

# La feuille de route scientifique et technologique de l'ONÉRA

Les fiches programmatiques

Édition 2019

ONÉRA

THE FRENCH AEROSPACE LAB

# La feuille de route scientifique et technologique de l'ONERA



**Bruno Sainjon,**  
président-directeur général  
de l'ONERA

Éclairer le futur et mettre à disposition des acteurs du domaine les outils de recherche adaptés. C'est une mission, mais aussi un défi permanent pour l'ONERA. Il était donc essentiel que l'ONERA explicite clairement ses ambitions en matière de recherche dans un document programmatique. C'est l'objet de notre feuille de route scientifique et technologique. Elle est construite pour répondre aux attentes exprimées par nos partenaires, étatiques et industriels, à travers les défis scientifiques de notre Plan stratégique scientifique (PSS) et dans notre Contrat d'objectifs et de performance (COP) signé fin 2016 avec le ministre de la Défense.

Notre feuille de route constitue donc un acte de transparence, mais aussi un engagement de notre part au service de l'innovation en matière de défense, d'aéronautique et d'espace. Elles n'ont pas seulement pour objectif de développer la connaissance scientifique. Elle vise à développer des objets et des outils scientifiques et technologiques concrets, ambitieux, sources des applications futures, opérationnelles et/ou industrielles selon les trois finalités défense, aéronautique, et espace. Cette approche est conforme à la vocation de l'ONERA : mener des recherches finalisées. En ce sens, notre feuille de route matérialise aussi la volonté de l'ONERA de jouer pleinement son rôle de pont jeté entre la recherche et l'industrie.

Cette feuille de route était attendue par nos partenaires. Elle leur procure une vision claire de notre stratégie scientifique et technologique, de notre positionnement, mais aussi de l'usage de la subvention qui fonde la préparation du futur demandée par l'État. Désormais, elle constitue pour tous, à l'intérieur comme à l'extérieur de l'ONERA, le guide de référence de la construction de notre futur, de notre activité et de nos investissements, et notre principal outil de pilotage des objectifs du PSS et du COP. C'est aussi un levier important pour nouer des partenariats académiques et industriels avec des acteurs nationaux et internationaux car elles mettent clairement en avant nos atouts : pluridisciplinarité, capacité d'intégration, volonté permanente d'innover.

Cet outil, qui exprime une vision à moyen et long termes de notre activité, n'est pas figé pour autant. Il doit rester vivant et s'adapter à l'évolution des contextes et des besoins. Il intègre aussi une part de prise de risque, et je considère que si tous ses objectifs étaient atteints, cela voudrait dire que nous n'aurions pas été assez ambitieux dans leur définition. Chacun doit désormais se saisir de cet outil pour proposer et mettre en œuvre des projets de recherche et des collaborations ambitieux et cohérents, qui permettent de dépasser les verrous qui nous séparent encore des objectifs concrets que nous nous sommes fixés.

La feuille de route de l'ONERA, décrite ici dans une optique programmatique, est déclinée en 24 feuilles de routes scientifiques et technologiques spécifiques, présentées ici sous forme de fiches de synthèse. Celles-ci témoignent d'un travail collaboratif riche et approfondi ; nombreux sont ceux qui s'y sont associés à tous les niveaux – je tiens à les en remercier. D'autres feuilles de route programmatiques viendront enrichir et compléter la feuille de route de l'ONERA ; elles feront l'objet de diffusions ultérieures.

J'ai eu l'occasion à plusieurs reprises de regretter que l'ONERA n'ait pas été suivi lorsqu'il proposait en 2001 de travailler sur des projets de lanceurs entièrement ou partiellement réutilisables. Plus récemment, j'ai découvert deux brochures sur les drones civils et militaires diffusées par l'ONERA en 2003, qui exposaient déjà la plus grande partie des problématiques auxquelles on essaie de répondre aujourd'hui. Certes nul n'est prophète en son pays et je sais qu'il peut être difficile de prendre en compte des préoccupations de long terme, alors que tant de problèmes de court terme se posent, mais j'aimerais que dans dix ans, quand nos successeurs reliront ces feuilles de route, ils ne découvrent pas à leur tour qu'elles proposaient déjà d'aborder les questions qui se poseront alors à eux dans l'urgence, mais que faute d'engagement, de persévérance ou de soutien, les sujets n'aient pas été traités.

# L'expression de la vision de l'ONERA

La feuille de route scientifique et technologique découle de la volonté de bâtir une stratégie lisible aussi bien en interne 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 façon dont nous assurons notre mission de préparation du futur grâce à la subvention pour charge de service public octroyée par le ministère des Armées.

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 également indispensable de conserver une place à la nécessaire recherche exploratoire et d'être capable de répondre à des sollicitations à court terme lorsqu'elles se manifestent.

Les feuilles de route devront également susciter des partenariats tant industriels qu'académiques, et s'appuieront sur d'autres sources de financement (contrats, projets ANR, projets CE, thèses ou post-doctorants...).

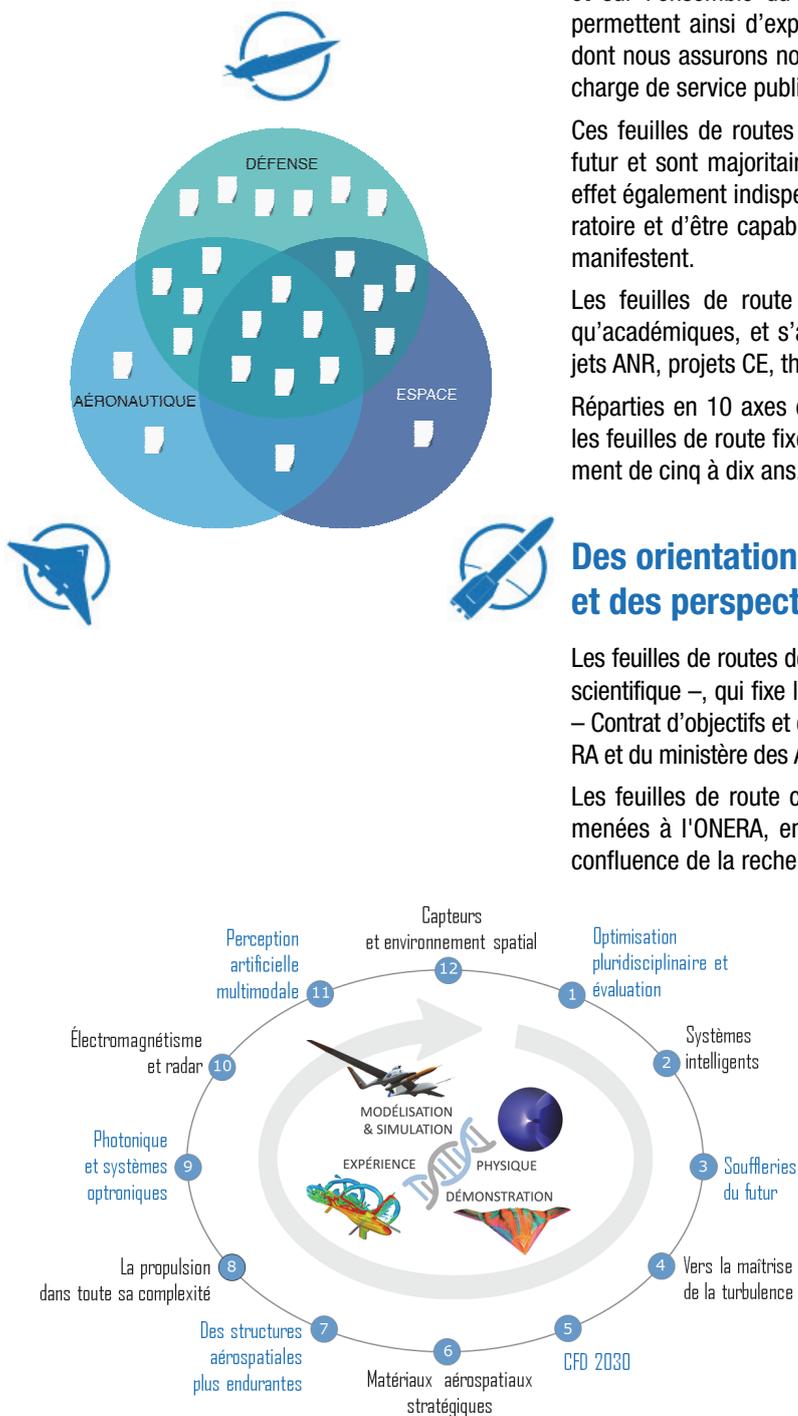
Réparties en 10 axes et identifiant les principaux verrous scientifiques et techniques, les feuilles de route fixent un objet final bien identifié et un horizon temporel, généralement de cinq à dix ans.

## Des orientations scientifiques et des perspectives industrielles en cohérence

Les feuilles de routes de l'ONERA matérialisent la convergence du PSS – Plan stratégique scientifique –, qui fixe les orientations scientifiques de l'ONERA (2015-2025) – 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 2017-2021.

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 résolvant 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 apprentissage...



Les 12 défis du Plan stratégique scientifique de l'ONERA

## 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 et 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 sera de même pour les thèses de doctorats. 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 ses différentes implantations géographiques.

Enfin, le pilotage global des feuilles de route permet d'exploiter les résultats et les avancées des feuilles de route d'une thématique vers une autre. Par exemple, l'enjeu de l'impact environnemental de l'aviation civile est-il abordé dans la thématique *Réduction de l'empreinte environnementale du transport aérien* mais aussi, pour les aspects de rejets et d'impact acoustiques dans la thématique *Efficacité, sécurité et certification du système de transport aérien*. C'est bien sûr également la vocation des feuilles de routes attachées aux piliers scientifiques *Nouveaux moyens de simulation*.

## 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 deux cents personnes de tous les domaines de compétences de l'ONERA. Aujourd'hui construites, les feuilles de route n'en demeurent pas moins un outil vivant qui devra s'adapter à l'évolution des contextes et des besoins et voir de nouvelles feuilles de route apparaître. Ainsi, chaque feuille de route sera suivie annuellement par un comité de suivi et un comité de pilotage global assurera la cohérence de l'ensemble et fixera les priorités si besoin entre les diverses feuilles de route.

Orientées vers des objectifs finalisés concrets, qu'il s'agisse d'instruments, de plateformes, de vecteurs, de systèmes ou encore de logiciels, basées sur le meilleur état de l'art, les feuilles de route décrivent les évolutions nécessaires, les verrous à lever et les jalons marquant la progression mais 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.

## Nouvelles génération d'aéronefs pour le transport civil et militaire

-   **1.1 Aéronef électrique pour une mobilité à la demande**
-   **1.2 Aéronefs autonomes et connectés**

## Réduction de l'empreinte environnementale du transport aérien

-  **2.1 Plateforme hybride pour l'aide à la conception de chambre de combustion optimisée à émissions réduites**

## 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**

## Surveillance des environnements 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**

## Robots, drones et systèmes intelligents pour la sécurité et la défense

-   **5.1 Architectures et outils pour systèmes intelligents de planification et de gestion de mission**

## Systèmes d'armes conventionnels du futur

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

## Nouvelle génération d'armes stratégiques

-  **7.1 Attaque stratégique balistique [ND]**
-  **7.2 Menaces anti-stratégiques et confrontation attaque-défense stratégique [ND]**
-  **7.3 Missile air-sol nucléaire de 4<sup>e</sup> génération (ASN-4G) [ND]**

## Accès performant et sûr à l'espace

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

## 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**

## Nouveaux moyens de simulation

-    **10.1 Plateforme et méthodes de simulation numérique multi-physique 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**



# Nouvelles générations d'aéronefs pour le transport civil et militaire



Mettre au point un système de mobilité aérienne à la demande marquerait l'avènement d'une nouvelle ère pour l'aviation. Plusieurs éléments amènent à penser que ce n'est plus une utopie »

Les avions de transport actuels sont les héritiers directs des formules aérodynamiques mises au point dans les années 1950 et 1960. Durant les cinquante dernières années les progrès techniques continus et les standards de certification associés ont permis d'améliorer les performances de ces aéronefs et ont d'ailleurs largement contribué à la compétitivité des compagnies aériennes.

Le secteur du transport aérien est constitué d'un ensemble d'acteurs qui interviennent au cours des étapes successives d'un voyage et qui concourent à une complexité du secteur tant sur les plans technique, économique que réglementaire. Il faut donc adopter une approche globale qui seule pourra permettre d'identifier les meilleurs compromis. Les améliorations futures nécessiteront une bonne appréciation des interdépendances entre les différents facteurs et compte tenu de la durée des cycles de vie particulièrement élevée des produits aéronautiques, les compromis retenus ne porteront pas leurs fruits dans l'immédiat.

## La propulsion électrique

Une rupture envisageable concerne la propulsion électrique des aéronefs. La transposition de ce mode de propulsion – qui se développe rapidement dans le transport terrestre – au secteur aéronautique se heurte pour l'instant à de sérieuses difficultés pour des avions gros porteurs à long rayon d'action. Mais les avantages de la propulsion électrique sont suffisamment nombreux pour s'intéresser de près à la question. Car elle consti-

tue une voie qui permet de repenser l'aéronef et l'intégration de son système de propulsion. De plus, elle est bien adaptée aux concepts basés soit sur le décollage vertical soit sur le décollage court. Enfin, il devient envisageable d'appliquer la propulsion électrique à l'ensemble du spectre de l'aviation générale, ainsi qu'aux avions de transport régional et aux moyens porteurs.

Nouvelles générations d'aéronefs

Réduction de l'empreinte environnementale

Efficacité, sécurité, certification

Surveillance des environnements naturel et opérationnel

Robots, drones et systèmes intelligents

Systèmes d'armes conventionnels

Nouvelle génération d'armes stratégiques

Un accès performant et sûr à l'espace

Un espace durable et sécurisé

Nouveaux moyens de simulation

## La mobilité à la demande

La mobilité à la demande, en plein essor dans le domaine du transport terrestre, est un concept aujourd'hui envisagé pour l'aérien. Il est soutenu à la fois par l'évolution des services dans la société, la situation d'engorgement des réseaux routiers et ferrés des grandes mégapoles, et la maturité grandissante des technologies liées à l'automatisation du vol. On attend des nouvelles solutions de transport une grande souplesse d'emploi, une utilisation à proximité immédiate des résidences imposant des caractéristiques de décollage et d'atterrissage à minima courts, voire verticaux, une absence de compétences particulières de l'utilisateur et un impact environnemental réduit pour se conformer à la sensibilité grandissante des populations à la pollution atmosphérique et acoustique, qui plus est en zone urbaine.

L'étude de la propulsion électrique pour un concept de mobilité aérienne à la demande est un puissant stimulant pour la recherche car elle s'ouvre à des concepts d'emploi en rupture avec les pratiques consacrées par le temps. Mettre au point un système de mobilité aérienne à la demande marquerait l'avènement d'une nouvelle ère pour l'aviation.

Plusieurs éléments amènent à penser que ce n'est plus une utopie ; nous sommes en effet actuellement à la confluence de trois facteurs :

- les progrès concernant les drones et notamment l'automatique applicable au pilotage des aéronefs et à la gestion du trafic aérien ;
- l'émergence d'une demande sociétale de mobilité aérienne en particulier dans le cadre intra-urbain des mégapoles. En 2030, 60% de la population mondiale vivra en ville ;
- des technologies nouvelles pour l'aérien comme par exemple la motorisation électrique – technologies souvent dopées par les efforts consentis pour l'automobile électrique.

Un élément clé de réussite sera que les nouveaux véhicules

pourront s'intégrer de manière fluide dans le trafic aérien. Cette évolution impliquerait que les nouveaux aéronefs soient équipés de systèmes « détecter et éviter » (*detect and avoid*) dûment certifiés. Au passage, précisons que les avions de ligne sont déjà équipés d'un système d'alerte de trafic et d'évitement de collision : les avions se situent les uns par rapport aux autres, et s'éloignent du risque de collision en déclenchant automatiquement une manœuvre d'évitement.

Il existe de nombreux points durs, sur le plan technologique, qu'il faudra lever. La condition d'émergence d'une mobilité aérienne à la demande est bien entendu la preuve de sa sécurité.

## L'autonomie et la connectivité

L'un des sujets essentiels pour l'avenir de l'aviation, évoqué dans le contexte de la mobilité à la demande, concerne plus largement l'aéronautique dans son ensemble, l'autonomie croissante des véhicules, ainsi que leur connectivité décuplée. Cette évolution se situe à la confluence de deux univers qui ont tendance à se rejoindre :

- l'univers des petits drones, qui a permis de grands progrès en termes de calculs embarqués pour la prise de décision dans l'incertain, et évolue vers des machines de plus en plus sophistiquées et lourdes vers le transport de colis puis de passagers en ville ;
- l'univers de l'aviation de transport, où se dessinent peu à peu des aides au pilotage de plus en plus sophistiquées, afin d'accroître la sécurité et de réduire l'équipage.

Là encore, de nombreux verrous technologiques restent à lever, non seulement du point de vue des capacités embarquées à mener des actions, à poser des décisions, de façon de plus en plus autonome, mais encore – et sans doute surtout – du point de vue des preuves de sûreté qui doivent accompagner ces évolutions.

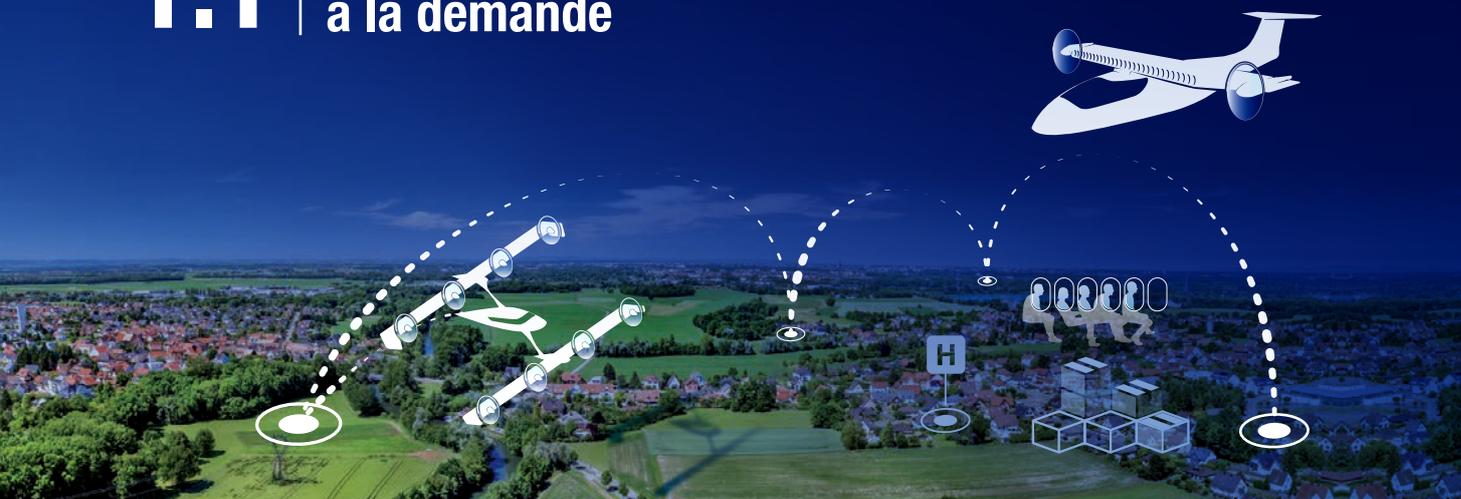
---

## Feuilles de route

1.1 | Aéronef électrique pour une mobilité à la demande

1.2 | Aéronefs autonomes et connectés

### 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.....jusqu'à 15 ans

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

#### Activités

##### Développements technologiques

- Des démonstrateurs sol pour les composants et l'architecture 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, les technologies et leur intégration, dans un cadre partenarial avec l'industrie

##### Thématiques-clés

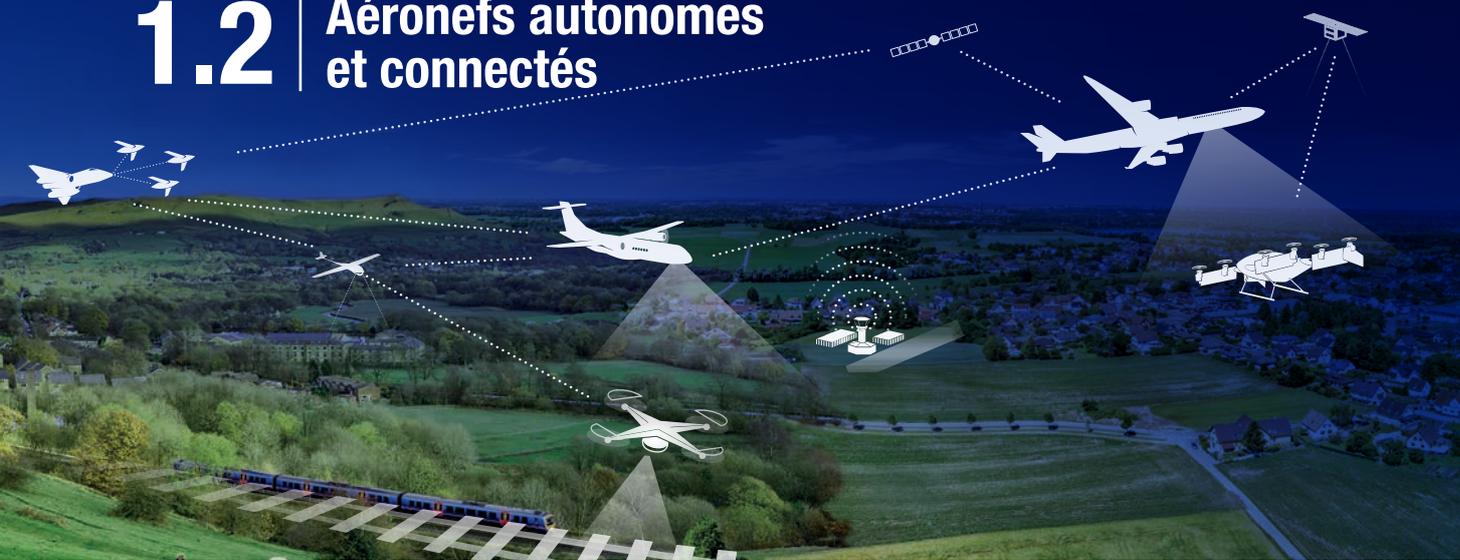
- Propulsion distribuée à travers ses composants, son intégration à la cellule et sa caractérisation acoustique
- Définition de la cellule : architecture électrique, structures et matériaux (sous contraintes foudre, thermique, CEM)
- Conception d'ensemble du véhicule – obtenir par compromis les performances souhaitées et la souplesse d'emploi attendue dans une perspective de certification
- Management de mission : automatisation du vol, intégration dans le trafic aérien, gestion de l'énergie à bord
- 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 en aérodynamique (CFD HiFi) et structures (CSM)
- Plateformes de conception & simulation multidisciplinaire et fonctionnelle
- Installations d'essais : intégration de puissance, 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, grâce à cette montée en compétence, le futur à plus long terme du transport aérien face aux enjeux environnementaux.**

### 1.2 | Aéronefs autonomes et connectés



L'objectif de cette feuille de route est de développer outils, méthodes, technologies, approches qui permettront :

- de rendre possible l'autonomie de tout type d'aéronef et son insertion dans son environnement – obstacles, trafic météo, autres aéronefs...
- de définir et de démontrer le niveau de sécurité à atteindre ou déjà atteint

Du point de vue applicatif, les scénarios d'intérêt concernent les grandes familles suivantes :

- petits drones indoor et/ou volant dans des zones faiblement urbanisées
- applications : défense, sécurité, sécurité civile, archéologie, exploration/surveillance de sites industriels, logistique...
- opérations de grande élancement (inspection de réseaux linéaires – voies ferrées, lignes électriques, pipelines... – par des drones sur plusieurs centaines de km)
- *Urban Air Mobility* (transport aérien de passagers ou de colis en contexte urbain)
- automatisation d'avions de ligne

### Activités

- Méthodes et outils pour l'intelligence de vol :
  - perception de l'environnement et traitement de données avec *deep-learning*, fusion ; interprétation de scène
  - techniques d'automatique : coordination de plusieurs aéronefs, aérodynamique perturbée – turbulence, givrage –, *flow control* et détection des anomalies, réduction de la consommation
  - techniques d'intelligence artificielle pour la conduite du vol
  - séparation de charge
- Capteurs optroniques, radars, inertiels
- Architectures informatiques et de communication
  - à base de calculateurs haute performance et de réseaux haut débit
  - nouveaux paradigmes d'architectures décentralisées
  - liaisons sans fil, bord-bord et bord-sol
- Sécurité – dont cybersécurité, liaisons de communications, perception de la santé de l'environnement
- Aspects facteurs humains
- Système de système, avec trois questions :
  - quelles évolutions de l'ATM\* pour gérer la complexité ?
  - quels services pour les aéronefs les mieux équipés ?
  - comment coordonner les évolutions des aéronefs et de leur écosystème ?

Horizon.....15 ans

\*ATM : Air Traffic Management

**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.**



# Réduction de l'empreinte environnementale du transport aérien



Afin de réduire l'empreinte environnementale du transport aérien, l'ONERA se concentre autour de trois objectifs macroscopiques et multidisciplinaires : la réduction de la consommation de carburant, la réduction des émissions polluantes et la diminution du bruit émis par les avions »

La limitation des conséquences de l'activité humaine est devenue une priorité tout particulièrement dans le domaine des transports. Pour l'aéronautique civile, il s'agit principalement de limiter les émissions de CO<sub>2</sub> et d'oxydes d'azote ainsi que les nuisances sonores au voisinage des aéroports. Durant les cinquante dernières années, des progrès techniques continus ont permis d'améliorer les performances acoustiques et énergétiques des avions. Plus de 20 décibels ont été gagnés depuis le début des années 80 (bruit perçu divisé par 4) et la consommation par passager-kilomètre a été réduite de 70% depuis 1960.

Les perspectives de développement du trafic aérien en Europe et au niveau mondial révèlent un quasi doublement de la demande dans les vingt prochaines années. Dans le même temps, il est imposé que les effets environnementaux de l'activité aérienne soient impérativement contenus aux niveaux actuels. On compte sur la recherche scientifique pour fournir, à chacune des composantes du système de transport aérien, des solutions techniques adaptées : infrastructures aéroportuaires, systèmes de gestion de l'espace aérien et des avions. En effet, le secteur du transport aérien est un ensemble constitué de différents acteurs qui interviennent au cours des étapes successives d'un voyage et qui concourent à la complexité du système sur les plans technique, économique et réglementaire.

L'aéronautique civile est un secteur où convergent naturellement l'intérêt économique de la compagnie aérienne et les préoccupations environnementales. Du point de vue d'une compagnie aérienne, le kérosène – qui représente environ 25% de la dépense totale – est la première source de dépenses (l'achat et la maintenance des appareils représentent 22% des dépenses ; les équipages 16%).

Quel que soit l'évolution du prix du carburant, il y aura toujours un avantage compétitif à exploiter des avions neufs qui consomment 15% à 20% de moins que les avions de la génération précédente.

Par ailleurs, la sûreté et la sécurité des passagers sont bien entendu prioritaires.

Durant la période 2000-2015, les activités de recherche aéronautique ont été étroitement liées à des programmes nouveaux tels que l'A380, A350, A400M ou le F7X et à des évolutions incrémentales associées à une nouvelle motorisation (A320neo, Boeing 737 Max).

La période 2020-2030 verra le renouvellement ou la préparation du renouvellement de produits stratégiques pour chacun des constructeurs nationaux et européens de la filière aéronautique, face à l'émergence annoncée de nouveaux acteurs.

Afin de réduire l'empreinte environnementale du transport aérien l'ONERA se concentre autour de trois objectifs macroscopiques et multidisciplinaires : la réduction de la consommation de carburant – qui est le moyen le plus efficace, avec l'usage des carburants alternatifs, de diminuer les émissions de CO<sub>2</sub> –, la réduction des émissions polluantes et la diminution du bruit émis par les aéronefs.

## Réduire la consommation en carburant

grâce à la recherche concernant :

- l'aérodynamique, afin de réduire la résistance à l'avancement des aéronefs et d'améliorer la prévision des performances aérodynamiques ;
- la propulsion, par des avancées concernant les compresseurs et les turbines de turbomachines ;
- les structures, matériaux structuraux et méthodes d'assemblage afin d'obtenir une réduction de masse des aéronefs ;
- le recours à l'énergie électrique, en recherchant une réduction de masse et une augmentation de la fiabilité par le remplacement d'organes de commande hydrauliques par des organes électriques ;

- le système avion lui-même, par l'élaboration de commandes de vol mieux adaptées autorisant un allègement des structures par le pilotage des efforts associé à de nouveaux concepts de gouvernes ;
- l'élaboration d'outils nouveaux, d'évaluation globale des performances ;
- l'optimisation de route, qui nécessite un effort de recherche sur les stratégies d'ATM (*Air Traffic Management*).

## Réduire les émissions polluantes

par des avancées concernant :

- en premier lieu la réduction de la consommation ;
- la connaissance des polluants tel que les oxydes d'azote, les suies et autres espèces minoritaires, par un effort de recherche sur la physique des écoulements réactifs dans les turbomachines et par l'élaboration de nouvelles techniques d'injection et de mélange dans les chambres de combustion ;
- la connaissance de la qualité de l'environnement aéroportuaire, par la caractérisation des émissions des avions et la modélisation de la dispersion et des transformations physico-chimiques autour des aéroports.

## Réduire le bruit

par des avancées concernant :

- l'acoustique externe, afin de dégager des solutions de traitement du bruit à la source et particulièrement du bruit d'origine aérodynamique. Cela implique un effort de modélisation et de simulation des écoulements instationnaires générateurs de bruit et de leur propagation ;
- des recherches sur de nouveaux matériaux poreux multifonctionnels.

## Feuille de route

---

### 2.1 | Plateforme hybride pour l'aide à la conception de chambre de combustion optimisée à émissions réduites



# 2.1 | Plateforme hybride pour l'aide à la conception de chambre de combustion optimisée à émissions réduites

**M**algré l'émergence de technologies de propulsion plus électriques, les turbomachines conventionnelles utilisant un combustible carboné restent l'option technologique majeure pour les avions commerciaux à l'horizon 2050.

La réduction drastique attendue des émissions polluantes – essentiellement les NOx, les suies, le CO et les hydrocarbures imbrulés – repose essentiellement sur la conception et l'optimisation de la chambre de combustion. Le défi est de taille puisque les efforts d'optimisation du cycle des moteurs afin de réduire la consommation, et donc les émissions de CO<sub>2</sub>, tendent à créer des conditions propices à la formation de polluants minoritaires réglementés.

Afin d'agir pour une meilleure performance environnementale des aéronefs, l'ONERA a décidé de changer de paradigme en matière de simulation. Il crée une plateforme hybride – expérimentale, métrologique et numérique – pour la conception de chambres de combustion à haute performance environnementale, répondant aux exigences premières de sécurité et d'opérabilité.

Cette plateforme associe :

- un secteur de chambre de combustion, équipé d'un système d'injection modulaire et flexible
- une plateforme logicielle multi-physique pour la mise en œuvre de simulations numériques haute-fidélité des espèces polluantes prenant en compte la production d'espèces polluantes cibles (voir feuille de route 10.1)

## Activités

### Axes d'investigation clés

- Systèmes d'injection améliorant la qualité du mélange air-carburant
- Systèmes innovants d'allumage et de combustion assistée
- Matériaux haute performance, thermique et thermomécanique
- Dispositifs de refroidissement innovants pour les parties chaudes
- Carburant aéronautique d'origine fossile ou non

### Expérimentation

- Adaptation du banc Micado existant : 0,3 à 40 bar, 3 à 4 kg/s
- Mise en œuvre de diagnostics avancés en conditions réelles de fonctionnement moteur
- Constitution de bases de données
- Études de sensibilité

### Développement de techniques de mesure

- Diagnostics optiques avancés dans le volume de la chambre – région de proche paroi comprise
- Mesures pariétales ponctuelles à très haute résolution
- Mesures avancées, intrusives ou non, en sortie de foyer

### Modélisation et simulation numérique

- Régimes d'injection du carburant et impact sur les émissions de polluants
- Chimie complexe et méthodes de réduction des mécanismes
- Formation/oxydation des suies
- Transferts thermiques et comportements pariétaux
- Dynamique de combustion et instabilités

**Horizon.....5-7 ans**

**L'ONERA capitalise son savoir-faire théorique et expérimental dans une plateforme de simulation hybride innovante, porteuse de promesses pour une importante réduction de l'impact environnemental des avions de transport.**



# 03 Efficacité, sécurité et certification du système de transport aérien



Face à la diversité des configurations d'aéronefs futurs, et à la complexité des exigences qu'ils devront satisfaire, l'ONERA parie sur la digitalisation du processus de certification pour maîtriser coûts et délais »

La certification est une des spécificités du secteur aéronautique. C'est un processus qui vise à démontrer que la conception, l'exploitation et la maintenance de l'aéronef sont conformes à un ensemble de règles jugées nécessaires pour en assurer la sécurité et l'acceptabilité sociétale.

Elle est intimement liée au développement de l'avion et son coût spécifique représente de 17 à 20 % du coût total de développement de l'appareil.

## Un processus interactif

Les règles de certification doivent être interprétées en fonction des nouvelles technologies devenant disponibles. C'est ce qui s'est produit avec l'A320 lorsqu'Airbus a adopté les commandes de vol électriques et introduit des calculateurs en lieu et place des traditionnelles commandes hydrauliques. Le retour d'expérience rappelle que la certification ne concerne pas simplement l'avion à sa mise en service mais qu'elle intervient pendant toute sa durée d'exploitation.

Le processus est par conséquent interactif et nouvelles technologies, retours d'expériences et certification sont liés.

Les règlements actuels visent principalement à assurer la sécurité des

biens et des personnes ainsi que la limitation des émissions polluantes et des nuisances sonores. Les descriptions des risques encourus et leur niveau d'acceptabilité sont fixés par un corpus de connaissances normalisées et sont régulièrement mis à jour. Les preuves de conformité du produit aux règlements sont construites par l'industriel requérant le certificat et revues par l'autorité habilitée à délivrer le certificat. L'activité est soutenue par la définition de moyens de conformité normalisés (analyses, simulations, essais...) reconnus pour montrer qu'un produit tient le niveau de risque acceptable. Ces référentiels sont aussi mis à jour pour tenir compte des évolutions technologiques des produits à certifier et des moyens de conformité disponibles.

Nouvelles générations d'aéronefs

Réduction de l'empreinte environnementale

Efficacité, sécurité, certification

Surveillance des environnements naturel et opérationnel

Robots, drones et systèmes intelligents

Systèmes d'armes conventionnels

Nouvelle génération d'armes stratégiques

Un accès performant et sûr à l'espace

Un espace durable et sécurisé

Nouveaux moyens de simulation

## Des besoins nouveaux

Les nouvelles pratiques peuvent faire émerger de nouvelles menaces telles que les cyber-attaques ou encore le non-respect de la vie privée à bord d'un avion connecté. De la même façon, le développement de nouveaux concepts d'aéronefs ou l'introduction de technologies de rupture souffrent du caractère inadapté du référentiel de certification actuel.

Les avions de transports actuels sont les héritiers directs des formules aérodynamiques mises au point dans les années 1950 et 1960. Durant les cinquante dernières années, les progrès techniques continus et les standards de certification associés ont permis d'améliorer les performances – notamment énergétiques – des aéronefs : la consommation par passager kilomètre transporté a été réduite de 70% depuis 1960. Aujourd'hui elle est de moins de 3 litres par passager pour 100 kilomètres parcourus sur les vols long-courriers.

Les perspectives de développement du trafic aérien font apparaître un quasi doublement de la demande dans les vingt prochaines années. Dans le même temps, les effets environnementaux de l'activité aérienne devront impérativement être contenus. Les efforts de recherche actuellement engagés permettent d'envisager une amélioration dans la continuité de l'ordre de 20 à 30% de réduction des émissions de CO<sub>2</sub> par rapport aux avions en service en 2000.

Pour aller plus loin, nous avons besoin d'une véritable rupture dans les performances futures, qui ne pourra vraisemblablement être atteinte que grâce à des configurations non standard d'aéronefs. Ces configurations ne seront pas nécessairement très nouvelles mais seront *a minima* à revisiter en fonction des progrès effectués. Certaines – comme l'aile volante – sont employées en aéronautique militaire mais leur adéquation à satisfaire un besoin de transport civil reste à établir.

## Maîtrise des coûts et les délais

L'axe de recherche décrit comment l'ONERA s'inscrit dans la maîtrise des coûts et des délais de la certification des aéronefs actuels et futurs en se dotant des moyens permettant de fluidifier le processus. À plus long terme il s'agira de s'adapter à la certification de nouveaux produits. La disponibilité de méthodes et d'outils de certification nouveaux devrait permettre à l'industrie de considérer l'examen de nouvelles configurations d'avions comme une priorité.

La digitalisation croissante de la société et de l'industrie offre l'occasion de réduire les coûts et les délais de certification des avions « classiques » : elle permet par exemple de partager et de corréliser plus largement des bases de données de risques. Elle offre de nouveaux outils virtuels de preuve associés aux environnements de conception numérique. Elle autorise également de connecter plus étroitement les bancs expérimentaux aux environnements numériques.

La digitalisation des activités de certification mobilisera les équipes de l'ONERA dans le but de s'inscrire dans le référentiel de certification actuel et futur et de favoriser l'appropriation par l'industrie d'outils nouveaux. Précisons que le terme de « digitalisation » couvre pour l'ONERA de manière globale la simulation et s'applique donc autant aux modèles qu'aux essais. On constate que derrière le sujet de la certification, qui peut paraître austère, se cache la capacité de peser dans l'établissement des normes et des règles. C'est un des éléments qui conditionne le maintien et le développement d'une industrie nationale et européenne compétitive à moyen et long terme. C'est donc un enjeu à la fois technique et socio-économique.

## Feuille de route

---

### 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 visant à montrer que la conception, l'opération et la maintenance de l'avion sont conformes à un ensemble de règles jugées nécessaires pour assurer l'acceptabilité sociétale du produit.

L'ONERA souhaite mettre en œuvre de nouveaux outils pour tracer, valider et justifier les connaissances des risques ainsi que l'usage de moyens de conformité alternatifs plus efficaces, applicables aux avions et systèmes embarqués actuels et futurs.

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 numériques permettant, à moyen terme, de fluidifier le processus et, à plus long terme, de favoriser son adaptation à la certification de produits innovants.

L'ONERA s'inscrit ainsi efficacement dans le référentiel de certification actuel et futur et accompagnera la digitalisation de l'industrie aéronautique.

La rénovation du processus de digitalisation s'inspire des grandes étapes de la digitalisation de la société et de l'industrie :

- stockage et partage de données, avec définition de procédés sûrs d'exploitation et d'enrichissement des données
- usage croissant de modèles et méthodes numériques, pour concevoir et vérifier au plus tôt la conformité des produits aux exigences
- environnement de travail collaboratif pour décloisonner les analyses et partager données, modèles, et outils de calcul
- digitalisation des plateformes d'essais physiques, notamment par l'introduction d'objets connectés ou des procédés de fabrication additive

#### Activités

- Spécification d'un référentiel de labellisation « certifié »
  - standardisation de la preuve
- Développement d'une plateforme de certification collaborative
  - environnement de calcul coopératif
  - bases de données, big data, IA
- Digitalisation d'objets pour tests labellisants
  - CAO, structure, électrique, thermique, logiciel...
- Digitalisation de la connaissance des risques
  - aérodynamiques
  - environnementaux – foudre, givre, EM...
  - opérationnels et humains
  - structureaux
  - systèmes et logiciels
  - émissions polluantes et acoustiques
  - gestion du trafic aérien (ATM)
- Digitalisation des essais virtuels
  - outils de calculs dans l'environnement collaboratif
- Digitalisation des essais physiques
  - capteurs innovants
  - moyens d'essais de l'ONERA
  - essais sur avion
- Dissémination d'une culture ONERA de la certification

Horizon ..... 15 ans

**La digitalisation permet de partager et corréler les bases de données de risques, de connecter plus fortement des bancs d'essais physiques avec des environnements numériques, et offre de nouveaux outils virtuels de preuve. Autant d'opportunités pour réduire les coûts et les délais de certification.**



# Surveillance des environnements naturel et opérationnel



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

L'homme a recherché constamment des moyens d'améliorer sa capacité de voir mieux, plus loin, avant les autres pour acquérir un avantage pouvant être décisif ; avoir une vue d'ensemble, voir ce qui est masqué, voir la nuit et plus généralement voir ce qui est inaccessible à l'œil. Dans de nombreuses situations, et en particulier dans les conflits militaires modernes, l'accès à des moyens d'observation performants permet de décider mieux et plus vite. Les propriétés spécifiques de ces systèmes dépendent des longueurs d'ondes utilisées. Dans le domaine du rayonnement électromagnétique, on distingue :

- les moyens optroniques, dont les longueurs d'ondes vont de l'infrarouge à l'ultraviolet en passant par le visible ; ces moyens sont souvent passifs – ils utilisent les propriétés radiatives de la scène observée ;
- les moyens radars, dont les longueurs d'ondes vont du millimètre au décimètre ; ces moyens sont généralement actifs – ils utilisent les propriétés réfléchives de la scène qu'ils illuminent ;
- les capteurs électromagnétiques utilisés dans le cadre des missions de renseignement d'origine électromagnétique (ROEM).

Les moyens peuvent être, suivant les applications, localisés au sol pour détecter et suivre des objets aériens ou spatiaux, ou embarqués sur différentes plates-formes telles que les avions, les satellites, les missiles ou les drones. Malgré les progrès considérables des dernières années, tant en optronique qu'en radar, liés en grande partie à ceux de l'électronique, le potentiel de ces moyens, est loin d'être totalement exploré. L'ONERA

mettra l'accent dans les années qui viennent sur le développement de nouveaux capteurs à la fois plus performants et plus compacts afin d'être en mesure de s'intégrer dans des plateformes de taille de plus en plus réduites. Par ailleurs, les phénomènes de propagation et d'interaction avec le milieu sont complexes, et leur dépendance vis-à-vis de nombreux facteurs rend difficile leur prédiction exacte.

## Moyens optroniques

En optronique il est nécessaire d'étudier et de développer de nouveaux concepts permettant d'augmenter la quantité d'information contenue dans les images par des méthodes telles que :

- l'imagerie quantitative, utilisant l'information radiométrique présente dans l'image dans toutes les bandes spectrales de l'optique ; cela conduira à la réalisation d'imageurs hyperspectraux utiles aux applications militaires et civiles ;
- l'imagerie à synthèse d'ouverture optique, pour accéder à une très haute résolution spatiale ;
- l'imagerie optique adaptative multi-conjuguée, pour augmenter le domaine angulaire de correction des effets de la turbulence atmosphérique sur les images ;
- l'imagerie spectroscopique, pour la surveillance de l'atmosphère depuis l'espace ;
- l'utilisation de lidars 3D, pour obtenir des images bidimensionnelles comportant en sus une information de distance ou de vitesse ; il s'agit là d'un moyen actif, qui s'apparente à ce qu'on fait plus traditionnellement avec des radars.

## Moyens radar

Le domaine radar bénéficiera des efforts qui porteront principalement sur :

- l'imagerie radar à très haute résolution, à terme centimétrique, 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 et la capacité 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 former une image des objets.

Ces travaux concernent essentiellement la physique et la technologie des moyens optroniques et radars. Ils s'intéressent également aux propriétés optiques ou radioélectriques des cibles ou des scènes observées. Ils sont à mener de concert avec des recherches sur le traitement des données – signal et images.

## Deep learning et intelligence artificielle

Le traitement des données subit actuellement une révolution, dont le signe le plus évident est le succès des méthodes d'apprentissage profond *deep learning* dans le domaine de la vision artificielle et de l'interaction homme-machine. L'accès récent à des bases de données hétérogènes de grande échelle et à des moyens de calcul massifs est la raison du succès de ces techniques liées à l'intelligence artificielle (IA) et a impulsé un large renouvellement méthodologique ainsi qu'une véritable révolution conceptuelle plaçant la donnée au cœur des enjeux.

A 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 :

- maîtrise des données physiques grâce à ses moyens d'acquisition, de modélisation et de simulation grâce auxquels seront constituées des capacités structurées de digitalisation de la donnée d'environnement permettant l'apprentissage massif au cœur des performances des nouvelles techniques d'IA ;
- maîtrise des traitements de l'IA avec plusieurs axes de recherche menés de front sur l'apprentissage hybride (données/simulations), la fusion de données hétérogènes, la mise à l'échelle, l'interaction avec l'humain, et l'IA de confiance (robustesse, explicabilité, certification) ;
- maîtrise des capteurs qui grâce à une co-conception capteur-IA permettra d'étudier une nouvelle génération de « capteurs cognitifs » qui seront capables de s'auto-adapter aux conditions d'environnement pour optimiser leur fonctionnement en vue de remplir la mission qui leur aura été assignée.

## Feuilles de route

---

**4.1** | Des 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



**A**u 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 envisagées sont les drones – des microdrones aux drones tactiques et UCAV\* –, 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

##### Radars

- Surveillance opérationnelle à bord de petits aéronefs « standard »
- Recueil de données à l'échelle de la planète pour permettre à l'ONERA de renforcer son rôle de référent environnement électromagnétique du pôle CGN\* de la DGA et alimenter les recherches en intelligence artificielle
- Solutions en mode radar passif, discret, compact, étendu à l'aéroporté
- Capteurs compacts intégrables sur petits drones ou ballons
- Capteurs, de millimétriques à sub-millimétriques, pour micro-drones, avec des classes de portée inférieure à 500 m
- Mesure du champ électromagnétique sur de larges zones

##### Activités en optronique

- Télédétection active et passive couplée : démonstrateur d'imageur compact panchro ou multi-spectral ; démonstrateur lidar 3D + imageur multi-hyper spectral
- Haute résolution sur drone et nanosat : concept d'image interférométrique panchromatique
- Détection des gaz depuis minidrone : démonstrateur de détecteur de gaz sur minidrone (lidar ou capteur local)
- 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 : avion «labo volant» équipé pour l'optronique IR

##### 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..... 5 à 12 ans**

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

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



Le traitement des données subit actuellement une révolution dont le signe le plus évident est le succès des méthodes d'apprentissage profond (*Deep Learning*) dans le domaine de la vision artificielle et de l'interaction homme-machine. L'accès à des bases de données hétérogènes de grande échelle et à des moyens de calcul massifs est le moteur du succès de ces techniques provenant de l'IA, et a impulsé un large renouvellement méthodologique.

Ce mouvement est en grande partie mené par des acteurs occidentaux (GAFAM) mais aussi asiatiques, notamment chinois, dotés de moyens colossaux tant sur le plan des données que sur le plan des capacités de calcul ou des ressources humaines.

Cette feuille de route vise à positionner l'ONERA comme acteur de référence IA pour la Défense à l'horizon 2020-2025 en démontrant sa capacité à intégrer les potentialités de l'intelligence artificielle dans le traitement automatique des données de l'environnement naturel & opérationnel.

L'objectif est de construire une capacité cohérente et coordonnée de l'ONERA pour présenter une offre globale en IA pour l'interprétation automatique de l'environnement sur les trois dimensions stratégiques suivantes :

- Un cloud ONERA
- Des capteurs « cognitifs »
- Une plateforme d'analyse et d'interprétation augmentée par IA

### Activités

- Mise en place d'un cloud ONERA, soit une architecture et des traitements intelligents de management de la donnée issue notamment des moyens d'expérimentation et de simulation ONERA. Cela permettra de capitaliser, de structurer et d'harmoniser toutes les données d'environnement utiles pour aider à la conception des architectures de traitement basées IA
- Développement de démonstrateurs de capteurs cognitifs, associant connaissance de la physique et maîtrise des méthodes de l'IA
- Construction d'une plateforme d'interprétation augmentée IA pour l'exploitation de données multimodales – « géo-intelligence » regroupant un ensemble de moyens de traitements et d'exploitation compatibles avec des configurations d'entrée variés : données opérationnelles extérieures, cloud ONERA, capteurs cognitifs...

### Thèmes scientifiques

- **IA physique** : calibrer les modèles issus d'apprentissage, assimiler modèles et approches « *data driven* », évaluer leur qualité, gérer l'hétérogénéité des sources de données, exploiter des moyens en simulation et de génération de données
- **IA scalable** : assurer le passage à l'échelle des traitements, envisager l'échelle mondiale et une réactivité maximale par l'exploitation 7/24 des données avec des garanties liées à l'interprétation des événements rares et des phénomènes localisés
- **IA coopérative** : améliorer l'explicabilité des résultats et des processus, développer l'interaction dans des langages métier, concevoir des démarches transparentes d'aide à la contextualisation des algorithmes, évaluer et améliorer l'utilisabilité des outils d'aide à la décision et à la conception
- **IA certifiée** : garantir la validité des prédictions et sorties des algorithmes, évaluer les domaines d'usage, estimer et identifier les incertitudes, détecter les mauvais fonctionnements, outiller les processus pour l'interprétabilité

Horizon..... 5 à 10 ans

**La perception augmentée de l'environnement est un enjeu stratégique : elle s'attachera à la compréhension et au suivi des évolutions d'une scène dynamique, à l'anticipation des phénomènes, à la détection d'événements imprévus ou anormaux.**



# Robots, drones et systèmes intelligents pour la défense et la sécurité



Dans un monde de plus en plus connecté où les temps de traitement de l'information sont de plus en plus courts, défense et sécurité doivent disposer de systèmes intelligents devant coopérer de manière autonome »

Les missiles, les drones, les lanceurs consommables, les satellites et les sondes spatiales sont dépourvus de pilote à bord et sont équipés d'automatismes qui leur confèrent une certaine autonomie de comportement. Les avions pilotés évoluent eux-mêmes en pilotage automatique dans de nombreuses phases de vol. Toutefois, et en dépit de leurs qualités, ces automatismes sont impuissants lorsqu'il s'agit :

- de réagir à des situations perturbant la mission en cours ;
- de coordonner efficacement plusieurs acteurs interagissant de façons multiples.

## L'homme et ses limites

Autant de difficultés qui justifient l'intervention de pilotes, à bord ou au sol, aptes à faire face à cette complexité. Mais l'homme a ses limites : temps de réaction, capacités de mémorisation et de traitement, résistance à la fatigue ou au stress. Et même depuis le sol, lorsqu'il est aidé par des algorithmes, les communications ne permettent pas toujours de transmettre les informations pour obtenir des réactions performantes. Aujourd'hui, les progrès des technologies et des mathématiques appliquées permettent d'envisager des systèmes plus sophistiqués, capables de confé-

rer une autonomie beaucoup plus poussée, présentant même un certain degré d'intelligence avec comme enjeux des avantages en termes de performances, de sécurité et de coût. Il existe une différence importante entre automatisme et autonomie : l'automatisme concerne l'accomplissement de tâches bien précises sans intervention humaine alors que l'autonomie confère au système des moyens de prise de décision. Ces techniques entrent dans le cadre générique de ce qu'on appelle l'intelligence artificielle.

Nouvelles générations d'aéronefs

Réduction de l'empreinte environnementale

Efficacité, sécurité, certification

Surveillance des environnements naturel et opérationnel

Robots, drones et systèmes intelligents

Systèmes d'armes conventionnels

Nouvelle génération d'armes stratégiques

Un accès performant et sûr à l'espace

Un espace durable et sécurisé

Nouveaux moyens de simulation

## En mode distribué

La répartition de ces décisions entre les opérateurs humains et les machines, avec notamment le partage d'autorité et la gestion des conflits, doit alors être étudiée et évaluée en termes d'efficacité et de sûreté.

Certaines missions de défense utilisent depuis de nombreuses années déjà des drones essentiellement aériens. Le futur se trouve dans le besoin de rendre possible l'utilisation distribuée de différents types de plateformes – aériennes, terrestres, navales – en relation avec plusieurs centres opérateurs.

L'exploitation des flux massifs d'informations issues de différentes sources qui résulteront de ce nouvel usage nécessitera 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... –

Les avancées concernant la conception des vecteurs, leur motorisation – autonomie énergétique, discrétion – la miniaturisation des composants – charges utiles, moyens de communication, capteurs... –, les performances des processeurs embarqués, les moyens de communication... permettent aujourd'hui d'envisager une utilisation distribuée de plusieurs vecteurs de taille réduite. Ces vecteurs peuvent être homogènes, dans une logique de redondance, ou bien hétérogènes dans une perspective de complémentarité.

Pour l'activité de recherche proprement dite l'élaboration des plateformes pourra faire assez largement appel aux composants disponibles dans le commerce. L'intérêt de sélectionner des composants sur étagère (COTS) ou développés par des partenaires industriels ou académiques permet d'atteindre la réactivité indispensable aux chercheurs compte tenu de la vitesse d'apparition de nouvelles technologies.

## Capteurs spécifiques et systèmes intelligents

Le développement de capteurs spécifiques associés aux systèmes intelligents participera également pleinement à leur performance et à leur différenciation par rapport aux développements actuels. La réalisation, le cas échéant, de capteurs spécifiques, optimisés pour fonctionner au cœur de systèmes autonomes, permettra d'améliorer les performances globales.

Les avancées concerneront tous les systèmes de défense qu'ils soient terrestres, aériens, maritimes ou spatiaux. Elles permettront de répondre à une large panoplie de scénarios de missions se déroulant dans des environnements très variés. Il s'agit aussi de permettre l'élaboration et le partage de la vision globale d'un théâtre d'opération entre les vecteurs et les opérateurs par l'intermédiaire des logiciels embarqués ou intégrés dans les C2 (centre de Commandement et Contrôle).

L'autonomie pour l'intégration des aéronefs militaires ou civils dans leur milieu environnemental fait appel aux mêmes techniques. Ici le principal objectif est de développer les outils, méthodes et technologies qui permettront d'accroître l'autonomie des aéronefs et leur connectivité avec leur écosystème. Cela doit évidemment s'accompagner de l'assurance de la sécurité des vols afin d'en garantir l'acceptabilité réglementaire et sociétale. La motivation pour accroître l'autonomie des aéronefs est ainsi double : diminuer les risques de crashes ou de collisions et améliorer leur efficacité. Ce dernier point concerne aussi bien l'optimisation des coûts d'exploitation qu'un recours moindre aux infrastructures aéroportuaires d'aide à l'atterrissage.

## Feuille de route

---

### 5.1 | Architectures et outils déployables pour systèmes intelligents de planification et de gestion de mission



L'ONERA structure un ensemble de travaux pour des systèmes terrestres, aériens, maritimes et/ou spatiaux coopératifs et adaptatifs pouvant répondre à une large panoplie de scénarios de missions se déroulant dans des environnements maîtrisés et/ou complexes. L'objectif opérationnel est de mettre en réseau des vecteurs intelligents permettant d'interagir efficacement et rapidement avec leur environnement extérieur.

L'élaboration et le partage de la vision globale du théâtre d'opération entre les vecteurs et les opérateurs via des logiciels embarqués ou C2 (centre de Commandement et Contrôle) s'inscrivent dans cette feuille de route. Toutes les thématiques de l'Intelligence Artificielle sont concernées.

Concrètement, il s'agit de développer une architecture logicielle générique offrant une vision commune aux différentes parties du système intelligent, permettant un déploiement rapide sur un théâtre d'opération (missions militaires ou de sécurité civile). Côté matériel, les vecteurs pourront être des véhicules ou nœuds de capteurs disponibles sur étagère, ou développés par l'ONERA et par des partenaires académiques ou industriels.

Le système sera totalement collaboratif, les vecteurs et les stations-opérateurs ayant conscience les uns des autres, les buts étant partagés et les décisions planifiées pour le bénéfice du système et des utilisateurs.

#### Activités

- Prise de décision critique

#### Thématiques scientifiques

- Architecture – adaptabilité / reconfiguration / flexibilité / agilité, modularité, rapidité, robustesse, sûreté de fonctionnement, preuve formelle
- Données – précision, agrégation, robustesse, mise en réseau, compacité, sécurisation, interconnexion (cf. IoT – *Internet of Things*)
- Perception – vision, audio, multi : détectations 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 – détectivité, taille, autonomie, communication

Horizon ..... 15 ans

**Dans un monde de plus en plus connecté où les temps de traitement de l'information sont de plus en plus courts, défense et sécurité doivent disposer de systèmes intelligents devant coopérer de manière autonome, y compris en environnement extérieur.**



# Systemes d'armes conventionnels



**Les moyens hypersoniques autorisent des frappes à des portées potentiellement supérieures aux rayons d'actions des systèmes actuels. Ils permettraient de faire peser à tout moment et à toute distance une menace de frappe conventionnelle avec un préavis très court »**

Dans toutes les parties du monde – à l'exception peut-être de l'Europe – les crédits militaires sont en forte augmentation et nombre de pays cherchent à rattraper leur retard technologique en s'équipant des meilleures technologies disponibles sur le marché. Cet effet est d'ailleurs encouragé par les efforts commerciaux déployés par des puissances comme la Russie ou la Chine pour promouvoir leurs systèmes d'armes à l'export. Dans le cadre des opérations militaires qu'ils ont mené durant la période 1990 à 2010 les pays occidentaux n'ont pas rencontré de menace de nature à les inquiéter sur le plan technologique. Mais cette situation est en train de changer et il est indispensable de préparer les systèmes d'armes conventionnels – c'est-à-dire non nucléaires – prévus par la loi de programmation militaire.

Parmi les capacités à conserver dans un environnement de plus en plus disputé, on peut citer :

- la capacité à frapper des objectifs de haute valeur situés dans la profondeur du dispositif de défense adverse ;
- la capacité à frapper des objectifs identifiés aussi bien fixes que mobiles de manière proactive avec un préavis très court afin d'être en mesure de paralyser l'adversaire ;
- la capacité à entrer en premier sur un théâtre d'opérations ;
- le déni d'accès et l'interdiction de zone (Anti Access / Area Denial ou A2/AD), à la fois en tant que moyen offensif, pour pénétrer

une zone réputée « interdite » à des distances nettement plus éloignées de la menace, et en tant que moyen défensif susceptible d'établir une situation de cette nature en repoussant au loin les moyens offensifs adverses ;

- la bataille pour la supériorité aérienne devrait également profiter de l'apport de ces armements.

## Hypersonique

De façon très générale l'atteinte de vitesses élevées a toujours été recherchée pour les vecteurs, qu'il s'agisse d'aéronefs ou de missiles. Une rupture susceptible de conférer un avantage certain est l'avènement

Nouvelles générations d'aéronefs

Réduction de l'empreinte environnementale

Efficacité, sécurité, certification

Surveillance des environnements naturel et opérationnel

Robots, drones et systèmes intelligents

Systemes d'armes conventionnels

Nouvelle génération d'armes stratégiques

Un accès performant et sûr à l'espace

Un espace durable et sécurisé

Nouveaux moyens de simulation

d'armements hypersoniques, c'est-à-dire capables d'évoluer à des vitesses supérieures ou égales à Mach 5. Les États-Unis ne cachent pas leur intérêt pour ces technologies ; ils ont d'ailleurs initié le projet de *Conventional Prompt Global Strike* (CPGs) de frappe intercontinentale sur court préavis. Lancé en 2001, il était initialement défini comme un système de contre-prolifération, mais apparaît désormais comme un moyen de contrer les capacités de « déni d'accès ».

Les moyens hypersoniques disposent de caractéristiques spécifiques car leur vitesse, associée à des capacités de manœuvre, rend inopérantes les capacités d'interception actuelles ou programmées. Ces moyens autorisent des frappes à des portées largement supérieures aux rayons d'actions des systèmes actuels à l'exception bien entendu des missiles balistiques. Ils permettent en outre de faire peser à tout moment et à toute distance une menace de frappe conventionnelle avec un préavis très court. Compte tenu de l'effort actuel consenti par les principales puissances militaires, il fait peu de doute que des armements hypersoniques figureront dans les arsenaux de plusieurs puissances à l'horizon 2030-2035.

## Le système de combat aérien futur

La France envisage de disposer de moyens hypersoniques pour la composante aéroportée de sa dissuasion nucléaire à partir de 2035 dans le cadre du programme ASN-4G.

En ce qui concerne les systèmes d'arme conventionnels, les travaux proposés par l'ONERA sont relatifs à différents concepts d'aéronefs hypersoniques qui pourraient par exemple constituer l'une des composantes du programme – SCAF\* en accompagnement des travaux directement au profit du NGF\*. Pour provoquer une réelle rupture et orienter les recherches vers une forte ambition, la vitesse maximale en croisière devra se situer au minimum à Mach 4 ; pour éviter de sur-spécifier les briques technologiques nécessaires, on se limitera à un nombre de Mach maximal de 7. Les études s'intéresseront *a priori* à un système capable de réaliser une croisière haute altitude de longue durée, avec un fonctionnement global de type avion – avec des phases de décollage et d'atterrissage horizontal sur une piste et une accélération autonome. L'un des défis à relever concernera le concept de propulsion qui, pour pouvoir évoluer efficacement dans un domaine de vol très étendu, devra pouvoir combiner des systèmes propulsifs tels que les turboréacteurs et le statoréacteur dans des architectures compactes et bien intégrées à la cellule. Par ailleurs la notion d'aéronef « de combat » doit s'entendre au sens large d'aéronef militaire et peut s'étendre à toute mission d'intérêt militaire.

\*SCAF : Système de combat aérien du futur, programme de développement en coopération européenne

NGF : New Generation Fighter, concept d'avion multi-rôle, Dassault Aviation

## Pénétration des défenses

L'ONERA dispose d'une longue expérience dans le domaine de la propulsion à hautes vitesses par statoréacteur et superstatoréacteur, du fait de son implication dans les programmes ASMP et ASMP-A ainsi que dans les études et recherches concernant les successeurs de ces missiles. Quel que soit l'avenir des systèmes d'armes hypersoniques, l'intérêt de s'investir dans la recherche est grand, car dans des domaines où les technologies sont poussées aux limites, les avancées promettent d'être nombreuses.

L'ONERA s'investira également dans le domaine de la pénétration des défenses conventionnelles, afin d'augmenter la survivabilité des plateformes. Changer de génération de chasseur n'est *a priori* pas suffisant pour répondre aux évolutions des menaces. Pour ne citer qu'une action en cours, le système de combat aérien futur SCAF sera un système de système, et le chasseur n'en sera pas forcément l'élément central ; il reposera sur l'apport de nouvelles technologies. Parmi les sujets qui feront l'objet d'études on peut mentionner : les technologies pour la pénétration des défenses, les connaissances sur les signatures, ou encore l'expertise concernant la menace.

Un autre axe d'effort concernera les systèmes de défense aérienne et anti-missiles intégrées. Les systèmes de défense anti-aérienne et de défense anti-missile balistique (DAMB) en particulier sont parmi les systèmes militaires les plus complexes et donc à l'avant-garde en ce qui concerne le besoin en recherche technologique. Cette composante de notre défense comporte de nombreux enjeux pour la France car la défense aérienne élargie est et sera un système d'arme militaire mature au cœur des équilibres stratégiques. La question n'est pas de savoir si la France se dotera de moyens majeurs pour cette composante de la défense, mais quand, notamment sur le plan de l'alerte. Les thèmes de recherche scientifique et technologique concerneront le développement des technologies de capteurs pour la surveillance aérienne, l'alerte anti-missile et la surveillance de la prolifération, le développement des technologies, les méthodes et outils nécessaires aux prochaines générations de missiles intercepteur, les avancées nécessaires à la réalisation d'une première génération d'arme à énergie dirigée mais aussi le développement de l'expertise de l'ONERA dans les systèmes de systèmes.

## Feuilles de route

---

**6.1** | Aéronef de combat hypersonique

**6.2** | Pénétration des défenses par des armements conventionnels et survivabilité

**6.3** | Défense aérienne et défense anti-missiles

*Documents non diffusés*



Pour continuer à assurer la crédibilité de notre dissuasion, nous devons être en mesure de réaliser une analyse permanente et récurrente des forces, risques et faiblesses de notre attaque face à des défenses actuelles et futures, en fonction de l'évolution de la menace et de ses technologies »

La possession par un État d'une capacité de dissuasion fut, au sortir de la seconde guerre mondiale, un marqueur de puissance. Son utilité fut brièvement questionnée au début des années 1990 après l'effondrement de l'Union soviétique mais aujourd'hui elle a retrouvé une place centrale dans les politiques stratégiques des États qui possèdent l'arme nucléaire et les vecteurs adaptés à sa mise en œuvre. Plus que tout autre système d'arme elle possède une caractéristique de binarité absolue : on la possède, ou pas. La France a clairement choisi d'appartenir au club des puissances nucléaires et cette décision fut d'ailleurs consubstantielle à la création de ce qui allait devenir la DGA tant il était indispensable – au début des années soixante – de rassembler des compétences autour d'une ambition nécessitant la vision du système global.

La dissuasion joue également un rôle important pour les forces classiques : du fait des exigences techniques et stratégiques de sa mise en œuvre elle tire vers le haut les capacités des armées. Ceci est vérifié aussi bien pour l'Armée de l'air que pour la Marine nationale. Ainsi bien que l'arme nucléaire ne constitue pas une arme de bataille, elle contribue largement au maintien et au développement des compétences des armées au plus haut niveau mondial.

Ceux qui avaient pronostiqué un déclassement des forces de dissuasion se sont lourdement trompés : en plus de son pouvoir dissuasif, l'arme nucléaire possède une dimension symbolique incontestable. En d'autres termes, elle permet à un

État d'affirmer un statut et c'est bien ce qui motive les efforts constatés de certains pour entrer dans le club nucléaire. Les membres historiques ne sont pas en reste et depuis plusieurs années la Russie se livre à une modernisation de ses forces nucléaires et prépare l'avenir avec de nouvelles générations de vecteurs. Elle met également en service de nouveaux sous-marins lanceurs d'engins qui lui permettent de retrouver une permanence à la mer interrompue durant plusieurs années. Le redressement des forces nucléaires russes, entamé il y a douze d'ans, est donc en bonne voie. La Chine développe également à grands pas ses capacités.

Nouvelles générations d'aéronefs

Réduction de l'empreinte environnementale

Efficacité, sécurité, certification

Surveillance des environnements naturel et opérationnel

Robots, drones et systèmes intelligents

Systèmes d'armes conventionnels

Nouvelle génération d'armes stratégiques

Un accès performant et sûr à l'espace

Un espace durable et sécurisé

Nouveaux moyens de simulation

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

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 défensifs, sont tels que les composantes aéroportées devront faire preuve d'un très haut niveau de performance.

Les efforts consentis par plusieurs États – dont la Russie – pour développer des systèmes de défense anti-missiles balistiques (DAMB) doivent être intégrés dans les réflexions sur la préparation de l'avenir. Remarquons toutefois que la défense antimissile, pas plus qu'un autre moyen militaire, ne sera capable à l'horizon 2040 de se présenter comme une alternative crédible à la dissuasion nucléaire.

L'ONERA accompagnera à l'avenir – comme il l'a fait dans le passé – 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 notamment sur la propulsion des missiles, le guidage-pilotage, les matériaux et les environnements. Pour la composante aéroportée, les travaux concerneront le missile air-sol nucléaire de 4<sup>e</sup> génération (ASN-4G).

Le principe même de la dissuasion repose sur la capacité à concevoir un système d'attaque stratégique capable de pénétrer les défenses adverses. Ainsi, 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

---

**7.1** | Attaque stratégique balistique

**7.2** | Menaces anti-stratégiques et confrontation attaque-défense stratégique

**7.3** | Missile air-sol nucléaire de 4<sup>e</sup> génération (ASN-4G)

*Feuilles de route non diffusées.*



## Un accès performant et sûr à l'Espace



Il ne s'agit plus seulement de disposer de moyens d'accès à l'espace capables de la performance maximale et d'une fiabilité rassurante. Il s'agit aussi et surtout d'offrir ce transport au meilleur coût, à qualité de service équivalent »

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 » appelée parfois *New Space* a été très largement ignorée ou du moins sous-estimée par les acteurs européens du domaine. Le changement de situation est particulièrement visible et ressenti pour l'accès à l'Espace, et les images spectaculaires de retour d'étages récupérables de lanceurs de la société Space X d'Elon Musk ont fait le tour du monde. Pourtant il faut éviter de présenter la situation de façon trop schématique. On oublie un peu vite que les États-Unis ont disposé pendant 30 ans – de 1981 à 2011 – d'un système spatial presque totalement récupérable : la navette spatiale.

Ce qui est nouveau aujourd'hui ce sont les acteurs et la contraction du temps d'élaboration de nouveaux produits. Les européens n'imaginaient pas que des magnats ayant fait fortune dans des secteurs n'ayant rien à voir avec le spatial (Paypal, Amazon...) seraient mus par une telle ambition : bâtir une nouvelle industrie de l'Espace, boostée par de nouvelles méthodes. Ainsi Elon Musk, dont le parcours est si peu lisible pour un européen, décida-

t-il de créer en 2002 SpaceX (Space Exploration Technologies Corporation) parce qu'il estimait que « la NASA manquait d'ambition ». Il faut aussi remarquer qu'aux États-Unis les acteurs étatiques – à commencer par cette NASA si décriée – ont finalement largement collaboré en mettant de nombreux moyens, technologies et compétences à disposition de ceux qui portaient cette ambition.

## L'accès à l'espace

L'évolution des technologies, la miniaturisation, le développement de nouveaux usages et services ouvrent la voie à de nouveaux acteurs privés ; le lancement spatial devient de plus en plus concurrentiel et une offre pléthorique (ou en passe de l'être) 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 un certain volume de contrats commerciaux. Il ne s'agit plus seulement de disposer de moyens d'accès à l'espace capables de la performance maximale et d'une fiabilité rassurante. Il s'agit aussi et surtout d'offrir ce transport au meilleur coût, à qualité de service équivalent.

Le retard pris par l'Europe concernant les technologies de réutilisation de lanceurs ou les lanceurs adaptés au lancement à la demande de petits satellites peut néanmoins être rattrapé. L'Europe spatiale peut intelligemment préparer l'après-Ariane 6 sans nuire à ce dernier (sa durée de vie sera probablement nettement moins longue que celle d'Ariane 5). Cette préparation a d'ailleurs commencé avec les initiatives industrielles comme Themis et Adeline pour le lanceur ou Prometheus pour les moteurs.

Pour aller plus loin, et plus rapidement, on doit faire aboutir des développements technologiques pour la réutilisation qui utilisent toute la complémentarité de la dualité aéronautique/espace de notre industrie. Une des pistes prometteuses consiste en effet 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 la fiabilité qu'il doit démontrer en permanence et de son utilisation à grande échelle, a beaucoup à apporter au transport spatial. Car le transport aérien est depuis longtemps un bien d'usage, et le transport spatial a du mal à s'émanciper

d'une vision trop conservatrice de son marché. L'aéronautique a par exemple développé des stratégies de surveillance de l'état de santé des appareils afin d'en optimiser la maintenance préventive. Pour qu'un futur lanceur réutilisable européen soit compétitif à l'horizon 2030, la diminution des coûts associés à la remise en vol doit être la priorité, sachant que la faisabilité de la réutilisation ne fait aujourd'hui plus de doute.

En outre il faut s'intéresser au développement d'un lanceur réutilisable dédié aux mini-satellites qui pourront à l'avenir remplir un certain nombre de missions traditionnellement dévolues aux satellites de grande taille. Une des feuilles de route propose notamment de se concentrer sur l'étude d'un lanceur aéroporté réutilisable.

## Nouveaux concepts de service en orbite

Jusqu'à maintenant les charges utiles sont placées sur orbite, y sont maintenues et assurent leur fonction – communication, observation, etc. La station spatiale internationale (ISS) est une exception à ce schéma dans la mesure où elle a nécessité des opérations d'assemblage, de maintien opérationnel en orbite. Aujourd'hui, le développement de la robotique spatiale aboutit au développement et à la mise au point des technologies nécessaires à la maintenance en orbite, à l'assemblage en orbite et même à la fabrication en orbite. Ce sont là de nouveaux concepts de services en orbite.

On envisage également le déploiement dans un avenir proche d'autres nouveaux « services » intéressants les utilisations militaire et civile de l'espace comme par exemple l'élaboration de petits satellites patrouilleurs ou de satellites gardiens afin de conférer à nos moyens spatiaux la capacité de contrer des menaces intentionnelles ou naturelles.

---

## Feuilles de route

**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



**D**e nombreux projets de lanceurs réutilisables émergent actuellement, surtout aux États-Unis. Ils sont orientés vers les charges utiles lourdes : plusieurs tonnes souvent destinées à l'orbite géostationnaire.

Or, l'arrivée de méga-constellations de milliers de mini-satellites fait apparaître de nouveaux besoins – réactivité, cadence de lancement, flexibilité... En Europe, peu de projets concrets sont envisagés à l'heure actuelle pour un lanceur réutilisable adapté au lancement économique de petits satellites dans la classe 500 kg, et aucun n'est arrivé au stade de la démonstration.

Cette feuille de route considère le lancement de mini-satellites de cette classe, soit par le développement d'un moyen dédié – un lanceur pour un mini-satellite – soit en mode partage de mission sur un lanceur « lourd ».

Il s'agit ici de faire la démonstration que la réutilisation du lanceur dans son ensemble ou seulement d'une partie est une solution répondant au besoin de maîtrise des coûts sur de tels marchés.

L'une des pistes prometteuses consiste à incorporer de plus en plus de technologies aéronautiques dans le monde du spatial, du fait de leurs atouts : coûts, fiabilité, utilisation massive des systèmes aéronautiques par rapport aux systèmes spatiaux.

L'évolution des besoins se situe également en terme de respect de l'environnement et de la sécurité, étant donnée l'attention croissante portée à la durabilité et à l'empreinte écologique du système, pour un cycle de vie complet (en plus des exigences légales).

### Activités

#### Développement de nouveaux concepts

- Parmi les nouveaux concepts qui ont déjà fait l'objet d'études à l'ONERA, citons : le lanceur réutilisable dédié aux mini-satellites (1<sup>er</sup> étage aéronautique, 2<sup>e</sup> et 3<sup>e</sup> réutilisables)
- Avant-projet de conception de lanceurs de mini-satellites réutilisable intégrant des technologies aéronautiques (e.g. aéroporté), orienté minimisation des coûts, par une approche multidisciplinaire couplant les différentes phases de vol du véhicule
- Étude détaillée du concept et spécifications de démonstration
- Conception préliminaire d'un système de lancement lourd multi-mission réutilisable
- Réflexion de démonstration à plus petite échelle d'éléments technologiques pour la réutilisation

#### Développements technologiques pour la réutilisation

- Réduire et maîtriser les sollicitations
- Surveiller le système dans son environnement et développement de solutions à bas coût de diagnostic (système propulsif et structure)
- Garantir un haut niveau de fiabilité et de probabilité de récupération des étages en prévoyant des stratégies adaptées
- Améliorer les structures
- Adapter le guidage et pilotage du lanceur pour la phase de retour
- Définir une maintenance inspirée de l'aéronautique
- Développer un moyen propulsif innovant
- Améliorer la compréhension et la simulation des chambres de combustion oxygène liquide/méthane (chambre principale, générateur de gaz, APU)
- Étendre les compétences de conception avancée et d'évaluation de performances des systèmes

**Horizon.....10 ans**

**L'ONERA, idéalement positionné dans le domaine aéronautique et spatial, a toutes les compétences pour proposer technologies et concepts de rupture et jouer un rôle décisif dans ce monde du transport spatial en pleine mutation.**



### 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 autour de deux capacités émergentes :

- **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** : l'ensemble des technologies d'assemblage, de modification, voire de fabrication en orbite

L'objectif de la feuille de route est de mettre en place à l'ONERA une expertise sur les capacités technologiques qui seront à la source de futurs services innovants et de proposer de nouveaux concepts répondant à des problématiques commerciales, environnementales ou de défense.

Les principales thématiques identifiées à ce jour sont :

- 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*)

#### Activités

- 0-10 ans : fédérer l'ONERA autour des nouveaux concepts, développer les coopérations et la formation des ingénieurs.
- 0-3 ans : développer et intégrer les modèles dans le SpaceLab (voir FdR 9.3) afin d'évaluer les concepts.
- 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 dans le cadre du projet Onsat X de la FdR 9.3, extension des travaux sur la fabrication pour intégrer la gestion du cycle de vie (ALM\*) et l'exploitation des ressources.

\*ALM : Application Lifecycle Management

#### Horizon.....10 ans

**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.**



## Un espace durable et sécurisé



**Le développement par des États européens de composantes d'un système de surveillance de l'espace, qui permet de détecter et d'identifier les objets qui s'y trouvent – systèmes orbitaux, vecteurs, armements, débris de taille moyenne – est une première réponse à la préoccupation de protection de nos propres systèmes spatiaux »**

L'espace revêt une importance stratégique depuis les débuts de la conquête spatiale en tant que milieu de transit des missiles balistiques et milieu de mise à poste de satellites. Comme zone de mise à poste, il prolonge la recherche de l'avantage donné par la maîtrise d'un « point haut ». C'est aussi un milieu intimement lié aux capacités nucléaires et balistiques des États.

Pour la première fois, la Revue stratégique de défense et de sécurité nationale publiée à l'automne 2017 mentionne « l'espace exo-atmosphérique » dans le cadre de la rubrique « des espaces contestés ». Il y est notamment indiqué qu'il s'agit d'un milieu « peu régulé » et que la banalisation de l'accès va en faire un domaine de confrontation entre États.

La prolifération de la menace balistique n'est pas à proprement parler un sujet nouveau, mais elle se pose avec une acuité particulière depuis quelques temps avec les gesticulations de la Corée du Nord et un peu avant de l'Iran. Ce qui relance le sujet de l'alerte avancée.

Après les démonstrations techniques anti-satellite chinoise (2007) et américaine (2008), la ministre des Armées, dans son discours du 7 septembre 2018, a mentionné et pour la première fois illustré la réalité des postures et

actions de plus en plus inamicales, potentiellement agressives vis-à-vis de nos capacités dans l'Espace.

Alors que nos capacités militaires reposent de plus en plus sur des composantes spatiales – pour le renseignement, les communications et la navigation – rien de ce qui se passe dans l'espace n'est donc anodin pour la France, ni pour l'Europe. Les positions très récentes adoptées aux États-Unis viennent renforcer cette tendance. Lors de la troisième réunion du *National Space Council* qui s'est tenue le 18 juin 2018, le président des États-Unis a souligné l'importance du domaine spatial en matière de création d'emploi et de fierté nationale, mais aussi dans le domaine de la Défense. C'est dans ce contexte qu'il demandé à l'administration de la défense de mettre en place une *Space Force*.

## La tenue de situation spatiale

La surveillance de l'activité dans l'espace exo-atmosphérique revêt une importance particulière puisqu'il n'existe pas d'instrument légal international contraignant concernant les conflits dans l'espace. Le traité sur la non-prolifération des armes nucléaires conclu en 1968 et signé par un grand nombre de pays interdit la mise en orbite autour de la Terre d'armes nucléaires ou de toute autre forme d'armes de destruction massive. Aucun traité en revanche n'interdit la mise en place d'autres types d'armes.

Ce constat et le contexte éminemment instable rendent indispensable une capacité autonome d'appréciation réactive de la situation spatiale, à des fins de contrôle, de régulation et de sécurité des moyens spatiaux. La tenue de situation spatiale s'intègre dans le cadre global de la gestion des opérations spatiales, afin de :

- disposer d'une connaissance autonome actualisée des activités et capacités des divers intervenants ;
- organiser les opérations spatiales, du lancement à la fin de vie des satellites ;
- assurer la maîtrise, la disponibilité et la planification des fonctionnalités spatiales.

L'évolution technique et opérationnelle liée à l'activité dans l'espace se traduit par des bouleversements rapides et importants, qui rendent difficile une prédiction de l'évolution du contexte à moyenne échéance. Un horizon d'activités sur 5-10 ans semble cohérent avec cette forte variabilité.

Ces actions permettent de répondre à deux grands enjeux :

- Un enjeu dual : permettre d'assurer l'utilisation sûre de l'espace – *Safety* ;
- Un enjeu de défense ; permettre d'identifier les menaces actives potentielles ou effectives, afin d'assurer la sécurité dans l'espace sur tous les domaines d'emploi et phases de vie – *Security*.

## La survivabilité des systèmes spatiaux

L'utilisation de l'espace sera de plus en plus difficile : d'une part le milieu est naturellement hostile du fait des particules solaires et rayonnements ionisants qui le traversent et d'autre part l'activité anthropique a elle-même généré de nouveaux

risques liés en particulier à la multiplication des débris en orbite. L'espace devient en outre un milieu de confrontation probable entre États. Le développement par des États européens de composantes d'un système de surveillance de l'espace, qui permet de détecter et d'identifier les objets qui s'y trouvent (systèmes orbitaux, vecteurs, armements, débris de taille moyenne) est une première réponse à la préoccupation de protection de nos propres systèmes spatiaux.

Il est néanmoins indispensable de compléter cette approche par une seconde qui aura pour objectif de caractériser les menaces d'origines naturelles et intentionnelles auxquels sont exposés nos propres systèmes orbitaux. Il s'agit d'être en mesure de qualifier la dangerosité de ces menaces et de quantifier les risques encourus afin d'en déduire les solutions envisageables d'atténuation de ces risques, voire de protection ou de la résilience la plus étendue possible.

## De nouvelles charges utiles pour de nouvelles missions

Ces dernières années, l'effort a porté sur le développement de capteurs toujours plus performants, la supériorité militaire en découlant étant liée à la qualité, voire au caractère unique de l'information.

La montée en puissance des technologies de l'information et de la communication met en évidence que le nombre et la répartition des capteurs devient vite critique. L'avènement 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 ces nouveaux usages, avec une évaluation de la performance du système non pas en sortie de capteur, mais en sortie d'une chaîne de traitements avancés mettant en valeur les caractéristiques de la constellation (notamment la revisite). Les dernières années ont vu des start-ups investir ce secteur pour proposer des services utilisant de nombreux petits satellites fabriqués à bas coût, plutôt que de gros satellites aussi performants qu'onéreux.

## Feuilles de route

---

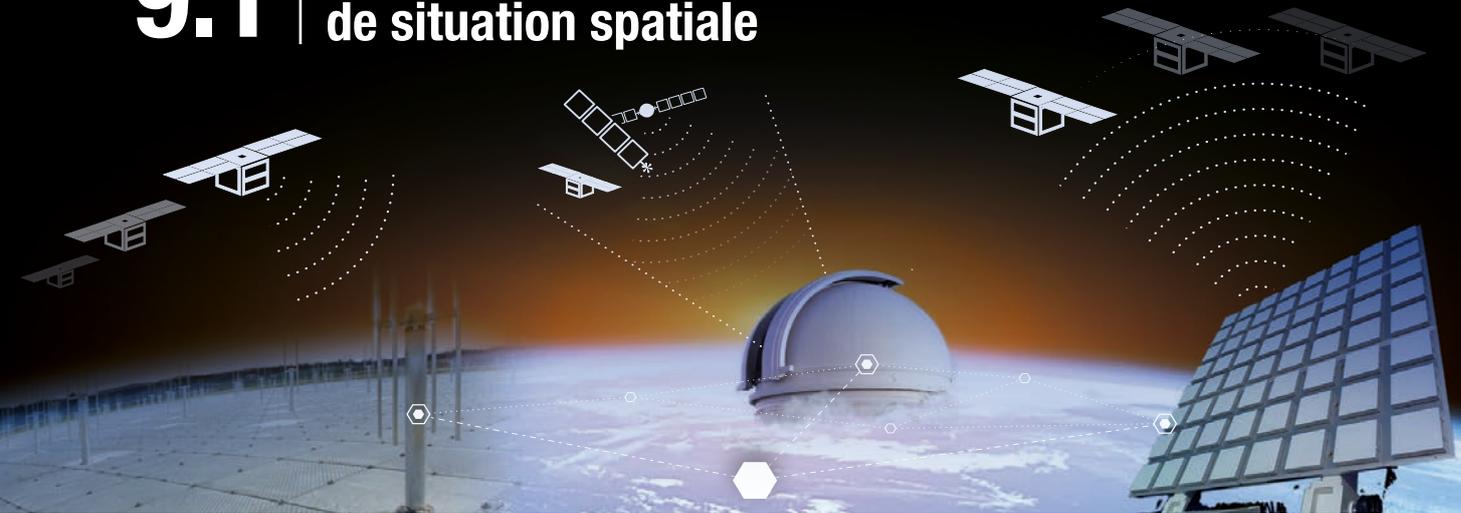
**9.1** | Système de tenue de situation spatiale

**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 – manoeuvres, 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

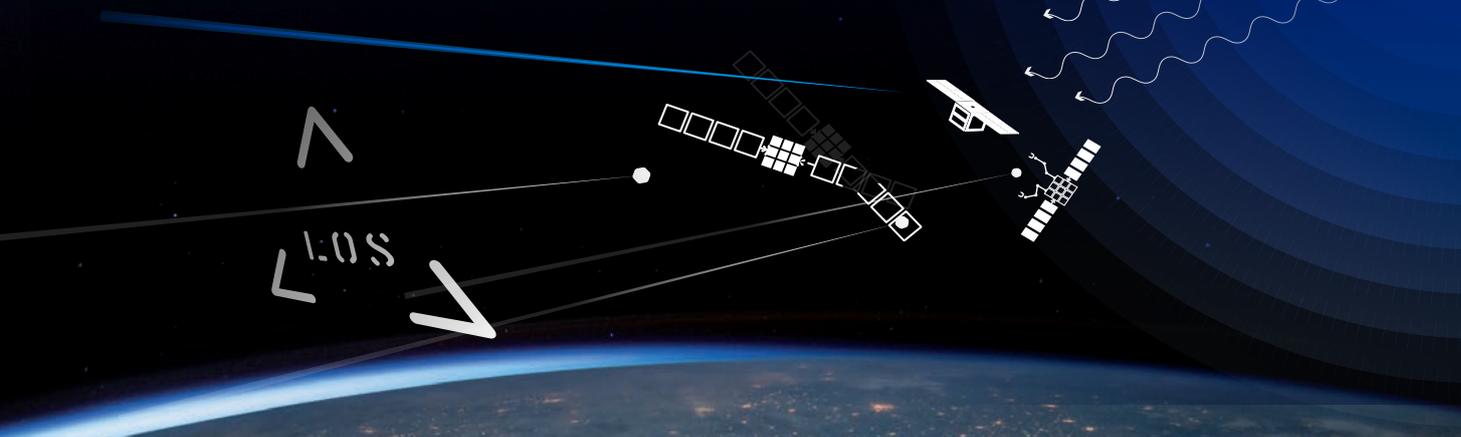
- Étude de règles et outils de diffusion de données multiniveaux, permettant le partage de données et produits en environnement multi-utilisateurs et/ou international
- Outils de planification des observations, pour optimiser les ressources pour la trajectographie, la caractérisation et l'imagerie
-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

Horizon ..... 5 à 10 ans

**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 ou de rechercher les stratégies d'emploi d'armes les plus efficaces ;
- 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

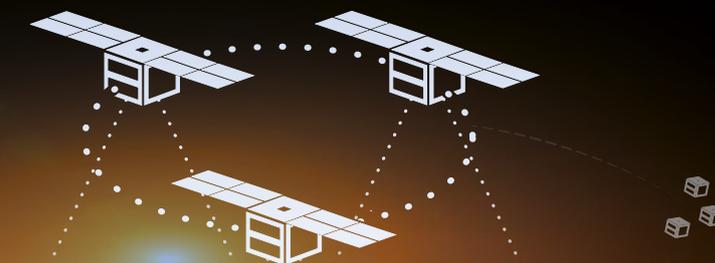
- Étudier les interactions Soleil-Terre ; caractériser l'environnement des systèmes spatiaux – météo spatiale – ; impact des agressions naturelles et non-intentionnelles sur les fonctions et composants des engins spatiaux – risques électrostatiques, effets de vieillissement, effets transitoires, collision... ;
- Identifier, caractériser les agressions susceptibles d'être mises en oeuvre 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 ;
- 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 oeuvre des outils de type IA (intelligence artificielle) ; élaborer des missions low-costs de tests sur des nanosats ; expériences sol...

**Horizon .....10 ans**

**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.**



## 9.3 | Missions et capteurs pour les micro-satellites



**D**ans un contexte de très forte accélération de l'innovation dans le domaine des nanosatellites (moins de 50 kg), l'ONERA propose un programme particulièrement ambitieux pour se fédérer autour d'un système opérationnel basé sur un essaim de nanosats, jusqu'à la démonstration en orbite. Il s'agit pour l'ONERA de :

- définir et réaliser des démonstrateurs en orbite de capteurs et de concepts de missions « nanosats »
- 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

Les missions envisagées aujourd'hui sont l'observation permanente de la Terre à très haute résolution (optique visible, IR ou hyperspectrale, ou SAR) et la connaissance de la situation spatiale (météorologie spatiale, surveillance des activités).

La démarche proposée est basée sur l'approche « newspace » qui a rendu possible les grandes constellations, mais en explorant les apports systèmes combinés des avancées en développement de capteurs et de robotique spatiale.

Dans une démarche de rupture technologique, il sera nécessaire de transcender les contraintes actuelles en gardant des performances significatives à coût réduit ou atteindre des performances inatteignables par un système classique de coût équivalent. Deux voies à explorer : la recherche de compacité au niveau de la charge utile et la recherche de solution permettant de s'affranchir des contraintes de taille.

### Activités

- Réaliser des démonstrateurs de charges utiles : capteur, spatialisation, intégration plateforme, structures déployables
- Maîtriser ou développer les briques de l'assemblage en orbite : contrôle/commande d'attitude et de position, rendez-vous, autonomie décisionnelle, robotique
- Maîtriser ou développer les briques du vol en formation: propulsion électrique de faible puissance, senseurs inertiels haute performance compacts, senseurs de distance précis à faible consommation
- Développer les outils liés aux essaims : gestion optimisée de la formation, échange de données, traitements répartis, autonomie de la formation, résilience, reconfiguration de la mission
- Analyser les concepts de missions qui utiliseraient ces charges utiles et évaluer leur performance, non en termes purement techniques, mais au niveau des services rendus à l'utilisateur

### Jalons

- **ONSAT-1** [0-5 ans] réalisation d'un première charge utile *ready to fly*
- **ONSAT-2** [0-5 ans] réalisation et démonstration en orbite des briques technologiques nécessaires pour une plateforme agile
- **ONSAT-3/4/5** [3-7 ans] réalisation d'un démonstrateur technologique du concept d'observation
- **ONSAT-X** [6-10 ans] démonstration en orbite de la mission complète

**Horizon ..... 10 ans**

**L'acquisition de l'expertise « nanosats » est le principal enjeu envisagé pour cette feuille de route, et concerne en particulier la mission de l'ONERA auprès de la Défense et des acteurs nationaux du spatial.**



**La simulation intervient aussi bien dans la définition de l'architecture que dans l'évaluation des performances jusqu'à la phase de qualification. Elle permet de réduire le nombre d'essais et donc le coût associé »**

**Le modèle de calcul donne accès à un champ de simulation virtuelle toujours plus vaste, et permet de combiner des facteurs dont la réunion effective serait ou trop longue ou trop coûteuse.**

Le mot simulation évoque essentiellement les techniques numériques et l'utilisation de l'informatique et il est vrai qu'elles en constituent l'ossature ; mais l'expérimentation reste omniprésente dans un bon outil de simulation, car elle fournit les données nécessaires à la validation. Dans sa plus grande généralité, l'outil de simulation est constitué d'une architecture informatique fédératrice qui intègre et fait dialoguer des modules logiciels simulant le comportement des divers composants du système et leurs interactions. Les modèles de comportement peuvent être de natures très différentes – physique, logique, algorithmique, statistique, phénoménologique – et sont établis à partir de données expérimentales ou provenant de codes de calcul. La simulation numérique est un outil essentiel pour contribuer à la maîtrise de phénomènes complexes et jouera un rôle croissant pour la conception et la garantie des performances globales des systèmes aérospatiaux.

### **Simulation numérique haute-fidélité et grands défis applicatifs**

Un objectif de l'ONERA est de progresser fortement dans le domaine de la simulation numérique haute-fidélité, terme qui désigne à la fois la fidélité relative à la représentation des phénomènes physiques proprement dits et celle du respect de la géométrie des systèmes. Il sera en effet nécessaire de prendre en compte la complexité géométrique croissante de configurations de plus en plus détaillées. Ce qui est recherché c'est

le niveau de fidélité global de la simulation et par conséquent son aptitude à représenter avec précision l'ensemble des phénomènes physiques.

Les grands défis applicatifs qu'a sélectionné l'ONERA pour incarner cette progression en simulation numérique haute-fidélité permettront également de disposer dans un avenir proche d'une simulation de routine beaucoup plus performante qu'actuellement avec des retombées importantes dans la conception des systèmes aérospatiaux de demain. Même s'ils concernent des systèmes complets –

## **Nouveaux moyens de simulation**

Nouvelles générations d'aéronefs

Réduction de l'empreinte environnementale

Efficacité, sécurité, certification

Surveillance des environnements naturel et opérationnel

Robots, drones et systèmes intelligents

Systèmes d'armes conventionnels

Nouvelle génération d'armes stratégiques

Un accès performant et sûr à l'espace

Un espace durable et sécurisé

Nouveaux moyens de simulation

un véhicule hypersonique et un turboréacteur –, les avancées effectuées au cours de la réalisation de ces défis trouveront des applications rapides sur des simulations d'ampleur plus limitée.

Les deux défis choisis sont particulièrement représentatifs de l'activité de l'ONERA et font par ailleurs appel à un large spectre de compétences en mécanique des fluides, matériaux et structure, transferts radiatifs, aéroélasticité, électromagnétisme ou encore aéroacoustique.

La modélisation et la simulation multiphysique constituent un axe d'effort privilégié, devenu un point de passage obligé pour prévoir et optimiser les performances des systèmes, véhicules ou équipements. 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 sachant qu'elle influence directement son efficacité aérodynamique et sa signature radar.

## Matériau numérique

Par ailleurs, il est indispensable de favoriser 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, à différentes échelles – atomique à macroscopique – des connaissances approfondies en physique des solides, en physique des matériaux et en mécanique des structures. C'est le défi que relève l'ONERA avec l'objectif de développer une plate-forme logicielle capable de simuler de façon rigoureuse le comportement d'un matériau virtuel qu'il s'agisse d'un matériau métallique, céramique ou encore composite.

Ces grands projets de simulation numériques permettront également de préparer l'arrivée des machines exaflopiques (un milliard de milliard d'opérations par seconde) dans une démarche de recherche avec les constructeurs et en exploitant dans les meilleures conditions les infrastructures de calcul nationales et européennes.

## Expérience et hybridation calcul-expérience

Si la simulation numérique progresse régulièrement les deux décennies passées prouvent que l'expérience, la « simulation expérimentale » n'a rien perdu de son importance.

L'expérience intervient sous toutes ses formes : 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 la configuration qui a été imaginée. Au stade de l'avant-projet, puis à celui du développement, on la désigne souvent par le vocable « essai », trompeur car trop réducteur. De fait, il s'agit bien d'une « simulation expérimentale » à échelle réduite ou sur une partie d'un système, dans des conditions réalistes et maîtrisées, conçue de manière à s'intégrer dans un processus de simulation ou de modélisation plus large.

Les méthodes expérimentales continuent en effet de progresser à vive allure et l'avantage compétitif donné à celui, chercheur ou ingénieur, qui a accès aux techniques les plus avancées, est indéniable. Ainsi dans le proche avenir les grands moyens expérimentaux de l'ONERA s'intégreront dans l'environnement de la simulation numérique où l'hybridation calcul expérience permettra la correction précise de l'influence de paroi des souffleries et l'accroissement du volume de données (le *big data*), l'interaction essai-calcul tant pour l'exploitation que pour le pilotage en temps-réel des moyens expérimentaux.

## La conception multidisciplinaire

La simulation prend également une place croissante dans la conception et l'évaluation des futurs systèmes de défense de plus en plus complexes et interconnectés. Elle intervient aussi bien dans la définition de l'architecture que dans l'évaluation des performances jusqu'à la phase de qualification et permet de réduire le nombre d'essais et donc le coût associé. L'ONERA va donc mettre au point la nouvelle génération d'outils qui lui permettra de répondre aux expertises sur les nouveaux programmes d'armement ou sur de nouvelles problématiques telle 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 : à la fois, il s'agit de se doter d'outils d'expertise pour évaluer des concepts et configurations de véhicules proposés par d'autres, et d'outils/méthodes prospectifs pour explorer des concepts, des technologies, des configurations et des architectures de véhicules innovants et de rupture, et contribuer ainsi à la levée de risques technologiques et à leur montée en maturité.

## Feuilles de route

---

**10.1** | Plateforme et méthodes de simulation numérique multi-physique 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



# 10.1 Plateforme et méthodes de simulation numérique multi-physique 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 multi physique – 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 grand 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 de toutes les 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 » (réplique numérique fournissant à la fois les éléments et le fonctionnement d'un dispositif du monde physique, cf Wikipedia).

Des travaux innovants portant sur l'efficacité algorithmique ou informatique réduiront les coûts de simulation ou permettront d'accéder à des simulations frontières 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.....5-15 ans

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 – ce sont les applications qui ont été retenues pour pousser la simulation numérique du futur dans ses retranchements, en plaçant l'ambition à un très haut niveau. Ces défis de la simulation physique constituent également 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 la géométrie. Les travaux s'appuieront directement sur le projet de plateforme de simulation multi-physiques haute-fidélité ORION (feuille de route 10.1).

Les défis retenus font appel à un large spectre de compétences en mécanique des fluides, matériaux et structure, transferts radiatifs, aéroélasticité ou encore aéro-acoustique. 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

Si l'objectif final est la simulation complète d'un turboréacteur Safran, on mettra au point l'ensemble de la méthodologie de calcul sur le moteur DGEN380, conçu par la PME française Price Induction qui est plus petit, plus simple.

#### Il y aura deux versions de démonstrateurs :

- une simulation considérant à la fois les chambres de combustion et la turbine en régime de croisière, pour la mise en avant des phénomènes multi-physiques des écoulements et leurs couplages avec la thermique des matériaux ;
- une étude d'un cas limite du domaine de fonctionnement du moteur avec une résolution de la turbulence la plus poussée possible. L'accent sera mis sur les méthodes numériques innovantes et les aspects HPC (*High Performance Computing*).

Une première simulation sur le DGEN380 en régime de croisière sera entreprise avec les codes actuels – elsA, CEDRE, Zset Zébulon – dès 2020.

**Horizon.....7-10 ans**

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

Le besoin principal est lié aux attentes militaires : des projets de missiles hypervéloce. 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 aéropropulsif 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 en LES\* 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

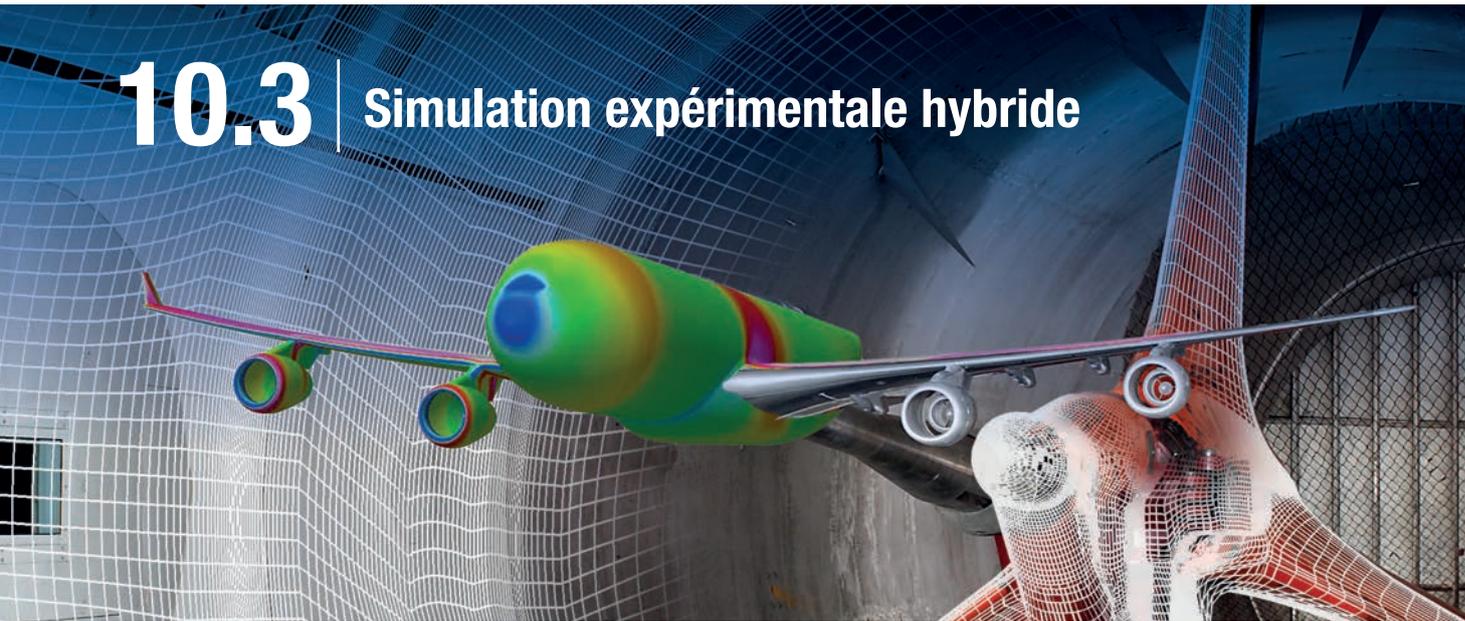
\*LES : simulation des grandes échelles de turbulence – méthode de calcul des écoulements où les grandes structures sont calculées et les petites modélisées.

**Horizon.....7-12 ans**

**Ces défis applicatifs préparent une simulation numérique à très haute précision. Ils mettront en évidence des verrous dont la résolution permettra des progrès dans la conception. Ils sont un puissant outil de motivation collective. Cette simulation numérique d'exception sera la simulation « courante » d'un futur plus lointain.**



# 10.3 | Simulation expérimentale hybride



La capacité de prévoir les écoulements aérodynamiques autour des aéronefs et dans leurs moteurs est d'une importance cruciale en matière de conception car ces phénomènes rendent compte pour une grande partie de la performance finale de l'appareil. Cette prévision s'appuie sur des simulations numériques (moyennant des hypothèses importantes comme sur la turbulence) et sur des mesures en soufflerie (affectées de biais inévitables comme celui lié à la réduction d'échelle). Actuellement, les jeux de données délivrés décrivent la même réalité physique mais ne s'enrichissent pas mutuellement, ou alors de façon empirique, peu efficace.

Les techniques d'assimilation de données, utilisées depuis longtemps dans le domaine de la prévision météorologique et introduites récemment dans le domaine aérospatial, donnent des résultats prometteurs dans les communautés de la métrologie et de la simulation numérique, mais plutôt dans un cadre de prototype ou de démonstration. L'enjeu de cette feuille de route est de mettre en place une démarche permettant d'atteindre la maturité suffisante pour une utilisation industrielle.

L'objectif *in fine* est le développement de l'EHCA – Environnement hybride de conception aérodynamique –, sous la forme d'une plateforme matérielle et logicielle intégrée aux installations d'essais, fournissant à l'issue des campagnes de calcul et d'expérimentation une description unifiée et optimisée du système étudié, issue de la fusion de résultats de mesure et de simulation.

## Activités

### Plateforme

- Développement d'un outil CAO de la soufflerie et de son environnement pour la conception complète des essais ; soufflerie virtuelle par CFD
- Standard unique de représentation des données aérodynamiques ; visualisation interactive des données
- Maîtrise des incertitudes expérimentales et numériques
- Assemblage en temps réel d'informations hétérogènes (fusion de données) et production de modèles : par apprentissage profond, ou modèles simplifiés (réduits) pour la synthèse d'expérience
- Augmentation des capteurs par les modèles : mesure guidée, mesure débruitée et « super-résolue », extension *a posteriori* des capacités de la mesure
- Optimisation des simulations numériques par l'assimilation de données expérimentales : estimer ou ré-estimer des quantités mal connues ou modélisées arbitrairement (approche *data-driven*)

### Moyens

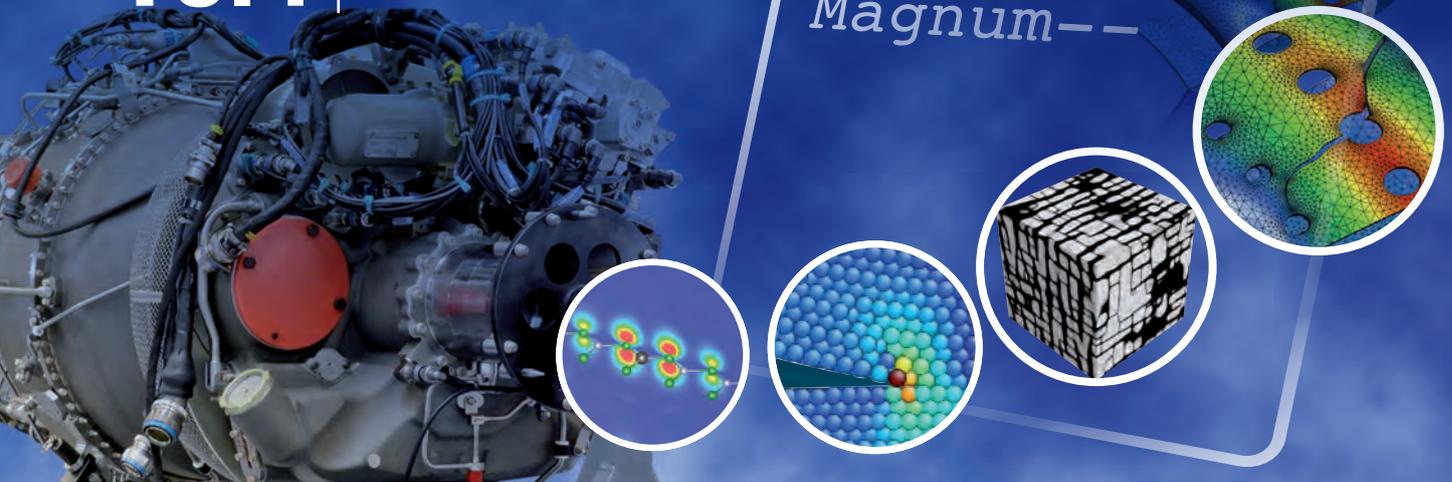
- Bancs d'essai de laboratoire, maquettes de référence
- Souffleries de taille intermédiaire : S3Ch (transsonique), SV4 (verticale), F2 (subsonique)
- Souffleries industrielles : S1MA (transsonique), F1 (subsonique)
- Future plateforme multi-physique haute-fidélité de l'ONERA ORION

Horizon ..... 15 ans

Accéder à une représentation de la réalité physique unifiée et améliorée par la combinaison de résultats d'expériences physiques, de modélisations et de simulations numériques, pour s'attaquer à des configurations d'aéronefs de rupture.



# 10.4 | Matériau numérique



**C**ette feuille de route a pour ambition de développer une plateforme logicielle réunissant différents modules, qui seront chacun capables de simuler un matériau à une certaine échelle spatiale/temporelle, et surtout de dialoguer les uns avec les autres. Cela permettra une approche globale des simulations numériques en sciences des matériaux.

Objectif : développer des outils numériques pour diviser par 3 le temps de développement de nouveaux matériaux (la mise au point d'une nouvelle classe de matériaux peut se mesurer en dizaine d'années)

- simuler le comportement d'un échantillon virtuel arbitraire (microstructure, texture, architecture, état de surface, défauts) à l'échelle du cm
- calculer le comportement d'un échantillon expérimental numérisé par tomographie
- construire la plateforme logicielle Magnum, qui rassemblera les modèles aux différentes échelles et permettra une approche globale de modélisation pouvant intégrer des processus d'auto-apprentissage (IA)

Les besoins sont ceux de l'industrie aéronautique :

- réduire les coûts et la durée des cycles de développement
- réduire le nombre et simplifier les essais industriels, en lien avec la certification
- simplifier les modèles mécaniques macroscopiques
- évaluer la nocivité des défauts

Pour, *in fine*, augmenter la durée de vie des composants critiques, diminuer l'empreinte environnementale, optimiser la maintenance.

### Activités

#### Démarche multi-échelle séquentielle

L'objectif est le passage contrôlé d'informations entre les différentes échelles :

- échelle atomique : exploiter les calculs de structure électronique (bases de données thermodynamique, étude des défauts) ; développer une cinétique atomique qui permette d'accéder au temps long de la diffusion
- échelle mésoscopique : étendre la méthode des champs de phase ( $\mu\text{m}$ ) aux échelles supérieures (mm/cm), développer les couplages multiphysiques, maîtriser la transition d'échelle du discret (dislocations individuelles, micro-endommagements, microfissurations) au continu (lois de plasticité cristalline, modèles d'endommagement, modèles de durée de vie)
- échelle macroscopique : développer les couplages mécanique/microstructures et mécanique/procédés

#### Intelligence Artificielle et bases de données expérimentales associées

Objectifs : optimisation multicritères des propriétés d'emploi à partir des seules données d'entrées ; évaluation rapide de propriétés du matériau, servant ou non de variables intermédiaires dans des calculs multi-échelles complexes. Pour cela :

- innover avec une approche IA / *big data* dans le domaine des matériaux
- coupler en profondeur l'expertise IA et l'expertise « matériaux »
- produire et/ou recueillir les données nécessaires en grand nombre, les structurer de manière optimale pour des visées long terme
- gérer les incertitudes et les biais sur les propriétés finales

**Horizon.....10-12 ans**

**MAGNUM permettra de simuler toute propriété fonctionnelle d'un matériau - métallique, céramique ou composite - par une connaissance scientifique approfondie des couplages entre les différentes physiques - chimie des procédés, mécanique, thermodynamique - et les différentes échelles - atomiques à macroscopiques.**



# 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

SCAF : Système de combat aérien du futur

ASN4G : Air-sol nucléaire de 4e génération (missile hypervélocé)

BLADE : Simulateur de systèmes / systèmes de systèmes (ONERA)

EMPRISE : Simulateur de scène radar (ONERA)

MATISSE : Simulateur de scène optronique (ONERA)

MSaaS : Modeling & Simulation as a Service

API : interface de programmation

OGC CDB : Open Geospatial Consortium Common Database

HLA : High Level Architecture

**Horizon.....10 ans**

## Activités

- Un socle commun de simulation ONESIM fédérant les codes de référence ONERA – Blade, Matisse, Emprise
- Des produits dérivés de ce socle (simulateurs, modèles, données de référence) en soutien aux programmes et aux études

## Objectifs

### Axe 1 : développement des applications

- Système de combat aérien futur
- Dissuasion
- Défenses aériennes et anti-missile intégrées
- *Space Lab*
- Au-delà des applications défense : sécurité, drones

### Axe 2 : bibliothèque commune de modèles

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

### Axe 3 : socle commun ONESIM

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

**Notre démarche de simulation globale multi-niveaux s'appuie sur un coeur 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



Cette feuille de route définit les nouvelles méthodes et approches pour la conception multidisciplinaire intégrée de véhicules aérospatiaux réalistes. Il s'agit d'un atelier de recherche en conception qui vise à doter l'ONERA :

- d'outils d'expertise pour évaluer des concepts et configurations proposés par d'autres
- d'outils d'exploration et d'innovation afin de proposer nous même des concepts innovants – architecture générale, technologie innovante
- d'un banc d'essai de méthodologies de conception avancées – optimisation, MDO\*, apprentissage, gestion des incertitudes, visualisation et aide à la décision

Cet atelier doit nous permettre d'évaluer, par simulation numérique, les performances et l'architecture optimale d'un concept en réponse à une spécification de mission, en prenant en compte les impacts opérationnels, environnementaux et sociétaux. L'objectif est d'avoir une vision allant au-delà des disciplines classiques – aérodynamique, propulsion, structure... – et incluant systèmes embarqués, maintenance-surveillance, exploitation-opérations, moyens de production, contraintes de certification...

Cet atelier vise ainsi à mettre en valeur les spécificités de l'ONERA, c'est-à-dire sa capacité à maîtriser à la fois les domaines disciplinaires et les méthodes numériques de modélisation et d'exploration, et d'orchestrer la définition de concepts innovants.

La notion d'atelier permet d'insister sur la place de l'intervention humaine – le concepteur en reste le chef d'orchestre, en s'appuyant sur un ensemble de méthodes et d'outils –, et définit une unité de lieu, virtuelle (réseau et interface partagée) ou réelle (réunions d'experts métiers).

## Activités

### Axes de recherche pour la définition de l'atelier

- Modélisation à différents niveaux de fidélité, y compris de disciplines non conventionnelles – fabrication, cycle de vie...
- Méthodes numériques d'exploration – optimisation, réduction de modèle, méthodes adjointes, incertitudes, IA
- Ingénierie informatique et de la connaissance

### Cas emblématiques de réalisations – challenges

- Optimisation aéro-structure d'un avion complet
- Optimisation d'un vecteur à statoréacteur sur toute sa mission
- Conception d'un 1<sup>er</sup> étage réutilisable robuste aux incertitudes
- Exploration automatique d'architectures innovantes pour des configurations de type eVTOL\*
- Réalisation d'une optimisation de concept intégrant des données d'essai – soufflerie, vol...

Conception et optimisation d'un nouveau concept pour le transport civil, avec conception conjointe de la cellule – BWB, fuselage non circulaire... –, du système propulsif – DEP/BLI/ UHBR – et des chaînes électriques – composants HEP, systèmes embarqués

\*MDO : Optimisation de conception multidisciplinaire  
 eVTOL : aéronef électrique à décollage et atterrissage verticaux  
 BWB : configuration d'aile volante  
 DEP : propulsion électrique distribuée  
 BLI : ingestion de couche limite  
 UHBR : turbofan à très haut taux de dilution  
 HEP : source d'alimentation à commutation

Horizon.....10 ans

Dans un monde industriel de plus en plus numérisé, la conception des aéronefs futurs repose sur la maîtrise de la connaissance et des données produites par une approche nécessairement transdisciplinaire, intégrant l'aéronef dans son système opérationnel, et s'appuyant sur des outils mathématiques avancés.