

LA FEUILLE DE ROUTE SCIENTIFIQUE ET TECHNOLOGIQUE DE L'ONERA

LES FICHES PROGRAMMATIQUES
ÉDITION 2023

Préface



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'État, 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 des 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 aéronautique - qui compte la NASA, la JAXA japonaise, le NRC canadien,

le DLR allemand - 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.

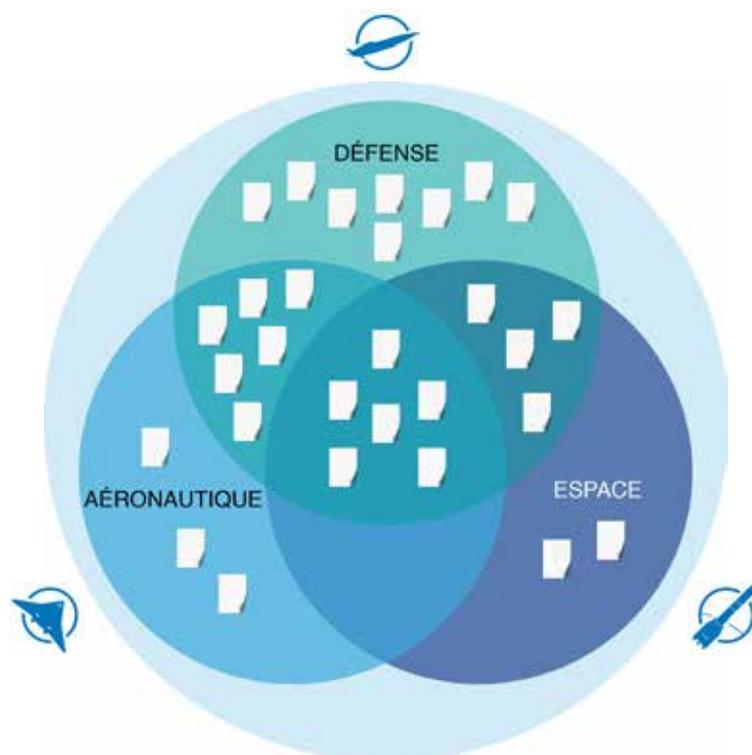
Nos objectifs sont ambitieux. Certains seront atteints, d'autres peut-être pas, mais le risque est inhérent à la recherche. Le succès passe par là. Les défis à venir sont grands, mais soyez certains que nos ambitions le sont tout autant.

L'expression de la vision de l'ONERA

La feuille de route scientifique et technologique découle de la volonté de bâtir une stratégie lisible en interne aussi bien que par les parties prenantes extérieures à l'ONERA.

Elle est détaillée en feuilles de route programmatiques basées sur nos missions et nos compétences scientifiques et techniques, fixant des objectifs ambitieux dans la durée et sur l'ensemble du domaine Aéronautique-Espace-Défense. Les feuilles de route permettent ainsi d'exprimer la vision et la stratégie de l'ONERA et illustrent la manière dont nous assurons notre mission de préparation du futur.

Ces feuilles de routes couvrent une très large partie des activités de préparation du futur et sont majoritairement duales mais elles n'en forment pas la totalité. Il est en effet indispensable de conserver une place à la recherche exploratoire et d'être en mesure de répondre à des sollicitations à court terme.



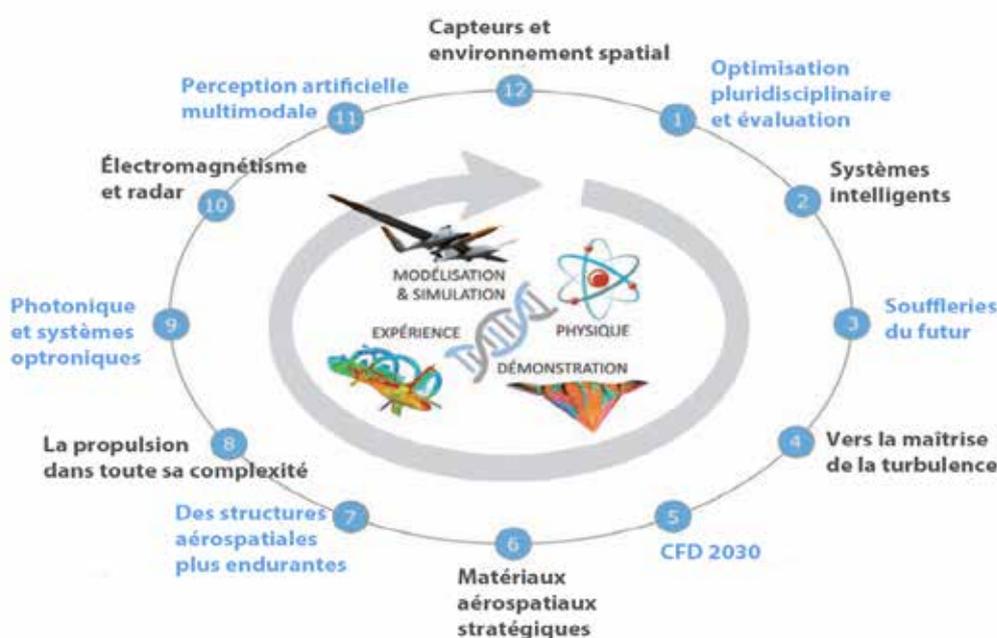
En plus de la subvention pour charge de service public octroyée par le ministère des Armées, les feuilles de route s'appuient sur des sources de financement variées (contrats industriels, projets ANR, projets DGAC, projets UE, thèses ou post-doctorats...). Elles suscitent également des partenariats tant industriels qu'académiques.

Réparties en 10 axes et identifiant les principaux verrous scientifiques et techniques, les feuilles de route fixent un objet final bien identifié et un horizon temporel, généralement de 5 à 10 ans.

Des orientations scientifiques et des perspectives industrielles en cohérence

Les feuilles de route de l'ONERA matérialisent la convergence du PSS – Plan stratégique scientifique –, qui fixe les orientations scientifiques de l'ONERA – et du COP – Contrat d'objectifs et de performance –, qui fixe les engagements réciproques de l'ONERA et du ministère des Armées sur la période 2022-2026.

Les feuilles de route confirment le caractère applicatif des recherches et des études menées à l'ONERA, en fournissant une grille de lecture simple de nos activités à la confluence de la recherche, de l'innovation et de l'implication dans des problématiques industrielles et sociétales.



Véritable pont entre le monde académique et le monde industriel, l'ONERA s'est organisé pour construire une visibilité et un positionnement vis-à-vis de chacun de ces mondes. Les relations avec le monde scientifique sont prises en charge par la Direction scientifique générale et celles avec le monde industriel par les directions de programme de la Direction technique et programmes. Les feuilles de route, partagées par ces deux entités, forment le noyau d'une cohérence de recherche finalisée basée sur une approche ambitieuse résolument scientifique et technologique. C'est la raison pour laquelle certaines feuilles de route s'attachent aux piliers scientifiques de l'activité de l'ONERA – moyens d'essais, métrologie, capacités de modélisation et de simulation, hybridation de la simulation, interaction avec les données et les techniques d'apprentissage...

Un guide de référence pour construire l'avenir

Chaque feuille de route thématique est un guide de référence, qui décrit des défis auxquels nous sommes confrontés ainsi que notre vision sur la façon de les relever. En interne cette démarche renforce la mobilisation des compétences, qui sont au cœur de la programmation de l'activité scientifique et technique de l'ONERA via un mécanisme d'appel à projets internes sur les sujets prioritaires. Ce mécanisme est basé sur le besoin exprimé par les divers acteurs mobilisés par et autour des feuilles de route. Il en est de même pour les thèses de doctorat. L'expression de la vision de l'ONERA via la publication de ses feuilles de route, doit également conduire à développer des partenariats structurants et de long terme tant avec les laboratoires ou organismes de recherche qu'avec les industriels, mettant ainsi à profit l'environnement scientifique de nos différentes implantations géographiques.

Une œuvre collective pour des réalisations concrètes et des apports croisés

Les feuilles de route sont issues d'une réflexion collaborative, pluridisciplinaire et transversale, qui a mobilisé près de trois cents personnes de tous les domaines de compétences de l'ONERA. Elles sont également un outil vivant conçu pour s'adapter à l'évolution des contextes et des besoins. Ainsi, chaque feuille de route est suivie annuellement par un comité de suivi ; un comité de pilotage assure la cohérence de l'ensemble et fixe au besoin les priorités.

Orientées vers des objectifs finalisés et basées sur le meilleur état de l'art, les feuilles de route décrivent aussi les collaborations envisageables.

La créativité et l'expertise des ingénieurs ont été mises à contribution pour préciser les grands axes et les décliner ainsi que pour définir les moyens d'action correspondants ; elles le seront encore plus à l'avenir pour lever les verrous identifiés. La direction générale s'est impliquée quant à elle pour parvenir à une convergence des visions, *descendante-globale* et *remontante-spécialisée*, exigée par un tel projet.

Feuilles de route scientifiques et technologiques de l'ONERA

édition 2023

 aéronautique

 espace

 défense

1. Nouveaux usages et missions étendues pour les aéronefs civils et militaires

-    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

2. Réduction de l'empreinte environnementale du transport aérien

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

3. Efficacité, sécurité et certification du système de transport aérien

-    3.1 Outils et moyens d'aide à la « certificabilité » des aéronefs futurs à coût et délai réduits

4. Surveillance de l'environnement naturel et opérationnel

-    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

5. Nouveaux concepts de systèmes de systèmes

-    5.1 Systèmes coopératifs et interactifs sur théâtres d'opérations
-    5.2 Communication/connectivité pour les systèmes AED

6. Systèmes d'armes conventionnels du futur

-    6.1 Aéronef hypersonique et aviation de combat [ND - non diffusée]
-    6.2 Pénétration des défenses par des armements conventionnels et survivabilité [ND]
-    6.3 Défense aérienne et défense antimissile [ND]

7. Nouvelle génération d'armes stratégiques

-    7.1 Attaque stratégique balistique [ND]
-    7.2 Menaces anti-stratégiques et confrontation attaque-défense stratégique [ND]
-    7.3 Composante nucléaire aéroportée [ND]

8. Accès performant et sûr à l'espace

-    8.1 Conception de lanceurs innovants, économiques et réutilisables
-    8.2 Nouveaux concepts de services en orbite

9. Utilisation durable et sécurisé de l'espace

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

10. Nouveaux moyens de simulation

-    10.1 Plateforme et méthodes de simulation numérique multiphysique haute-fidélité
-    10.2 Défis applicatifs de la simulation numérique aérospatiale :
(i) simulation aéronef hypersonique *nose-to-tail* (ii) Simulation moteur complet
-    10.3 Simulation expérimentale hybride
-    10.4 Matériau numérique
-    10.5 Simulations de défense
-    10.6 Atelier de conception intégrée de véhicules aérospatiaux



Nouveaux usages et missions étendues pour les aéronefs civils et militaires

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 condition 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.

Nouveaux usages, missions étendues

Réduire l'empreinte environnementale

Efficacité, sécurité et certification du système de transport aérien

Surveillance de l'environnement opérationnel et naturel

Nouveaux concepts de systèmes

Systèmes d'armes conventionnels du futur

Nouvelles générations d'armes stratégiques

Accès performant et sûr à l'espace

Utilisation durable et sécurisée de l'espace

Nouveaux moyens de simulation

Autonomie

Les progrès dans les capteurs et les systèmes embarqués permettent une navigation partiellement ou totalement autonome. 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 nouvelles formules 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 États-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 le sujet.

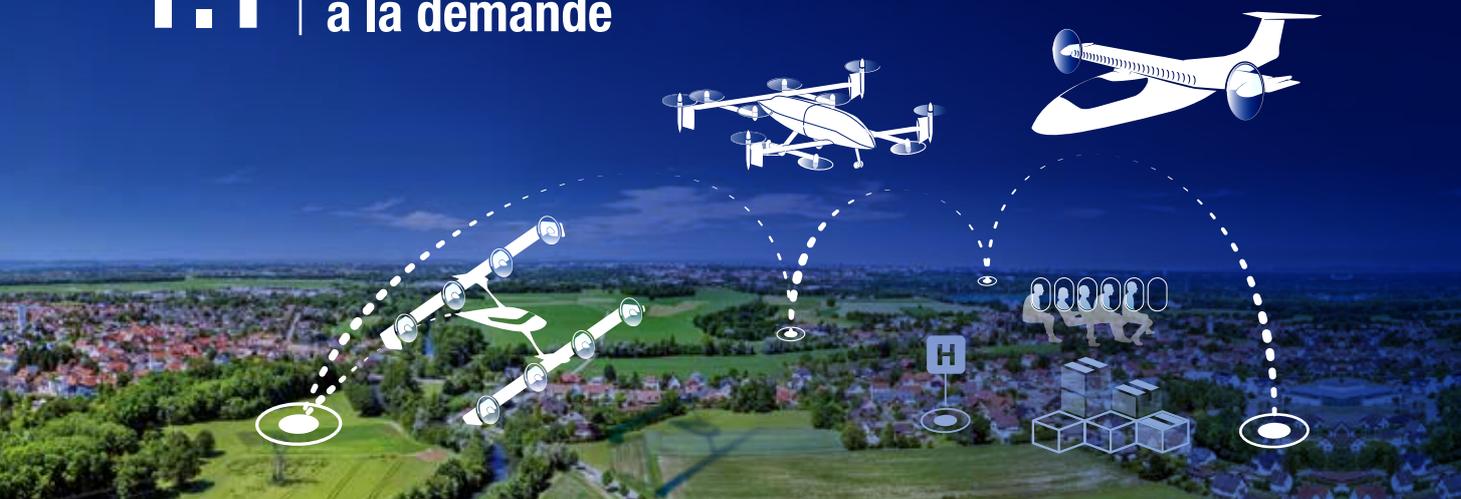
L'étude de ces nouveaux usages et missions est un puissant stimulant pour la recherche. Car il s'agit de concepts d'emploi en rupture. L'ONERA possède les compétences disciplinaires pour traiter ces sujets et développe également des approches système indispensables pour évaluer l'impact de l'intégration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

Feuilles de route programmatiques

- 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



1.1 | Aéronef électrique pour une mobilité à la demande



La mobilité à la demande, en plein essor dans le domaine terrestre, est maintenant envisagée au niveau aérien, notamment grâce à la maturité grandissante des technologies liées à l'électrification et à l'automatisation du vol. Sont attendus une grande souplesse d'emploi en toute sécurité, des caractéristiques de décollage et d'atterrissage courts, voire verticaux, une absence de qualifications particulières de l'utilisateur et un impact environnemental réduit.

Plusieurs usages ont été identifiés :

- transport de 4 à 6 passagers (jusqu'à 10) ;
- fret en mode hub à hub ;
- ambulance, transport d'organes... ;
- sécurité civile.

Pour deux modes de déplacement :

- urbain et péri-urbain – 50 km à 150 km/h ;
- interurbain – jusqu'à 500 km à 250 km/h ou plus ;

les performances visées imposent l'usage d'ailes associées à de multiples propulseurs électriques alimentés par des sources d'énergie hybridées. Deux types de configurations sont envisagées : décollage court, décollage/atterrissage à la verticale.

Horizon.....2030

- 3 ans pour démontrer la maîtrise des technologies clés de la propulsion distribuée
- 8 ans pour disposer d'ensembles technologiques certifiables prêts à être transférés à l'industrie
- 15 ans pour étendre l'application à de plus grandes capacités : plus de passagers, plus de distance parcourue, plus d'emport

Activités

Développements technologiques

- Des démonstrateurs sol pour l'intégration des architectures de propulsion électrique distribuée
- Un démonstrateur vol à échelle réduite pour valider les algorithmes de commande de vol, les stratégies de gestion de l'énergie embarquée et les concepts de décollage et atterrissage
- Un démonstrateur technologique pour valider la configuration d'ensemble du véhicule, les technologies et leur intégration, dans un cadre partenarial avec l'industrie

Thématiques

- Intégration aéro-propulsive : composants de propulsion, interactions avec la cellule, caractérisation acoustique
- Définition de la cellule : architecture électrique, structures et matériaux (CEM...)
- Conception d'ensemble du véhicule – obtenir par compromis les performances souhaitées en fonction de l'énergie disponible à bord et de la souplesse d'emploi attendue dans une perspective de certification
- Connaissance de l'environnement : aérologie en espace urbain et semi-urbain, capteurs associés et modélisation pour l'aide à la certification

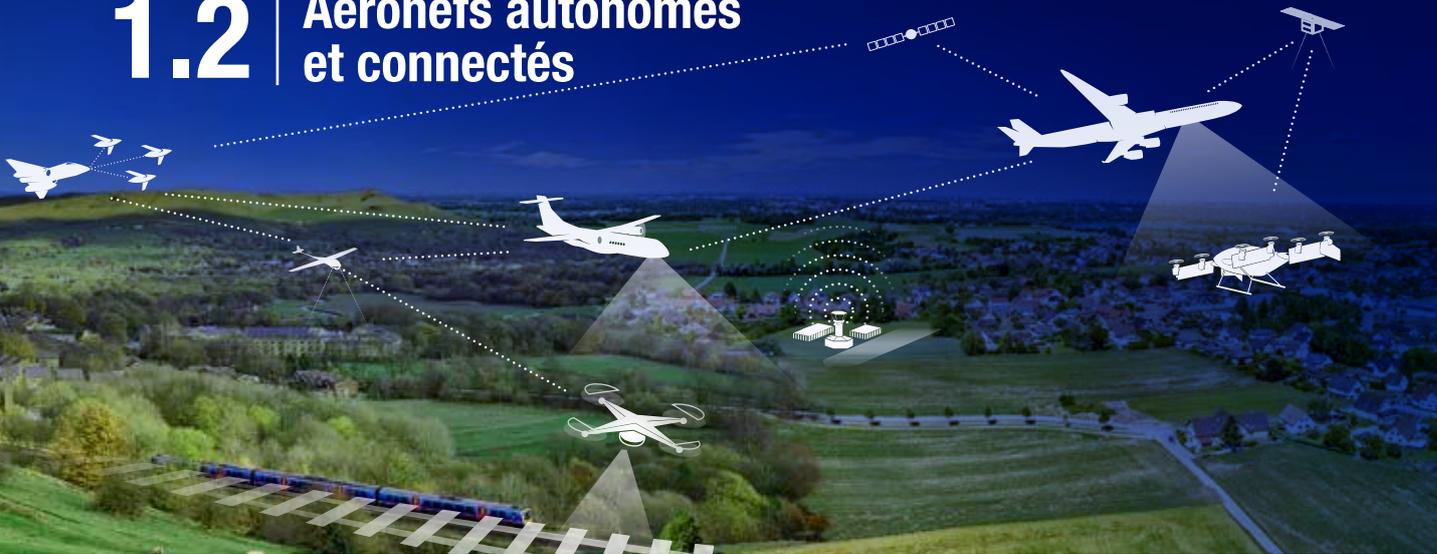
Moyens

- Plateformes de simulation numérique HiFi en aérodynamique, structures, foudre, thermique, électromagnétique...
- Plateformes de conception & simulation multidisciplinaires
- Banc d'intégration d'architecture électrique de propulsion, soufflerie, démonstrateurs en vol
- Essais en soufflerie

L'ONERA aborde l'avion électrique avec pragmatisme dans une perspective de développement en partenariat avec l'industrie. Il s'engage pour faire émerger des solutions et prépare le futur à plus long terme du transport aérien face aux enjeux environnementaux.



1.2 | Aéronefs autonomes et connectés



La croissance des niveaux d'autonomie et de connectivité pour l'amélioration de l'efficacité, des performances et de la sécurité est au cœur des recherches appliquées dans le monde de l'aviation civile, commerciale et de la défense.

L'ambition ultime d'intégration dans l'espace aérien d'aéronefs autonomes est soumise à l'acceptabilité réglementaire et demandera une introduction progressive des technologies habilitantes et leur démonstration.

L'ONERA structure un ensemble de travaux pour le développement d'outils, méthodes et technologies pour répondre aux deux enjeux principaux :

- le développement de nouvelles fonctions de perception, décision, navigation et guidage résilientes aux changements contextuels et capables de collaborer avec un pilote/un opérateur au sol ou de le remplacer si nécessaire, tout en garantissant le niveau de sécurité des opérations requis ;
- des défis spécifiques comme l'amélioration de la robustesse aux pannes (capteur et système) et aux aléas, l'intégration des moyens de communication avancés pour la coopération des flottes hétérogènes (en termes d'autonomie), et le développement des moyens de gestion du trafic aérien.

Activités

- Synthèse des scénarios actuels et futurs - CONOPS.
- Conception, intégration et validation de :
 - nouvelles fonctions pour l'autonomie : planification de trajectoire d'urgence, coordination des agents, prise de décision, IA dans la boucle critique de vol ;
 - nouveaux systèmes de perception augmentée : design et dimensionnement des capteurs pour l'autonomie (radars, lidars, caméras, IMU miniaturisé etc.) ; traitement de l'information et hybridation des données hétérogènes ; détection, identification des pannes et reconfiguration ; analyse de risque cyber et la sensibilité électromagnétique ;
 - nouveaux systèmes de gestion des espaces aériens pour l'insertion des aéronefs autonomes : séparation des trajectoires 4D, *Geofencing*, déconflition, *Tracking*, etc.
- Facteurs humains : formulation des modèles de fonctions exécutives, caractérisation de leur sensibilité à des états cognitifs internes et aux conditions environnementales.
- Simulation : du vol, des fonctions d'autonomie, des capteurs, des IHM, des scénarios de mission, du trafic aérien.
- Architectures informatiques de bord et démonstrations en vol.

Horizon.....2040

La motivation pour accroître l'autonomie des aéronefs est double. Il s'agit d'assurer la sécurité maximale – les risques de crash, de collision – et d'améliorer l'efficacité – coût, précision, rapidité, réduction de la fatigue, moindre nécessité d'infrastructures au sol.



1.3 | Aéronefs à voilure tournante plus sûrs pour des missions étendues



L'ambition de la feuille de route est de développer et stimuler les recherches multidisciplinaires spécifiques aux voilures tournantes, pour explorer de nouvelles technologies et configurations permettant à terme de proposer des solutions de rupture.

Elle concerne l'ensemble des véhicules aériens qui utilisent la voilure tournante pour se sustenter (en anglais *rotorcraft*) : hélicoptère classique, girodyne, tandems, combinés, tilt-rotor et de façon plus générale tous les concepts permettant un décollage et un atterrissage vertical ou court au moyen de rotor (multi-rotors ou hybrides voilures tournantes & voilures fixes).

Elle s'intéresse à tous les usages et missions remplies par ces appareils et leurs ambitions d'évolution et d'extension. Sont considérées toutes les opérations civiles (transport, sécurité civile) et militaires (transport, manœuvre, logistique, attaque). La notion de « mission étendue » s'entend autant par la recherche d'extension des performances et capacités (vitesse, endurance, vols tout temps, etc.) que la recherche d'amélioration des fonctions (pour le pilotage, la sécurité, etc.).

Activités

La projection des travaux se fera sur des exemples de cibles concrètes :

- Un hélicoptère de transport militaire rapide et manœuvrant
- Un hélicoptère de secours tous temps

La feuille des route est organisée suivant quatre axes :

- L'amélioration des performances
 - Aérodynamique, notamment pour la réduction des délais de certification des appareils, l'accompagnement du développement des nouveaux concepts, le design des pales de rotor
 - Dynamique du vol et conception préliminaire
- La réduction des nuisances
 - Acoustique externe
- Des opérations sûres et étendues
 - Dynamique du vol, systèmes d'assistance au pilotage et conception préliminaire
 - Maintenance conditionnelle et amélioration de la disponibilité
- La réduction de la vulnérabilité
 - Résistance au crash et aux impacts
 - Résistance au givrage et à la foudre
 - Vibrations, signatures infrarouge et radar

Cette feuille de route s'appuie sur plusieurs collaborations déjà installées dans le domaine des hélicoptères : DLR, US Army, NASA, coopération STAR, GartEur...

Horizon.....2035

L'ONERA renforce sa position en tant que contributeur de premier plan des futurs programmes civils et militaires auprès des différents acteurs français – DGA, DGAC, Airbus Helicopters.



1.4 | Physique du vol supersonique



La feuille de route porte principalement sur les disciplines fondamentales affectant les performances et l'empreinte environnementale des nouveaux concepts d'avions supersoniques.

Elle vise à développer :

- une compréhension et une maîtrise des phénomènes physiques spécifiques des avions de transport supersoniques qui impactent son dimensionnement et son empreinte environnementale : aérodynamique supersonique, bang sonique, bruit au décollage et émissions ;
- des modèles physiques, outils numériques et capacités expérimentales qui fourniront une capacité prédictive validée en faisant usage des synergies entre calculs et essais ;
- différents avions-concepts représentatifs des principaux segments de marché supersonique – avions civils de petite et moyenne taille –, qui fourniront des objets d'étude indispensables au développement et à la validation expérimentale de ces modèles.

Les gains attendus porteront essentiellement sur l'aéronautique civile mais des retombées directes/synergies avec la finalité Défense sont également prévues.

L'enjeu central est de permettre à l'ONERA d'éclairer la préparation d'une future réglementation pour le supersonique civil et de s'assurer qu'elle n'aille pas à l'encontre des intérêts nationaux et européens.

Activités

Plusieurs activités sont déjà en cours ou prévues dans un futur proche :

- caractérisation aérodynamique de la couche limite atmosphérique ;
- modélisation haute-fidélité des émissions supersoniques ;
- simulations 3D du bang depuis l'avion jusqu'au sol ;
- chaîne d'optimisation de forme aérodynamique + bang ;
- proposition de réglementation supersonique sur émissions ;
- validation expérimentale des outils de simulation et modèles.

Une deuxième phase portera sur la consolidation des résultats obtenus et les sujets suivants :

- la motorisation et l'utilisation de moteurs à cycle variable afin d'adapter le taux de dilution du moteur selon la phase de vol (réduction du bruit de jet au décollage) ;
- l'aérodynamique basse vitesse et l'étude de systèmes ;
- hypersustentateurs spécifiques ;
- la laminarité et son potentiel à réduire la traînée ;
- des activités réduction de traînée par perche laser ;
- la réduction du bruit au décollage/atterrissage via l'optimisation de la trajectoire et du régime de montée ;
- les matériaux innovants : optimisation de la masse, tenue en température, procédés de fabrication, cycle de vie.

Horizon.....2035

L'ONERA confirme son leadership sur les questions scientifiques liées à l'aviation supersonique, pour jouer son rôle d'expert auprès des autorités de certification.



Réduction de l'empreinte environnementale du transport aérien

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 NO_x 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 CO_2 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 (NO_x), 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- CO_2 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 NO_x 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.

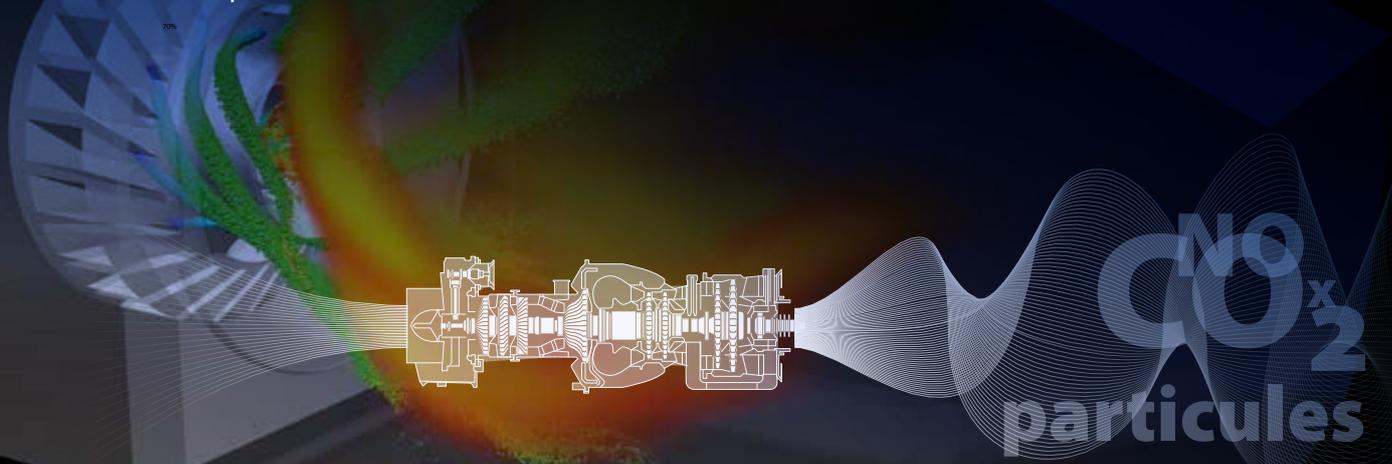
Pour résumer, l'ONERA intervient à différents degrés sur l'ensemble des leviers de compréhension et de réduction des impacts environnementaux de l'aviation qui peuvent se décliner suivant trois objectifs de haut niveau : la réduction de la consommation et des émissions de CO_2 ; la réduction des émissions polluantes et de leurs impacts ; la réduction des nuisances sonores.

Feuilles de route programmatiques

- 2.1** | Plateforme hybride pour l'aide à la conception de chambre de combustion optimisée à émissions réduites
- 2.1** | Motorisation plus efficace à émissions réduites
- 2.2** | Cellule avion et intégration motrice innovantes
- 2.3** | Impact environnemental et climatique



2.1 | Motorisation plus efficace à émissions réduites



Du point de vue de la propulsion, les deux grands axes pour réduire l'empreinte environnementale de l'aviation commerciale sont aujourd'hui le développement de turbomachines plus vertueuses et la décarbonation de leur source d'énergie.

La poursuite de l'ultra-sobriété énergétique passe par l'allègement des moteurs et l'amélioration de leur efficacité propulsive avec, en particulier, l'augmentation de leur taux de dilution et le développement de fans non carénés. Parallèlement, l'effort doit être maintenu sur la réduction du bruit et des émissions polluantes, deux objectifs parfois contradictoires avec l'accroissement de l'efficacité. Les futurs moteurs devront en outre pouvoir fonctionner avec des carburants durables (biocarburants ou électrocarburants) purs, tandis que l'introduction de l'hydrogène nécessite une reconception des moteurs et de leur chambre de combustion.

L'ONERA accompagne l'industrie avec les objectifs suivants :

- développer et fournir des méthodologies ainsi que des outils numériques et expérimentaux pour la conception, le développement et l'évaluation des performances aéropulsives et acoustiques des nouveaux systèmes propulsifs ;
- évaluer, proposer des concepts pour les composants des systèmes propulsifs ;
- développer des méthodes pour la définition et l'évaluation des performances de nouveaux matériaux, proposer de nouvelles formulations ;
- comprendre et caractériser la relation entre composition des carburants et toutes leurs propriétés, contribuer à la compréhension des limites de compatibilité avec les avions actuels.

Activités

Fan, open-fan et hélices

- Développement des méthodologies pour la conception et l'optimisation multidisciplinaire des nouvelles générations
- Modélisations du comportement des matériaux et de leurs assemblages (matériaux composites tissés 3D)

Compresseurs, turbines et tuyères

- Simulation numérique haute-fidélité pour les problématiques de pompage et de stabilité des compresseurs et l'amélioration du rendement des turbines BP
- Développement d'approches de conception rapide et robuste pour les compresseurs
- Développement des matériaux métalliques haute température et des approches de conception numériques associées
- Exploration du potentiel des alliages à base de titane, des CMC et des composites oxyde/oxyde

Chambres de combustion

- Développement des moyens d'essai et de mesure
- Modèles et méthodes pour l'étude des émissions polluantes et de l'opérabilité des chambres
- Adaptation des outils et concepts à la combustion d'hydrogène

Combustibles

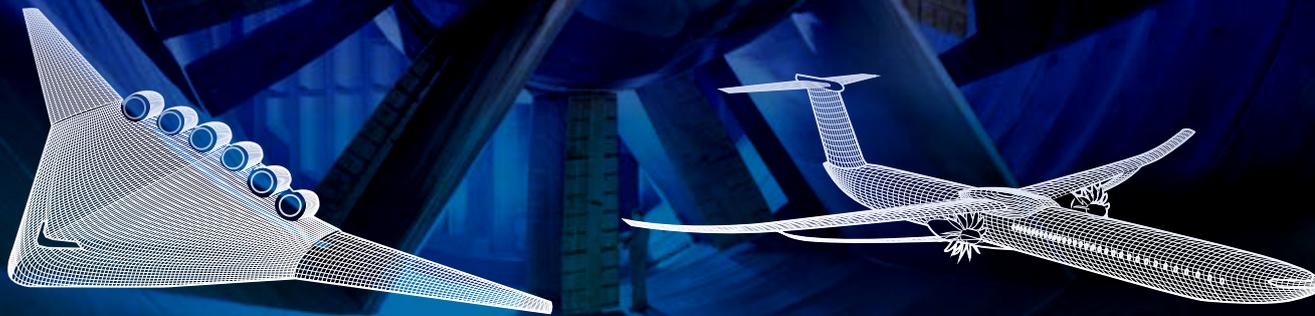
- Compréhension et caractérisation du comportement des carburants (base de données expérimentale et modélisation)
- Exploration et compréhension des limites d'emploi et de spécification des carburants
- Étude de l'interaction de l'hydrogène et des produits de combustion avec les matériaux (fragilisation, corrosion)

Horizon.....2035

Repenser toutes les composantes de la motorisation aéronautique, à la lumière des moyens numériques et expérimentaux d'aujourd'hui, pour réduire drastiquement l'empreinte environnementale des avions.



2.2 | Cellule avion et intégration motrice innovantes



Afin de limiter son impact environnemental, le secteur de l'aviation s'est engagé à la neutralité carbone pour 2050. Si des ruptures technologiques sont nécessaires au niveau de l'énergie embarquée et des systèmes propulsifs, des solutions innovantes sont également attendues sur la cellule avion et une intégration optimisée des moteurs afin de minimiser la consommation énergétique.

Cette feuille de route regroupe alors un ensemble de développements technologiques regroupés selon différents thèmes d'ici 2030, avec des jalons intermédiaires qui visent une amélioration de la cellule avion et de l'intégration motrice des avions de transport civil.

La feuille de route vise également la définition de deux configurations d'avions de recherche permettant non seulement de mettre en avant le savoir-faire ONERA sur le développement de briques technologiques qui seront intégrées sur les prochaines générations d'avions de transport mais également d'offrir aux départements des objets concrets qui serviront de cas d'applications pour les activités scientifiques et techniques. Une première configuration correspond à une possible évolution de la solution « *tube & wing* » avec une voilure haubanée à très grand allongement. Avec un horizon plus lointain, la seconde configuration se base sur le concept d'aile volante, une solution plus disruptive et donc plus risquée qui offre un certain volume interne ainsi que diverses solutions intéressantes pour l'intégration du système propulsif.

Activités

L'articulation des activités se fait au travers de cinq thématiques :

- Amélioration de l'efficacité aérodynamique
 - Voilure grand allongement
 - Technologie pour la laminarité
 - Voilure haubanée très grand allongement
- Réduction de la masse
 - Réservoir LH2 (Hydrogène Liquide)
 - *Dry-wing* (voilure sans réservoir)
 - Structures architecturées
 - Matériaux innovants/Structures multi-matériaux multifonctionnelles
- Intégration du système propulsif
 - Intégration USF (*Unducted Single Fan*)
 - Intégration moteur UHBR (*Ultra High Bypass Ratio*)
 - Intégration motrice disruptive
- Caractérisation et réduction du bruit
 - Validation expérimentale des nouvelles technologies aéro-acoustiques
 - Contrôle actif du bruit
 - *Design to noise*
 - Solutions à base de matériaux poreux/liners
 - Panneaux d'habillage pour réduire le bruit cabine
- Synthèse Avion
 - Avion hydrogène
 - Avion voilure haubanée
 - Aile volante / BWB

Horizon.....2030

Définir et valider un ensemble d'améliorations technologiques de la cellule avion et de l'intégration motrice pour favoriser l'émergence de solutions disruptives qui participeront à la neutralité carbone d'ici 2050.



2.3 | Impact environnemental et climatique



L'aviation contribue à l'effet de serre par ses émissions de CO₂ ainsi qu'au travers de mécanismes complexes impliquant d'autres espèces chimiques dans la haute atmosphère. Réduire l'impact climatique de l'aviation nécessite de comprendre et quantifier ces effets dits «non-CO₂» qui restent entachés de fortes incertitudes, ceci afin de définir des stratégies d'optimisation pertinentes.

Pour orienter les choix technologiques du secteur et répondre aux attentes des instances gouvernementales dans l'établissement de leurs politiques climatiques, il est également important de pouvoir évaluer l'impact des évolutions technologiques et énergétiques de l'aviation sur son impact climatique global à moyen ou long terme.

Les travaux de l'ONERA sont principalement consacrés à l'étude des traînées de condensation, l'élaboration des scénarios de trafic, des inventaires d'émission et des impacts associés, ainsi que les stratégies de minimisation de l'impact climatique de l'aviation. Ils s'inscrivent dans le cadre d'une collaboration avec l'Institut de climatologie Pierre Simon Laplace (IPSL) pour l'évaluation de l'impact climatique de l'aviation.

La question de l'impact des émissions des avions sur la qualité de l'air, sur et autour des plateformes aéroportuaires, constitue une seconde préoccupation environnementale importante vis-à-vis des riverains et de l'acceptabilité du transport aérien. Sur ce thème, l'ONERA développe des méthodologies pour caractériser la dispersion atmosphérique et l'évolution physico-chimique des polluants aéronautiques, sur et autour des plateformes aéroportuaires.

Activités

- Étude de la formation, de l'évolution et des propriétés des traînées de condensation jusqu'aux échelles intermédiaires (15 à 30 mn en aval de l'avion) : mécanisme de formation des cristaux de glace pour les différents combustibles, interaction avec le sillage de l'avion et évolution en fonction des conditions atmosphériques, modélisation de la perturbation radiative d'une traînée.
- Acquisition et exploitation de données d'observation pour la calibration des simulations de traînées de condensation.
- Construction des inventaires d'émissions pour l'évaluation de l'impact climatique de différents scénarios d'évolution du transport aérien et trajectoires d'impact associées.
- Exploration de stratégies de minimisation de l'impact CO₂ et non-CO₂ de l'aviation.
- Maintien d'une capacité de mesure des émissions au meilleur niveau.
- Étude de l'évolution des émissions dans le panache d'un moteur et de leur dispersion dans l'environnement aéroportuaire.

Horizon.....2028

Améliorer, en tant qu'expert indépendant, l'évaluation des impacts climatiques et environnementaux de l'aviation



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, ce 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 certifiabilité.

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.

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.

Nouveaux usages, missions étendues

Réduire l'empreinte environnementale

Efficacité, sécurité et certification du système de transport aérien

Surveillance de l'environnement opérationnel et naturel

Nouveaux concepts de systèmes

Systèmes d'armes conventionnels du futur

Nouvelles générations d'armes stratégiques

Accès performant et sûr à l'espace

Utilisation durable et sécurisée de l'espace

Nouveaux moyens de simulation

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).

Feuilles de route programmatiques

3.1 | Outils et moyens d'aide à la «certificabilité» des aéronefs futurs à coût et délais réduits



3.1 | Outils et moyens d'aide à la « certificabilité » des avions futurs à coût et délais réduits



La certification d'un avion est un processus pluridisciplinaire visant à démontrer que la conception, l'opération et la maintenance de l'avion sont conformes à un ensemble de règlements assurant l'acceptabilité sociétale du produit. Au travers de la variété de ses disciplines, l'ONERA s'engage dans une logique de maîtrise des coûts et de délais de la certification aéronautique en se dotant d'un ensemble cohérent de moyens permettant, à moyen terme, de fluidifier le processus et, à plus long terme, de favoriser son adaptation à la certification de produits innovants.

Les moyens de l'ONERA comprennent des développements méthodologiques, des outils numériques et des moyens d'essais pour soutenir plus particulièrement :

- Le développement d'une meilleure connaissance de risques technologiques ou environnementaux pour définir des règlements au plus juste besoin
- Une réalisation des démonstrations de conformité aux différentes exigences réglementaires, plus rapides et moins coûteuses, à niveau de confiance fixé
- Un suivi efficace de la cohérence et de la persistance dans le temps des hypothèses de démonstration prises par les multiples équipes impliquées dans la certification
- L'étude de la « certificabilité », i.e. la faisabilité de la certification de nouveaux concepts d'avions ou d'opérations, notamment en matière de transport aérien durable et de nouvelles mobilités

Activités

Développement de la culture de la certification

- Veille sur la certification : mise à jour de l'état de l'art
- Contribution à la diffusion de la culture de la certification : participation à groupes de standardisation par thématiques, formation interne et externe
- Formation aux outils et méthodes transverses : gestion des incertitudes, intelligence artificielle

Développement des connaissances de la sécurité, des nuisances et des moyens de conformité associés

- Sécurité de la configuration avion : domaine de vol, aéroélasticité, résistance des structures, crash et impacts, feu
- Sécurité de la conduite du vol et systèmes de l'avion : contrôle de l'avion, navigation/partage de l'espace aérien, qualité de vol, logiciels critiques, sécurité des systèmes, équipements sécuritaires, CEM interne
- Conditions de vol adverses : givre, effets directs et indirects de la foudre, rayons cosmiques, turbulence
- Nuisances des vols : émissions acoustiques, électromagnétiques

Soutien à la certification collaborative et au suivi de certification, analyse globale de la certificabilité de nouveaux concepts

- Étude et mise en œuvre de scénarios de certification collaborative (démonstration d'acceptabilité de produits), ateliers de travail collaboratif
- Étude et mise en œuvre de scénarios d'exploitation et développement de capacité d'exploitation de données massives

Horizon.....2035

L'ONERA se positionne comme acteur clé de l'aide à la certificabilité (i) en concevant des moyens pour les certifications innovantes, (ii) en améliorant continuellement la culture et les moyens d'aide à la certification, (iii) en favorisant l'accès à ses moyens les plus matures.



Surveillance de l'environnement opérationnel en défense et sécurité, et de l'environnement naturel

Sur un théâtre d'opérations, 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 de données associées.

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 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.

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 :

- muti et hyperspectrale 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 des 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 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 aéronefs 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.

Intelligence artificielle (IA) et Deep Learning

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.

Feuilles de route programmatiques

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



4.1 | Capteurs embarqués pour l'observation de la Terre et de l'activité anthropique



Au cours des années écoulées, l'effort a porté sur le développement de capteurs électromagnétiques et optroniques toujours plus performants. La montée en puissance des technologies de l'information et de la communication (TIC) a mis en évidence la criticité du nombre et de la répartition de ces capteurs.

L'avènement des drones et des petits satellites ouvre parallèlement la possibilité de disposer de plateformes souples et multiples. Le défi pour les futurs capteurs est de combiner la performance avec la compacité requise par les nouveaux usages.

Les plateformes considérées sont les drones – des microdrones aux drones tactiques etUCAV* –, les aéronefs – dont les aérostats –, les nano et micro-satellites.

Les missions adressées sont :

- la surveillance de la scène opérationnelle et le renseignement
- le développement de l'expertise de référent environnement électromagnétique et optronique pour la Défense
- la surveillance de l'environnement naturel

Activités

Radar

- Surveillance opérationnelle depuis des petits aéronefs « standard »
- Recueil de données à l'échelle de la planète pour conforter l'ONERA comme référent environnement électromagnétique du pôle CGN* de la DGA, et alimenter les recherches en IA
- Solutions radar passif, discret, compact, étendu à l'aéroporté
- Capteurs compacts intégrables sur petits drones ou ballons
- Capteurs, de millimétriques à submillimétriques, pour microdrones, avec des classes de portée inférieure à 500 m
- Mesure du champ électromagnétique sur de larges zones

Optronique

- Télédétection active et passive couplée : démonstrateur d'imageur compact panchro ou multispectral ; démonstrateur lidar 3D + imageur multi-hyper spectral
- Haute résolution sur drone et nanosat : concept d'image interférométrique panchromatique
- Détection des gaz : nouveaux capteurs et synergie multicapteurs
- Caractérisation des gaz à effets de serre depuis satellite : démonstrateurs de lidar / détection hétérodyne passive
- Recueil de données IR pour l'alerte aéroportée – cibles et fonds

Autres domaines

- Accéléromètre haute précision compact pour nanosatellites
- Capteur d'environnement foudre

*UCAV : Unmanned Combat Aircraft Vehicle
CGN : Pôle Capteurs, Guidage, Navigation de la DGA

Horizon..... 2030

Combiner compacité et performance des capteurs embarqués, c'est le défi pour accompagner la montée en puissance des nouvelles capacités de traitement de l'information - big data, IA...



4.2 | Perception augmentée IA de l'environnement naturel et opérationnel



Le traitement des données pour la vision artificielle est en pleine mutation technologique grâce au succès de l'IA ainsi qu'à l'accès à des bases de données de grande échelle et au calcul massif.

Dans ce paysage où les GAFAM et les acteurs de la *Deep tech* se disputent les ruptures technologiques, cette feuille de route vise à positionner l'ONERA comme acteur de référence dans le domaine aéronautique, espace, défense à l'horizon 2025-2030 pour la géo-intelligence et la perception embarquée en démontrant sa capacité à intégrer et valoriser les technologies issues de l'IA.

L'objectif est de construire une capacité cohérente et coordonnée de l'ONERA en IA pour l'interprétation automatique de l'environnement grâce aux trois axes d'effort suivants :

- Technologies de perception
- Capteurs cognitifs
- Plateforme d'analyse et d'interprétation augmentée par l'IA

- Technologies de perception : l'études de solutions logicielles pour l'analyse géospatiale et temporelle, la modélisation 3D et 4D (jumeau numérique), la fusion multimodale et hétérogène, l'analyse et la prédiction comportementale
- Aide à la conception de capteurs cognitifs, de systèmes perceptifs distribués, ainsi qu'à leur commande et leur planification opérationnelles
- Mise en œuvre d'une Infrastructure IA HPC* pour le développement collaboratif, la capitalisation et la démonstration

Thèmes scientifiques

- **Perception multimodale** : développement de modèles IA aptes à intégrer des modélisations physiques (capteurs, scènes) pour traiter efficacement des sorties de capteurs opérationnels avec capacité à exploiter et valoriser la multi-modalité physique ou l'hétérogénéité numérique/sémantique
- **IA frugale** : capacité à construire des modèles IA efficaces malgré une disponibilité insuffisante des données d'apprentissage par des processus d'augmentation, de généralisation, ainsi que d'hybridation avec des données simulées
- **IA de confiance** : capacité à produire une fonction de perception avec un niveau de performance escompté et explicable sur un domaine d'emploi aussi large que possible
- **Perception active** : commande d'un capteur, de ses paramètres de prise de vue en fonction d'un environnement multiphysique complexe, d'un système de capteurs coopératifs en vue d'optimiser une fonction de perception globale partagée

*HPC : High Performance Computing

Horizon **Activités** **2030**

La perception augmentée IA de l'environnement est stratégique : elle améliore la compréhension et la modélisation, permet le suivi des évolutions d'une scène géolocalisée, la détection d'événements imprévus ou anormaux et offre des capacités supplémentaires d'anticipation.



Nouveaux concepts de systèmes 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 bien-fondé des algorithmes développés.

L'ONERA travaille également sur l'exploitation des flux massifs d'information 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

Nouveaux usages, missions étendues

Réduire l'empreinte environnementale

Efficacité, sécurité et certification du système de transport aérien

Surveillance de l'environnement opérationnel et naturel

Nouveaux concepts de systèmes

Systèmes d'armes conventionnels du futur

Nouvelles générations d'armes stratégiques

Accès performant et sûr à l'espace

Utilisation durable et sécurisée de l'espace

Nouveaux moyens de simulation

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 seront intégrés dans ces centres de commandement et sur les systèmes multi-robots 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 programmatiques

5.1 | Systèmes coopératifs et interactifs sur théâtres d'opérations

5.2 | Communications/connectivité pour les systèmes AED



5.1 | Systèmes coopératifs et interactifs sur théâtres d'opérations



L'ONERA développe un ensemble de travaux sur les systèmes robotiques autonomes, distribués et coopératifs (robots terrestres, drones aériens et maritimes) pour réaliser des missions complexes sur les zones stratégiques des théâtres des opérations militaires et civiles. Il s'agit de réaliser des missions de surveillance de sites, de protection de convois ou de pelotons ; d'exploration, de modélisation et d'évaluation de l'environnement ; de renseignement et recherche d'objets d'intérêt ; de support aux recherches et sauvetages.

Dans ce contexte, l'enjeu est d'améliorer les capacités de navigation et de coordination des vecteurs autonomes, le traitement des données des charges utiles et leur interprétation sémantique, l'adaptation du niveau d'autonomie des vecteurs au contexte opérationnel. La conduite des opérations demande également de faire évoluer les capacités de prise de décisions tactiques et stratégiques, et de faire évoluer les capacités de coopération entre robots, drones, et les différents centres de commandement (C2, C3, C4). L'évolution en milieu contesté exige la résilience du système, notamment vis-à-vis de l'évolution de l'environnement opérationnel, mais aussi vis-à-vis de la perte de communication et de la volonté de discrétion.

L'ambition est qu'à l'horizon 2040, des outils logiciels et méthodologiques issus des travaux ONERA soient intégrés dans les centres de commandement et sur les systèmes multirobots participant aux futures missions des forces armées françaises.

Activités

- Conduite des opérations, navigation et coopération autonomes, perception pour l'élaboration de la situation tactique
- Synthèse des scénarios multirobots, réalisation d'expérimentations et de démonstrations

Thématiques scientifiques

- **Architecture** – adaptabilité/reconfiguration/flexibilité/agilité, modularité, rapidité, robustesse, sûreté de fonctionnement – preuve formelle, dimensionnement
- **Données** – précision, agrégation, robustesse, mise en réseau, compacité, sécurisation, interconnexion
- **Perception** – vision, audio, multicapteur : détecteurs collaboratives, reconstruction de l'environnement, apprentissage automatique de scène
- **Traitement intelligent des capteurs** – collaboration permettant le partage des informations et l'amélioration des traitements embarqués
- **Fusion de données** – trajectographie multi-cible, corrélation de situation tactique, détection de comportements d'intérêts ou anormaux
- **Décision** – autonomie de navigation, autonomie de mission, collaboration, coopération, rapidité, réactivité
- **Communication** – robustesse, discrétion, stratégie de maintien
- **Capteurs/charges utiles** – détectivité, dimensionnement, autonomie, communication

Horizon2040

La robotisation des équipements dans les forces armées se poursuit et la palette de missions qui leur sont confiées se diversifie : l'autonomisation décisionnelle des robots et des drones coopérant sur les théâtres d'opérations est un enjeu majeur des quinze prochaines années.

Nouveaux usages, missions étendues

Réduire l'empreinte environnementale

Efficacité, sécurité et certification du système de transport aérien

Surveillance de l'environnement opérationnel et naturel

Nouveaux concepts de systèmes

Systèmes d'armes conventionnels du futur

Nouvelle génération d'armes stratégiques

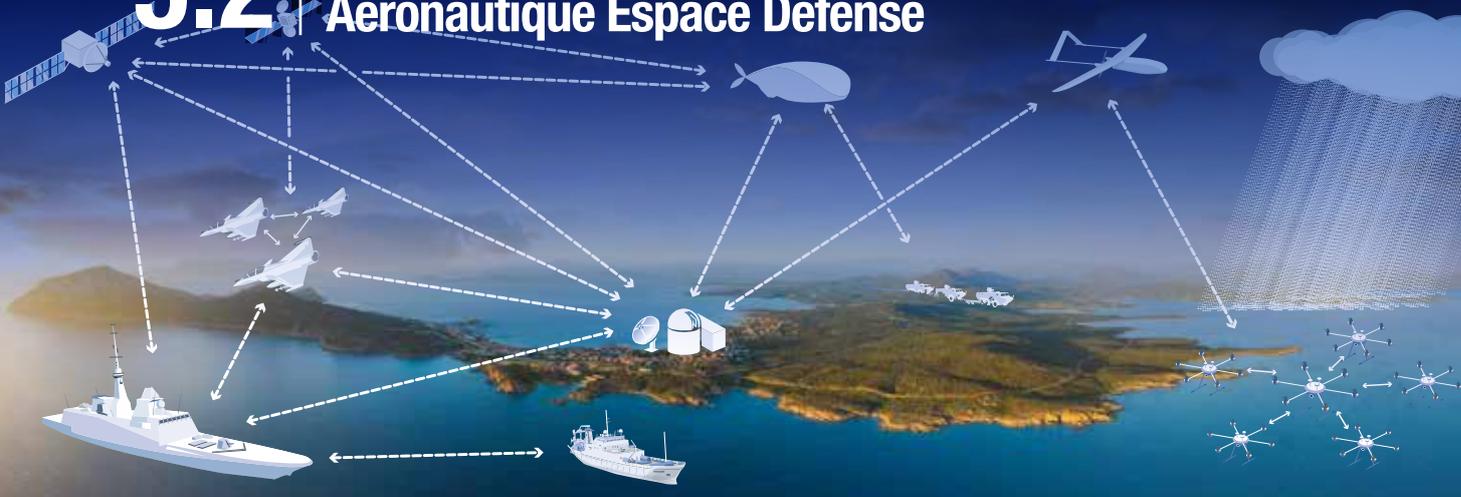
Accès performant et sûr à l'espace

Utilisation durable et sécurisée de l'espace

Nouveaux moyens de simulation



5.2 | Communications et connectivité pour les systèmes Aéronautique Espace Défense



Les moyens de communication rapides, sûrs, discrets – difficilement interceptables dans un contexte défense –, frugaux et couvrant des distances potentiellement longues connaissent actuellement une croissance exponentielle.

Cette feuille de route vise à répondre au besoin de maîtrise technique des performances et des limites de ces moyens de nouvelle génération. Il s'agira pour l'ONERA, à terme, d'apporter au ministère des Armées et aux industriels du domaine l'expertise nécessaire à l'exploitation de moyens de communication sécurisés très performants mais sensibles aux perturbations de l'environnement.

Cette ambition est déclinée en trois enjeux sectoriels :

- **Aéronautique** : Répondre aux enjeux de communication posés par la mobilité aérienne en zone urbaine et la gestion du trafic de drones. Objectifs : communication multiphysique ou multi-canal, distribuée, faible *swap**, fiabilité, robustesse aux interférences, très faible latence, le tout en environnement complexe.
- **Espace** : Être partie prenante du développement de communications satellitaires performantes et sécurisées. Objectifs : haut (> 10 Gbps) à très haut (> 1Tbps) débits pour liens bidirectionnels, disponibilité maîtrisée, faible *swap*, très faible latence, communications sécurisées.
- **Défense** : Répondre notamment aux enjeux spécifiques du SCAF (Système de combat aérien du futur) et du programme Scorpion (modernisation des capacités de combat de l'Armée de terre). Objectifs : liens discrets, disponibles, résilients, haut débit (> 10 Gbps), faible latence, *swap* compatible de l'emport sur vecteurs.

*Swap : Size Weight and Power

Activités

- **Technologies clés**
 - Concerne principalement les communications optiques et radio à fréquence élevée : regroupe les travaux menés sur les antennes, les sources, les détecteurs, les formes d'ondes et enfin les terminaux.
- **Modèles physiques de l'environnement**
 - Regroupe les travaux sur les modèles physiques d'environnement et du canal de propagation ainsi que les expérimentations à mener afin de valider les modèles.
- **Techniques de traitement**
 - Améliorer et optimiser les performances des systèmes, pour prendre en compte le comportement de l'environnement physique – terrestre, maritime ou atmosphérique –, ou améliorer la résilience par rapport à l'environnement EM et la robustesse à des agressions intentionnelles.
- **Outils d'évaluation des performances système**
 - Regroupe les travaux sur l'impact du milieu et du canal de propagation pour l'évaluation de performance de liens de communications.
- **Briques logicielles**
 - Développer un *Communication Laboratory (ComLab)*, pour l'évaluation de performance de liens de communications.
- **Plateformes ou démonstrateurs end-to-end**
 - Contribuer au développement d'une démonstration représentative d'un système futur d'un des secteurs AED, plus globale que toutes les expérimentations de télécommunication réalisées jusqu'alors par l'ONERA.

Horizon.....2033

Il s'agit pour l'ONERA d'assumer à moyen terme le rôle de référent étatique pour les communications dans les systèmes du domaine Aéronautique Espace Défense.



Systemes 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.

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

d'appareil, 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 turbo-réacteurs et des statoréacteurs dans des architectures compactes.

Pour répondre à ces enjeux, l'ONERA dispose d'une longue expérience, acquise notamment par son implica-

- Nouveaux usages, missions étendues
- Réduire l'empreinte environnementale
- Efficacité, sécurité et certification du système de transport aérien
- Surveillance de l'environnement opérationnel et naturel
- Nouveaux concepts de systèmes
- Systemes d'armes conventionnels du futur
- Nouvelles générations d'armes stratégiques
- Accès performant et sûr à l'espace
- Utilisation durable et sécurisée de l'espace
- Nouveaux moyens de simulation

tion dans les programmes de la composante nucléaire aéroportée. La propulsion à hautes vitesses par statoréacteur et superstatoréacteur 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 systèmes plus large. Pour répondre aux défis technologiques posés, 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 antimissile

Les systèmes de défense aérienne et antimissile intégrés, la défense aérienne et la défense antimissile 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 deviendra 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.

Feuilles de route programmatiques (non diffusées)

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 antimissile



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 pro-

gramme 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, conjugués à la mise en réseau des systèmes défen-

Nouveaux usages, missions étendues

Réduire l'empreinte environnementale

Efficacité, sécurité et certification du système de transport aérien

Surveillance de l'environnement opérationnel et naturel

Nouveaux concepts de systèmes

Systèmes d'armes conventionnels du futur

Nouvelles générations d'armes stratégiques

Accès performant et sûr à l'espace

Utilisation durable et sécurisée de l'espace

Nouveaux moyens de simulation

sifs, 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 antimissile 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. Bâtir 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 4e 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 programmatiques (non diffusées)

7.1 | Attaque stratégique balistique

7.2 | Menaces anti-stratégiques & Confrontation attaque-défense stratégique

7.3 | Composante nucléaire aéroportée



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 États-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 une 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 lan-

ceur 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 main-

tenance 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, complèteront 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, observa-

tion... 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 de 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 programmatiques

8.1 | Conception de lanceurs innovants, économiques et réutilisables

8.2 | Nouveaux concepts de services en orbite



8.1 | Conception de lanceurs innovants, économiques et réutilisables



De nombreuses réalisations et projets de lanceurs réutilisables ont émergé ces dernières années, principalement sous l'impulsion de sociétés privées américaines. D'abord orientés vers le placement en orbite de charges de plusieurs tonnes, ces concepts s'orientent également vers des charges plus petites, pour faire face à l'essor des méga-constellations de mini-satellites et à l'accroissement des exigences de réactivité, cadence de lancement et flexibilité. En Europe, bien qu'un grand nombre de start-ups aient vu le jour ces dernières années, aucun projet de lanceur réutilisable adapté au lancement économique de mini et micro satellites n'est encore arrivé au stade de la démonstration.

On se propose d'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. Cela concerne à la fois le lancement des charges utiles de plusieurs tonnes sur des orbites dites à haute énergie, et le lancement de mini voire micro-satellites sur des orbites de basse et moyenne altitudes, soit au moyen d'un lanceur dédié soit en mode partage de mission sur un lanceur « lourd ».

L'une des pistes prometteuses consiste à incorporer de plus en plus de technologies aéronautiques, réputées fiables et peu coûteuses. Les concepts doivent bien entendu respecter les exigences de la loi sur les opérations spatiales (LOS). On porte également désormais une attention accrue à la durabilité et à l'empreinte écologique du système, pour un cycle de vie complet.

Activités

Développement de nouveaux concepts

- Lanceur réutilisable aéroporté dédié aux mini-satellites (1^{er} étage aéronautique, 2^e et 3^e réutilisables)
- Lanceur réutilisable « lourd » multi-missions

Développements technologiques pour la réutilisation

- Réduire et maîtriser les sollicitations mécaniques et aérodynamiques, notamment pour un second étage réutilisable
- Surveiller le système dans son environnement et développer des solutions de diagnostic santé (système propulsif, structure et avionique) à bas coût
- Garantir un haut niveau de fiabilité et de probabilité de récupération des étages en prévoyant des stratégies adaptées de reconfiguration de missions
- Améliorer les structures (matériaux composites, fabrication additive...)
- Adapter le guidage et pilotage du lanceur pour la phase de retour
- Définir une maintenance inspirée de l'aéronautique
- Développer des moyens propulsifs innovants (monoergol « vert », propulsion hybride, moteur à onde de détonation continue)
- Améliorer la compréhension et la simulation des chambres de combustion oxygène liquide/méthane
- Étendre les compétences de conception avancée et d'évaluation de performances des systèmes
- Se doter de moyens pour évaluer et prendre en compte l'impact environnemental des lanceurs

Horizon.....2035

L'ONERA a l'expérience et toutes les compétences pour proposer technologies et concepts de rupture dans ce monde du transport spatial en pleine mutation.

- Nouveaux usages, missions étendues
- Réduire l'empreinte environnementale
- Efficacité, sécurité et certification du système de transport aérien
- Surveillance de l'environnement opérationnel et naturel
- Nouveaux concepts de systèmes
- Systèmes d'armes conventionnels du futur
- Nouvelle générations d'armes stratégiques
- Accès performant et sûr à l'espace
- Utilisation durable et sécurisée de l'espace
- Nouveaux moyens de simulation



8.2 | Nouveaux concepts de services en orbite



Il s'agit de proposer et d'étudier des concepts de services en orbite innovants et d'intérêt dual, particulièrement pour :

- les drones spatiaux – des plateformes légères, percevant leur environnement, autonomes dans leur déplacement et leurs décisions, agiles et dotés d'effecteurs pour intervenir sur des objets en orbite coopératifs ou non ;
- l'usine spatiale – ensemble des technologies d'assemblage, de modification, voire de fabrication en orbite.

Il s'agit de mettre en place à l'ONERA une expertise sur les capacités technologiques à la source de futurs services innovants et de proposer de nouveaux concepts répondant à des problématiques commerciales, environnementales ou de défense.

- L'amélioration de la résilience des systèmes orbitaux face à des menaces intentionnelles ou non (débris)
- La neutralisation des capacités ou menaces adverses
- La diminution des coûts de déploiement et d'opération de nos capacités à iso-performance
- Les innovations de rupture entraînant un gain capacitaire important
- L'élimination active des débris (ADR - Active Debris Removal)
- Les services de maintenance des systèmes orbitaux (réapprovisionnement, réparation, reconfiguration...)
- L'assemblage de grandes structures et la fabrication en orbite
- L'utilisation et la manipulation des poussières lunaires

Activités

- **0-10 ans** : fédérer l'ONERA autour des nouveaux concepts, développer les coopérations et la formation des ingénieurs.
- **0-5 ans, volet 1** : drone spatial. Conception et développement technologiques pour un démonstrateur de satellite agile et autonome en vue d'une mission d'inspection ou de protection d'une infrastructure en orbite (satellite gardien), en particulier la détection d'approche, la caractérisation de la menace et son éventuelle interception.
- **0-5 ans, volet 2** : assemblage en orbite. Réalisation et démonstration au sol des briques technologiques nécessaires pour l'assemblage en orbite d'un capteur optique ou SAR et pour lever les verrous sur la manipulation, les interfaces et l'utilisation dans un objectif de robotique collaborative (flottille de petits satellites).
- **6-10 ans, volet 1** : démonstration en orbite, avec le soutien des agences.
- **6-10 ans, volet 2** : démonstration en orbite des concepts précédents (en lien avec la feuille de route 9.3), extension des travaux sur la fabrication pour intégrer la gestion du cycle de vie (*ALM - Application Lifecycle Management*) et l'exploitation des ressources.

Horizon.....2035

L'émergence de nouveaux marchés mais aussi de nouvelles menaces pour les systèmes orbitaux appellent des ruptures technologiques. Aussi, l'ONERA se prépare au défi de l'assemblage des grandes charges utiles en orbite, et à celui des drones spatiaux, qui au delà de la maintenance, pourront offrir de nouveaux services, y compris pour la Défense.

Réduire l'empreinte environnementale

Efficacité, sécurité et certification du système de transport aérien

Surveillance de l'environnement opérationnel et naturel

Nouveaux concepts de systèmes

Systèmes d'armes conventionnels du futur

Nouvelle générations d'armes stratégiques

Accès performant et sûr à l'espace

Utilisation durable et sécurisée de l'espace

Nouveaux moyens de simulation



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.

CubeSat et New Space

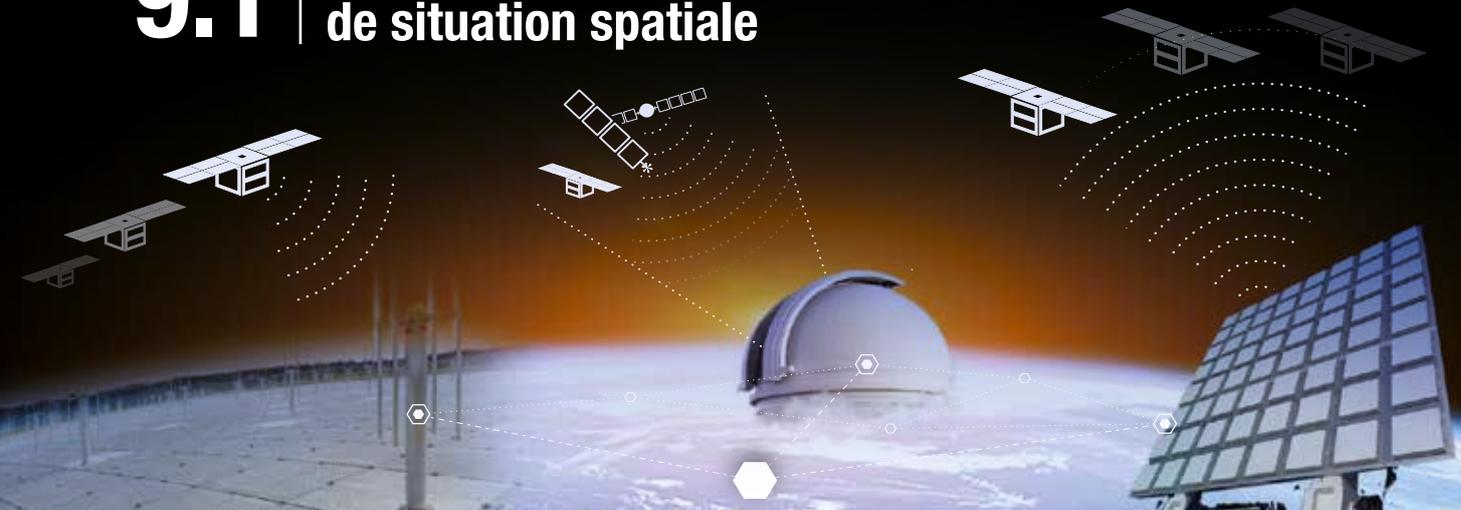
L'avènement des petits satellites (moins de 50 kg) ouvre la possibilité de disposer de plateformes souples et multiples. Le défi est de combiner performance et compacité des capteurs, avec une évaluation de la performance du système en sortie d'une chaîne de traitements avancés mettant en valeur les 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 programmatiques

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



9.1 | Système de tenue de situation spatiale



La surveillance de l'Espace est une thématique importante de l'ONERA, en particulier la composante liée à la connaissance des objets et actions en orbite : la tenue de situation spatiale.

Deux grands enjeux, respectivement dual et défense, pour assurer la sécurité dans l'Espace sur tous les domaines d'emploi et phases de vie :

- garantir l'utilisation sûre de l'Espace ;
- identifier les menaces actives potentielles ou effectives.

Les besoins, face à l'évolution rapide des objets et de leur environnement, sont multiples :

- s'adapter aux dynamiques nouvelles – manœuvres, lancements réactifs ;
- améliorer la détection des (nouveaux) objets, plus nombreux, plus petits, sur de nouvelles orbites ;
- gérer des mesures de capteurs plus nombreux et variés ;
- mieux comprendre les objets, pour caractériser et identifier ;
- gérer la diffusion de données dans des cadres multilatéraux et multinationaux.

Enfin, la tenue de situation spatiale s'intègre dans le cadre global de la gestion des opérations spatiales :

- disposer d'une connaissance autonome actualisée des capacités et activités des différents acteurs – nations, privés ;
- organiser les opérations spatiales, du lancement à la fin de vie ;
- assurer maîtrise, disponibilité et planification des fonctionnalités spatiales ;
- limiter les risques pour l'espace aérien et la surface terrestre.

Activités

Nouveaux systèmes senseurs de surveillance des objets en orbite

- En orbite basse (< 2000 km d'altitude), préparer le successeur de Graves en parallèle de sa rénovation en cours. Axes d'intérêt : capitalisation sur l'acquis – notamment catalogage –, montée en fréquence, exploitation des nouvelles technologies – puissance de calcul, numérisation...
- En orbite géostationnaire et orbite moyenne, étudier techniques et traitements innovants en détection, catalogage et caractérisation
- Développer l'imagerie par optique adaptative et l'imagerie radar ISAR, et étudier des méthodes et outils d'exploitation pour des analyses fusionnées des images

Activités transverses et traitements

- Étude de règles et outils de diffusion de données multiniveaux, permettant le partage de données et produits en environnement multi-utilisateurs et/ou international
- Outils de planification des observations, pour optimiser les ressources pour la trajectographie, la caractérisation et l'imagerie
- Étude de nouveaux pistages et stratégies innovantes de rassemblement de mesures – association de mesures isolées, par exemple...

Horizon.....2030

La surveillance de l'Espace liée aux activités humaines est une thématique majeure de l'ONERA notamment grâce à l'historique du système de veille spatiale Graves, opérationnel depuis 2005. Il dote la France et l'Europe d'une capacité souveraine et stratégique unique.



9.2 | Survivabilité des systèmes spatiaux



L'espace est le théâtre d'enjeux considérables, tout particulièrement économiques et de souveraineté. Son utilisation durable est menacée : à l'hostilité naturelle du milieu s'ajoutent des risques croissants liés à l'activité spatiale (débris, collisions, interférences...) voire des risques d'activités hostiles.

La survivabilité des systèmes spatiaux doit être comprise comme le maintien d'un niveau de service suffisant malgré une agression ou un événement naturel de grande ampleur. Elle nécessite la prise en compte d'un large cadre allant de la conception à la gestion des opérations spatiales : considérer les menaces sur tous les éléments participant à une fonction ; minimiser les risques dans toutes les phases de vie du segment spatial ; assurer maîtrise, disponibilité et planification des fonctionnalités et en garantir l'intégrité à long terme ; respecter les réglementations dont la LOS – Loi sur les opérations spatiales.

L'objectif est d'étudier, modéliser et outiller la connaissance et les impacts des menaces – naturelle ou intentionnelle – envers les systèmes spatiaux et permettre l'évaluation de leur vulnérabilité :

- identifier et modéliser les menaces naturelles et leurs effets sur les systèmes, développer les outils permettant de spécifier, exploiter et intégrer les mesures pour mieux connaître l'environnement ;
- recenser, modéliser les menaces intentionnelles et leurs effets sur les systèmes spatiaux et leurs composants ou concevoir celles-ci ;
- développer les méthodes et outils nécessaires à l'évaluation de la vulnérabilité et de la survivabilité des systèmes spatiaux à ces menaces ;
- proposer et évaluer des concepts, des technologies et des architectures permettant d'améliorer la survivabilité en orbite des systèmes – protection, résistance, évitement, diminution/neutralisation de la menace, dissuasion ;

- évaluer et réduire/supprimer le risque au sol lié aux débris spatiaux dans le cadre de l'application de la LOS (Loi relative aux opérations spatiales).

Activités

- Étudier les interactions Soleil-Terre ; caractériser l'environnement des systèmes spatiaux – météo spatiale – ; impact des agressions naturelles et non-intentionnelles sur les fonctions et composants des engins spatiaux – risques électrostatiques, effets de vieillissement, effets transitoires, collision...
- Identifier, caractériser les agressions susceptibles d'être mises en œuvre dans l'espace ou depuis le sol : explosions nucléaires de haute altitude ; armes à effets dirigés de forte puissance de type laser, missiles anti-satellites, armes embarquées
- Qualifier et quantifier la vulnérabilité et la survivabilité des systèmes orbitaux face aux agressions ; capitaliser les outils d'évaluation de la vulnérabilité des systèmes orbitaux dans un référentiel dédié, pour l'expertise et les simulations technico-opérationnelles
- Évaluer/maîtriser et réduire/supprimer le risque des rentrées de débris arrivant au sol et tester la rentrée de nouveaux composants élémentaires dans la stratégie Design for Demise (conception pour destruction) : développer ou améliorer les modèles physiques (aéro-thermo-mécanique, mécanique du vol) ; simuler des rentrées non contrôlées, estimer les risques ; mettre en œuvre des outils de type IA (intelligence artificielle) ; élaborer des missions low-costs de tests sur des nanosats ; expériences sol...

Horizon.....2035

La survivabilité des systèmes spatiaux rassemble trois enjeux majeurs : la compréhension des menaces et de leurs effets, l'augmentation de la résilience, la maîtrise des rentrées atmosphériques non pilotées.

Nouveaux usages, missions étendues

Réduire l'empreinte environnementale

Efficacité, sécurité et certification du système de transport aérien

Surveillance de l'environnement opérationnel et naturel

Nouveaux concepts de systèmes

Systèmes d'armes conventionnels du futur

Nouvelle générations d'armes stratégiques

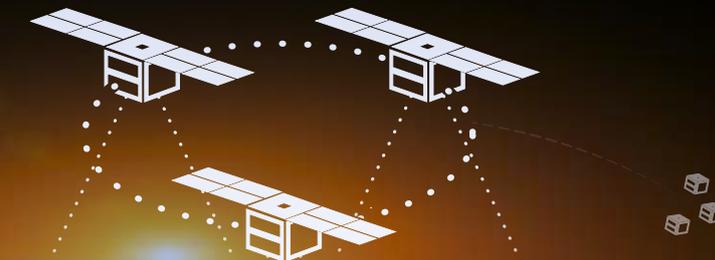
Accès performant et sûr à l'espace

Utilisation durable et sécurisée de l'espace

Nouveaux moyens de simulation



9.3 | Missions et capteurs pour les nouveaux satellites



L'ambition de cette feuille de route est multiple :

- positionner l'ONERA comme un acteur à part entière du *New Space*, apte à concevoir, réaliser, mettre en œuvre et faire voler des capteurs scientifiques ainsi que des sous-systèmes dédiés, sur emport unique et sur constellation
- définir et réaliser des démonstrateurs de capteurs scientifiques, de sous-systèmes et de concepts de missions pour des petits satellites de moins de 50 kg en orbite
- favoriser la spatialisation de capteurs ONERA innovants permettant de proposer des micro/nanosatellites ambitieux
- proposer de nouveaux concepts de missions, notamment grâce au vol en formation de micro/nanosatellites.

Si l'objectif premier est de disposer des compétences pour mener à bien des missions de nanosatellite, et être un partenaire fort de missions scientifiques de type microsatsellites, l'objectif à long terme est de déployer un essaim de satellites agiles pour l'observation à haute résolution de la Terre (optique visible, IR ou hyperspectrale, ou SAR).

La recherche doit être holistique car la problématique de compacité conduit à une imbrication étroite de la charge utile et de la plateforme sous les aspects : mécanique, thermique, CEM, partage de l'énergie, capacités calcul/mémoire, tenue à l'environnement...

Cela ne peut se faire sans des partenariats forts avec les acteurs actuels du spatial (*New Space* ou non), en particulier plateformes et opérateurs. C'est une démarche de rupture et non pas incrémentale.

Activités

- **ONSAT-1 : Mission CROCUS**
 - réaliser une première charge utile pour un nanosat
 - initier les travaux d'un SpaceLab, plateforme d'analyse mission pour charge utile
- **ONERAD : Mission CREME**
 - concevoir et réaliser un instrument miniaturisé de mesure des radiations spatiales
 - réaliser un démonstrateur autonome pouvant ensuite être industrialisé,
- **FLYLAB : Vol en formation de deux nanosatellites**
 - réaliser deux nanosatellites 6U, un dédié à l'observation, et l'autre à l'agilité ; démonstration en vol
- **ACCEOS : Concepts de constellations de satellites d'observation de la Terre**
 - soutien aux développements de BPI France (capteurs optiques + planification bord/sol)
 - prévision des conditions météorologiques
 - conception et simulation des constellations
- **CULONO sur InspireSat-7 (Latmos) : mesures de perturbations de l'ionosphère en HF**
 - réaliser une charge utile
 - développer un logiciel embarqué sur carte spécifiquement conçue pour la mission images

Horizon.....2028

L'acquisition de l'expertise microsatsellites/nanosatsellites renforce la mission de l'ONERA comme acteur du *New Space* auprès de la Défense et des acteurs nationaux du spatial.



Nouveaux moyens couplés de simulation numérique et expérimentale, et exploitation de données massives

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.

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 méca-

Réduire l'empreinte environnementale

Efficacité, sécurité et certification du système de transport aérien

Surveillance de l'environnement opérationnel et naturel

Nouveaux concepts de systèmes

Systèmes d'armes conventionnels du futur

Nouvelles générations d'armes stratégiques

Accès performant et sûr à l'espace

Utilisation durable et sécurisée de l'espace

Nouveaux moyens de simulation

nique 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.

Feuilles de route programmatiques

- 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



Nouveaux usages, missions étendues

Réduire l'empreinte environnementale

Efficacité, sécurité et certification du système de transport aérien

Surveillance de l'environnement opérationnel et naturel

Nouveaux concepts de systèmes

Systèmes d'armes conventionnels du futur

Nouvelle générations d'armes stratégiques

Accès performant et sûr à l'espace

Utilisation durable et sécurisée de l'espace

Nouveaux moyens de simulation

10.1 | Plateforme et méthodes de simulation numérique multiphysique haute-fidélité



Cette feuille de route définit les objectifs scientifiques ainsi que les moyens et méthodes pour le développement d'une plateforme de simulation numérique – ORION – intégrant les modélisations physiques des métiers de l'ONERA, les outils de couplage multiphysique – méthodes de calcul et modèles de représentation – et le traitement des données utilisant des modèles mathématiques déterministes ou bien statistiques.

ORION fédérera l'ensemble des grands logiciels ONERA utilisés dans les différentes physiques – mécanique des fluides, énergétique, matériaux, électromagnétisme... – dans un environnement logiciel unifié afin d'en être à terme le vecteur de diffusion privilégié.

ORION répondra aux besoins de l'ONERA ainsi qu'à ceux de ses principaux partenaires ; il permettra de réaliser des simulations pour différents niveaux de précision, allant des méthodes rapides jusqu'à la haute-fidélité, permettant une analyse très fine de la physique mise en jeu.

Le couplage entre les différents modules d'ORION devra permettre de réaliser de manière performante des scénarios d'une grande complexité algorithmique. Enfin, cette plateforme sera ouverte vers l'extérieur.

Toute l'expertise ONERA sur les plateformes logicielles sera mobilisée afin de construire un outil à la fois entièrement compatible avec la plateforme Safran Mosaic tout en répondant à l'ensemble des besoins des autres clients et partenaires de l'ONERA – en particulier pouvoir dialoguer avec le nouveau logiciel CFD CODA, développé en partenariat entre Airbus, l'ONERA et le DLR.

Activités

Un défi crucial consiste à élargir l'accès à la simulation numérique en simplifiant la mise en données, pour la limiter à la description de la géométrie, aux conditions aux limites, et quelques paramètres.

Le contrôle de la précision des résultats et l'intégration des incertitudes constituent également des enjeux majeurs.

La précision spatio-temporelle permettra d'accéder à des niveaux de résolution très fins et d'effectuer des calculs « à des coûts réduits ».

Les algorithmes de propagation d'incertitudes et les méthodes d'optimisation robuste dans un contexte de couplage multi-physique seront développés dans l'objectif du développement de « jumeaux numériques ».

Des travaux innovants portant sur l'efficacité algorithmique ou informatique réduiront les coûts de simulation ou permettront d'accéder à des simulations frontière encore non pratiquées aujourd'hui : simulations multi-échelles pour plusieurs étages d'un moteur ou bien configuration d'avion en hypersustentation avec gouvernes de contrôle.

Pour améliorer les niveaux de prévision, un axe important concernera les méthodes d'assimilation et de fusion de données ainsi que les méthodes relevant de l'intelligence artificielle, par exemple pour les problèmes liés à la modélisation de la turbulence.

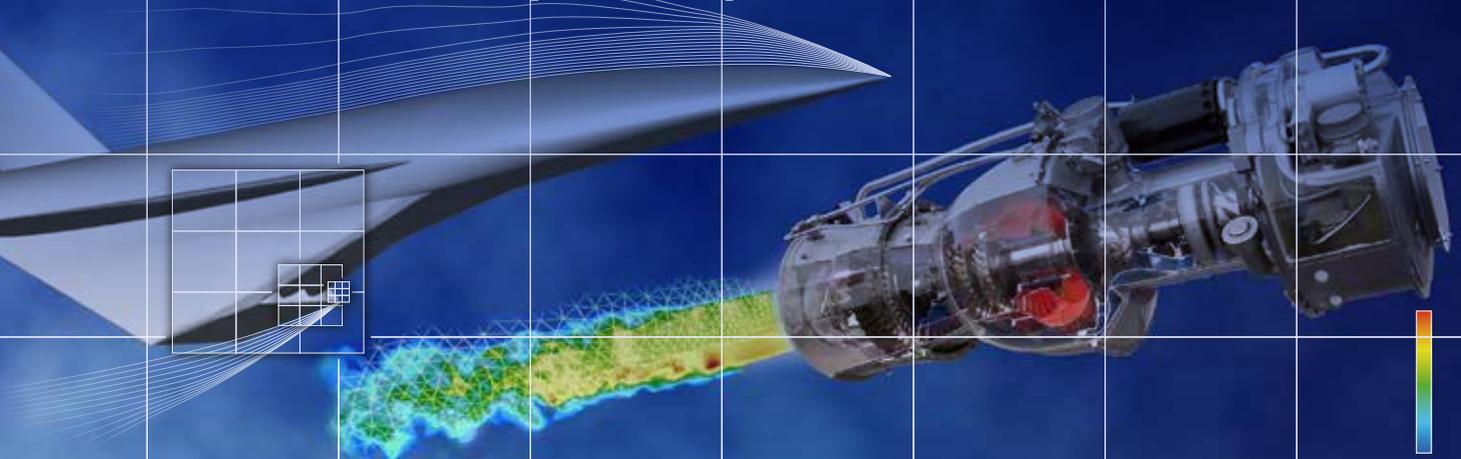
Un élément déterminant pour la viabilité des méthodes développées concernera leur cohérence avec les architectures informatiques massivement parallèles et hétérogènes de nouvelle génération.

Horizon.....2035

La simulation numérique haute-fidélité, qui associe simulation des phénomènes physiques dans toute leur complexité et finesse de représentation de la géométrie, devient indispensable pour garantir les performances globales dans le processus de conception.



10.2 Défis applicatifs de la simulation numérique aérospatiale



Un moteur aéronautique complet et un aéronef hypersonique sont les applications retenues pour pousser la simulation numérique du futur dans ses retranchements, en plaçant l'ambition à un très haut niveau. Ces défis constituent un puissant outil de motivation collective et de communication. Il s'agit de simulation numérique haute-fidélité, en termes de représentation des phénomènes physiques et de géométrie.

Les travaux s'appuieront directement sur le projet de plateforme de simulation multiphysique haute-fidélité ORION (cf 10.1). Les défis retenus font appel à un large spectre de compétences en mécanique des fluides, matériaux et structures, transferts radiatifs, aéroélasticité ou encore aéroacoustique. D'autres défis pourront être proposés ultérieurement, en particulier : décrochage d'un avion de transport en transsonique, écoulement autour d'un hélicoptère, ingestion de volatile dans un moteur.

Simulation d'un moteur aéronautique complet

L'enjeu est de répondre au besoin d'outils fiables pour la conception de moteurs civils :

- aux performances améliorées
- avec un impact sur l'environnement réduit

Le démonstrateur retenu est le banc BEARCAT de Safran Tech, qui est un dérivé du moteur MAKILA 2. Il s'agira de réaliser, dans un premier temps, une simulation du banc complet, avec une finesse accrue de la chambre de combustion et de la turbine, ce qui mettra en avant les phénomènes multiphysiques des écoulements et leurs couplages avec la thermique des matériaux.

L'ambition est d'aller jusqu'au bilan aérothermomécanique du banc, en particulier sa durée de vie, et d'y ajouter l'évaluation de la signature optique du moteur.

Les premiers travaux ont été initiés en 2022, dans le cadre du projet DGAC ATOM, réalisé en partenariat avec Safran.

Simulation *nose-to-tail* d'un aéronef hypersonique avec séparation

Le besoin principal est lié aux attentes militaires : des projets de missiles hypervéloces. Des projets d'avions pourraient profiter de ces travaux.

L'objectif principal de la simulation *nose-to-tail* d'un tel aéronef est d'accéder directement au bilan aéro-propulsif du véhicule, tant pour les phases quasi-stationnaires du vol que pour les phases instationnaires (séparation, ouverture de trappes, braquage de gouvernes).

Les verrous que cette feuille de route permettra de lever sont :

- la modélisation de la transition laminaire-turbulent de Mach 2,5 à 6-8 ;
- des simulations avec de grands décollements à Mach élevé ;
- une meilleure prise en compte de l'atomisation du jet de combustible ; des dizaines de jets doivent être représentés ;
- la prise en compte du délicat couplage entre le circuit de refroidissement et la chambre de combustion ;
- une représentation plus fine de la cinétique chimique ;
- la prise en compte de la stabilisation de la flamme par plasma ;
- la prise en compte d'éléments mobiles exaflopiques et hétérogènes de nouvelle génération.

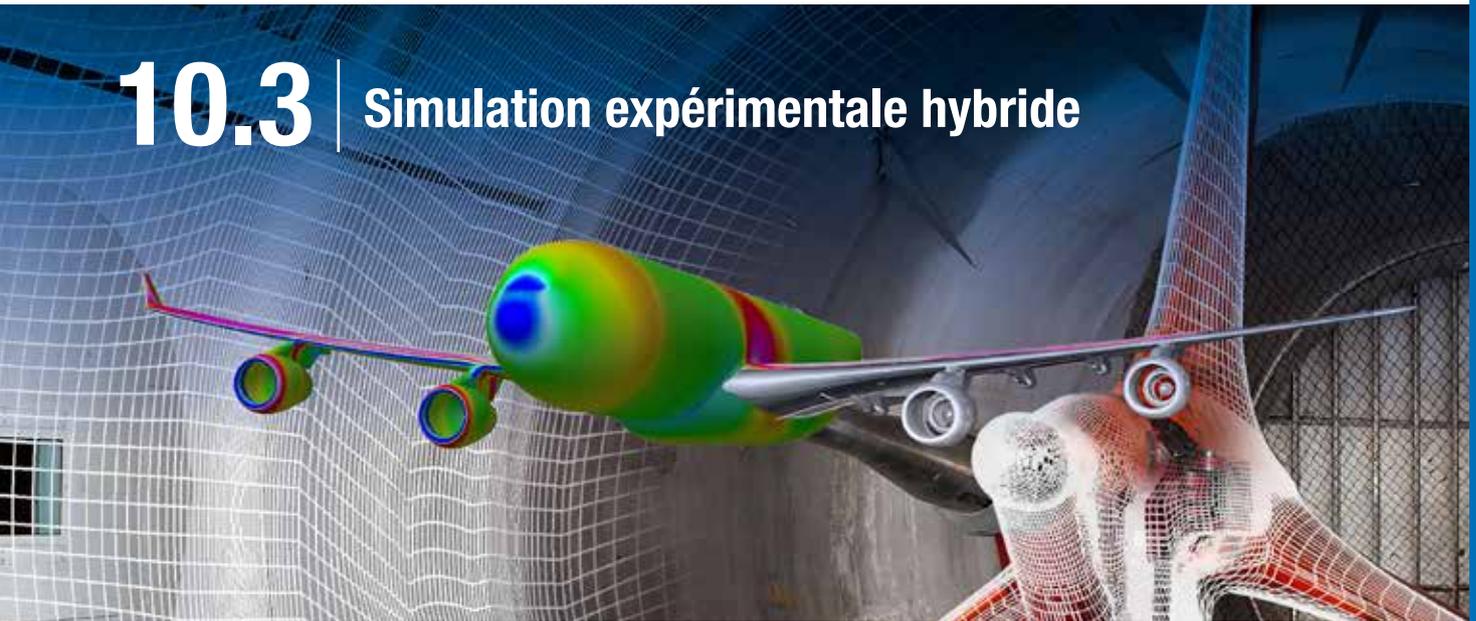
Horizon.....2030

Horizon.....2030

Ces défis applicatifs préparent une simulation numérique à très haute précision, qui mettra en évidence des verrous dont la résolution permettra des progrès dans la conception. Cette simulation d'exception préfigure la simulation « courante » d'un futur plus lointain.



10.3 | Simulation expérimentale hybride



La simulation expérimentale hybride consiste à développer et exploiter des environnements de réalisation d'essais augmentés par la simulation, prenant la forme de plateformes matérielles et logicielles fortement interfacées avec les moyens numériques et expérimentaux, dans les domaines de la mécanique des fluides et de la mécanique des solides.

La capacité de prévoir les écoulements aérodynamiques autour des aéronefs et dans leurs moteurs est en effet d'une importance cruciale car ces phénomènes rendent compte pour une grande partie de la performance finale des appareils. Les recherches en matériaux et structures débouchent quant à elles sur le développement de structures aérospatiales plus légères et plus tolérantes à leur environnement.

Les défis à relever par l'industrie aérospatiale passent par une résolution du cloisonnement entre expérimental et numérique.

On se dotera de techniques d'hybridation et de fusion de données d'essai et de simulation permettant :

- de mettre en œuvre et d'utiliser des jumeaux numériques pour mieux préparer les essais, mieux corriger les biais inévitables et mieux affecter les ressources expérimentales.
- de mieux exploiter la complémentarité déjà existante entre les simulations et les essais, en termes de quantité, de qualité et de coût de l'information fournie.
- d'améliorer et d'harmoniser les informations fournies par les différents moyens de caractérisation à la disposition du concepteur et du chercheur, pour tendre vers une description unique et unifiée.

Méthodologies centrales

Fusion de données hybrides et synthèse d'expériences

Assemblage d'informations hétérogènes - en densité, en incertitude - décrivant la même réalité physique

Capteurs augmentés par des modèles

Adjonction d'éléments de modèle à la mesure réalisée par un ensemble de capteurs. La mesure guidée par le modèle est débruitée et super-résolue a posteriori. Les capacités de la mesure sont étendues pour ouvrir de nouveaux champs de caractérisation

Simulations numériques augmentées par assimilation de données expérimentales

Approche *data-driven* : Les données de mesure servent à estimer ou ré-estimer des quantités mal connues ou modélisées de façon arbitraire. Objectifs : déterminer les plages de fonctionnement optimal et qualifier les performances dans différents contextes d'intérêt aérospatial.

Activités transverses ou de support

Interaction et communication simulation/essai

Mise en place de standards de représentation des données pour une exploitation conjointe efficace et une visualisation interactive

Maîtrise des incertitudes expérimentales et numériques

Contribution à la certification et à la conception multidisciplinaire

Développements des méthodes de mesure

Amélioration de la résolution et de la robustesse des capteurs, et de la densité d'information fournie

Intégration et démonstrations

Sélection de certaines technologies développées afin d'achever leur maturation et de les pérenniser

Horizon.....2035

Fournir une description unifiée et optimisée des systèmes aéronautiques, issue de la fusion de résultats de mesure et de simulation dans les domaines de la mécanique des fluides et des structures.



10.4 | Matériau numérique



Aujourd'hui le temps de développement d'un nouveau matériau est plus long que le temps de développement d'un avion...

Il est donc indispensable de réduire drastiquement les temps de développement et de validation des nouveaux matériaux !

Cet objectif nécessite une capacité de modélisation prédictive et rapide qui ne peut être atteinte que par une connaissance et une maîtrise des phénomènes à chaque échelle.

Les objectifs techniques consistent à effectuer des ponts entre des modèles correspondant à différents niveaux de précision, à différentes échelles de temps et d'espace, et à faire appel à différentes physiques (thermodynamique, mécanique, endommagement, chimie des procédés...) : il peut s'agir de modèles existants à l'ONERA, mais aussi de modèles encore à construire, avec différents niveaux de signification physique, voire de modèles sans physique, de type machine learning (IA).

L'ensemble des modèles pourra dialoguer dans un même espace défini par la future plateforme MAGNUM.

Ces modélisations permettront de réduire drastiquement le volume des campagnes expérimentales (procédés, caractérisation, validation aux différentes étapes du dimensionnement).

Les applications concrètes sont liées aux matériaux aéronautiques du futur, essentiellement à vocation structurale, tels que les composites stratifiés ou tissés, les alliages métalliques (à base de nickel ou titane par exemple), les céramiques haute température, et d'autres.

Les industriels de l'aéronautique sont demandeurs de ces développements et en même temps bien souvent porteurs pour les autres secteurs tels que l'automobile ou l'énergie.

Activités

Démarche de développement multi-échelle

- À l'échelle atomique : méthodes de simulation atomique pour accéder aux échelles des temps longs
- Microstructures : nouveaux modèles macroscopiques entre la méthode des champs de phase (micron) et les modèles macroscopiques (millimètre)
- Mécanique : modèles qui assurent la transition Dislocation/ Mécanique des milieux continus
- Calcul haute performance : utilisation de stratégies de résolution HPC pour une montée en complexité des modélisations aux différentes échelles et pour viser des couplages forts
- Couplages : couplage mécanique/évolution microstructurale à haute température
- Interdiffusion : logiciel pour le calcul et le couplage de l'interdiffusion/ oxydation
- Endommagement : modélisation de la coalescence d'endommagements microscopiques vers des endommagements pouvant engendrer la rupture
- Mécanique et procédés : couplage mécanique/procédé
- Méthodes multi-échelles concurrentielles

Intelligence artificielle et bases de données expérimentales associées

- Couplage profond entre expertise IA et expertise matériaux
- Production et recueil des données en grand nombre, optimisation pour des visées à long terme
- Gestion des incertitudes et des biais sur les propriétés finales

Horizon.....2030

Raccourcir drastiquement le cycle de développement et de validation des nouveaux matériaux nécessaires au domaine Aéronautique, Espace, Défense.

Nouveaux usages, missions étendues
Réduire l'empreinte environnementale
Efficacité, sécurité et certification du système de transport aérien
Surveillance de l'environnement opérationnel et naturel
Nouveaux concepts de systèmes
Systèmes d'armes conventionnels du futur
Nouvelle générations d'armes stratégiques
Accès performant et sûr à l'espace
Utilisation durable et sécurisée de l'espace
Nouveaux moyens de simulation



10.5 | Simulations de défense



La simulation joue un rôle important dans plusieurs phases clés du cycle de développement des systèmes de défense :

- définition d'architecture de système de systèmes
- spécification, conception et évaluation des performances d'un système
- qualification, en complétant et minimisant les essais réels.

L'ONERA est ainsi de plus en plus sollicité pour fournir des outils, des modèles, des données de référence et/ou pour réaliser des études nécessitant de tels moyens.

Une part significative de ces sollicitations provient en particulier du rôle de référent environnement joué auprès du pôle CGN de la DGA.

L'enjeu est donc de mettre au point la future génération d'outils ONERA, qui permettra de soutenir son intervention sur des programmes de défense – SCAF, ASN4G, défense aérienne... – ou sur des nouvelles problématiques comme la militarisation de l'espace. La pertinence de ces outils repose en priorité sur la capacité à prouver la validité des modélisations physiques au travers d'une démarche associée d'instrumentation et de tests réels.

*CGN : Pôle Capteurs, Guidage, Navigation de la DGA

Emprise : Simulateur de scène radar (ONERA)

Matisse : Simulateur de scène optronique (ONERA)

MSaaS : Modeling & Simulation as a Service

OGC CDB : Open Geospatial Consortium Common Database

Activités

Axe 1 : socle commun ONESIM

- Socle couvrant les simulations systèmes de systèmes (SimLabs) et la simulation physique de la scène (Emprise/Matisse)
- Modèle de données standard (OGC CDB) multi-niveaux étendu aux aspects matériaux, signatures et météo, etc.
- Flexibilité des modes de déploiement offerts : déploiement MSaaS en ligne ou classique sur machine cible, interopérabilité des simulations, etc.

Axe 2 : bibliothèque commune de modèles

- Modèles EM de scène, de cibles et de radar
- Modélisation scène et cibles optroniques
- Modélisation systèmes
- Méthodologie : actions de validation et vérification informatiques et physiques

Axe 3 : développement des applications

- Système de combat aérien futur
- Dissuasion
- Défenses aériennes et antimissile intégrées
- Space Lab
- Jumeaux numériques
- Au-delà des applications défense : sécurité, drones

Horizon.....2030

Notre démarche de simulation globale multi-niveaux s'appuie sur un cœur de simulation partagé et un catalogue complet de modèles/données offrant un continuum depuis les niveaux de modélisation « gros grain » jusqu'à des niveaux de représentation physique détaillés.



10.6 | Atelier de conception intégrée de véhicules aérospatiaux



Dans un monde industriel de plus en plus digital avec des enjeux sociétaux majeurs (décarbonation, souveraineté), la conception des véhicules aérospatiaux futurs repose sur la maîtrise de la connaissance et des données produites par une approche transdisciplinaire, englobant les disciplines de la physique du vol ainsi que les interfaces de l'aéronef avec son système opérationnel. Dans ce domaine, l'ONERA joue à la fois un rôle prospectif en imaginant et évaluant les machines volantes qui s'adapteront au contexte d'emploi à horizon 20/30 ans, et un rôle d'expertise pour la maturation de nouvelles technologies et leur impact sur le design des véhicules.

L'objet de cette feuille de route est la création d'un atelier numérique de conception dont les cas d'application sont les véhicules aérospatiaux au sens large, qui sera doté :

- d'outils d'expertise pour évaluer les concepts et configurations proposés par d'autres – industriels, organismes de recherche, universités ;
- d'outils d'exploration et d'innovation afin d'être acteurs et de proposer des outils – modélisation avec différents degrés de finesse, de fidélité et méthodologies MDO – et des concepts de véhicule innovant – nouvelle architecture de véhicule ou nouvelle technologie.

L'objectif est d'avoir une vision holistique du problème, incluant des disciplines telles que : systèmes embarqués, maintenance, exploitation, opérations, production, procédés, certification...

Activités

Une MDO de nouvelle génération permettra à tous les utilisateurs de l'atelier de développement et de conception d'explorer l'espace de conception et d'affiner leurs concepts à toutes les étapes du processus.

Les thématiques de R&D relèvent de quatre axes principaux :

- La modélisation physique
- Les méthodes numériques d'exploration
- L'ingénierie informatique et de la connaissance
- Les aspects manufacturing et cycle de vie du produit

Cas emblématiques de réalisation :

- Optimisation aéro-servo-structure d'une voilure à fort allongement
- Optimisation d'un vecteur à statoréacteur sur l'ensemble de sa mission
- Conception d'un premier étage réutilisable robuste aux incertitudes
- Exploration automatique d'architectures innovantes pour des configurations de type eVTOL
- Conception et optimisation d'un nouveau concept pour le transport civil, avec conception conjointe de la cellule (BWB, fuselage non circulaire...), du système propulsif (LH2, DEP/BLI/UHBR) et des chaînes électriques
- Des métriques d'avancement spécifiques et des procédures de validation de l'atelier seront définies. Pour mesurer les progrès, des benchmarks seront définis et partagés entre partenaires.

eVTOL : electric Vertical Take-Off and Landing

BWB : Blended Wing Body (fuselage intégré dans la voilure)

LH2 : Liquid Hydrogen

DEP : Distributed Electric Propulsion

BLI : Boundary Layer Ingestion

UHBR : Ultra High Bypass Ratio

Horizon.....2028

Fort de son expertise scientifique et technologique, l'ONERA peut proposer une modélisation complète à différents niveaux de fidélité de tout véhicule aérospatial, ainsi que des méthodes numériques d'exploration de l'espace de conception et de caractérisation de solutions innovantes.



ONERA

THE FRENCH AEROSPACE LAB

6 CHEMIN DE LA VAUVE AUX GRANGES – 91120 PALAISEAU – FRANCE – TÉL. : +33 (0)1 80 38 60 60

www.onera.fr