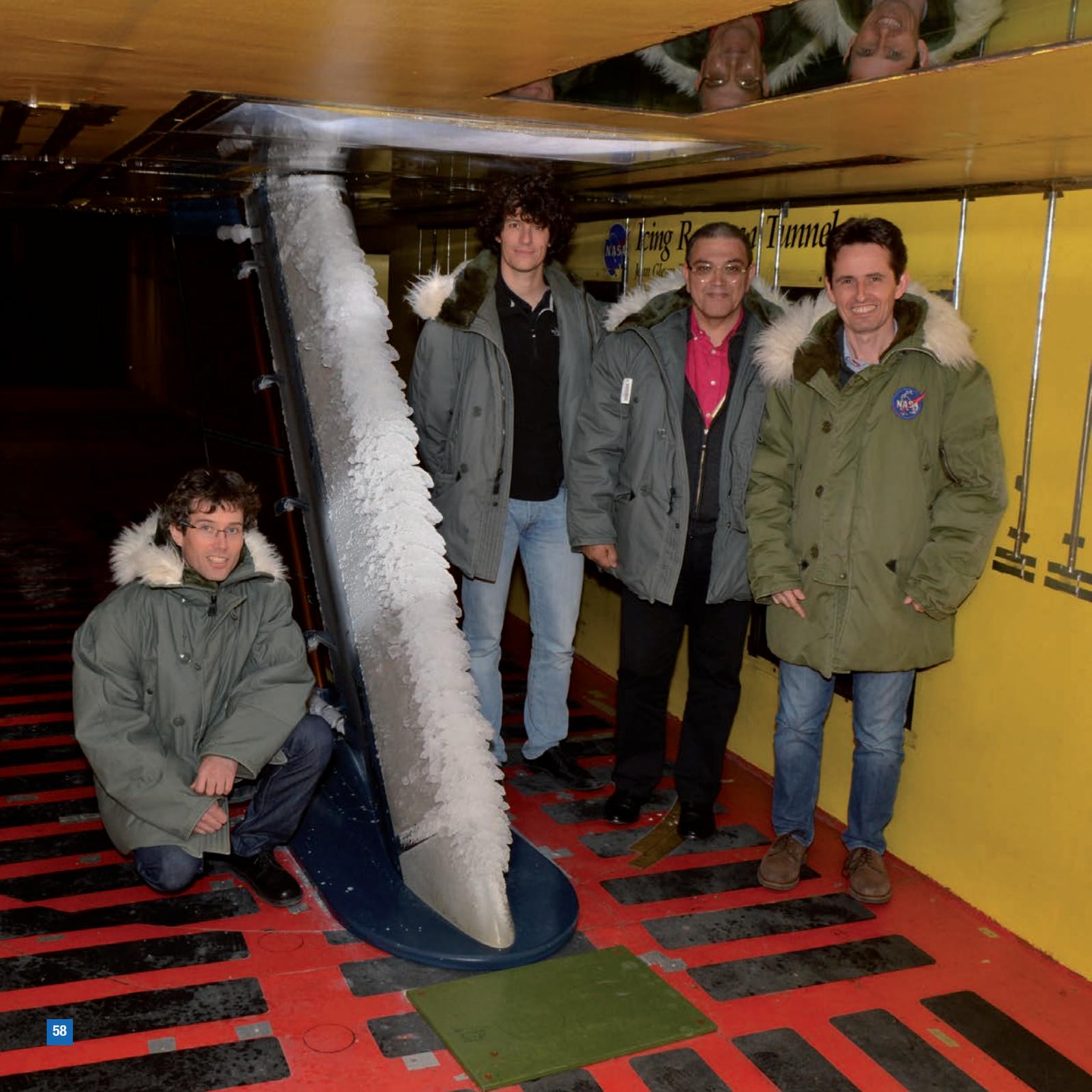
A Kourou, la foudre ne touche pas les lanceurs

Ce sont des spécialistes ONERA de la compatibilité électromagnétique qui ont contribué à la définition et à l'optimisation du système de protection foudre des sites de lancement des lanceurs Ariane, Soyouz, Vega.

Ils ont simulé informatiquement, grâce à leurs modèles, les champs magnétiques et les courants suite à un impact foudre sur un des quatre pylônes interconnectés protégeant la tour de lancement

Leur expertise est allée au-delà : en injectant de forts courants représentatifs de ceux provoqués par la foudre, ils ont mis en évidence, sur site, les anomalies et zones mal protégées, contribuant ainsi à la mise en conformité du système de protection.





Agir contre le givrage

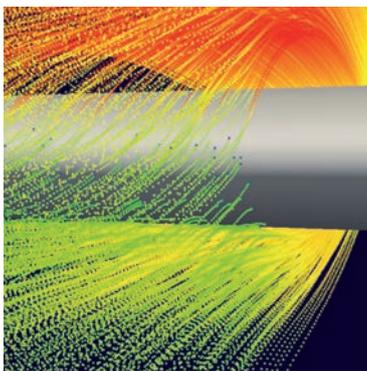
Le givrage est le phénomène météorologique le plus dangereux pour le transport aérien. L'ONERA a toujours étudié le phénomène sur les aéronefs et les moteurs : d'abord grâce aux conditions « naturelles » de ses souffleries alpines (mont Lachat, puis S1 Modane). A partir des années 80, l'ONERA aborde le sujet par la modélisation et la simulation numérique. Ses logiciels sont utilisés depuis par tous les industriels français du secteur. A partir de 2000, l'ONERA est considéré comme le référent européen en matière de modélisation du givrage.

Aujourd'hui les conditions de certification se durcissent ; parallèlement la protection contre le givre doit être énergétiquement optimisée. L'ONERA est à l'œuvre, en particulier dans le cadre de la convention Physice de la DGAC, pour développer une deuxième génération d'outils numériques et de systèmes de mesure embarqués. Objectif : caractériser les conditions givrantes, prévoir la formation et les conséquences du givre dans un cadre réglementaire plus sécuritaire.

Un axe ONERA-NASA à la hauteur des enjeux

Les nouvelles réglementations internationales amènent avionneurs et motoristes à revoir les processus de mise en conformité. Il leur faut prouver que le givre ne peut en aucun cas faire tomber l'avion. Face à la diversité des situations, le recours à la simulation numérique devient incontournable, avec des logiciels de plus en plus raffinés.

Les accords ONERA-NASA Sunset-1 (2006) et Sunset-2 (2013) impulsent les travaux de manière décisive. La NASA simule la formation de givre sur une aile en soufflerie givrante. Un scanner 3D permet de numériser la forme pour fabriquer des moulages en résine, et étudier la dégradation de performance aérodynamique dans la soufflerie ONERA F1, une des meilleures du monde dans sa catégorie, et de créer des données pour valider les logiciels. Mais les problèmes soulevés sont de taille. Par exemple : quel degré de détail des formes convient pour représenter la réalité physique de façon satisfaisante ?





Des avions plus sûrs, plus fiables. Merci qui ?

Obtenir des performances élevées et garantir des comportements sûrs pour des systèmes complexes comme les avions, les lanceurs, les satellites... malgré les incertitudes et les pannes, dans un environnement qui peut être perturbant, voilà l'enjeu.

Cela fait environ 20 ans que les chercheurs de l'ONERA, unanimement reconnus par leurs pairs, développent des outils mathématiques de haut niveau et les capitalisent pour les rendre utilisables par les industriels et les centres de recherche du monde entier (sous la forme de fonctions Matlab®). On parle de synthèse de commande robuste, de méthode systématique d'estimation, d'analyse et de validation de lois de commande, d'optimisation.

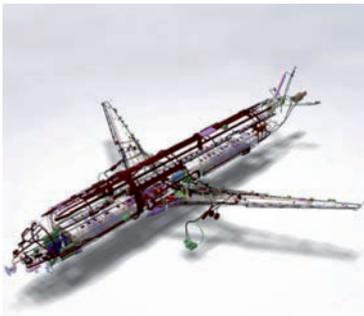
L'expertise va jusqu'à la démonstration de la valeur des techniques de commande devant les autorités de certification.

En matière de sûreté et de fiabilité, avionneurs et passagers peuvent dire merci à l'ONERA !

La certification des logiciels critiques

L'ONERA développe méthodes et outils permettant d'implémenter les fonctions critiques, telles que les lois de commande de vol, dans les informatiques embarquées. L'objectif est d'obtenir des logiciels sans bugs avec des coûts de développement et de vérification maîtrisés. L'ONERA travaille aujourd'hui sur les architectures informatiques qui utiliseront une nouvelle génération de processeurs – les "manycores".

Dans le domaine aéronautique, les logiciels doivent être certifiés pour pouvoir être embarqués. L'ONERA a une grande expertise dans le domaine de la certification et a participé à l'écriture des standards du domaine (DO-178C et DO-333).





Pod Reco-NG : une belle pépite sous le Rafale

Les performances du pod Reco-NG (alias nacelle Aeros) sont un atout majeur pour le renseignement tactique français, depuis son adoption par les armées en 2011. L'appareil effectue de la reconnaissance photographique visible et infrarouge à très basse comme haute altitude, à courte comme à moyenne distance, à grande et très grande vitesse. Les capteurs optiques tournent à 180°, peuvent viser une zone, pointer suivant plusieurs angles et cela indépendamment du profil de mission de l'avion, tout en respectant les paramètres prédéfinis par les interpréteurs. Enfin, les images numériques haute résolution peuvent être transmises en temps réel par liaison dédiée. En 2017, Reco-NG est toujours à l'état de l'art.

Dès 1996, l'ONERA accompagnait la DGA dans la définition des spécifications. En 2000, la DGA passait commande à Thales, qualifiait la nacelle en 2009, toujours soutenue par l'ONERA. Pendant cette période, jusqu'à plus de 20 personnels ONERA auront été impliqués.

Un système complexe, avec de la belle science dedans

Tout pour plaire aux ingénieurs-chercheurs de l'ONERA ! Les spécialistes en optronique et traitement d'image se sont naturellement impliqués dans la chaîne du renseignement du pod. Le laboratoire volant d'imagerie multi-spectrale Timbre-Poste de l'ONERA, conçu pour l'imagerie satellitaire, fut très sollicité pour simuler les futures images, en étroite relation avec les interpréteurs.

Les radaristes ont proposé de l'imagerie SAR dans le pod. Elle n'est pas retenue à ce stade (manque de maturité technologique).

Enfin les aérodynamiciens ont mis à contribution soufflerie et simulation numérique pour trouver une forme de nez au pod, générant le moins possible d'effets aéro-optiques.





Qui dit autonomie dit capacité de décision

Des essais de drones de combat, des constellations de satellites, ou bien des ensembles coopérants de drones manœuvrant dans différents milieux doivent s'acquitter de leurs missions avec un très haut niveau d'autonomie. Pour cela, ils doivent être dotés d'un ensemble de connexions – un "cerveau", et d'une intelligence artificielle distribuée qui puisse leur permettre d'atteindre leurs objectifs tout en garantissant leur sûreté de fonctionnement.

L'autonomie de tels systèmes engage des capacités de décision devant des informations d'origines multiples qui peuvent être incomplètes ou inexactes. Les travaux développés conduisent ainsi à l'élaboration de modélisation des incertitudes, à l'implémentation d'algorithmes... Le tout sur des systèmes embarqués capables de mettre en œuvre leur méthode de décision en temps-réel en coordination avec les autres entités autonomes.

L'hétérogénéité donne à l'union plus de force

Dans le projet Action, l'ONERA démontre l'intérêt de la mise en œuvre d'une équipe de drones hétérogènes autonomes pour optimiser les fonctions de localisation et de navigation globale de cette équipe impliquée dans des missions complexes.

Ces drones autonomes embarquent une architecture générique incluant des fonctions logicielles élaborées : perception de l'environnement, évaluation de situation, décision sur les actions à accomplir et les stratégies à déclencher pour réagir aux nouvelles informations.

Les démonstrations sont réalisées avec des drones aériens (Ressac de l'ONERA), des robots terrestres (avec le Laboratoire d'analyse et d'architecture des systèmes - CNRS), des drones sous-marins ou de surface (DGA).



$$\neg A \rightarrow B \rightarrow ((\neg A \rightarrow \neg B) \rightarrow A)$$

$$(\forall A \in P), \models (A \rightarrow (A'' - A))$$

| | |
|---|------------------------------------|
| H | $\varphi \rightarrow \psi$ |
| C | $\neg\psi \rightarrow \neg\varphi$ |

$$P = (A_1 \cap A_2) \supseteq A_1 \cup A_2$$

$(\mathcal{L}', \subseteq, \cup, \cap)$ is a lattice

$$A' = \text{def } \bigcap_{\varphi \in A} \mathcal{L}'(\varphi)$$
$$B'' = \text{def } \bigcup_{\varphi \in B} \mathcal{L}'(\varphi)$$

Et l'humain dans tout ça ?

Depuis l'avènement des commandes électriques sur les avions de ligne (fin des années 80), la place de l'humain a changé dans les cockpits. Le pilote n'agit plus *stricto sensu* sur les commandes de vol, il est devenu un véritable superviseur qui gère un système de plus en plus automatisé et complexe, dont il assume néanmoins la responsabilité en liaison avec les autres acteurs de l'espace aérien.

La conception des systèmes interactifs est maintenant centrée sur l'utilisateur et les usages. Elle se nourrit du retour d'expérience, thème sur lequel l'ONERA et la NASA travaillent avec des compagnies aériennes. Des évaluations en situation permettent aux chercheurs de développer des algorithmes et des moyens de mesure afin de caractériser des types de comportement, d'analyser les interactions avec le système et de détecter les difficultés rencontrées et les défauts d'attention. Objectifs principaux : améliorer la performance des systèmes mais surtout en augmenter la sécurité... en veillant à ce que l'humain puisse bien jouer son rôle là où il est attendu.

Pour les drones aussi, les facteurs humains sont importants

Tandis que la législation n'autorise pas encore les aéronefs télépilotés à évoluer dans l'espace aérien fréquenté par les appareils pilotés, l'ONERA mène des recherches sur leur intégration dans le trafic aérien.

Comme tout pilote d'aéronef, le pilote de drone doit assurer la sécurité du vol et notamment le « voir et éviter ». Il doit pouvoir appliquer en connaissance de cause les instructions du contrôle aérien, et lorsque la séparation est de son ressort, maintenir son drone à distance de sécurité des autres appareils. L'ONERA travaille ainsi sur le rôle du pilote et ses interactions avec des fonctions de détection et d'évitement partiellement automatisées, en tenant compte des limitations inhérentes à la conduite distante telles que les délais de communications et le déficit de perception de l'environnement.





Expert ès drones et anti-drones



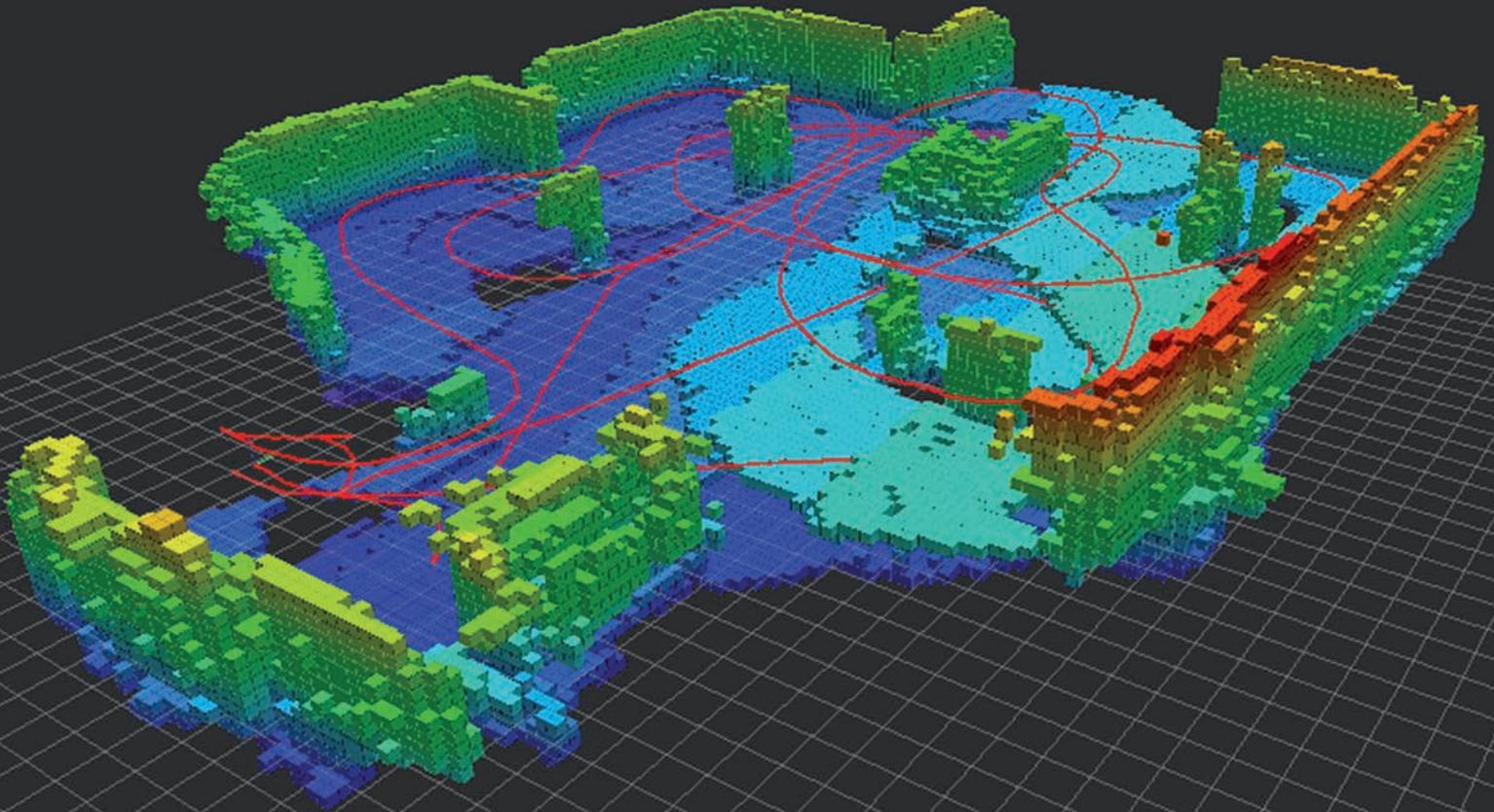
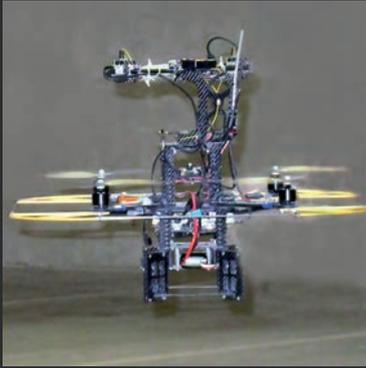
C'est en 2015 que le projet ANGELAS – analyse globale et évaluation des technologies et méthodes pour la lutte anti UAS – coordonné par l'ONERA avec six partenaires industriels et académiques, a été retenu par l'Agence nationale de la recherche (ANR) pour le programme « Protection de zones sensibles vis-à-vis des drones aériens ».

ANGELAS, plus orienté sur les techniques de détection et d'identification des drones malveillants est porteur à plus d'un titre. Seule proposition à viser la détection à longue distance, il a été l'occasion pour les équipes de l'ONERA de monter en maturité des technologies innovantes, à l'instar du radar passif opéré depuis le sol ou du Lidar 2D, permettant de mesurer le temps de vol et les distances grâce à la technologie de l'imagerie laser flash 2D.

Au profit de l'État et des industriels

ANGELAS a permis à l'ONERA d'étendre son rôle d'expert étatique à la lutte anti-drone, au profit des ministères, SGDSN, DGA, gendarmerie... Afin de mener à bien le projet, l'ONERA aura étudié de manière approfondie de nombreuses technologies : radar actif, détection acoustique, caméra très haute résolution dans le visible ou l'infrarouge, Lidar 3D, goniométrie, éblouissement optique, brouillage de liaisons de données... Les équipes de l'ONERA et ses partenaires auront mené un travail très exhaustif et acquis une véritable expertise sur les avantages et limites des différentes technologies émergentes. Une expertise acquise qui bénéficiera aux services de l'État et aux industriels français.





A l'ONERA, les drones naviguent à vue

Il y a deux sortes de drones aériens : ceux évoluant en extérieur selon les règles de la navigation aérienne et ceux évoluant en intérieur. Ces derniers sont dotés d'un mode de vision embarquée très spécifique. Le drone doté d'une vision 3D et de capacités de calcul temps-réel construit son environnement sous forme d'un modèle 3D, dans lequel il évolue en y évaluant visuellement sa position. Il peut prendre des décisions et élaborer lui-même les commandes de navigation, en fonction des objectifs de sa mission.

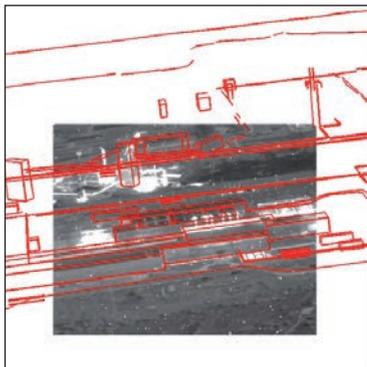
A partir de composants du marché – drone léger quadri-rotor, caméras miniatures, ressources de calcul embarquées – les chercheurs de l'ONERA se sont lancés dans la course internationale à l'autonomie de la robotique aérienne et se retrouvent au meilleur niveau mondial avec un savoir-faire essentiellement concentré dans le logiciel : reconstitution 3D, navigation, commande... Les secteurs d'application sont très variés : surveillance et intervention sur les infrastructures SNCF, dans les transformateurs EDF, pour les militaires, le bâtiment, les ouvrages d'art, l'archéologie...

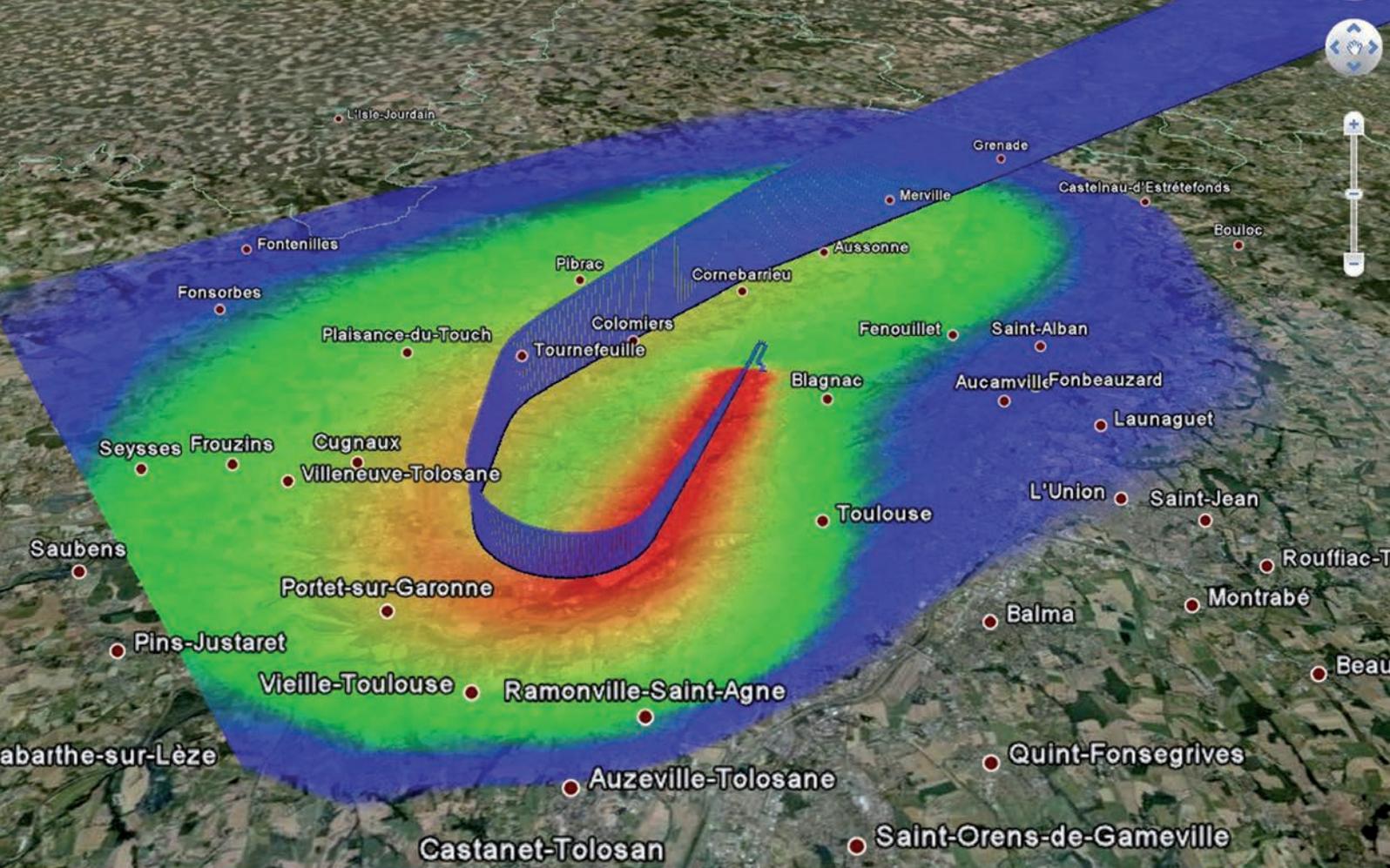
L'auto-directeur du missile Scalp/Storm Shadow

L'ONERA a mis son savoir-faire en matière de traitement d'image et de reconstitution 3D au service de la défense, bien avant l'engouement pour les drones que nous connaissons actuellement.

Ainsi, de 1992 à 2000, les spécialistes ONERA ont participé, pour la DGA et l'industriel MBDA, aux phases de définition, de conception et de qualification par simulation de l'auto-directeur du missile MBDA Scalp/Storm Shadow.

Le guidage terminal de précision de ce missile de croisière quasi-autonome est basé sur une corrélation intelligente entre les images de sa caméra infrarouge et un modèle 3D de l'environnement de la cible, non pas construit en temps réel, mais issu d'une préparation de mission.





Les systèmes de transport aérien du futur à l'épreuve

lesta est la plateforme ONERA d'évaluation numérique pluridisciplinaire qui représente toute la réalité d'un système de transport aérien dans sa complexité : par exemple un aéroport avec son environnement, les avions dans l'espace aérien, le suivi d'une procédure...

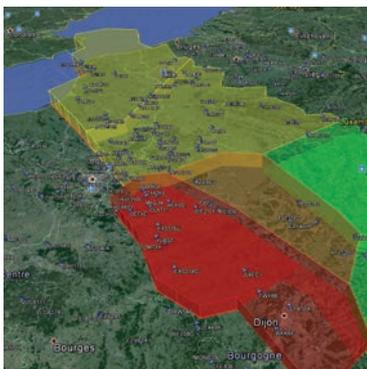
L'espace virtuel très réaliste de lesta, est conçu pour évaluer commodément l'introduction dans le trafic aérien d'un nouvel avion, d'un nouveau moteur, de nouvelles règles, et en examiner les conséquences sur l'environnement (bruit, consommation de carburant, émissions polluantes, qualité de l'air). La sécurité du trafic aérien, sa capacité, font également partie des enjeux.

lesta est notamment utilisé dans les grands programmes européens Clean Sky (développement de technologies pour une aéronautique innovante et propre) et Sesar (modernisation de la gestion du trafic aérien).

lesta, super-simulateur système pour Sesar

En Europe, aujourd'hui encore, chaque pays gère son espace aérien. Mais d'autres organisations sont possibles. Dans le cadre du programme européen Sesar (*Single European Sky ATM Research*), la plateforme lesta permet de simuler et d'évaluer de nouveaux concepts de configurations d'espace aérien flexibles et dynamiques, en tenant compte des besoins de tous les acteurs impliqués : contrôleurs aériens, aéronefs, free route, militaires...

lesta, en testant ainsi les innovations en amont et en prévoyant les conséquences de différents scénarios, se révèle être un puissant outil d'aide à la décision.





Ampere ou le pari de la propulsion électrique distribuée

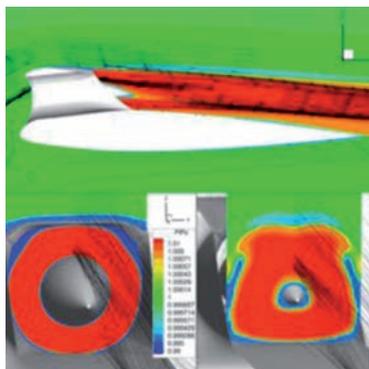
Pour l'ONERA, innover, c'est explorer des solutions nouvelles dans la perspective de proposer aux industriels des technologies validées et intégrables. Ainsi, l'objectif du concept Ampere est de valider un projet d'avion tout électrique capable de transporter 4 à 6 personnes sur 500 km en deux heures, à proximité des villes. L'ONERA propose pour relever ce défi une propulsion électrique distribuée, innovation qui conduit à repenser totalement la conception de l'appareil.

Dans ce cadre de mission, Ampere est un ensemble cohérent qui permet d'intégrer des technologies et de les mettre à l'épreuve. L'intégration aéro-propulsive a déjà fait l'objet de premières simulations numériques et de validations en soufflerie (Lille) tout à fait concluantes.

Si 2025 semble un objectif réaliste pour le projet Ampere, les ingénieurs se projettent déjà en 2040 où ils imaginent un avion de transport régional reposant sur les mêmes principes, avec une capacité de 50 à 80 sièges, pour 1000 km d'autonomie. Une vraie révolution énergétique !

Les avantages de la propulsion distribuée

- Décollage et atterrissage sur de courtes distances, les moteurs ayant un effet de soufflage de voilure, qui accroît la portance à basse vitesse. Une piste de 200 m serait suffisante
- Participation des moteurs au pilotage et à la stabilisation de l'avion à travers la gestion de leur poussée unitaire
- Amélioration de la sécurité du vol grâce à la mutualisation des fonctions et à la redondance intrinsèque des composants de propulsion
- Alimentation électrique également distribuée avec 8 piles à combustibles (définies sur des éléments fournis par le CEA) et batteries de type lithium-ion pour les appels de puissance transitoires
- Dimensionnement au plus juste de la propulsion grâce à la distribution des composants du système propulsifs (fans et sources d'énergie)
- Pas de rejet de polluants ni de gaz à effets de serre en fonctionnement
- Diminution potentielle des pertes d'énergie liées au frottement, grâce à l'effet des 32 fans positionnés sur l'extrados de la voilure, très près de la paroi





Nouveaux enjeux, nouvelles conceptions

La prise de conscience environnementale actuelle oblige les constructeurs à réaliser des prouesses technologiques pour atteindre des objectifs ambitieux, comme diviser par 4 la consommation passager-km entre 2000 et 2050. Les avions actuels « à l'allure classique » ne laissent plus espérer de gain notable.

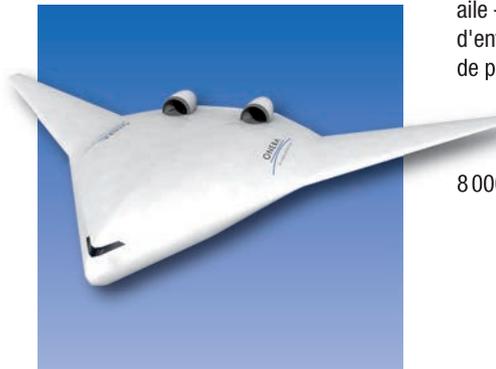
Mais il y a des idées prometteuses, illustrées par le concept Nova proposé par l'ONERA. Par exemple, intégrer la motorisation à l'arrière de l'aile ou du fuselage permettrait d'améliorer le bilan propulsif conjoint de la cellule et du moteur, qui ne seraient alors plus considérés comme deux éléments séparés mais comme un ensemble.

L'ONERA adopte une approche multidisciplinaire, capable d'orchestrer toutes ses compétences, pour faire émerger des avancées technologiques, tout en optimisant les qualités requises : aérodynamique, propulsion, structure, performance, capacité de manœuvre, acoustique...

L'aile volante, futur long-courrier ?

Depuis longtemps, l'aile volante est créditée d'un potentiel supérieur à celui de l'avion classique. Pourtant, cela reste encore à démontrer pour le transport commercial. En cause, les incertitudes qui entachent l'évaluation des performances de ce concept, dont toutes les technologies-clés interagissent entre elles, de façon bien plus forte que sur l'avion classique. La configuration « continue » aile - fuselage aplati est un défi en termes d'aérodynamique, de conception structurale, d'enfouissement des moteurs, d'efficacité aéro-propulsive, de nuisance acoustique, et de pilotage du fait de l'absence de dérive.

C'est pourquoi l'ONERA s'attache à lever ces incertitudes ; son projet de recherche CICA V (conception intégrée d'une configuration d'aile volante) étudie une aile volante hybride pour transporter 400 passagers sur une distance de 8 000 miles nautiques à une vitesse de mach 0,85.





Les lidars se ressourceent pour de nouvelles applications

Les lidars sont des dispositifs permettant d'analyser la lumière réfléchie ou rétro-diffusée issue du faisceau laser qu'ils émettent eux-mêmes.

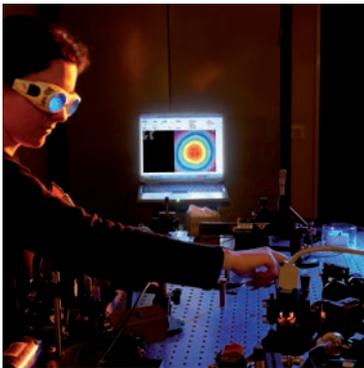
L'ONERA crée et développe de nouveaux lidars, en particulier de nouvelles sources laser fibrées qui sont moins coûteuses et embarquables (fibres optiques « dopées » aux terres rares). Ces lidars, qui analysent la lumière rétro-diffusée par les aérosols atmosphériques voire des molécules, sont d'abord pensés pour la sécurité aéronautique : aéroportuaires (cartographie du vent et des sillages), embarqués (détection des zones de turbulence, anémométrie). La plateforme expérimentale de l'ONERA Licorne a atteint en 2015 la plus grande portée au monde pour la mesure du vent (16km).

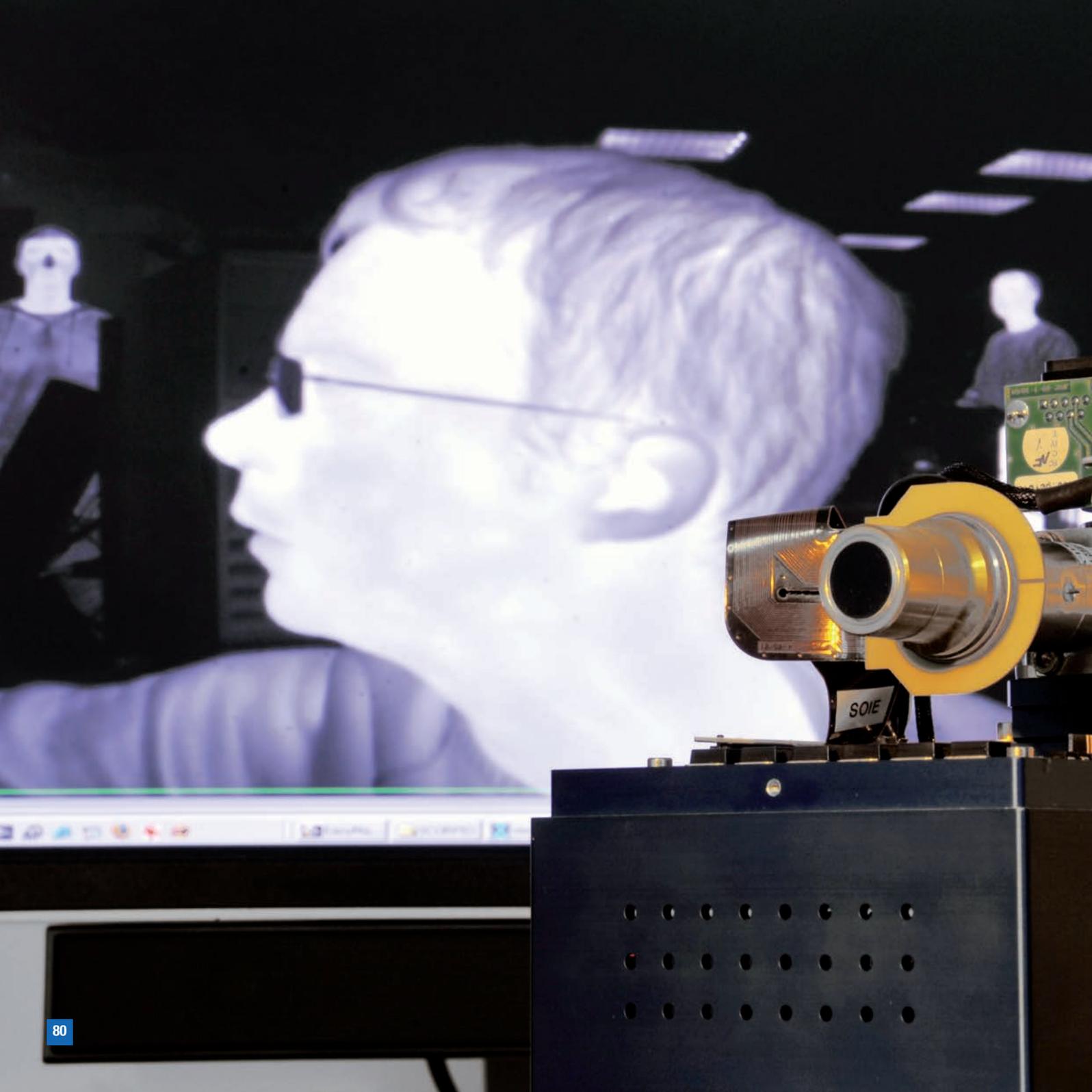
Ces lidars ont un potentiel énorme pour la défense, l'environnement, la sécurité : identification de mobiles, détection de gaz, imagerie active, mesure des gaz à effet de serre dans l'atmosphère depuis un satellite... L'ONERA a ainsi aidé la PME Leosphere à devenir leader mondial de l'observation environnementale.

OPO - un laser modulable à volonté, multicolore

Un OPO ou oscillateur paramétrique optique est une source de lumière laser dont on peut ajuster la couleur (plus exactement la longueur d'onde) à volonté. Les OPO permettent de produire certaines couleurs que ne peuvent produire d'autres sources laser, et peuvent faire bénéficier certaines applications de leur grande « accordabilité ».

L'ONERA a développé et breveté des sources OPO spécifiques, et mène des recherches pour en démontrer les applications technologiques. En particulier, l'OPO permet des mesures simultanées de multiples composés. Applications lidar : détection à distance d'attaques chimiques, surveillance anti-attentats, qualité de l'air dans les espaces publics (transfert de technologies en cours vers la société Blue Industry and Science) et aussi non lidar : contre-mesure pour brouiller les auto-directeurs de missiles.





Caméras miniaturisées, visions augmentées

La lumière infrarouge est invisible à nos yeux, mais elle peut servir à la vision nocturne, à l'imagerie des températures, à l'identification de gaz, etc. Les détecteurs infrarouges qui font les caméras IR n'ont cessé de se perfectionner et leur utilisation se démocratise pour des applications civiles. Les applications de défense restent nombreuses : navigation, pilotage, reconnaissance et identification de cibles, guidage d'armement...

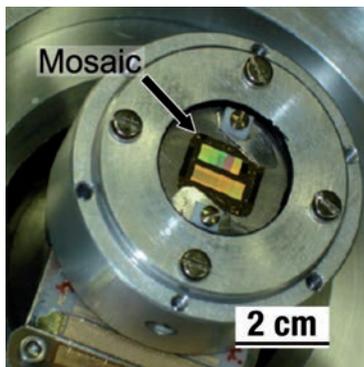
Avec le soutien de la DGA, plusieurs prototypes ont été réalisés à l'ONERA et sont passés au stade industriel, grâce à un partenariat avec la société Sofradir (depuis 2013). Citons les caméras compactes « grand champ » imitant l'architecture de l'œil humain, dédiées à la surveillance ou au pilotage des drones, les caméras ultra-compactes « sur puce » produisant plusieurs petites images de la même scène, dont la combinaison permet d'augmenter l'information perçue – augmentation de la résolution, vision 3D, imagerie multi-spectrale (plusieurs « couleurs » infrarouges).

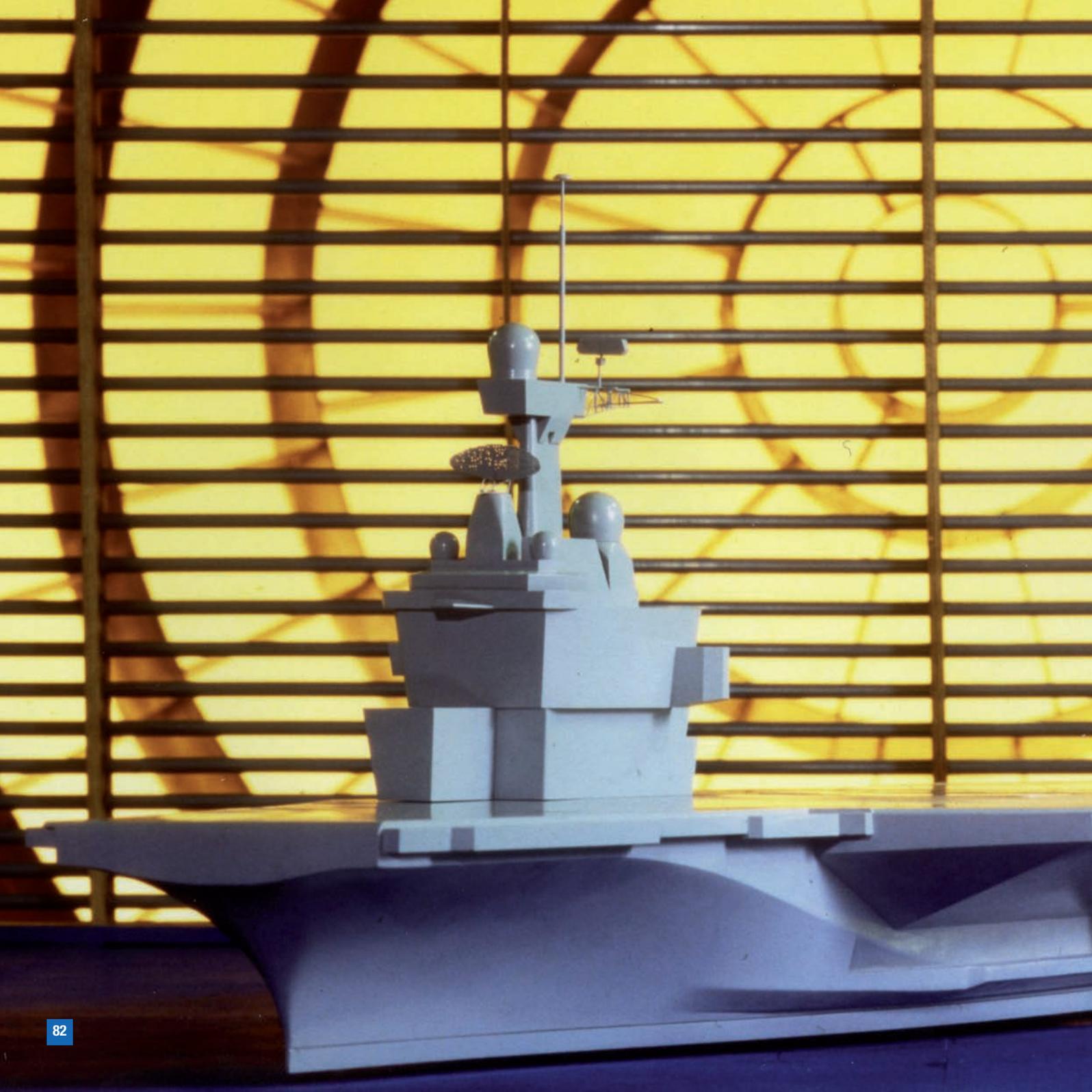
La nanophotonique, l'optique sans optique

L'ONERA met au point des concepts d'applications de détection infrarouge en rupture avec les technologies actuelles. Les propriétés des dispositifs par rapport à la lumière n'y dépendent pas d'optiques comme des lentilles, mais interagissent selon des structures gravées dans la matière... à l'échelle micro-métrique, voire nanométrique.

Premiers prototypes au point : « Vitrail », mosaïque de nano-filtres pour de l'imagerie multi-spectrale, « Or noir » pour absorber totalement plusieurs « couleurs », « Entonnoir à photons » pour détecter de très faibles flux de photons. Applications : sécurité (détection de mouvement), caméras ou détecteurs de polluants pour mini ou nano-drones, cryptographie...

De fructueux enrichissements mutuels se font avec le Laboratoire de photonique et de nanostructures du CNRS.





De l'air à la mer

Jusqu'au début des années 2000, l'ONERA est intervenu dans la conception et la mise au point du système de pilotage du porte-avions *Charles de Gaulle* et des frégates de type *La Fayette*.

Catapulter et faire apponter des avions sur un porte-avions, en toute sécurité, même dans des mers très formées : c'est le défi relevé dans les années 80 par les ingénieurs de Naval Group, avec le concours des ingénieurs de l'ONERA. Prédire en temps réel certains mouvements du navire pour mieux les contrôler, c'est une des clefs qui ont présidé au développement d'un système original de pilotage et de stabilisation des mouvements du navire, le SATRAP (Système Automatique de TRANquillisation et de Pilotage).

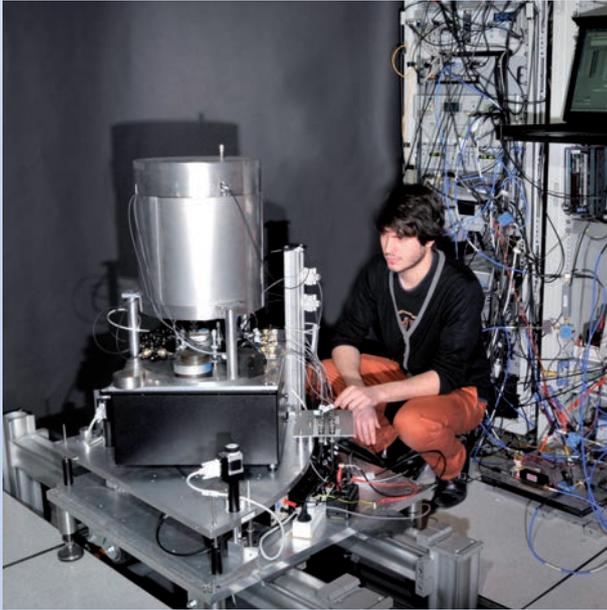
En complément des gouvernes classiques qui permettent de tranquilliser le comportement du Charles de Gaulle et d'assurer la mise en œuvre des avions par gros temps, un système de 12 masses mobiles en transversal sous le pont d'envol (22 tonnes chacune), baptisé COGITE, permet de limiter l'inclinaison latérale du pont d'envol. L'ONERA a également mené des essais en soufflerie sur maquette afin de caractériser les efforts aérodynamiques induits par le vent sur la carène et les super-structures.

En surface mais également sous l'eau...

Jusqu'aux années 2000, les pilotes automatiques de tous les sous-marins français ont été conçus à l'ONERA : ceux des navires à propulsion nucléaire, SNA et SNLE (du *Redoutable* au *Terrible*), mais aussi ceux des nouvelles versions de l'*Agosta* et du *Scorpène*.

Bien au-delà des pilotes d'évolution en eau calme, l'ONERA a fait évoluer de manière spectaculaire les techniques de pilotage notamment en ce qui concerne la stabilisation sous houle en immersion périscopique (et en phase de tir pour les SNLE). Les premières études ont ainsi débouché sur la suppression des hydro-réacteurs coûteux et bruyants pour s'orienter vers une stabilisation automatique par mouvements d'eau. Afin de réduire encore plus les coûts et les bruits acoustiques, les études effectuées ont permis d'optimiser le dimensionnement des installations en répartissant au mieux l'effort global entre les barres et la pesée.





Les atomes froids de l'ONERA n'ont pas le mal de mer

Les ingénieurs physiciens de l'ONERA ont exploré « l'interférométrie à ondes de matière », une technologie « quantique » exploitant le refroidissement d'atomes par laser, technique qui valut le prix Nobel de physique 1997 à Claude Cohen-Tannoudji *et al.*

Ils ont proposé à la DGA, en collaboration avec le Service hydrographique et océanographique de la Marine (Shom), le projet audacieux de réaliser un gravimètre basé sur ce principe, embarquable sur un navire, capable de cartographier la gravité avec une précision et une rapidité inégalées. Fort d'une première expérience réussie, l'ONERA met au point un premier prototype dont la précision atteint quelque 10^{-9} g en laboratoire, puis l'instrument Girafe2 – capable de supporter les conditions de la navigation hauturière. Sur le bâtiment scientifique du SHOM, en manipe au large de Brest, Girafe2 améliorera les valeurs connues du champ de gravité, malgré une houle atteignant 6 m !

Applications possibles : géophysique, cartographie du champ de pesanteur, navigation sans GPS...

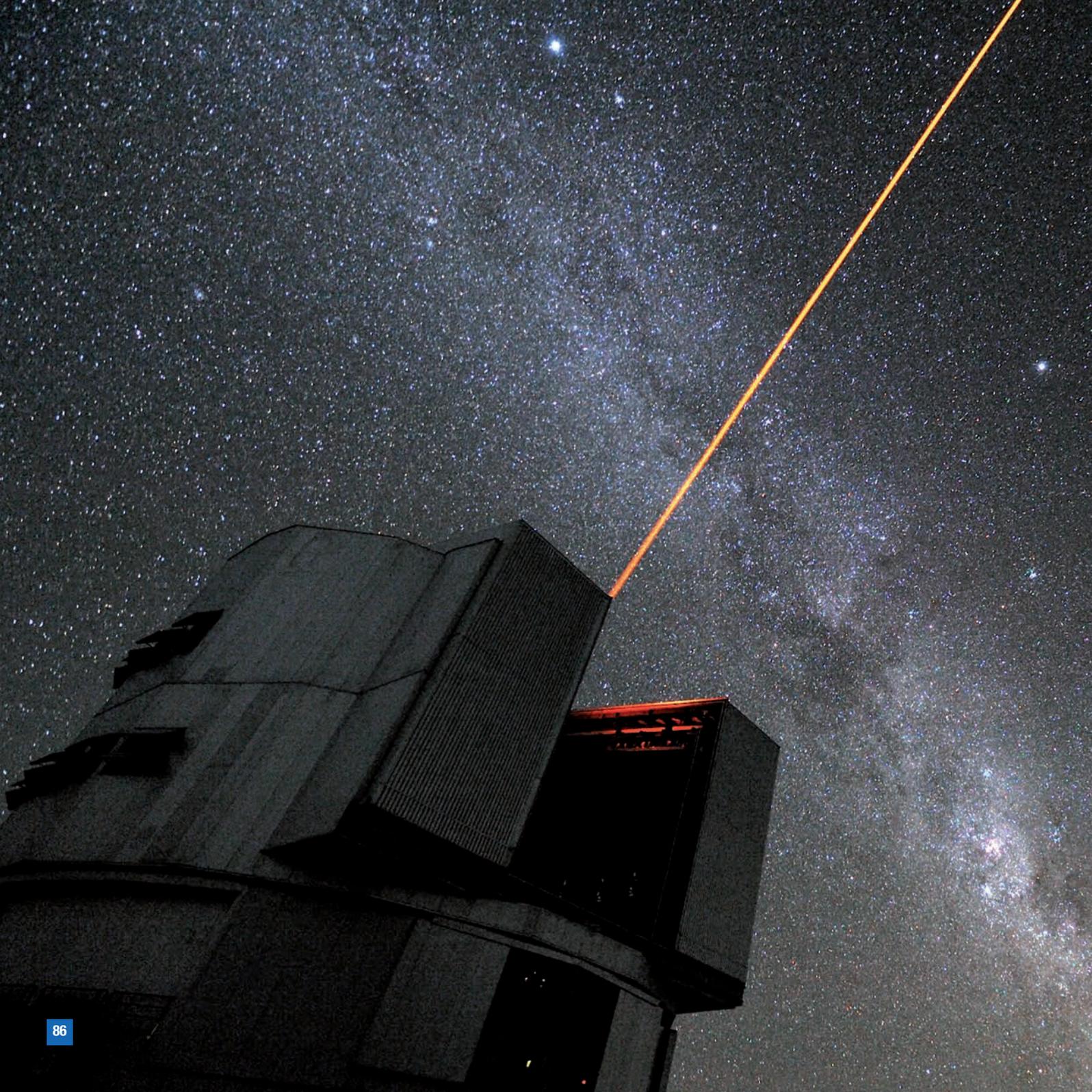
Girafe en mode aéroporté : une première mondiale

Le même gravimètre à atomes froids conçu pour la navigation maritime a été utilisé en vol en 2017 aux alentours du glacier Vatnajökull en Islande, zone particulièrement intéressante pour l'étude de la fonte des glaces et des activités volcaniques.

Cette collaboration avec l'Université technologique du Danemark s'est faite dans le cadre d'études sur les effets du réchauffement climatique. Cette mission fut une excellente opportunité de valider cette technologie des atomes froids, devenue spécialité de l'ONERA, pour cartographier la gravité en mode aéroporté.

Issue d'expériences de physique fondamentale menées dans les années 2000, cette technique fournissant des valeurs très précises et absolues (recalages inutiles) a donc débouché sur un démonstrateur technologique utilisable en conditions quasi-opérationnelles.





Une optique adaptative cinq étoiles

Le scintillement que l'on constate en observant les étoiles est dû aux turbulences atmosphériques. Ainsi, une prise de vue photographique depuis la Terre produit une image floue, par rapport à une image qui serait prise sans turbulence, par exemple depuis l'espace.

Suite à des travaux pour la Défense, destinés à contrer les effets de la turbulence sur la propagation de rayons lasers dans l'atmosphère menés au début des années 1980, les chercheurs de l'ONERA sont devenus des experts internationaux de l'optique adaptative pour l'astronomie. La technique repose sur un miroir déformable qui « redresse » le flux lumineux provenant de l'objet observé, suivant les consignes fournies par un analyseur ad-hoc. Le *Very Large Telescope* de l'ESO au Chili s'est doté de l'équipement ONERA Naos (2001), sur un télescope de 8 m, ce qui a conduit à la première observation directe d'exoplanètes. Puis Saxo (2014) sur l'instrument Sphere du VLT, véritable imageur de planètes extra-solaires. Prochain défi : l'optique adaptative (OA) de l'*Extremely Large Telescope* européen (eELT) qui sera doté d'un miroir de 39 m.

L'œil, autre milieu de prédilection pour l'OA

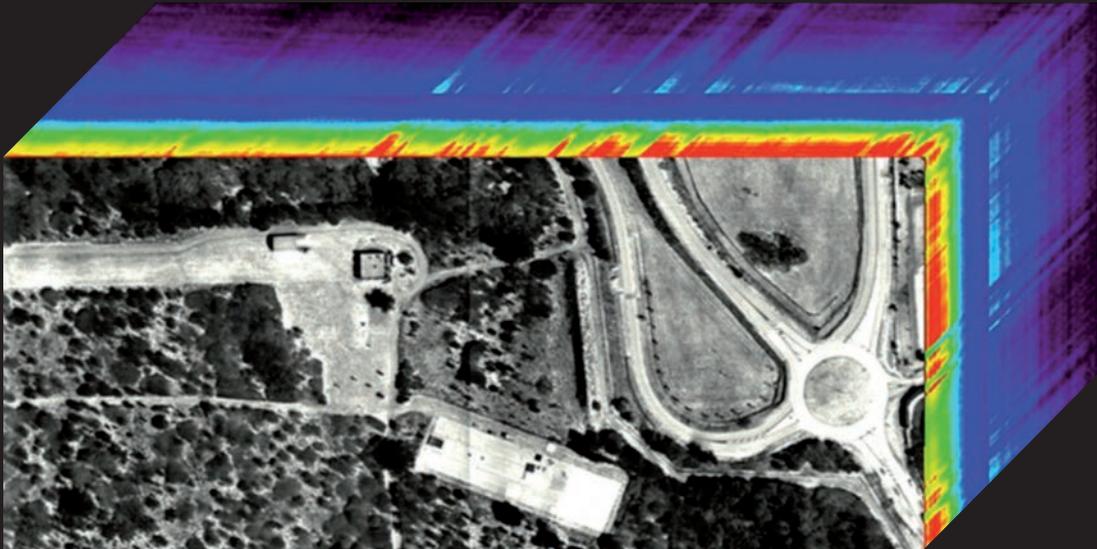
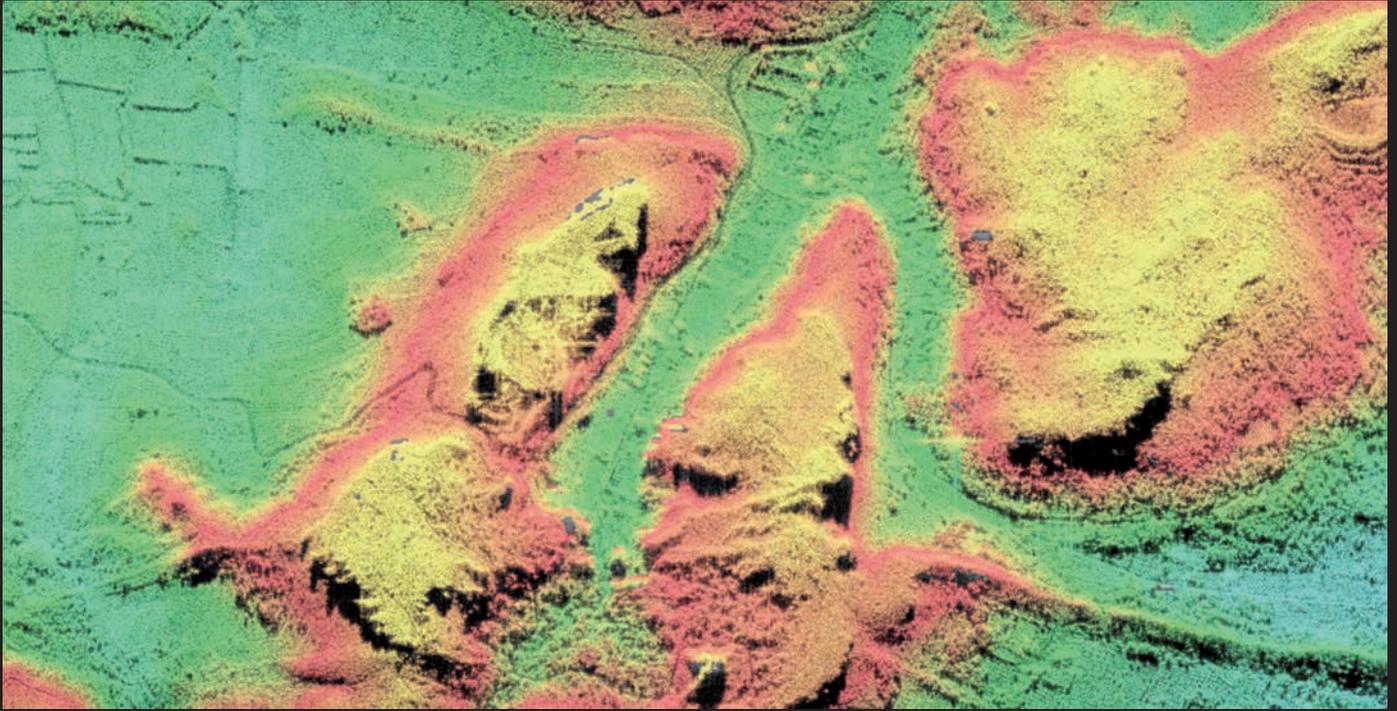
Laboratoire phare de la technique de l'optique adaptative au niveau mondial, l'ONERA transfère sa compétence à l'ophtalmologie. L'observation du fond de l'œil pose des problèmes voisins de ceux de l'astronome qui observe

les étoiles. En corrigeant les aberrations optiques dues au cristallin et au corps vitré, l'OA permet d'observer la rétine avec une très haute résolution. Des progrès très attendus en matière de diagnostic médical et en chirurgie laser.

Par ailleurs, en biométrie, l'ONERA est leader d'un projet dont l'objectif est de développer un système d'OA bas coût de reconnaissance de l'iris. Une technique d'identification très prometteuse, car beaucoup plus fiable que les traits du visage ou les empreintes digitales.

C'est un exemple emblématique de transfert d'avancées technologiques vers d'autres secteurs. La valorisation hors aérospatial fait partie des missions de l'ONERA.





Nouvelles télédétections, nouvelles vues sur la Terre

Ramses-NG, Sysiphe : deux démonstrateurs technologiques pour voir l'invisible au sol.

La technique radar SAR (*Synthetic Aperture Radar*) de Ramses-NG aéroportée utilise une antenne compacte qui tire parti du déplacement de l'avion pour obtenir une grande résolution d'image, après traitement des données. Pour la Défense, l'ONERA développe ce moyen radar qui permet la cartographie jour/nuit par tous temps, la classification d'objets et de milieux, la réalisation de modèles numériques de terrain, la détection d'objets enterrés ou sous couvert...

Alors que la photographie recueille le rouge, le vert et le bleu, une caméra hyperspectrale acquiert des centaines de « couleurs », y compris dans l'infrarouge, formant un cube d'images très riche sur les détails de la zone observée. Sysiphe, projet DGA piloté par l'ONERA, est un moyen innovant hyperspectral unique en Europe : il offre une image du sol avec une résolution de 50 cm dans plus de 500 bandes de couleurs, du visible à l'infrarouge lointain, exploitable par exemple pour la détection de cibles même camouflées, la caractérisation d'effluents, la détection de mines, de souterrains...

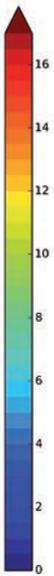
Lima, l'imagerie aéroportée ouverte à tous

Lima est la plateforme de recherche ONERA pour développer l'utilisation civile des nouvelles technologies d'imagerie aéroportée – hautes résolutions spatiale et spectrale, imagerie laser 3D. L'ONERA propose là à ses partenaires et clients des campagnes aéroportées clé en main, du besoin aux données exploitées.

Un des principaux moyens de Lima est le pod Sethi, un dispositif aéroporté doté de capacités radar SAR et hyperspectrales. Les champs d'application sont nombreux : agriculture, urbanisme, détection et caractérisation de pollutions, feux de forêts, accidents industriels, inondations, surveillance de sites, de frontières, prospection de ressources, météorologie, archéologie...



Rain attenuation at 30 GHz dB
exceeded 0.1% of the time



Les experts de la bande Ka (prononcer K-A)

La bande Ka est à la diffusion de l'internet par satellite ce que la bande FM est à la radio terrestre : une gamme de fréquences radio particulièrement adaptée à son usage. La bande Ka commence à être exploitée en Europe et présente de nombreux avantages, comme un accès haut débit à coût comparable aux offres terrestres, des antennes plus petites... Néanmoins cette bande de fréquences est sensible aux atténuations atmosphériques : pluie, nuages, vapeur d'eau.

L'ONERA, suite à des travaux pour la défense dans les années 90, a mis ses compétences au service du CNES, de l'ESA, des industriels et des opérateurs. A partir de mesures de propagation et d'exploitation de données météorologiques, l'ONERA a construit des modèles capables de prédire l'affaiblissement des signaux, et la disponibilité de service. Ces modèles sont utilisés, en Europe et au-delà, comme outils d'aide à la conception des futurs systèmes de communication par satellites.

Ka, c'est aussi l'altimétrie satellitaire au cm près

La bande Ka a d'autres atouts que la communication. Elle est par exemple particulièrement adaptée à l'imagerie radar SAR pour réaliser des mesures environnementales de très bonne résolution spatiale avec des hauteurs au centimètre près.

L'ONERA est appelé par les agences spatiales pour évaluer, qualifier de nouveaux systèmes d'imagerie en bande Ka. Il dispose du Busard, un moto-planeur équipé d'un pod pouvant embarquer de tels systèmes. L'équipe de spécialistes de l'imagerie radar SAR, autour du moyen aéroporté, fait de l'ONERA un centre d'excellence pour cette technologie de rupture au service de l'environnement.

L'ONERA a ainsi participé à la préparation de la mission CNES-NASA SWOT qui mesurera la dynamique des hauteurs d'eau continentales et océanographiques de façon beaucoup plus précise qu'auparavant.





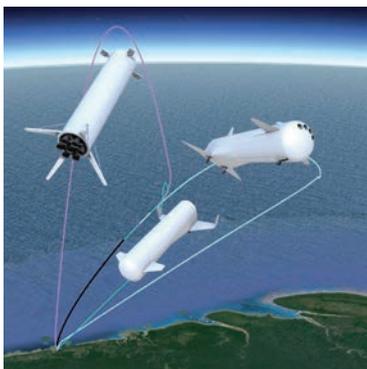
Lanceur réutilisable : du concept au démonstrateur

L'ONERA réfléchit depuis une douzaine d'années déjà au concept d'un lanceur partiellement réutilisable pour petits satellites (jusqu'à 150 kg de charge utile). Mené en partenariat avec le CNES et des étudiants, Perseus doit valider la faisabilité de remplacer le premier étage d'un lanceur classique par un aéronef automatisé et réutilisable. Cette étude a abouti à un démonstrateur à l'échelle 1/3, appelé Eole, construit avec Aviation Design, qui a volé lors de plusieurs campagnes d'essais.

Au vu des bonnes performances, le projet est devenu européen. Altair doit approfondir la faisabilité d'un tel concept à coûts réduits, incluant également les installations sol. Débuté en 2015 le projet Altair mobilise 8 partenaires européens, pour, peut-être, aboutir à un programme industriel. L'ONERA pilote le projet, apportant son savoir-faire et ses outils pour le développement multidisciplinaire optimisé de ce concept. Avec le fort développement des constellations de micro ou nano satellites, à l'instar de OneWeb, un tel projet pourrait devenir un succès industriel et commercial.

Du léger au lourd

Impliqué depuis le début de l'aventure Ariane, l'ONERA, important partenaire d'ArianeGroup, apporte son expertise au programme Ariane 6. Tourné vers l'avenir, l'ONERA réfléchit aussi à l'après Ariane 6. Sous la dénomination d'Ariane Next, l'ONERA étudie et défriche avec le CNES la faisabilité d'un concept européen de lanceur lourd réutilisable. Plusieurs pistes sont explorées : un retour avec un atterrissage en position verticale, un retour en vol plané ou en vol propulsé avec un atterrissage conventionnel, à l'image de la Navette.





Préparer les satellites à une vie d'agressions

Avant la conception d'un satellite (ou de tout autre système spatial), il est impératif de prédire les phénomènes qu'il pourra subir en vol. Les radiations solaires et cosmiques, les particules chargées (protons, électrons, ions) sont en effet un réel danger pour les matériaux de surface et surtout les électroniques, très vulnérables dans l'espace.

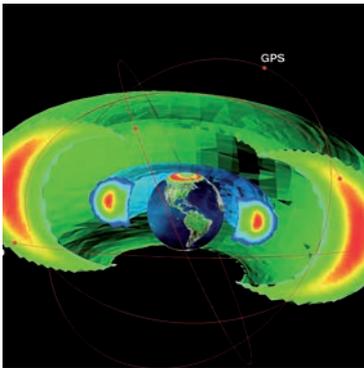
L'ONERA possède l'expertise qui lui permet de spécifier les tests à faire au sol en fonction de chaque mission spatiale, et dispose de tout un ensemble de moyens expérimentaux et numériques pour les mettre en œuvre. Il s'agit de caractériser globalement les effets de l'environnement qui menaceraient l'intégrité du satellite, afin d'en tenir compte en conception.

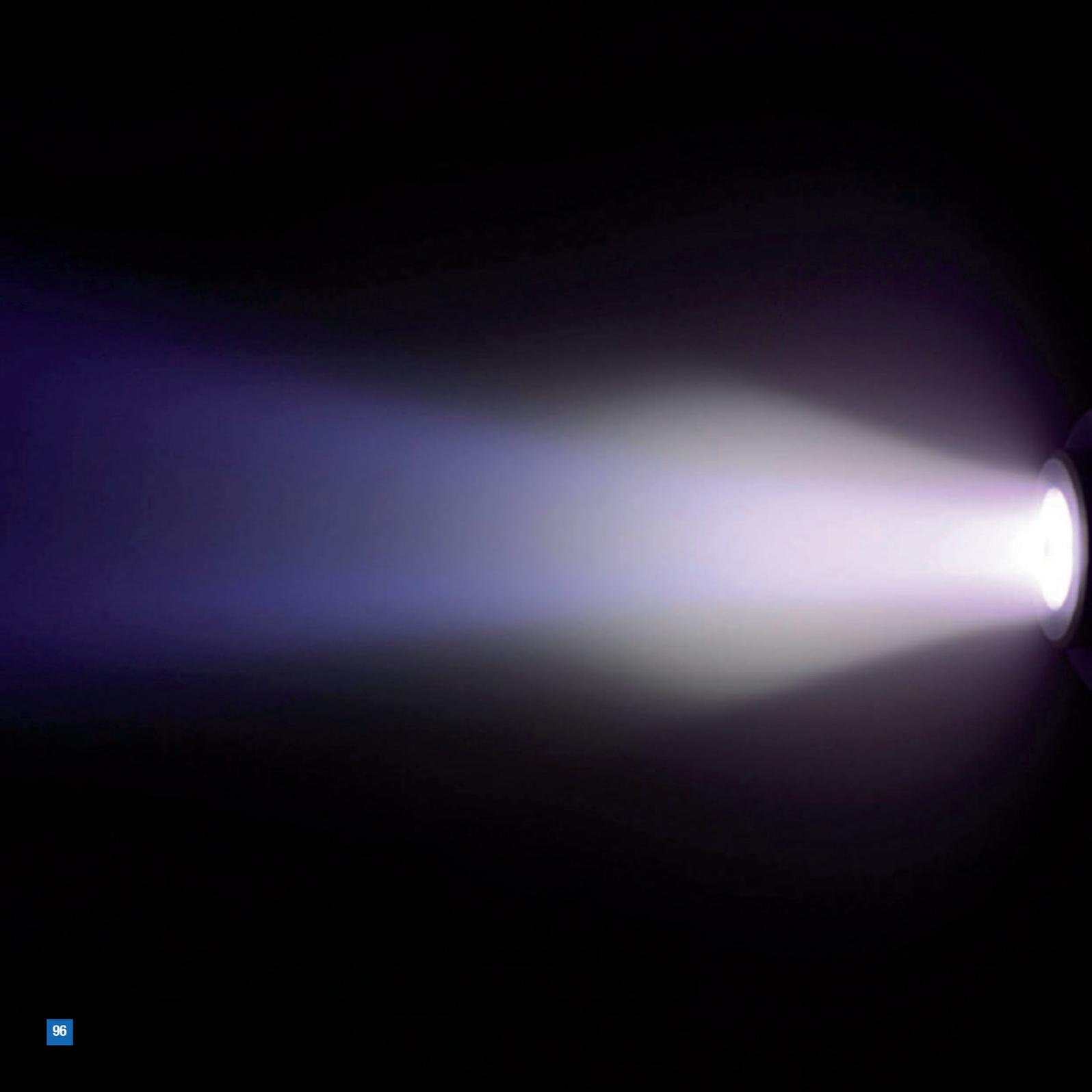
L'expertise de l'ONERA pour l'évaluation de la charge électrostatique des satellites et pour la prédiction des événements singuliers dans les électroniques est reconnue au plus haut niveau mondial. Les agences spatiales (ESA, CNES, NASA, JAXA...), les industriels du satellite et de nombreux concepteurs de composants lui font confiance.

Salambô, modèle physique des ceintures de radiation

Les ceintures de radiation ou ceintures de Van Allen sont des zones toroïdales situées autour de la Terre. Elles contiennent une très grande quantité de particules énergétiques, issues du vent solaire et du rayonnement cosmique, piégées par le champ magnétique terrestre. Il est capital de préparer les satellites à affronter cet environnement potentiellement très agressif, d'autant plus que le nouveau mode de propulsion – électrique – augmentera les temps de transit.

Le modèle physique Salambô, que l'ONERA enrichit depuis plus de 20 ans, permet de modéliser tous les phénomènes mis en jeu dans la magnétosphère lors des orages géomagnétiques. C'est un outil de météorologie spatiale. Salambô s'appuie sur une base de mesures en vol unique au monde. Sa notoriété est mondiale.





La propulsion spatiale passe au tout électrique

La plupart des satellites utilisent des propulseurs, que ce soit pour le contrôle de leur orientation, le maintien à poste, ou bien le transit de l'orbite de transfert à l'orbite géostationnaire.

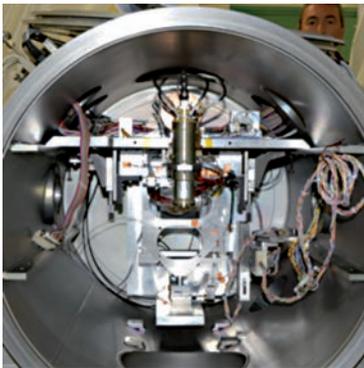
Un propulseur électrique utilise l'électricité des panneaux solaires pour transformer du gaz en plasma et l'accélérer à une vitesse de plusieurs dizaines de km/s (c'est ce qui crée la poussée). Utiliser l'énergie solaire plutôt que l'énergie chimique du propergol peut faire économiser à un gros satellite en transit jusqu'à 2 tonnes de combustible, soit 20 M€ au lancement. Inconvénient : le transit dure quelques mois de plus. La France et l'Europe entendent bien être sur ce marché où sont déjà les américains.

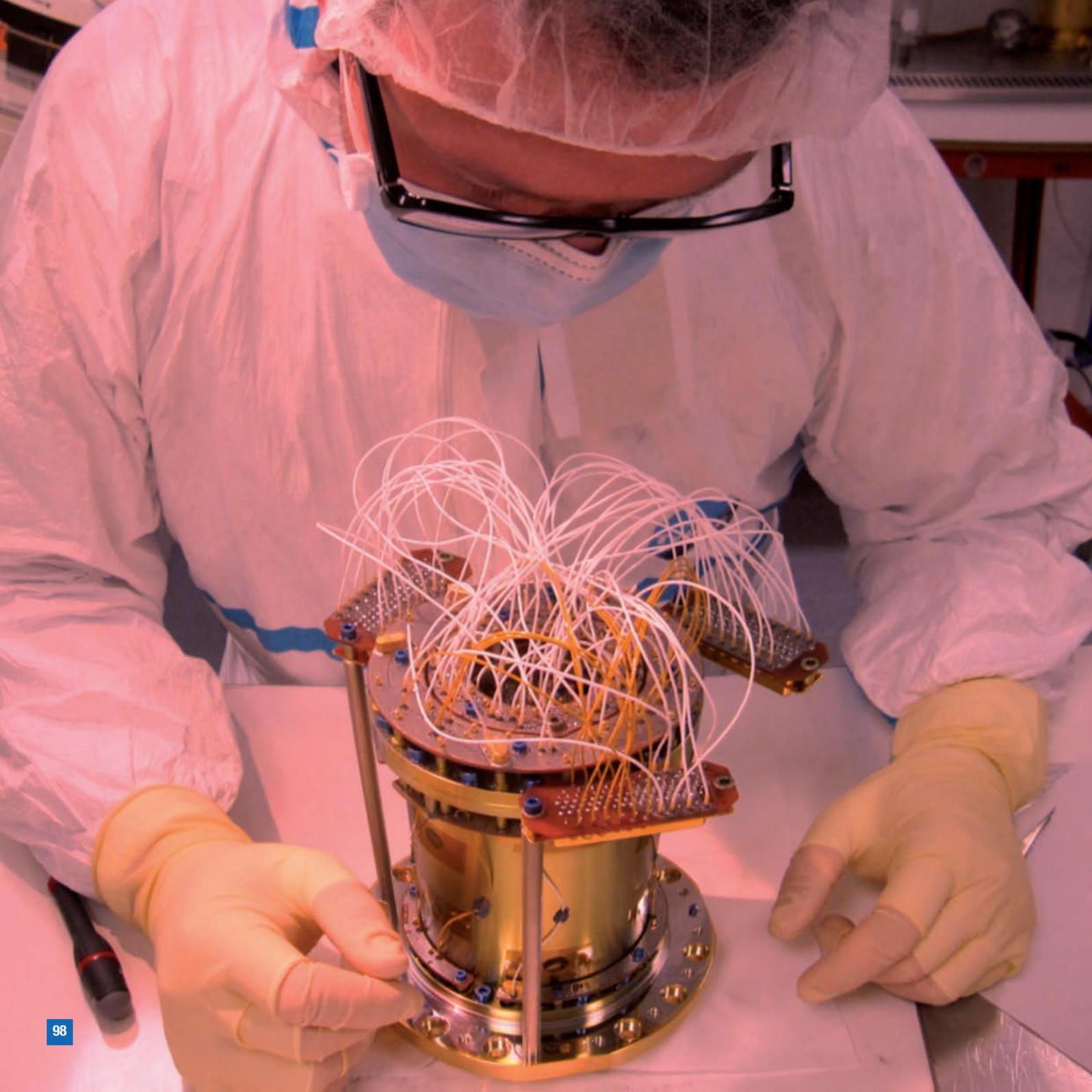
L'ONERA, soutenu par le CNES et l'ESA, développe des moyens de mesure innovants pour tester ces propulseurs électriques ou plasma : diagnostics laser et électriques, balance ultra-précise. L'ONERA développe aussi sa propre technologie, brevetée en 2011 : la propulsion à tuyère magnétique (Ecra), qui promet par son efficacité de réduire encore le coût du lancement.

La meilleure balance de poussée spatiale européenne est à l'ONERA

La balance micronewton de l'ONERA est extraordinairement précise : elle mesure des poussées entre 0,1 μN et 2 mN. C'est la plus performante en Europe (0,1 μN correspond environ au poids d'1 mg sur Terre).

Elle a été sélectionnée par le CNES et l'ESA pour effectuer les tests de recette des propulseurs de précision – à gaz froid – de la mission Gaia (cartographie de la Galaxie, 2013) et de Lisa Pathfinder (cosmologie, 2015). Elle validera également les micro-propulseurs de compensation de traînée de la mission CNES-ONERA Microscope (physique fondamentale, 2016).





L'accélérométrie spatiale, un leadership mondial de l'ONERA

Etudier globalement les courants marins et la fonte de glaces, cartographier la gravité terrestre, mieux connaître ce qu'il y a sous la croûte terrestre, vérifier les lois les plus fondamentales de la physique, évaluer les variations de position des satellites... Comment fait-on tout ça ? Avec les accéléromètres spatiaux de l'ONERA !

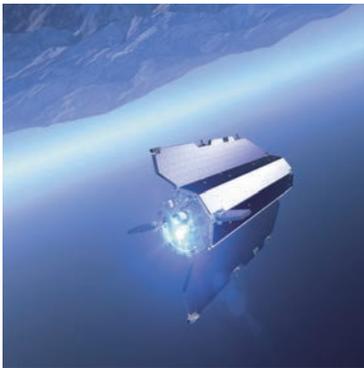
Ces instruments, de véritables balances ultrasensibles, développés par l'ONERA depuis plus de cinquante ans, permettent de mesurer les accélérations à partir des mouvements d'un corps en lévitation dans un champ électrostatique avec une précision record, jusqu'à 10^{-15} m.s⁻². NASA, ESA, CNES font confiance à l'ONERA pour des missions spatiales de sciences de la Terre ou de physique fondamentale qui s'appellent Champ, Grace, Grace Follow-On, Goce, Microscope...

Au départ, une « fausse bonne idée »

La découverte des accéléromètres est née d'une bonne intuition des aérodynamiciens de l'ONERA. Au début des années 1960, ils cherchent un moyen de suspendre les maquettes en soufflerie sans utiliser ni support ni fil. Ils

choisissent de les faire léviter, c'est-à-dire de les sustenter dans un champ électromagnétique. Mais la lévitation est très instable : le projet est abandonné.

L'idée est reprise par des physiciens : ils emprisonnent une bille dans une petite cage sphérique, et la maintiennent en lévitation dans un champ électrique. Les variations d'accélération de l'ensemble tendent à faire bouger cette masse, qui se rapproche alors d'une des parois du réceptacle. Un asservissement fait varier le champ électrique, afin de maintenir cette masse centrée. Ce sont ces variations du champ électrique qui fournissent la mesure de l'accélération.



ONERA
Direction de la communication
Août 2017

Conception : Sylvain Gaultier
Rédaction : Sylvain Gaultier, Guillaume Belan
avec les ingénieurs-chercheurs de l'ONERA
Maquette : Philippe Bernou

Crédits images

ONERA
Dernière de couverture à gauche, FCAS : Dassault Aviation ;
à droite, lanceur Eole : CNES/ONERA/Aviation Design
P. 8, hélicoptère EC155 : DLR
P. 9, pale "Blue edge" : Eurocopter/Patrick Gertner
P. 13, missile ASMPA : Daniel Bechennec
P. 38, maquette Falcon 7X : ONERA-Dassault Aviation
P. 43, avion Rafale : USAF/Capt. Jason Smith
P. 45, essais vibrations : DLR
P. 48, moteur M88 : Snecma-Safran/Philippe Stroppa
P. 62, Rafale : Armée de l'Air
P. 64, satellites : CNES
P. 84, navire Beautemps-Beaupré : Franck Seurot/Marine Nationale
P. 86, VLT : ESO/G. Hüdepohl (atacamaphoto.com)
P. 99, Goce : ESA-AOES Medialab
Thinkstock

ISBN 13 : 978-2-7257-020-5

Principales abréviations utilisées

| | |
|--------------|--|
| CEA | Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives |
| CNES | Centre national d'études spatiales (agence spatiale française) |
| CNRS | Centre national de la recherche scientifique |
| DGA | Direction générale de l'armement |
| DGAC | Direction générale de l'aviation civile |
| DLR | Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (centre de recherche aéronautique et agence spatiale allemande) |
| DMA | Délégation ministérielle pour l'armement (1961-1977) |
| EASA | Agence européenne de la sécurité aérienne |
| ESA | Agence spatiale européenne |
| ESO | Observatoire européen austral |
| FAA | Federal Aviation Administration (administration de l'aviation civile aux États-Unis) |
| JAXA | Japan Aerospace Exploration Agency (agence d'exploration aérospatiale japonaise) |
| NASA | National Aeronautics and Space Administration (centre de recherche aéronautique et agence spatiale américaine) |
| OTAN | Organisation du traité de l'Atlantique nord |
| SAR | Synthetic Aperture Radar |
| SGDSN | Secrétariat général de la défense et de la sécurité nationale |
| SHOM | Service hydrographique et océanographique de la Marine |
| UAS | Unmanned Aerial System |

ONERA



THE FRENCH AEROSPACE LAB



LES PÉPITES DE L'ONERA



ONERA

THE FRENCH AEROSPACE LAB

ONERA - BP 80100 - 91123 PALAISEAU CEDEX - Tél. : +33 1 80 38 60 60 - Fax : +33 1 80 38 65 10

www.onera.fr