

LA FEUILLE DE ROUTE SCIENTIFIQUE ET TECHNOLOGIQUE DE L'ONERA



LA FEUILLE DE ROUTE SCIENTIFIQUE ET TECHNOLOGIQUE DE L'ONERA





Bruno SAINJON
président-directeur général
de l'ONERA

Les feuilles de route de l'ONERA expriment notre vision de l'avenir pour la défense, l'aéronautique et l'espace, avec pour objectif d'anticiper les besoins de nos principaux partenaires, étatiques et industriels.

Cette mise à jour de la "Feuille de Route Scientifique et Technologique de l'ONERA", version publique de nos feuilles de route, décrit de manière transparente, concrète et ambitieuse, comment nous comptons exercer notre mission d'organisme de recherche finalisée. Nous venons par ailleurs d'engager les réflexions pour sortir en 2024 une nouvelle version de notre plan stratégique scientifique qui, lui, déclinera notre vision de l'avenir par disciplines scientifiques. En 2019, nos premières feuilles de route étaient attendues par nos partenaires. Et les témoignages de satisfaction ont été légion. Notre Contrat d'Objectif et de Performances (COP), signé le 3 mars 2022 avec la ministre des Armées, le rappelle : il consacre une place importante à nos feuilles de route, aux attentes qu'elles ont générées et à la place primordiale que veulent leur accorder les services de l'Etat, en premier lieu la direction générale de l'Armement (DGA), dans la structuration de nos échanges.

Dans le domaine de la défense, nos travaux contribuent à l'excellence des matériels opérationnels notamment dans de très nombreux domaines de souveraineté : dissuasion tout d'abord, pour les deux composantes océanique et aérienne, spatial militaire, aviation de combat, renseignement ... Leur importance pour le ministère des Armées se traduit par les niveaux de commandes records de la DGA vers l'ONERA depuis 2020.

Dans le domaine de l'aéronautique, la place importante que nous consacrons à la réduction de l'empreinte environnementale du transport aérien civil nous a valu de renforcer notre rôle au sein du Conseil pour la Recherche Aéronautique Civile et a permis à la recherche et à la science d'être bien présentes dans le plan de relance du Gouvernement. Le haut niveau des commandes de la direction générale de l'Aviation civile vers l'ONERA depuis 2021 le confirme.

Dans l'ensemble de nos activités, les excellents résultats obtenus ces dernières années dans les appels à projets européens, dans les trois volets défense, aéronautique et spatial, les records mondiaux établis, ou encore la décision unanime des 26 autres membres de l'IFAR, l'association mondiale des établissements publics de recherche dans le domaine de l'aéronautique qui compte parmi ses membres la NASA, l'Agence d'exploration aérospatiale japonaise (JAXA), le Conseil national de recherches Canada (NRC), le Centre allemand pour l'aéronautique et l'astronautique (DLR) ... , d'en confier en octobre prochain la présidence à l'ONERA pour deux ans sont autant de témoignages de l'excellence de nos équipes, de leurs travaux et de leur reconnaissance internationale.

2019, c'était hier mais depuis le monde a subi deux grands chocs avec les crises sanitaire en 2020 et ukrainienne en 2022. La première a provoqué l'accélération des travaux engagés pour la décarbonation de l'aviation ; la seconde a fortement influé sur l'avenir de notre défense à travers notamment les travaux de préparation de la prochaine loi de programmation militaire.

J'ai toujours affirmé que nos deux grands documents stratégiques que sont le plan stratégique scientifique et les feuilles de route sont des documents vivants que nous devons faire régulièrement évoluer. Notre troisième pierre angulaire, le récent COP, tient compte de la crise COVID et de ses conséquences. Il a toutefois été signé alors que la Russie attaquait l'Ukraine, et s'il ne pouvait bien sûr en tenir compte, il demeure un cadre au sein duquel nous apporterons des aménagements pratiques nécessaires, comme ce fut le cas pour le précédent COP.

Cette nouvelle version de nos feuilles de route prend donc en compte ce nouveau contexte. La reconnaissance de la valeur des équipes et projets de l'ONERA a conduit à élargir notre champ d'intervention, et aboutit sans surprise à un accroissement du nombre de feuilles de route, qui passent de 24 à 29.

Alors que le secteur aérospatial français, européen et mondial connaît une période de bouleversements et de profonde remise en question, le rôle de la recherche finalisée n'a jamais été aussi crucial : éclairer le futur. C'est-à-dire identifier les ruptures techniques ou scientifiques prometteuses, éliminer celles qui sont inatteignables ou inutiles, comprendre les enjeux futurs, pour anticiper l'avenir et offrir des perspectives ambitieuses. Pour que nos industriels demeurent au meilleur niveau mondial et que notre défense ait toujours un temps d'avance et repose sur des moyens crédibles et performants.

Cette feuille de route fixe donc nos grands axes de recherche, les directions vers lesquelles notre expertise, nos scientifiques et nos moyens d'essais uniques sont mobilisés pour jouer au mieux notre rôle d'expert étatique et pour soutenir l'industrie française et européenne.

Nos objectifs sont ambitieux. Certains seront atteints, d'autres peut-être pas, mais le risque est inhérent à la recherche. Le succès passe par là. Les défis à venir sont grands, mais soyez certains que nos ambitions le sont tout autant.

01 NOUVEAUX USAGES, MISSIONS ÉTENDUES

L'aéronautique civile et militaire est source d'évolutions technologiques et la raison d'être de l'ONERA est de les anticiper. Le secteur connaît une très nette accélération ces dernières années avec l'arrivée de nouvelles technologies clés qui permettent d'envisager de nouveaux usages et missions.

Ces dernières années, la recherche aéronautique a connu une très nette accélération avec l'émergence de plusieurs technologies clés qui ouvrent de nouvelles possibilités d'utilisation de l'espace aérien. Certaines de ces technologies permettent d'améliorer les capacités existantes et d'élargir le champ des missions réalisables.



■ Drones

On peut citer en premier lieu les progrès en électronique, informatique et miniaturisation des systèmes embarqués qui ont ouvert la voie au développement des drones. Leur essor est fulgurant et les possibilités offertes ont conduit à des usages extrêmement variés : personnels, récréatifs, professionnels, militaires... L'ONERA dispose de nombreuses compétences (touchant aux capteurs, comportement en vol, lutte anti-drone...) avec notamment un espace aérien dédié en Occitanie.

■ Aéronef électrique

Les performances et progrès des batteries ouvrent de nouvelles possibilités en termes de propulsion électrique. La transposition au secteur aéronautique se heurte pour l'instant à de sérieuses difficultés pour des avions gros porteurs. Mais ces avancées permettent d'ores et déjà d'envisager des applications pour des aéronefs de petites tailles. La propulsion électrique permet de repenser l'aéronef, comme l'a montré le projet Ampere (propulsion électrique distribuée pour les aéronefs) de l'ONERA pour ne citer qu'un exemple. Il est aussi bien adapté au décollage vertical ou court. Des solutions d'électrification partielle (hybridation électrique – thermique) sont aussi à l'étude, objet du projet européen Imothep (projet d'étude de la propulsion hybride électrique) coordonné par l'ONERA.

De nouveaux usages apparaissent, comme la mobilité à la demande. Ces solutions de mobilité en zones urbaines se développeront à conditions d'être souples, de proximité, avec un impact environnemental et acoustique réduit et avec un niveau de sécurité au moins équivalent à celui de l'aviation commerciale, autant de contraintes abordées par les scientifiques de l'ONERA.

■ Autonomie

Les progrès dans les capteurs et les systèmes embarqués permettent une navigation partiellement ou totalement au-

tonome. Ainsi, dans le domaine du transport civil, des travaux sont conduits sur les capacités de roulage, décollage et atterrissage autonomes (projet ATTOL avec Airbus). Les scientifiques de l'ONERA y travaillent, en étroite relation avec les industriels et disposent notamment de simulateurs très performants.

■ Voilures tournantes

Des développements qui s'appliquent aussi aux voilures tournantes avec des capacités de pilotage optionnel. Pour ces appareils, la recherche de nouvelle formule hélicoptère est motivée par de nouvelles performances ou utilisations. La mobilité aérienne urbaine en est une. Ou encore la grande-vitesse avec l'ajout d'une propulsion auxiliaire, thématique abordée par l'ONERA dans le partenariat de Clean Sky 2 (démonstrateur RACER avec Airbus Helicopters).

■ Le retour du supersonique ?

Autre tendance : l'avion supersonique civil pourrait renaître ! Avec des projets aux Etats-Unis, au Japon, en Russie ou encore en Chine. Une formule très exigeante tant au niveau de l'aérodynamisme que de l'intégration motrice, tout en maîtrisant l'impact sonore du bang sonique. Historiquement leader européen sur le sujet, l'ONERA continue de développer son expertise en utilisant pleinement les synergies entre les moyens numériques et expérimentaux inédits. Et il reste le référent national en cas de réglementations spécifiques « supersonique », alors que plusieurs organismes de recherche internationaux majeurs réinvestissent significativement sur le sujet.

L'étude de ces nouveaux usages et missions est un puissant stimulant pour la recherche. Car il s'agit de concepts d'emploi en rupture. L'ONERA possède les compétences disciplinaires pour traiter ces sujets et développe également des approches systèmes indispensables pour évaluer l'impact de l'intégration des nouvelles technologies.

Feuilles de route associées

- 1.1 - Aéronef électrique pour une mobilité à la demande
- 1.2 - Aéronefs autonomes et connectés
- 1.3 - Aéronefs à voilure tournante plus sûrs pour des missions étendues
- 1.4 - Physique du vol supersonique

02

RÉDUIRE L'EMPREINTE ENVIRONNEMENTALE



Feuilles de route associées

- 2.1 - Motorisation plus efficace à émissions réduites
- 2.2 - Cellule avion et intégration motrice innovantes
- 2.3 - Impact environnemental et climatique

Réduire les impacts environnementaux du transport aérien est une nécessité vitale. Décarboner l'aviation est d'autant plus crucial que la croissance du trafic aérien demeure élevée. L'ONERA, comme toute la filière, y est fortement engagé.

Limiter l'impact environnemental de l'activité humaine est devenu une priorité. C'est pourquoi l'ONERA recherche et étudie des solutions pour décarboner l'aviation. On distingue impacts climatiques globaux et impacts locaux, autour des zones aéroportuaires, liés à la qualité de l'air et aux nuisances sonores. Décarboner est d'autant plus important que la croissance du trafic aérien demeure élevée : si la crise sanitaire s'est traduite par un brusque effondrement du trafic aérien, force est de constater que le niveau de fréquentation se rapproche aujourd'hui de celui de 2019.



■ Impacts climatiques

Le premier impact climatique de l'aviation est lié aux émissions de CO₂ générées par la combustion du kérosène. Le secteur aérien est engagé depuis de nombreuses années déjà dans l'amélioration de son efficacité énergétique et l'ONERA y a fortement contribué. Depuis l'apparition des avions civils à réaction, la consommation et les émissions de CO₂ par passager-kilomètre ont baissé de près de 80% et la dernière génération d'avions affiche jusqu'à 25% de gain d'efficacité par rapport à la précédente. Des objectifs ambitieux de réduction des émissions de CO₂ sont fixés pour l'avenir. Ils passent par l'optimisation aérodynamique de l'avion (par exemple via les recherches sur les voilures de grand allongement), son allègement, l'accroissement de l'efficacité de ses moteurs et de leur intégration à la cellule (par exemple via le développement de motorisations de type open-fan : concept RISE de Safran), autant de compétences et de travaux numériques et expérimentaux menés dans les départements scientifiques et les souffleries de l'ONERA.

Mais l'amélioration de l'efficacité énergétique ne suffit pas à compenser l'effet de l'augmentation du trafic aérien. L'enjeu pour l'aviation n'est plus seulement la réduction de la consommation mais la décarbonation de ses sources d'énergie, au premier rang desquelles, le combustible. Ainsi les carburants de synthèse durables (biocarburants ou électrocarburants) ou l'hydrogène constituent des voies complémentaires de décarbonation des combustibles. Sur l'hydrogène en particulier, les chercheurs de l'ONERA concentrent leurs recherches d'une part pour assurer une combustion stable avec des très faibles émissions de NOx et d'autre part sur l'interaction entre l'hydrogène cryogénique et les matériaux des réservoirs et circuits carburants (phénomènes de fragilisation), ainsi que les phénomènes d'oxydation sur les aubes de turbine par les gaz riches en vapeur d'eau en sortie de chambre.

Par ailleurs, le CO₂ n'est pas le seul impact. Parce qu'elles sont rejetées à haute altitude, d'autres émissions contribuent à l'impact climatique au travers de mécanismes chimiques et microphysiques complexes. Pour le kérosène, les oxydes d'azote (NOx), formés par la combustion à température élevée, produit de l'ozone, un gaz à

effet de serre. La vapeur d'eau et les suies génèrent aussi des traînées de condensation qui peuvent persister et évoluer en nuages. Si l'impact de ces phénomènes est potentiellement nocif, sa compréhension et sa prévision sont un enjeu de recherche important pour l'aviation. C'est l'objectif de la convention pluriannuelle Clim'Aviation financée par la DGAC avec une très forte contribution de l'ONERA et du laboratoire IPSL du CRNS spécialiste des sciences du climat, tant l'incertitude sur ces effets non-CO₂ demeure élevée.

■ Impacts locaux

Concernant les impacts sur la qualité de l'air autour des aéroports, les principaux enjeux ont été jusqu'ici la réduction des émissions polluantes avec une attention particulière portée sur les NOx et les suies. Il s'agit ici d'enjeux liés à la combustion dans les turbomachines. Par ailleurs, l'emploi de nouveaux combustibles est susceptible de modifier significativement les émissions polluantes. Ceci est vrai pour l'hydrogène mais aussi pour les carburants de synthèse ne contenant ni soufre ni aromatiques. La prévision des pics de pollution générée autour des aéroports est aussi un sujet important.

Le bruit a quant à lui probablement été le premier impact du transport aérien à faire l'objet de travaux et de réglementations. L'effort ne s'est jamais interrompu et plus de 20 décibels ont été gagnés depuis le début des années 80 (bruit perçu divisé par quatre). Maîtriser les nuisances sonores des aéronefs suppose des travaux sur l'évaluation et l'atténuation du bruit à la source, pour la cellule et pour les moteurs, sur la propagation du bruit, l'optimisation des opérations et enfin sur le ressenti par les riverains en prenant en compte les aspects psycho-acoustiques : autant de sujets traités par les équipes de l'ONERA, alliant simulations numériques et mesures expérimentales.

Pour résumer, l'ONERA intervient à différents degrés sur l'ensemble des leviers de compréhension et de réduction des impacts environnementaux de l'aviation qui peuvent se décliner suivant trois objectifs de haut niveau : la réduction de la consommation et des émissions de CO₂ ; la réduction des émissions polluantes et de leurs impacts ; la réduction des nuisances sonores.

03 EFFICACITÉ, SÉCURITÉ ET CERTIFICATION DU SYSTÈME DE TRANSPORT AÉRIEN

Derrière le sujet aride de la certification d'un appareil se cache la capacité à peser dans l'élaboration des normes et des règles, qui conditionne le développement d'une industrie française compétitive en garantissant un trafic aérien sûr et efficace. L'ONERA actualise constamment son socle de connaissances, nécessaire à une compréhension des phénomènes physiques liés aux nouvelles technologies et aux nouvelles configurations d'avions pour assurer leur certificabilité.



L'amélioration des performances du système de transport aérien est un des leviers pour réduire l'impact environnemental de l'aviation, qui pourrait amener une réduction de 10% des émissions de CO₂. Ces améliorations se feront sans transiger sur la sécurité, garantie par le processus de certification, qui est une spécificité du secteur aéronautique : il doit assurer que la conception, l'exploitation et la maintenance de l'avion respectent les règles posées et la sécurité de tous. Ce processus est intimement lié au développement de l'avion et son coût représente jusqu'à 20 % du coût total de développement.



Feuilles de route associées

3.1 - Outils et moyens d'aide à la certificabilité des aéronefs futurs

■ Comprendre et maîtriser les risques

Les règles de certification sont interprétées en fonction des nouvelles technologies disponibles. C'est ce qui s'est produit avec l'A320 lorsqu'Airbus a introduit les commandes de vol électriques et des calculateurs à la place des traditionnelles commandes hydrauliques. La certification ne concerne pas simplement la mise en service mais continue pendant toute la durée d'exploitation de l'appareil. Nouvelles technologies, retours d'expériences et certification sont étroitement liés.

Soutenus par la DGAC, les spécialistes de l'ONERA conduisent des recherches à l'état de l'art sur la compréhension de risques très spécifiques comme par exemple le givrage, le feu ou encore le foudroiement des aéronefs. Il s'agit également de tenir compte de l'ensemble des risques liés à l'intégration de nouvelles technologies dans les aéronefs (avions de transport classiques ou nouveaux entrants dans l'espace aérien comme les drones) dans une approche système plus globale.

■ Certification numérique

L'ONERA travaille à adapter les processus de la certification aux nouveaux produits, grâce notamment aux progrès de la simulation numérique. Elle offre de nouveaux outils virtuels, des environnements de conception numérique et permet de connecter plus étroitement les bancs expérimentaux aux environnements numériques.

Les équipes de l'ONERA sont pleinement mobilisées dans cette digitalisation des activités de certification et favorisent l'appropriation par l'industrie d'outils nouveaux. Le terme de « digitalisation » couvre pour l'ONERA de manière globale la simulation et s'applique donc autant aux modèles qu'aux essais.

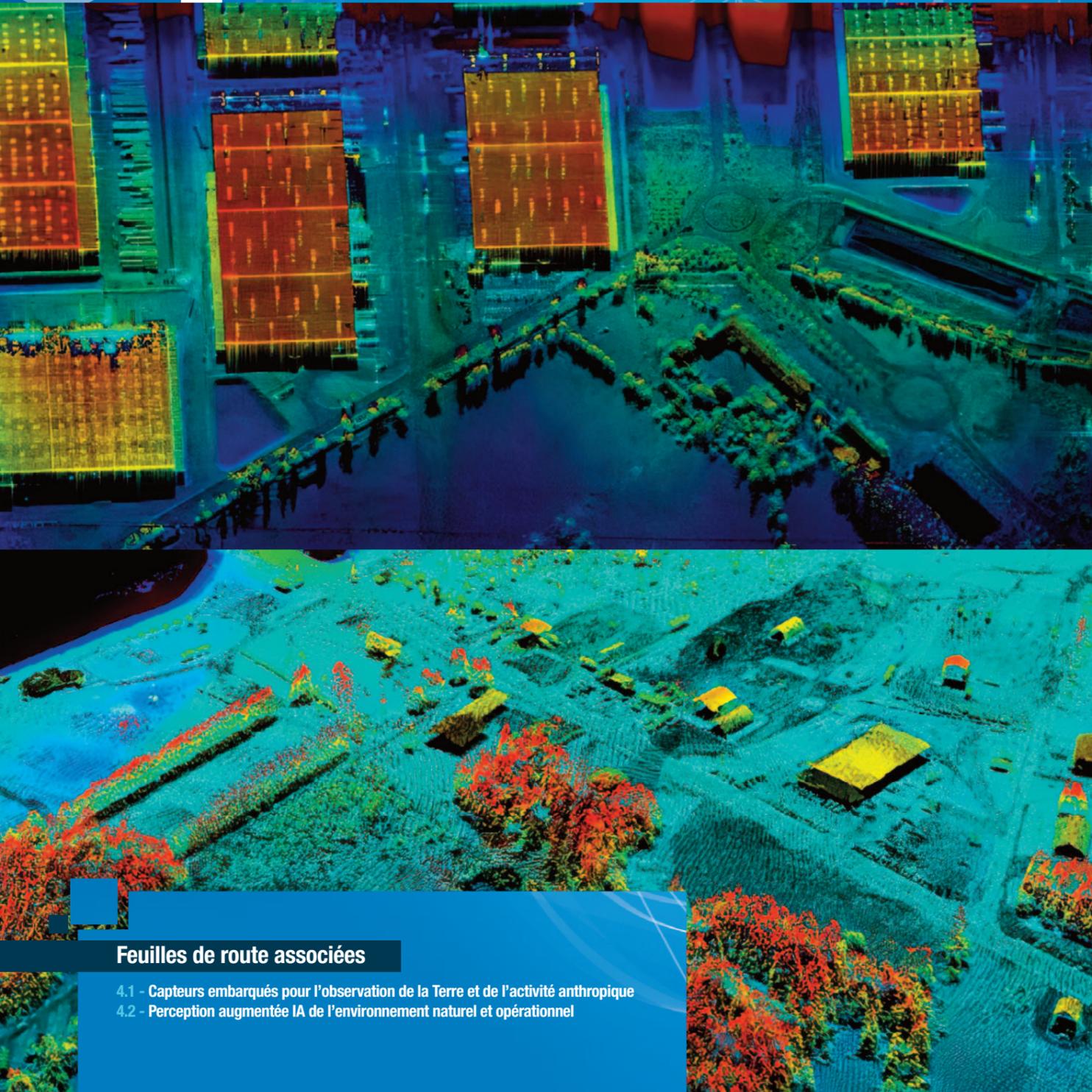
■ Vers des opérations aériennes plus vertes

Outre l'amélioration de l'efficacité du trafic aérien aux abords des aéroports (réduction des temps d'attente, optimisation des approches), des concepts opérationnels basés sur le vol en formation d'avions sur de grandes distances sont développés et mis au point grâce à des technologies avancées développées par l'ONERA, comme par exemple le Lidar permettant un positionnement précis et optimal de l'avion suiveur dans le sillage des avions précédents. Le but est de réduire la consommation de carburant et donc les émissions de CO₂.

Au-delà du CO₂, l'aviation a également un impact sur le réchauffement climatique au travers des traînées de condensation, conséquences de la condensation de la vapeur d'eau en sortie des moteurs émise à haute altitude : un objectif à moyen terme sera de s'approcher de la notion théorique de vol parfait, en optimisant les trajectoires en fonction d'un critère global d'impact climatique, tenant compte à la fois des émissions de CO₂ et des effets non-CO₂ (parmi lesquels ceux engendrés par les traînées de condensation).

04 SURVEILLANCE DE L'ENVIRONNEMENT OPÉRATIONNEL ET NATUREL

Sur un théâtre d'opération, améliorer sa capacité de vision peut être décisif : voir mieux, plus loin, avant les autres, avoir une vue d'ensemble, voir ce qui est masqué, la nuit et ce qui est inaccessible à l'œil nu. L'ONERA étudie tant la physique, l'optronique, les radars que l'optique, la radioélectricité et les traitements des données associées.



Feuilles de route associées

- 4.1 - Capteurs embarqués pour l'observation de la Terre et de l'activité anthropique
- 4.2 - Perception augmentée IA de l'environnement naturel et opérationnel

L'accès à des moyens d'observation performants permet une meilleure compréhension d'une scène. Parmi ces moyens, on distingue :

- l'optronique passif qui va de l'infrarouge à l'ultraviolet en passant par le visible ; on utilise ici les propriétés de réflexion (domaine visible et proche infrarouge) et d'émission (infrarouge thermique) de la scène observée,
- les lidars basés sur des lasers permettent d'obtenir des représentations de scènes en trois dimensions ou des informations sur l'état de l'atmosphère,
- les radars qui utilisent les propriétés réfléchives de la scène et des objets d'intérêt qu'ils illuminent. L'évolution des technologies font évoluer les radars vers des architectures

■ Optronique

L'ONERA étudie de nouveaux concepts permettant d'augmenter la quantité et la qualité des informations contenues dans les images par des méthodes telles que l'imagerie :

- multi et hyper spectrale utilisant différentes bandes spectrales (« couleurs » de la lumière) permettant de remonter à des propriétés physiques des surfaces ou de l'atmosphère (caractérisation des sols, détection d'objets camouflés, détection de gaz...).
- À base de lidars pour obtenir des images comportant également une information de distance (3D) ou de vitesse (du porteur, du vent...) mais aussi pour mesurer à distance des concentrations de gaz et d'aérosols
- À synthèse d'ouverture optique pour accéder à la très haute résolution angulaire ou pour recourir à des télescopes déployables.
- Utilisant l'optique adaptative pour corriger les images des effets de la turbulence atmosphérique ou les aberrations causées par l'écoulement autour d'un porteur aéroporté.
- Mettant en œuvre des techniques de coronographie afin d'être en mesure de détecter des objets peu lumineux proches angulairement de sources beaucoup plus lumineuses.

La mise au point de ces nouveaux instruments fait appel au développement de nombreuses briques technologiques comme : le développement de nouvelles sources laser, la nanophotonique, les optiques dites Freeform, les circuits photoniques intégrés, la co-conception de l'optique avec les traitements.

■ Radars

Le domaine radar bénéficiera des efforts qui porteront sur :

- l'imagerie radar à très haute résolution pour améliorer la qualité et la richesse des images grâce à des traitements prenant mieux

multistatiques. Les radars peuvent être actifs ou passifs en utilisant des émetteurs d'opportunité, ● les capteurs électromagnétiques utilisés dans le cadre des missions de renseignement d'origine électromagnétique, des systèmes multifonction pouvant aller jusqu'à combiner des fonctions radars, d'écoute et de communication.

Les moyens sont soit au sol pour détecter et suivre des objets aériens ou spatiaux, soit embarqués sur des plates-formes (aéronefs, satellites, missiles ou drones). Une attention particulière est portée aux altitudes intermédiaires entre « l'aérien et l'espace ». L'ONERA met l'accent sur le développement de capteurs plus performants et plus compacts pour s'intégrer dans de petites plates-formes spatiales.

en compte l'interférométrie, la polarimétrie et les aspects multispectraux.

- Les radars basse fréquence pour la détection transhorizon à très longue portée depuis le territoire national.
- L'emploi des basses fréquences pour leurs capacités de pénétration dans le sol ou le couvert végétal.
- L'amélioration de la prévision et de l'optimisation des signatures radars des avions notamment dans des conditions difficiles comme le vol au voisinage du sol ou de la mer, et pour des longueurs d'onde et des conditions d'éclairage très variées : radars anti-furtifs, radars très haute fréquence, radars aéroportés...
- L'utilisation d'émissions d'opportunité (télécommunications, télévision), ou du rayonnement propre (micro-ondes) pour l'observation radar passive, en vue de détecter, pister et, le cas échéant de former une image des objets.
- Les configurations multistatiques orchestrant simultanément différents types de radars dans des configurations géographiques ou sur des porteurs différents.

■ Deep learning

et intelligence artificielle (IA)

Le traitement des données connaît une révolution avec le « deep learning ». L'accès à des bases de données hétérogènes de grande échelle et à des moyens de calcul massifs associés à de grandes capacités de mémoire est la raison du succès qui a conduit à une véritable révolution plaçant la donnée au cœur des enjeux. À cet égard, l'ONERA dispose d'une position stratégique dans le domaine de l'IA pour les systèmes de surveillance et de perception grâce à sa triple compétence dans la maîtrise de données, des traitements et des capteurs.

05 NOUVEAUX CONCEPTS DE SYSTÈMES

Missiles, drones, satellites... La guerre est déjà et sera encore plus connectée, avec un recours toujours plus grand à des systèmes automatisés, dotés d'une certaine autonomie de comportement. Gestion de flux d'informatisation, miniaturisation, avancées et importance de l'intelligence artificielle ou moyen de communication de nouvelles générations sont autant de domaines d'expertise où l'ONERA éclairera les choix à venir.



Aujourd'hui, les progrès des technologies et des mathématiques appliquées permettent de concevoir des systèmes plus sophistiqués, capables d'une autonomie beaucoup plus poussée, voire de leur conférer un certain "niveau d'intelligence". L'objectif recherché est de parvenir à obtenir des gains significatifs dans la conception de ces systèmes, en termes de performances, de sécurité et de coût. L'ONERA étudie et évalue le processus de décision entre les opérateurs humains et les machines, avec notamment le partage d'autorité et la gestion des conflits.

■ Guerre en réseaux

Quel que soit le milieu, air, terre, océan et demain espace, les drones sont utilisés depuis de nombreuses années déjà. L'enjeu réside désormais dans une utilisation distribuée, multi-milieu, de différents types de plates-formes, en relation avec plusieurs centres opérateurs. L'ONERA s'intéresse fortement à cette problématique et s'emploie à montrer *in situ* le bienfondé des algorithmes développés

L'ONERA travaille également sur l'exploitation des flux massifs d'informations qui nécessite des approches nouvelles tant au niveau algorithmique (traitement des données, stockage, représentation abstraite de l'information, diffusion de l'information...) que système (traitements distribués et intelligents des ressources, implémentation robuste des architectures, gestion des communications, réparation et reconfiguration, interactions homme-système automatisées...).

La miniaturisation des composants (charges utiles, moyens de communication, capteurs...), les performances des processeurs embarqués, les moyens de communication tant en matière de débit proprement dit qu'en matière de sûreté permettent d'envisager diverses configurations entre vecteurs de taille réduite pour être redondant et complémentaires.

Les avancées attendues permettront notamment de démultiplier les capteurs et les effecteurs, de les rendre plus robustes à l'environnement et permettront aussi l'élaboration et le partage de la vision globale d'un théâtre d'opération entre les vecteurs et les opérateurs par l'intermédiaire de logiciels embarqués ou intégrés dans les centres de commandement et de contrôle.

■ IA et communication

Le projet est qu'à l'horizon 2040, des outils logiciels et méthodologiques issus des travaux de l'ONERA soient intégrés dans ces centres de commandement et sur les systèmes multirobots participant aux futures missions des forces armées françaises. La plus-value apportée par ces outils est l'augmentation de l'autonomie des systèmes de flottes robotiques, de la performance des charges utiles et de la synergie homme-machine. L'intelligence artificielle, utilisée en support d'aide à la conduite d'opération, doit permettre d'accélérer le cycle de la boucle OODA (Observation, Orientation, Décision et Action), de maîtriser le tempo des opérations, tout en réduisant l'incertitude, et ainsi de renforcer la performance et l'agilité des centres de commandement, tout en garantissant la transparence et l'auditabilité du système de drones autonomes et en minimisant la charge cognitive des opérateurs.

L'ambition portée par cet axe de recherche vise aussi à répondre au besoin de maîtrise technique des performances et des limites des moyens de communication de nouvelle génération. Il s'agit d'être en mesure, à l'horizon 2033, d'assumer le rôle de référent étatique pour les communications dans les systèmes aéronautique, espace et défense (AED), afin d'apporter au ministère des Armées et aux industriels du domaine l'expertise nécessaire à l'exploitation de moyens de communications sécurisés très performants mais sensibles aux perturbations de l'environnement.

Feuilles de route associées

- 5.1 - Systèmes coopératifs et interactifs sur théâtres d'opérations à horizon 2040
- 5.2 - Communications/connectivité pour les systèmes AED

06 SYSTÈMES D'ARMES CONVENTIONNELS DU FUTUR

L'ONERA est depuis 1946 un acteur majeur de l'aéronautique de combat, des hautes vitesses et de la défense aérienne. L'office bénéficie d'une expertise reconnue dans le cadre de sa mission d'assistance à maîtrise d'ouvrage au profit de l'État, d'une forte implication dans les programmes d'armement et de capacités à faire émerger des nouvelles technologies ou des concepts innovants.

Feuilles de route associées

- 6.1 - Aéronef hypersonique et aviation de combat
- 6.2 - Pénétration des défenses par des moyens conventionnels et survivabilité
- 6.3 - Défense aérienne et défense anti-missiles

Crimée, Haut-Karabakh et guerre en Ukraine, ces conflits, mais aussi la montée des tensions dans le Pacifique, nous rappellent que les confrontations de haute intensité entre grandes puissances n'ont pas disparu. Cette nouvelle donne géostratégique oblige à adapter notre système de défense. Depuis la création de l'Office, les femmes et les hommes de l'ONERA contribuent à proposer des évolutions technologiques disruptives afin de permettre à la France de maintenir sa capacité d'intervention militaire avec des systèmes d'armes conventionnels performants face aux nouvelles menaces émergentes. D'ores et déjà l'ONERA travaille, au côté du ministère des Armées, au travers de trois feuilles de route de l'axe 6, pour améliorer nos capacités d'intervention dans la profondeur, de réactivité face à la menace et de préservation de la supériorité aérienne.

■ Aviation de combat

Concernant l'aviation de combat, l'ONERA contribue à préparer l'avenir en étudiant différents concepts d'aéronef, y compris hypersoniques évoluant à des vitesses comprises entre Mach 4 et Mach 7. En effet, bien que ces derniers soient en marge du programme de système de combat aérien du futur (SCAF), ce domaine de vol fait néanmoins l'objet d'efforts de R&D particulièrement intenses aux USA, en Russie et en Chine et pourrait constituer une menace potentielle à prendre en compte pour le NGF (New Generation Fighter). Pour ce type de véhicule, le rôle de l'ONERA est d'étudier les technologies disruptives émergentes afin de proposer à la DGA des réponses face aux menaces à l'horizon 2045. Les études en cours s'intéressent à un aéronef capable de réaliser une croisière de longue durée et à haute altitude. L'un des défis réside dans la propulsion qui devra pouvoir combiner des systèmes propulsifs tels que des turboréacteurs et des statoréacteurs dans des architectures compactes.

Pour répondre à ces enjeux, l'ONERA dispose d'une longue expérience, acquise notamment par son implication dans les programmes de la composante nucléaire aéroportée. La propulsion à hautes vitesses par statoréacteur et super statoréacteur est un domaine d'excellence reconnu de l'Office.

■ Pénétration des défenses

Depuis longtemps, l'ONERA est pleinement investi dans le domaine de la pénétration des défenses conventionnelles. Changer de génération de chasseur n'est pas suffisant pour répondre aux évolutions des menaces. Ainsi, pour reprendre

l'exemple du SCAF, le chasseur ne sera plus l'élément central mais deviendra le contributeur d'un système de système plus large. Pour répondre aux défis technologiques posés par de tels systèmes, l'ONERA apporte ses compétences en connaissance sur les signatures, la connaissance de la menace ou en encore les facteurs humains, ses travaux exploratoires sur la transmission optique...

■ Défenses aérienne et anti-missiles

Les systèmes de défense aérienne et anti-missiles intégrés, la défense aérienne et la défense anti-missile balistique en particulier nécessitent de développer des systèmes complexes qui font appel à un large champ de compétences dans des domaines très variés. En raison de son spectre d'expertise très large qui va de l'optique au radar en passant par la robotique, des matériaux ou l'aérodynamique, l'ONERA est un contributeur majeur dans l'élaboration des briques technologiques nécessaires pour garantir le développement de systèmes d'armes performants.

Au regard des premiers retours d'expérience de la guerre en Ukraine, on pressent aussi que la défense aérienne élargie devient une composante de premier plan de notre défense ; et notamment pour la basse couche en raison de la prolifération des drones ou des munitions rodeuses. La prise en compte de ces menaces implique des technologies disruptives comme le développement de nouveaux capteurs, de systèmes d'alerte et de surveillance, des moyens d'interception, d'armes à énergie dirigée ainsi qu'une fonction C2 (*Command and control*) avancée. Autant de domaines où l'ONERA apporte des compétences de premier plan.

07 NOUVELLES GÉNÉRATIONS D'ARMES STRATÉGIQUES

Pour garantir dans la durée la crédibilité de notre dissuasion, il est primordial de disposer de vecteurs, porteurs de l'arme nucléaire, adaptés aux menaces actuelles et à celles que l'on pressent à un horizon donné. Cela nécessite de développer des technologies *ad hoc* et aussi de mener une analyse permanente des forces, risques et faiblesses de notre attaque face à des défenses actuelles et futures en constante évolution.

Le conflit entre l'Ukraine et la Russie a rappelé, à qui en doutait, que le recours à la force et à la coercition pour modifier les frontières des pays n'avait pas disparu. Cela a aussi rappelé que les périls nucléaires restent présents et a également souligné que les États dotés de l'arme nucléaire sont des adversaires particuliers, difficiles à affronter frontalement. L'arme nucléaire retrouve ainsi sa dimension symbolique qui avait été éclipsée depuis la chute du régime soviétique. Au-delà de l'aspect dissuasif, il permet à un État doté d'affirmer un statut. Mais disposer d'une arme et de vecteurs pour les mettre en œuvre n'est pas suffisant, il est nécessaire d'asseoir sa crédibilité. Celle-ci passe notamment, par une mise à niveau constante pour prendre en compte l'évolution des systèmes de défense.

■ Modernisation

Aussi, depuis plus d'une décennie, la Russie se livre à une modernisation de ses forces nucléaires et prépare l'avenir avec de nouvelles générations de vecteurs. La Chine quant à elle développe également à grands pas ses capacités. Les trois États non signataires du traité de non-prolifération (TNP), Israël, l'Inde et le Pakistan, ne devraient pas être en reste.

Les puissances occidentales – les États-Unis, le Royaume-Uni et la France – sont également engagées dans une modernisation et un renouvellement de leurs moyens de dissuasion. La France modernise ses deux composantes et a lancé le programme de renouvellement de sa composante océanique avec le sous-marin lanceur d'engins de troisième génération. Elle poursuit son programme de simulation, en partie en coopération avec le Royaume-Uni, et s'est engagée dans un programme de renouvellement de sa composante aéroportée.

■ Pénétration des défenses

Les vecteurs aériens seront, comme depuis les origines de la dissuasion, confrontés à des moyens antiaériens de plus en plus efficaces. Le développement et la multiplication des radars de veille lointaine, conjugué à la mise en réseau des systèmes défensifs, sont tels que les composantes aéroportées devront faire preuve d'un très haut niveau de performance. Les efforts consentis par plusieurs États – dont la Russie – pour développer des systèmes de défense anti-missiles balistiques (DAMB) doivent être intégrés dans les réflexions sur la préparation de l'avenir. Remarquons toutefois que la défense antimissile, pas plus qu'un autre moyen militaire, ne sera capable à l'horizon 2040 de se présenter comme une alternative crédible à la dissuasion nucléaire.

■ Les deux composantes

L'ONERA continuera à accompagner l'effort français de modernisation et de renouvellement, tant pour la composante aéroportée que pour la composante océanique. Bâter des feuilles de route relatives aux recherches intéressant la dissuasion suppose évidemment de se projeter dans l'avenir et de tenir compte de toutes les avancées techniques dans des domaines très variés. En ce qui concerne la composante océanique, les efforts porteront plus particulièrement sur la propulsion des missiles, le guidage-pilotage, les matériaux et les environnements. Pour la composante aéroportée, les travaux concerneront le missile air-sol nucléaire de 4^{ème} génération (ASN-4G) où, après plus de 20 ans d'études amont sur la propulsion hypersonique, l'ONERA interviendra de plus en plus en qualité d'assistance à la maîtrise d'ouvrage.

Le principe même de la dissuasion repose sur la capacité à concevoir un système d'attaque stratégique capable de pénétrer les défenses adverses. Aussi, pour assurer la crédibilité de notre dissuasion, il est indispensable d'être en mesure de réaliser une analyse permanente et récurrente des forces/risques/faiblesses de notre attaque face à des défenses actuelles et futures, en fonction de l'évolution de la menace et des technologies qu'elle pourrait utiliser. Un effort important mettant en œuvre l'ensemble des compétences multidisciplinaires de l'ONERA sera donc mené en ce sens.

Feuilles de route associées

- 7.1 - Attaque stratégique balistique
- 7.2 - Menaces anti-stratégiques & Confrontation attaque-défense stratégique
- 7.3 - Composante nucléaire aéroportée

08 ACCÈS PERFORMANT ET SÛR À L'ESPACE

Le secteur du spatial en général et du spatial militaire en particulier connaît depuis quelques années de nombreux bouleversements venus des Etats-Unis. Cette « révolution dans les affaires spatiales » ou « *New Space* » a été très largement sous-estimée par les acteurs européens du domaine. L'objectif est de faire de l'ONERA en 2030 un acteur majeur de la recherche européenne sur ce sujet.

Les images spectaculaires de retour d'étages récupérables de lanceurs de la société d'Elon Musk « SpaceX » ont fait le tour du monde. C'est le résultat de la volonté des administrations américaines de réduire les coûts des programmes spatiaux, qui au début des années 2000, conduisit à une réflexion en profondeur sur l'organisation des activités spatiales. Aujourd'hui les acteurs sont issus de nouveaux horizons, les méthodes différentes et les développements rapides. Une surprise pour l'Europe ! Ainsi, les institutionnels américains, NASA en tête, ont largement contribué à cette évolution, en mettant de nombreux moyens, technologies et compétences à disposition de ces nouveaux acteurs.

■ L'accès à l'espace

Aujourd'hui le lancement spatial est devenu de plus en plus concurrentiel et l'offre pléthorique envahit tous les segments du marché. Dans ce contexte, la compétitivité devient un enjeu primordial, y compris pour un lanceur dit de souveraineté comme Ariane, dont le modèle économique repose sur les contrats commerciaux. Il ne s'agit plus seulement de disposer de moyens d'accès à l'espace performant et fiable, mais d'offrir le meilleur coût. Le retard européen sur les lanceurs réutilisables capables d'emporter de petits satellites peut néanmoins être rattrapé. L'Europe spatiale peut intelligemment préparer l'après Ariane 6, ce qui a déjà débuté avec les initiatives industrielles comme Themis et Adeline pour le lanceur ou Prometheus pour les moteurs.

Ces développements technologiques doivent se construire sur la complémentarité de la dualité aéronautique/espace de notre industrie. Une des pistes prometteuses consiste à incorporer de plus en plus de technologies issues du transport aérien dans le monde du spatial. L'aéronautique, du fait de ses coûts très contraints par son modèle économique, de sa nécessaire fiabilité et de son utilisation à grande échelle a beaucoup à apporter au transport spatial. Là où le transport aérien est depuis longtemps un bien d'usage, le transport spatial a du mal à s'émanciper d'une vision trop conservatrice. L'aéronautique a par exemple développé des stratégies de surveillance de l'état de santé des appareils afin d'en optimiser la maintenance préventive et la disponibilité opérationnelle. Pour qu'un futur lanceur réutilisable européen soit compétitif à l'horizon 2030, la diminution des délais et coûts doit être la priorité.

Il faut aussi développer un lanceur réutilisable dédié aux mini-satellites qui, à l'avenir, compléteront voire remplaceront

un certain nombre de missions traditionnellement dévolues aux satellites de grande taille. La feuille de route propose notamment de se concentrer sur l'étude d'un lanceur aéroporté réutilisable. Dans ce but, l'ONERA va explorer, définir et évaluer des concepts nouveaux et des technologies de rupture pour la mise en orbite de satellites, avec un coût compétitif grâce en partie à la réutilisation.

■ Nouveaux concepts de services en orbite

Excepté la station spatiale internationale (ISS), les charges utiles sont, jusqu'à maintenant, placées sur orbite, y sont maintenues et assurent leur fonction de communication, observation... sans autre intervention. Aujourd'hui, le niveau de maturité de la robotique permet le développement et la mise au point des technologies nécessaires à la maintenance, à l'assemblage et même à la fabrication en orbite. Ces technologies permettront l'émergence de concept de services en orbite en rupture par rapport à l'existant et qui pourraient impacter fortement les systèmes spatiaux.

L'ONERA envisage également le développement de l'expertise nécessaire au déploiement de nouveaux « services » d'intérêt pour des utilisations duales de l'espace comme par exemple l'élaboration de petits satellites patrouilleurs ou de satellites gardiens donnant aux moyens spatiaux patrimoniaux la capacité de contrer des menaces intentionnelles ou naturelles.

L'objectif de cette feuille de route est donc développer l'expertise de l'ONERA sur les technologies capacitantes pour les futurs services en orbite innovants et de proposer, sur ces bases, des concepts en rupture touchant aussi bien les systèmes critiques pour la Défense que les applications commerciales.

Feuilles de route associées

8.1 - Conception de lanceurs innovants, économiques et réutilisables

8.2 - Nouveaux concepts de services en orbite

09 UTILISATION DURABLE ET SÉCURISÉE DE L'ESPACE

Depuis le début de la conquête spatiale, l'espace revêt une importance capitale, à tel point qu'il est devenu au fil du temps essentiel au fonctionnement de nos sociétés et de notre sécurité. Depuis quelques années, ce milieu se trouve au cœur d'une compétition stratégique et industrielle sans précédent : augmentation du nombre d'acteurs, contestation des leaderships technologiques traditionnels par les nouveaux entrants du *New Space*, actes hostiles... L'espace devient peu à peu un milieu de contestation. L'ambition est de faire de l'ONERA à l'horizon 2030 le référent connaissance de la situation spatiale ainsi qu'un acteur important du *New Space*.

Le satellite est devenu un allié technologique indispensable à la conduite des opérations militaires. Consciente des enjeux géostratégiques, la France, en créant le Commandement de l'Espace et en rebaptisant l'armée de l'Air en armée de l'Air et de l'Espace, marque sa volonté d'être un acteur de premier plan du domaine spatial.

■ Menaces

Alors que nos capacités militaires reposent de plus en plus sur des moyens spatiaux, que ce soit pour le renseignement, les communications ou la navigation, la menace contre ces moyens grandit. Le tir d'essai russe d'un missile antisatellite en 2021 en est un exemple. Certains pays procèdent aussi régulièrement à des démonstrations d'approche en orbite. Les actions agressives vis-à-vis de nos capacités dans l'espace sont aujourd'hui réelles, faisant de l'espace un domaine de confrontation à part entière. L'objectif du programme ARES (Action et Résilience Spatiale) est de se préparer aux actions dans l'espace pour assurer la sécurité de nos systèmes. Dans un autre registre, la guerre en Ukraine a mis en avant la nécessité, pour l'Europe, de se doter de moyens d'alerte avancée. Même si la prolifération de la menace balistique n'est pas récente, les démonstrations répétées de la Corée du Nord et les avancées de l'Iran rappellent son importance.

L'ambition de l'ONERA est de répondre aux besoins duaux de connaissance de la situation spatiale de plus en plus dense, de la dynamique des objets spatiaux et de l'analyse des intentions adverses dans le domaine spatial, afin d'assurer sécurité et sûreté liées au domaine spatial et aux actifs stratégiques français.

■ Surveillance et survivabilité

L'accroissement du nombre d'objets en orbite, ainsi que les nombreux débris générés depuis plusieurs décennies rendent nécessaires d'assurer le catalogage de tous ces objets. Pour la France, le système GRAVES permet un suivi permanent des objets en orbite. Sa rénovation en cours d'achèvement permettra

de suivre plus d'objets avec une meilleure résolution. L'étape suivante serait de pouvoir identifier l'agresseur, d'évaluer la dangerosité des menaces et de quantifier les risques encourus voire de protéger nos moyens de haute valeur.

L'ambition de l'ONERA est d'être référent sur la menace naturelle (particules solaires, rayonnements ionisants) ou intentionnelle envers les systèmes spatiaux ainsi que sur l'évaluation de leur survivabilité (maintien d'un niveau de service suffisant malgré une agression ou un événement naturel). Cela nécessite une connaissance de ces menaces et une compréhension des impacts possibles sur les fonctions de nos systèmes spatiaux, afin d'élaborer des solutions adaptées.

■ Cube sat et new space

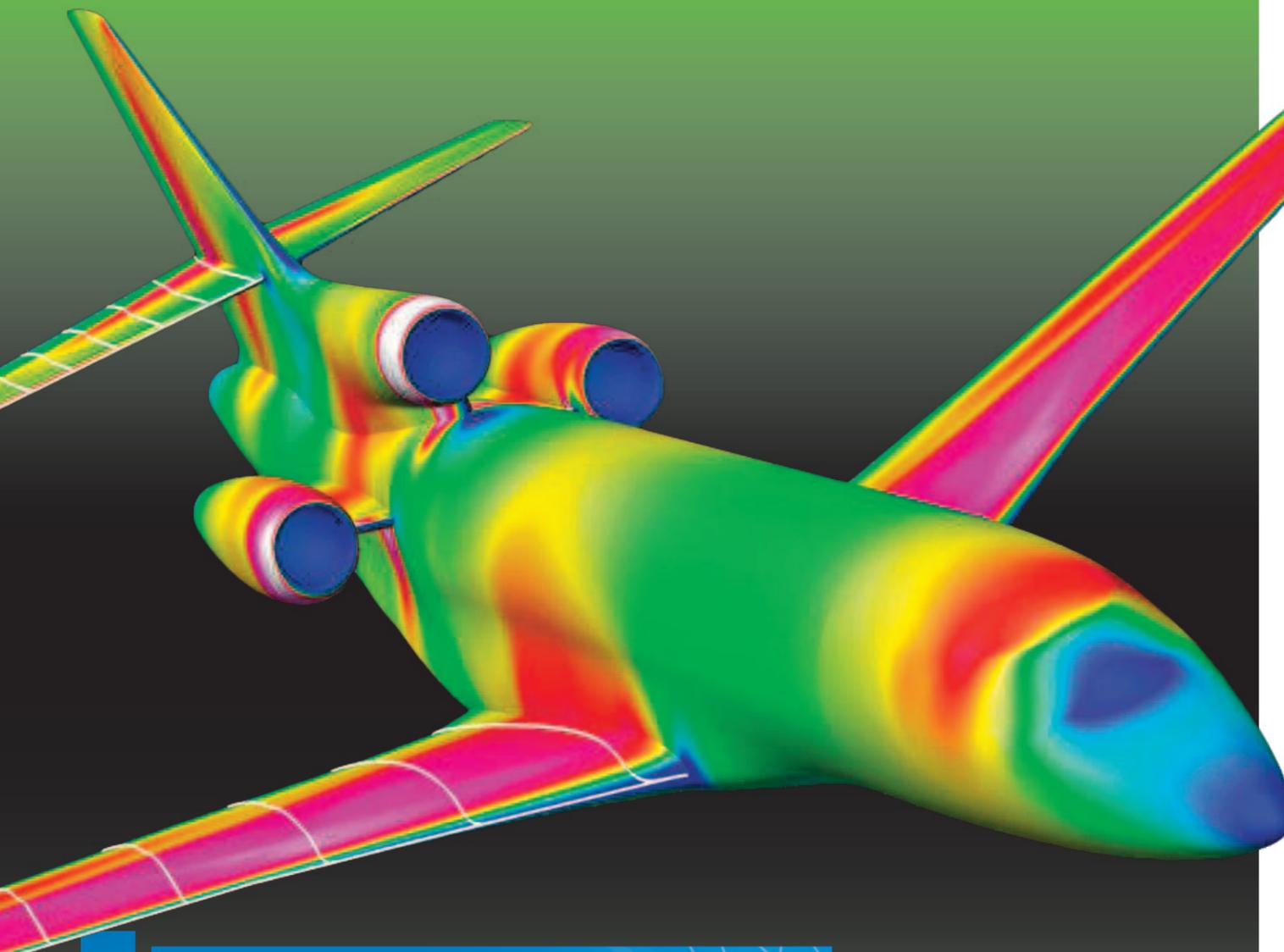
L'avènement des petits satellites (moins de 50 kg) ouvre la possibilité de disposer de plateformes souples et multiples. Le défi est de combiner performance et compacité des capteurs, avec une évaluation de la performance du système en sortie d'une chaîne de traitements avancés mettant en valeur les caractéristiques de la constellation (notamment la revisite). Des startups ont investi ce secteur et proposent des services utilisant de nombreux petits satellites bas coût. L'ONERA se veut un acteur à part entière du *New Space*, apte à concevoir, réaliser, mettre en œuvre et faire voler des briques technologiques, des capteurs scientifiques ainsi que des sous-systèmes dédiés, sur emport unique et sur constellation.

Feuilles de route associées

- 9.1 - Système de tenue de situation spatiale
- 9.2 - Survivabilité des systèmes spatiaux
- 9.3 - Missions et capteurs pour les micro-satellites

10 NOUVEAUX MOYENS DE SIMULATION

Le modèle de calcul donne accès à un champ de simulation virtuelle toujours plus vaste, et les outils de simulation bénéficient de très rapides progrès technologiques. L'ONERA, qui est historiquement l'un des grands acteurs de la simulation et de l'expérimentation aérospatiales, les fait progresser et évoluer constamment au bénéfice des projets de demain.



La simulation numérique est un outil essentiel qui contribue à la maîtrise de phénomènes complexes et qui joue un rôle croissant pour la conception et la garantie des performances globales des systèmes aérospatiaux. Même si le mot simulation évoque essentiellement les techniques numériques et l'utilisation de l'informatique, l'expérimentation reste omniprésente, car elle fournit les données nécessaires à la validation. Une démarche de recherche avec les constructeurs et l'adaptation des codes aux infrastructures de calcul permettront aux grands projets de simulation numérique de tirer pleinement parti des machines exaflopiques (un milliard de milliards d'opérations par seconde) nationales et européennes.



Feuilles de route associées

- 10.1 - Plateforme et méthodes de simulation numérique multiphysique haute fidélité
- 10.2 - Défis applicatifs de la simulation numérique aérospatiale
- 10.3 - Simulation expérimentale hybride
- 10.4 - Matériau numérique
- 10.5 - Simulations de défense
- 10.6 - Atelier de conception intégrée de véhicules aérospatiaux

■ Simulation haute-fidélité

L'ONERA va progresser fortement dans le domaine de la simulation numérique haute-fidélité. L'objectif est de représenter avec précision l'ensemble des phénomènes physiques en respectant la géométrie des systèmes. L'ONERA disposera dans un avenir proche d'une simulation beaucoup plus performante afin de contribuer efficacement à la conception des systèmes aérospatiaux de demain, jusqu'aux systèmes complets : un véhicule hypersonique, un turboréacteur, un avion à propulsion hydrogène, etc. La modélisation et la simulation multiphysique constituent un axe d'effort privilégié. Ainsi, le comportement vibratoire des ailes d'avions et des aubes de turbine doit être appréhendé par la mise en œuvre couplée de l'aérodynamique et de la mécanique des structures. La forme d'un avion de combat ou d'un missile (ailes, empennage, entrée d'air) doit être définie en considérant son efficacité aérodynamique et sa signature radar.

■ Matériau numérique

Par ailleurs, il est indispensable d'améliorer la modélisation et la simulation multi-échelle des phénomènes. C'est particulièrement le cas dans le domaine des matériaux inhomogènes où il est nécessaire d'exploiter en couplage étroit des connaissances approfondies en physique des solides, des matériaux et en mécanique des structures. C'est le défi que relève l'ONERA avec l'objectif de développer une plateforme logicielle capable de simuler de façon rigoureuse le comportement d'un matériau virtuel (métallique, céramique ou composite).

■ Simulations expérimentales

Si la simulation numérique progresse régulièrement, la « simulation expérimentale » n'a rien perdu de son importance. Du montage de laboratoire aux grandes souffleries, elle permet de comprendre les phénomènes, de les modéliser, de vérifier des hypothèses et d'identifier avec confiance les performances. De fait, il s'agit bien d'une « simulation expérimentale » à échelle réduite ou sur une partie d'un système, dans des conditions réalistes, conçue de manière à s'intégrer dans un processus de simulation ou de modélisation plus large.

Ainsi, les moyens expérimentaux de l'ONERA (en particulier en mécanique des fluides et des solides) s'intègrent chaque jour davantage dans l'environnement de la simulation numérique.

■ Conception multidisciplinaire

La simulation prend également une place croissante dans la conception des futurs systèmes de défense, de plus en plus complexes et interconnectés. Elle doit désormais permettre l'évaluation des performances, de la phase d'expression de besoin à celle des qualifications. L'ONERA développe une nouvelle génération d'outils pour la simulation de défense, afin de continuer à répondre aux besoins d'expertise sur les nouveaux programmes d'armement ou sur de nouvelles problématiques, telles que la militarisation croissante de l'espace.

Par ailleurs, l'ONERA mettra en place un atelier de recherche dédié à la conception multidisciplinaire de véhicules aérospatiaux, civils et militaires. L'objectif est double : se doter à la fois d'outils d'expertise et d'outils/méthodes prospectifs pour explorer des concepts, des technologies, des configurations et des architectures de véhicules innovants.





ONERA - 06 / 2023



ONERA - BP 80100 - 91123 PALAISEAU CEDEX
TÉL. : +33 1 80 38 60 60 - FAX : +33 1 80 38 65 10
www.onera.fr