



RÉPUBLIQUE  
FRANÇAISE

*Liberté  
Égalité  
Fraternité*

# FEUILLE DE ROUTE SCIENTIFIQUE AMONT POUR L'AÉRONAUTIQUE CIVILE

LA RECHERCHE PUBLIQUE UNIE POUR  
LES FUTURS ENJEUX NATIONAUX

Étude 2024/2025

# Feuille de route scientifique amont pour l'aéronautique civile

**La recherche publique unie pour les futurs  
enjeux nationaux**

---

**Étude 2024/2025**

---

Rédacteurs et contributeurs directs au document :

- Ph. Beaumier, Directeur aéronautique, ONERA/DTP
- A. Tanguy, Directrice scientifique branche MAS, ONERA/DSG puis MESR
- T. Alcouffe, Directeur du rayonnement Occitanie, ONERA
- P. Pacaud, Service de la Stratégie Recherche et Innovation, MESR/DGRI
- Ph. Doublet, Service de la Stratégie Recherche et Innovation, MESR/DGRI
- F. Hervy, DGA
- C. Maître, DGAC



# Sommaire

---

<b>1 - RÉSUMÉ OPÉRATIONNEL</b>	<b>5</b>
<b>2 - INTRODUCTION</b>	<b>7</b>
<b>3 - VEROUS SCIENTIFIQUES</b>	<b>11</b>
3.1. Agglomération en 5 grandes problématiques et 24 grands enjeux	11
3.2. Vision synthétique des 24 enjeux	12
3.3. Mise en relief de certains enjeux du premier ordre	42
<b>4. COMPÉTENCES NATIONALES : LES ACTEURS</b>	<b>44</b>
<b>5. RECOMMANDATIONS</b>	<b>49</b>
<b>6. REMERCIEMENTS</b>	<b>53</b>
<b>ANNEXE - CONTRIBUTEURS À LA RÉFLEXION SUSCITÉE PAR LA MISSION</b>	<b>55</b>



# 1 - Résumé opérationnel

**Préparer l'avenir de l'aviation civile** : le domaine aéronautique civil, grande force nationale, va connaître des changements ambitieux liés aux objectifs de décarbonation, incluant numérisation, électrification, nouveaux matériaux et modes de production. Si la filière aéronautique civile s'est dotée d'une feuille de route technologique au Conseil pour la Recherche Aéronautique Civile (CORAC), la recherche scientifique académique doit pouvoir participer au ressourcement du secteur, dans un environnement international où d'autres nations s'emparent rapidement de nouveaux sujets technologiques.

**Analyser les enjeux et forces de recherche scientifique du domaine** : l'Office national d'études et de recherches aérospatiales (ONERA) a été missionné par la Direction générale de la recherche et de l'innovation (DGRI), la Direction générale de l'aviation civile (DGAC) et la Direction générale de l'armement (DGA) pour piloter et coordonner des travaux permettant in fine de disposer d'une synthèse des compétences nationales de la communauté scientifique publique, d'une cartographie des verrous scientifiques de premier ordre issus d'une déclinaison d'enjeux clés et enfin, en co-construction avec la DGRI, la DGAC et la DGA, d'une feuille de route nationale et de recommandations pour la recherche scientifique amont, y compris duale.

**Fédérer et organiser la communauté scientifique** : la démarche pilotée par l'ONERA a permis de travailler autour de 11 thématiques<sup>7</sup> partagées par les principaux acteurs (laboratoires de recherche et établissements d'enseignement supérieur et de recherche) dont une centaine se sont mobilisés pour contribuer d'abord à identifier les établissements de recherche académiques contributeurs ainsi que leurs compétences, puis lancer la démarche d'analyse des verrous scientifiques dans chaque thématique pendant près de 8 mois. Ces analyses pour chaque thème et leurs verrous ont permis d'identifier les forces de la communauté scientifique, son positionnement par rapport à l'international et les domaines en émergence à consolider. La communauté scientifique, très impliquée dans le travail collaboratif, soudée et dans la volonté de préparer l'avenir, a mis au jour plus de 370 verrous scientifiques partagés.

**Synthétiser les grands enjeux scientifiques** : les équipes de la DGRI, la DGAC, la DGA et de l'ONERA ont ensuite pu se saisir de ces verrous scientifiques pour les synthétiser et effectuer une analyse des grands objectifs de recherche. Cinq grandes problématiques ont été identifiées, conduisant à 24 grands enjeux génériques qui regroupent les verrous scientifiques de premier ordre identifiés par la communauté. Ces 5 problématiques concernent : l'aéronef dans son environnement, ses impacts et contraintes ; la propulsion et des concepts d'aéronefs innovants ; les matériaux et structures ; la modélisation physique et l'expérimentation ; les systèmes intelligents distribués et interactions humains – systèmes.

La DGRI, la DGAC et la DGA, avec l'ONERA, ont enfin mis en perspective les grands enjeux au regard de leur criticité pour l'avenir, des enjeux scientifiques en amont irriguant toute la communauté scientifique, de l'importance pour la filière, des enjeux de souveraineté et de leur potentiel dual, tout en considérant des points forts et initiatives en cours ou à développer davantage. Cela a permis de mettre l'accent sur 12 enjeux génériques<sup>8</sup> parmi

7 Architectures d'aéronefs innovantes, moteurs et nouveaux concepts propulsifs, systèmes embarqués et avionique, matériaux et structures innovants, transport aérien, l'aéronef dans son environnement, opérateurs et sciences humaines, modélisation et simulation mono ou multi-physiques, expérimentations avancées, impact environnemental, système industriel et autres grands systèmes.

8 - Connaissance des impacts réciproques entre climat et aviation : incertitudes sur les effets non- $\text{CO}_2$  / modélisation des impacts environnementaux / Impact du climat sur l'aviation ;  
- Réduction des nuisances sonores : perception et nuisance sonores / sources et propagation du bruit / corrélations entre les impacts (bruit, pollution) ;  
- Nouveaux modes de propulsion et combustion haut rendement : procédés et matériaux pour la combustion / émissions ;  
- Impacts des nouveaux combustibles à bord : résistance des matériaux et des structures, modes de stockage ;  
- Fiabilisation des modèles numériques et des expériences : incertitudes / explicabilité / non-linéarités ;  
- Enrichissement : réduction de modèles / approches multi-échelles / couplages multi-physiques / grands systèmes ;  
- Stratégies de calcul et de gestion de données numériques et expérimentales : génie logiciel et algorithmique / fusion de données / hybridation données-physique ;  
- Connaissance et représentation des matériaux : procédés / approches multi-échelles / phénomènes non-linéaires / ambiances extrêmes ;

les 24, étant acquis que tous font l'objet d'opportunités de recherches scientifiques de premier plan au regard de modalités, outils et instruments à venir.

**Établir une cartographie des acteurs** : le nombre d'acteurs de la recherche dans le domaine mobilisés lors de cette démarche a dépassé les 160 et a permis d'établir une cartographie des compétences ciblées autour des verrous scientifiques établis dans chaque thématique. Cette cartographie a permis d'alimenter la priorisation des verrous sur la base des compétences fortes de la filière ou au contraire des besoins de renforcement : plus de 170 structures (laboratoires de recherche, universités et grandes écoles) sont présentes dans au moins un des thèmes et une moyenne de 24 établissements en capacité d'agir pour chaque thème. On note une variabilité importante entre plus de soixante établissements convoqués dans la thématique matériaux et structures et seulement 4 en systèmes embarqués et avionique, preuve d'un besoin de renforcement de cette dernière thématique. Certains établissements sont très présents sur l'ensemble des thèmes traités comme l'ONERA, le CEA, ou encore le groupe ISAE et les laboratoires de l'Université de Toulouse.

**Soutenir l'ensemble de la R&D** : la démarche a été présentée au CORAC, aux grands industriels du domaine qui ont été interrogés (Airbus, Thalès, Safran), et au GT R&D du GIFAS, qui l'ont jugée appropriée et complémentaire des travaux de R&D de ces acteurs de la filière. Les acteurs de la mission ont fait état des questionnements non seulement scientifiques mais aussi technologiques pour un dialogue plus fluide au sein de l'ensemble de la filière aéronautique. Par ailleurs, un grand nombre de verrous du secteur aéronautique civil nécessite un meilleur lien avec la recherche, à un niveau plus fondamental, sur les enjeux transverses (IA, quantique, matériaux, systèmes, environnement, outils numériques, mathématiques appliquées, etc.). Ceci permettra d'apporter des éléments de réponses aux problématiques scientifiques, et ainsi également aux problématiques technologiques.

**Finalement**, le travail effectué a mobilisé largement la communauté de recherche scientifique autour de l'aéronautique civile et lui a permis d'interagir et de mieux se connaître. Cette démarche pourra ainsi inspirer des démarches équivalentes pour d'autres filières.

- 
- Matériaux avancés et fonctionnels : procédés de fonctionnalisation / protection face aux agressions / gestion thermique ;
  - Recyclage et réparation : métaux, composites, céramiques / écoconception et sobriété : matériaux biosourcés, assemblages, frugalité ;
  - Architecture hardware et software embarquées : puissance de calcul / adaptabilité ;
  - Interaction humain-système pour le pilotage, la navigation, la gestion du trafic : caractérisation des opérateurs / coopération humain-machine pour la décision / optimisation de la relation humain-système / simulation virtuelle / formation.

## 2 - INTRODUCTION

---

### Rappel de la mission

Le 19 avril 2024, la Direction générale de la recherche et de l'innovation (DGRI)<sup>9</sup>, ainsi que la Direction générale de l'armement (DGA)<sup>10</sup> et la Direction générale de l'aviation civile (DGAC)<sup>11</sup> ont souhaité confier à l'ONERA (Office national d'études et de recherches aérospatiales) une mission de pilotage et de coordination d'un travail collaboratif des forces de recherche scientifiques nationales impliquées sur le domaine aéronautique civil.

Les trois grands résultats attendus de cette mission sont :

- une **synthèse des compétences nationales** à ce jour et une vision des forces et faiblesses de la communauté scientifique (organismes de recherche, universités, écoles),
- une **cartographie des verrous scientifiques** de premier ordre sur une déclinaison des enjeux clefs, en s'appuyant sur les travaux menés précédemment par le CORAC (Conseil pour la Recherche Aéronautique Civile),
- une **feuille de route nationale et des recommandations** partagées pour la **recherche scientifique amont** dans le domaine aéronautique civil, y compris dual.

Le présent rapport constitue la production finale de cette mission menée par l'ensemble des acteurs de l'écosystème de recherche amont national entre juin 2024 (date de lancement opérationnel) et juin 2025 (remise du rapport au Salon International de l'Aéronautique et de l'Espace du Bourget).

Dans cette introduction, les principaux contributeurs à cet exercice fortement collaboratif sont décrits avant d'exposer la façon dont a été menée la réflexion.

La partie suivante (chapitre 3) est consacrée à une synthèse des verrous scientifiques identifiés, avec une tentative de priorisation selon des critères qui sont précisés.

Une description des compétences nationales est ensuite réalisée (chapitre 4) avant de proposer un ensemble de recommandations (chapitre 5) que la DGRI, la DGA et la DGAC émettent sur la base du travail réalisé.

Une description exhaustive des documents rédigés par l'ensemble des acteurs, regroupés en 11 thèmes est incluse dans un document plus détaillé mais non public, avec une description aussi précise que possible des plus de 370 verrous scientifiques recensés.

### Besoins de recherche en aéronautique

La recherche en aéronautique est un vaste écosystème qui s'étend de la recherche scientifique la plus amont jusqu'à la recherche appliquée la plus aval, couvrant l'ensemble des niveaux de TRL (*Technology Readiness Level*). La filière française est très structurée grâce au CORAC qui produit, en particulier, ses feuilles de route technologiques pour le développement des futurs aéronaves et de leurs composants.

La recherche amont contribuant au domaine aéronautique, très riche de par la diversité de ses acteurs, est davantage structurée par discipline scientifique plutôt que par technologie cible. Une telle organisation est parfaitement compréhensible, les activités de recherche amont pouvant servir des domaines très variés autres que celui de l'aéronautique.

---

<sup>9</sup> Ministère en charge de l'Enseignement supérieur et de la Recherche

<sup>10</sup> Ministère des Armées

<sup>11</sup> Ministère de l'Aménagement du territoire et de la Décentralisation



Un dialogue fluide au sein de la filière aéronautique nécessite donc une connexion entre ces deux mondes. La DGRI promeut et favorise ce dialogue de sorte à assurer le continuum recherche – innovation ; et en attente de la mission confiée, l'ONERA rassemble la communauté de recherche du domaine aéronautique afin d'éclairer sur le domaine la puissance publique sur les sujets de recherche les plus importants à prendre en compte pour préparer l'avenir de l'aéronautique française, en articulation avec les besoins de la filière.

## Acteurs du premier cercle et constitution du groupe de travail

Compte tenu de la diversité des acteurs concernés par la recherche amont, seul un travail collaboratif réunissant les acteurs les plus impliqués sur le domaine pouvait être envisagé pour mener à bien la mission confiée par la DGRI, la DGA et la DGAC.

L'ONERA, sur la base de sa connaissance des acteurs de la recherche amont ainsi que sur la volumétrie des publications dans le domaine aéronautique, a sélectionné un ensemble d'acteurs dits du « premier cercle » avec les points de contact répertoriés dans le tableau ci-dessous.

Chaque point de contact participant à un groupe de travail a été libre de faire intervenir d'autres acteurs nationaux pertinents pour le thème qu'il a eu à traiter.

CEA, CEA Tech	David Fraboulet
CERFACS	Catherine Lambert
Centrale Lyon (LMFA)	Christophe Corre, Stéphane Aubert
Centrale Nantes (GeM)	Michel Coret
CNRS INSIS	Lionel Buchaillot, Fabien Godeferd
ENAC	Patrick Senac, Stéphane Conversy
ENSAM	Eleanor Fontaine
Fédération TTM	Eric Markiewicz
IFPEN	Antonio Pires-Da Cruz, Julie Lhomme-Maublanc
INSA Lyon (Ampère)	Eric Bideaux
IPP (ENSTA)	Jean-François Semblat, Véronique Lazarus
IRT St Exupéry	Lionel Bourgeois
ISAE Supaero	Laurent Joly
ISAE SupMeca	Jean-Luc Dion
Mines PSL (CDM)	Samuel Forest, Jérôme Crépin
Univ. Belfort (FCLab)	Daniel Hissel
Univ. Bordeaux (IMS)	Cristell Maneux
Univ. Bordeaux (LOMA)	Fabio Pistolesi
Univ. Gustave Eiffel	Fabrice Vienne
Univ. Paris-Est Créteil (ICMPE)	Loïc Perrière
Univ. Paris-Saclay	Frédérique Laurent-Nègre, Pierre-Alain Boucard
Univ. Poitiers (Pprime)	Karl Joulain
Univ. Sorbonne (IPSL)	Nicolas Bellouin
Univ. Toulouse (LAAS)	Mohamed Kaâniche
Univ. Toulouse (LAPLACE)	Xavier Roboam
Univ. Toulouse (CIRIMAT)	Christophe Laurent

Tableau 1 : liste des acteurs du premier cercle (hors ONERA)

Par ailleurs, un état d'avancement régulier de l'avancement des travaux a été fait devant la commission R&D du GIFAS, afin de tenir informé l'ensemble de la filière de la démarche en cours. En outre, même si aucun industriel ne participait à la démarche, il a paru opportun d'organiser des interviews de représentants d'Airbus, Safran et Thales afin qu'ils puissent donner leur propre vision de l'évolution technologique de leur secteur d'activité.

## Organisation du travail : les 11 thèmes

Par souci d'efficacité, le travail a été scindé en 11 thèmes inspirés d'un exercice « bas TRL » mené dans le cadre du comité Feuille de Route du CORAC (figure 1), chacun piloté par un duo avec un représentant de l'ONERA et au moins un représentant d'un acteur du premier cercle (tableau 2). De nombreux autres acteurs se sont joints à chacun de ces 11 thèmes.

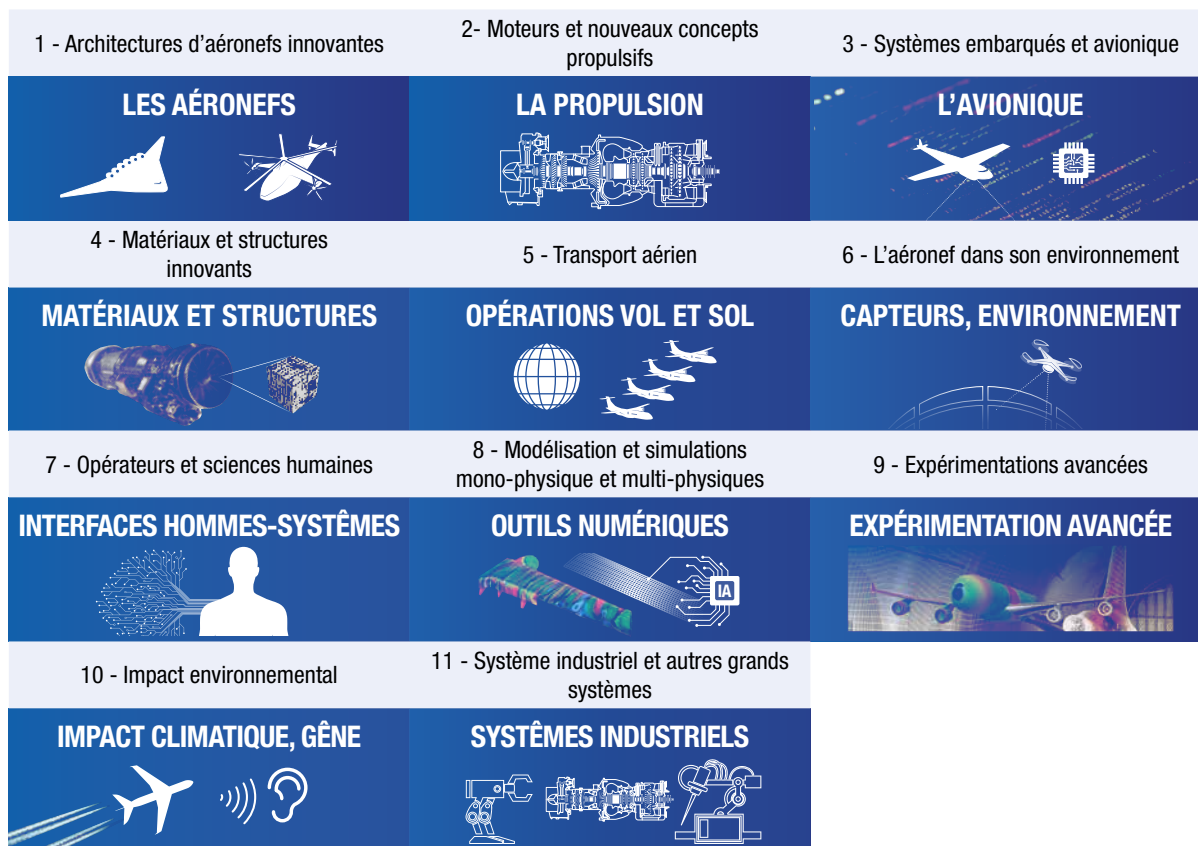


Figure 1 : les 11 thèmes de travail

n°	Thème	Pilote(s)	Co-pilotes
1	<b>Architectures d'aéronefs innovantes</b>	• Laurent Joly (ISAE Supaero)	• Sébastien Defoort (ONERA-DTIS)
2	<b>Moteurs et nouveaux concepts propulsifs</b>	• David Fraboulet (CEA) • Marc Bellenoue (ENSMA Pprime)	• Nicolas Bertier (ONERA-DMPE)
3	<b>Systèmes embarqués et avionique</b>	• Sébastien Pillement (Polytech Nantes)	• Frédéric Boniol (ONERA-DTIS)
4	<b>Matériaux et structures innovants</b>	• Jérôme Crépin (Mines ParisTech, CDM)	• Bertrand Langrand (ONERA-DMAS)
5	<b>Transport aérien</b>	• Stéphane Conversy (ENAC)	• Thomas Dubot (ONERA-DTIS)
6	<b>L'aéronef dans son environnement</b>	• David-Tomline Michel (ONERA-DOTA)	• Pierre Temple-Boyer (LAAS)
7	<b>Opérateurs et sciences humaines</b>	• Jean-Christophe Sarrazin (ONERA-DTIS)	• Hélène Tattegrain (UGE)
8	<b>Modélisation et simulations mono-physique et multi-physiques</b>	• Pierre-Alain Boucard (ENS PS) - Mécanique des structures • Samuel Forest (Mines) - Mécanique des matériaux • Laurent Gicquel (CERFACS) - Milieux réactifs • Jean-François Semblat (ENSTA) - Mathématiques appliquées / Physique	• Denis Gueyffier (ONERA-DSG)
9	<b>Expérimentations avancées</b>	• Laurent Cordier (CNRS Pprime) • Michel Coret (EC Nantes, GEM) • Jean-Luc Dion (ISAE Supmeca)	• Benjamin Leclaire (ONERA-DAAA)
10	<b>Impact environnemental</b>	• Christophe Bailly (EC Lyon) - Acoustique • Martial Haeffelin (IPP/LMD) - Météo/émissions	• Philippe Novelli (ONERA-DTP)
11	<b>Système industriel et autres grands systèmes</b>	• Eléonor Fontaine (ENSAM)	• Thomas Polaczek (ONERA-DTIS)

Tableau 2 : pilotes et copilotes des 11 thèmes

On note que ces thèmes sont majoritairement liés à des fonctions, des sous-systèmes de l'aéronef, ou des enjeux de développement. Par rapport à un choix plus lié à des disciplines scientifiques par exemple, ce choix nous a permis de réfléchir aux enjeux scientifiques dans la perspective des fonctions attendues, et donc davantage « thématiques » au domaine aéronautique. Par ailleurs, ce pavage des problématiques liées à l'aéronautique nous a paru relativement complet, mais fait naturellement apparaître des intersections non négligeables entre les thèmes qu'il a fallu gérer par des discussions entre les pilotes des thèmes et au travers de réunions plénières organisées au fur et à mesure du développement de la démarche.

Afin de définir les verrous scientifiques associés à chaque thème, il a été demandé aux acteurs des 11 groupes de définir des grands objectifs afin d'identifier les raisons fondamentales pour lesquelles ces objectifs ne pouvaient être atteints aujourd'hui : ont ainsi émergé des verrous associés à chacun de ces objectifs dont la nature peut être variée. Les verrous à caractère scientifique ont alors été répertoriés et sont détaillés dans le document détaillé non public..

La démarche initialement basée sur les 11 thèmes a abouti à un ensemble de 59 grands objectifs et une liste de plus de 370 verrous scientifiques associés. Comme attendu, certains verrous scientifiques étaient de même nature selon les thèmes traités ; il a alors été nécessaire de construire une liste homogène de grandes problématiques scientifiques (5) et enjeux (24), plus aisée à intégrer pour le lecteur. La partie suivante de ce rapport propose une synthèse de cette structuration, afin de faire émerger ce qui nous a paru le plus important à date pour la recherche amont au bénéfice de l'ensemble de la filière Aéronautique.

## 3 - VERROUS SCIENTIFIQUES

### 3.1. Agglomération en 5 grandes problématiques et 24 grands enjeux

En vue d'une restitution lisible des résultats de l'exercice, une structuration en 5 grandes problématiques transverses aux 11 thèmes a été adoptée :

- A. L'aéronef dans son environnement : impacts et contraintes
- B. Propulsion et concepts aéronefs innovants
- C. Matériaux et structures
- D. Modélisation physique et expérimentation
- E. Systèmes intelligents distribués et interactions humains/systèmes

À chacune de ces 5 grandes problématiques, ont été associés des grands enjeux, répertoriés dans le tableau ci-dessous. Les verrous scientifiques des 11 thèmes sont ensuite déclinés pour chacun de ces grands enjeux.

Problématique	Enjeux clés	
<b>A. L'aéronef dans son environnement : impacts et contraintes</b>	1	<b>Connaissance des impacts réciproques entre climat et aviation</b> : incertitudes sur les effets non-CO <sub>2</sub> / modélisation des impacts environnementaux / Impact du climat sur l'aviation
	2	<b>Réduction des nuisances sonores : de la source à la perception du bruit</b> : perception et nuisance sonores / sources et propagation du bruit / corrélations entre les impacts (bruit, pollution)
	3	<b>Acceptation sociétale et individuelle</b> de nouveaux concepts
	4	<b>Conception des aéronefs</b> sous exigences étendues (environnement global) : système de production / intermodalités
<b>B. Propulsion et concepts aéronefs innovants</b>	5	<b>Nouveaux modes de propulsion et combustion haut rendement</b> / procédés et matériaux pour la combustion / émissions
	6	Impacts des <b>nouveaux combustibles</b> à bord (CSD, H <sub>2</sub> , NH <sub>3</sub> ) : résistance des matériaux et des structures, modes de stockage
	7	<b>Propulsion électrique</b> : chimie des batteries / piles à combustibles / matériaux pour moteurs et câbles électriques
	8	<b>Contraintes d'intégration des systèmes</b> à bord : montée en tension / architectures électriques / systèmes non propulsifs
	9	<b>Conception intégrée</b> des aéronefs
	10	<b>Propulsion disruptive</b> à fort rendement

>>>

<b>C. Matériaux et structures</b>	11	<b>Connaissance et représentation des matériaux</b> : procédés / approches multi-échelles / phénomènes non-linéaires / ambiances extrêmes
	12	<b>Matériaux avancés et fonctionnels</b> : procédés de fonctionnalisation / protection face aux agressions / gestion thermique
	13	<b>Recyclage et réparation</b> : métaux, composites, céramiques / éco-conception et sobriété : matériaux biosourcés, assemblages, frugalité
	14	<b>Représentation et optimisation des structures</b> : comportement des structures complexes / aéroélasticité / conception pour plus de légèreté
<b>D. Modélisation physique et expérimentation</b>	15	<b>Fiabilisation</b> des modèles numériques des expériences : incertitudes / explicabilité / non-linéarités
	16	<b>Enrichissement des modèles</b> : réduction de modèles / approches multi-échelles / couplages multi-physiques / grands systèmes
	17	<b>Stratégies de calcul et de gestion de données</b> numériques et expérimentales : génie logiciel et algorithmique / fusion de données / hybridation données-physique
	18	<b>Production massive de jumeaux numériques</b> : construction et conception / systèmes complexes / jumeau on-line en temps réel
<b>E. Systèmes intelligents distribués et interactions humains / systèmes</b>	19	<b>Architecture hardware et software embarquées</b> : puissance de calcul / adaptabilité
	20	<b>Avionique et communications</b> : connectivité / cybersécurité
	21	<b>Certification de la complexité</b> : IA, systèmes adaptables
	22	<b>Observations de l'état de l'aéronef</b> : technologies de capteurs / conditions de vol / prédiction en temps réel
	23	<b>Systèmes au sol</b> pour l'aide à la navigation et gestion des aéroports : architectures de gestion du trafic / optimisation des trajectoires / robustesse et sécurité des données de vol
	24	<b>Interaction humain-système</b> pour le pilotage, la navigation, la gestion du trafic : caractérisation des opérateurs / coopération humain-machine pour la décision / optimisation de la relation humain-système / simulation virtuelle / formation

Tableau 3 : Liste des 24 grands enjeux

Une description plus complète de ces 24 grands enjeux et des principaux verrous associés est proposée au paragraphe suivant.

## 3.2. Vision synthétique des 24 enjeux

Est proposée dans ce paragraphe une description synthétique des 24 verrous de premier ordre présentés dans le tableau 3, accompagnés d'une description synthétique des principaux verrous scientifiques qui y sont attachés.



## L'AÉRONEF DANS SON ENVIRONNEMENT : IMPACTS ET CONTRAINTES

Connaissance des impacts réciproques entre climat et aviation\*  
Réduction des nuisances sonores : de la source à la perception du bruit\*  
Acceptation sociétale et individuelle  
Conception des aéronefs

\*Enjeux de 1<sup>er</sup> ordre

### Enjeu 1 : Connaissance des impacts réciproques entre climat et aviation

#### Incertitudes sur les effets non CO<sub>2</sub>

Des lacunes dans les modèles physiques rendent difficile l'élaboration de stratégies efficaces pour minimiser les effets non-CO<sub>2</sub> de l'aviation sur le climat. Il s'agit en premier lieu d'améliorer la précision des modélisations des nuages et aérosols, qui jouent un rôle clé dans la formation des traînées de condensation et les perturbations radiatives. Ensuite, pour prédire avec plus d'exactitude l'impact climatique de l'aviation, les modèles haute-fidélités doivent évoluer pour prendre en compte les environnements turbulents à l'échelle mésoscopique, ainsi que les phénomènes de sursaturation. Il en est de même pour les modèles utilisés pour calculer les perturbations radiatives qui montrent une grande dispersion dans leurs résultats, ce qui renforce les incertitudes. Enfin, l'évaluation de l'impact environnemental des émissions des avions en vol et la capacité des particules issues de ces émissions à former des nuages doivent être mesurées et modélisées.

#### Modélisation des impacts environnementaux

Un autre enjeu concerne les défis posés par les modélisations des impacts environnementaux de l'aviation, en particulier en ce qui concerne les effets non-CO<sub>2</sub> et leur interaction avec le CO<sub>2</sub>. Plusieurs verrous scientifiques freinent actuellement la capacité à évaluer et atténuer efficacement les impacts environnementaux de l'aviation. Le premier verrou réside dans les lacunes des chaînes de modèles, qui nécessitent des observations multiples et hétérogènes pour être évaluées. Par ailleurs, la combinaison et la propagation des incertitudes doivent être améliorées à l'échelle de l'analyse globale. Ceci nécessite de meilleures données permettant de caractériser les effets non-CO<sub>2</sub> d'un vol et leur impact climatique spécifique, et en parallèle de continuer à progresser et fiabiliser les modèles de climat simplifiés utilisés pour évaluer ces impacts.

Un autre verrou important est la définition d'une métrique d'équivalence entre les effets du CO<sub>2</sub> et ceux des polluants non-CO<sub>2</sub>, essentielle pour élaborer des politiques cohérentes. Par ailleurs, le changement climatique global induit par le trafic aérien doit être traduit en impacts locaux, et nécessite notamment des mesures détaillées sur les aéroports. Enfin, la construction d'inventaires d'émissions fiables s'avère nécessaire pour améliorer les modélisations et prendre des décisions éclairées.



## Impact du climat sur l'aviation

L'impact du climat sur l'aviation est un enjeu croissant, marqué par plusieurs verrous scientifiques. Ces verrous portent d'abord sur l'amélioration de la robustesse des plans de vol en prenant en compte intégralement les incertitudes et des différents niveaux de fidélité des contraintes ATM (*Air Traffic Management*), ainsi que des phénomènes environnementaux, de même que l'intégration encore difficile des contraintes multi-objectifs complexes. Ensuite, les architectures innovantes de gestion du trafic aérien nécessitent plus de données, de métriques adaptées et de modèles performants. Enfin, la génération automatisée à grande échelle de trajectoires 4D vertes doit intégrer une gestion des incertitudes liées à la météorologie et aux perturbations de trafic, et de résoudre le verrou de la complexité combinatoire des interactions entre les trajectoires. Ces défis soulignent la nécessité de progresser sur les outils de modélisation et l'intégration de données fiables pour répondre aux challenges climatiques et opérationnels (enjeu 15).

## Enjeu 2 : Réduction des nuisances sonores : de la source à la perception du bruit

### Réduction des sources de bruit

La réduction du bruit à sa source reste un enjeu majeur, notamment avec les nouvelles architectures d'avions à fort taux de dilution caractérisés par une perte significative de volume disponible pour installer des traitements acoustiques et en outre un spectre de fréquences à atténuer plus bas (autour de 500 Hz) : on doit donc absorber un champ sonore plutôt basse fréquence avec des matériaux de plus en plus minces. Un premier verrou consiste à mieux comprendre et modéliser le comportement des liners en régime non linéaire pour développer des technologies plus efficaces en termes de rayonnement acoustique externe et atténuer le bruit cabine. Plus largement, il s'agit de traiter la problématique des interactions entre écoulements turbulents, ondes sonores et les géométries des liners et leurs impacts sur l'absorption acoustique et les pertes aérodynamiques, ce qui passe par des progrès sur les plans expérimentaux (capteurs de la pression pariétale sous écoulement) et numériques.

### Mieux comprendre la nuisance sonore dans l'acceptabilité

Mieux comprendre la nuisance sonore et le poids de l'acoustique parmi les autres facteurs de gêne est un point clé pour l'aéronautique. Les indicateurs permettant de mesurer la perception et la gêne sont assez déconnectées de la réduction de bruit constatée en acoustique physique. On retrouve les enjeux liés à l'auralisation, dans des conditions de vie réaliste pour effectuer des études : le verrou réside dans une meilleure description de l'exposition de la population au bruit des aéronefs. Par ailleurs, la perception couplée des nuisances sonores avec une gêne immédiate et de la qualité de l'air avec une gêne plus tardive par rapport à la détection visuelle ou sonore de la source reste un sujet de recherche ouvert.

### Réduire la signature acoustique en vol de croisière supersonique pour satisfaire les normes de bruit

Les projets d'avion supersonique sont aujourd'hui lancés outre-Atlantique ou encore en Chine ou au Japon. L'enjeu essentiel au niveau national est de maintenir un socle de connaissances suffisant pour valider la crédibilité des annonces de réduction de bruit grâce à des designs *low boom*, afin d'anticiper des modifications réglementaires qui, pour le moment, interdisent le survol des terres. Un verrou scientifique réside dans la connaissance et la simulation de la physique de la propagation dans une atmosphère turbulente des ondes acoustiques engendrées par des ondes de choc au niveau de l'avion afin de quantifier leur atténuation au niveau du sol.



## Enjeu 3 : Acceptation sociétale et individuelle de nouveaux concepts

### Modèles d'acceptabilité

Dans le cadre du développement de la mobilité aérienne automatisée, il est indispensable de réinterroger la validité des modèles théoriques existants en matière d'acceptabilité des technologies, tels que le *Technology Acceptance Model* ou l'*Unified Theory of Acceptance and Use of Technology*. Bien que ces modèles aient été largement utilisés pour évaluer l'acceptabilité des technologies numériques ou des véhicules automatisés terrestres, leur transposition directe au domaine aérien automatisé s'avère être un verrou actuel. L'enjeu est donc de définir un ou plusieurs modèles spécifiquement adaptés à ce nouveau contexte, en tenant compte des particularités du transport aérien, des profils différenciés des utilisateurs (par exemple, les pilotes professionnels versus les passagers occasionnels), ainsi que des facteurs culturels susceptibles d'influencer les perceptions. Cela permettra de construire un cadre d'analyse pertinent permettant de mieux comprendre les déterminants de l'acceptabilité dans ce secteur émergent.

### Définition de méthodologies d'évaluation standardisées

Afin d'orienter la conception des aéronefs et de l'offre de transport, il faut aussi prendre en compte l'acceptabilité par le public. Dans ce contexte, la recherche doit développer des méthodologies d'évaluation standardisées permettant d'anticiper l'acceptabilité des technologies avant leur mise en œuvre effective. Ces méthodologies devront permettre d'identifier les réticences potentielles des différents profils d'utilisateurs à travers des outils tels que des questionnaires, des *focus groups* ou des démonstrations en environnement simulé comme des simulations immersives pouvant être utilisées pour tester les réactions des usagers face à des scénarios de vol automatisé, afin de recueillir des données sur leurs attentes, leurs peurs ou leurs besoins spécifiques.

### Comprendre les spécificités du contexte d'usage

Enfin, la prise en compte des spécificités du contexte d'usage et la mise en place de stratégies de communication adaptées constituent un levier essentiel pour favoriser l'acceptabilité. Il est crucial de présenter de manière claire et transparente les choix de conception, en mettant en évidence leurs avantages, leurs limites et les enjeux associés. Un exemple emblématique concerne la suppression des hublots physiques au profit de hublots virtuels, qui suscite actuellement une forte réticence chez environ 60 % des passagers. Pour répondre à cette problématique, il faut pouvoir garantir un réalisme élevé de l'affichage, permettant aux usagers d'avoir l'impression de voir réellement le paysage extérieur en temps réel, avec une qualité d'image satisfaisante en termes de résolution, de luminosité et de fidélité des couleurs. Le positionnement et la forme des dispositifs devront également contribuer à cette impression de réalisme, tout en évitant les effets indésirables (malaise, vertige...). Enfin, la possibilité de personnaliser l'affichage selon les préférences individuelles pourrait constituer un facteur déterminant pour renforcer l'acceptabilité de ces innovations.

## Enjeu 4 : Conception des aéronefs sous exigences étendues

### **Intégration holistique et multi-sectorielle dans la conception aéronautique du produit et de son système industriel**

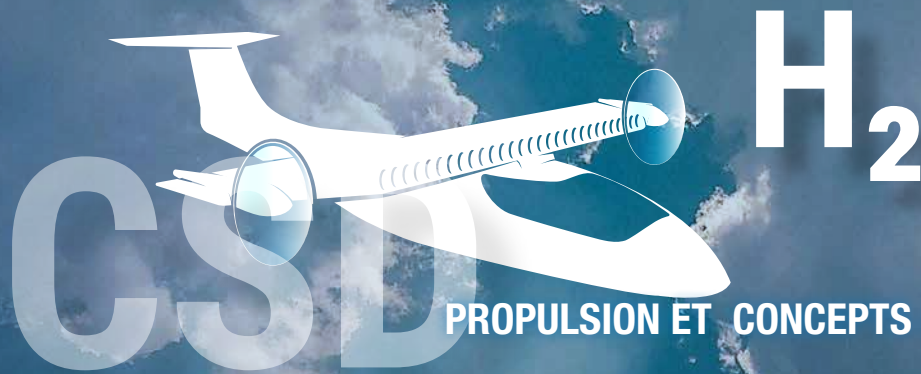
La conception des aéronefs doit désormais s'inscrire dans une approche intégrée, prenant en compte un ensemble de facteurs interdépendants qui dépassent les seules considérations techniques traditionnelles. Ce verrou scientifique réside dans la capacité à élaborer un cadre de conception global, capable d'articuler de manière cohérente les exigences opérationnelles des compagnies aériennes, les évolutions des systèmes de gestion du trafic aérien, ainsi que les impératifs croissants en matière de maintenance, de durabilité environnementale et de production industrielle à haute cadence. Il s'agit notamment de garantir que l'avion puisse être exploité efficacement, répondre aux nouvelles attentes fonctionnelles du secteur, tout en étant conçu pour une fabrication répétable et optimisée. La levée de ce verrou nécessite le développement de méthodologies robustes permettant d'intégrer ces multiples dimensions dès les premières phases de conception, afin d'assurer la compétitivité, la fiabilité et la soutenabilité des futurs programmes aéronautiques.

### **Penser aujourd'hui des usines aéronautiques opérables et adaptables aux enjeux de 2050**

La conception des futurs systèmes industriels de production adaptés aux exigences de l'aéronautique, étroitement liée aux enjeux de durabilité environnementale et de compétitivité industrielle, pose plusieurs verrous scientifiques. Pour répondre aux attentes sociétales et réglementaires croissantes, il est impératif d'anticiper dès la phase de conception les capacités d'adaptation des usines à des usages futurs, parfois encore inconnus. La durée de vie particulièrement longue des sites de production aéronautique, souvent alignée sur celle des programmes industriels (jusqu'à 50 ans), impose une approche prospective intégrant l'évolution des technologies, la modernisation des équipements, la transition énergétique, la sobriété des consommations, ainsi que l'intégration des énergies renouvelables. Ce verrou appelle ainsi le développement de cadres méthodologiques et d'outils scientifiques permettant de concevoir des usines flexibles, capables d'intégrer des moyens de production évolutifs, des dispositifs de désassemblage et de recyclage, une gestion optimisée et en temps réel de la consommation énergétique, ainsi qu'une résilience face aux incertitudes liées à la disponibilité et à la variabilité des sources d'énergie.

### **Conception d'un aéronef dans le contexte d'un système de transports**

Un verrou scientifique majeur réside dans la capacité à concevoir des aéronefs non plus de manière isolée, mais en les intégrant pleinement au sein du système global de transport aérien. Il s'agit de développer des approches méthodologiques permettant d'optimiser simultanément les performances propres de l'avion et son interaction avec les infrastructures aéroportuaires, les réseaux de trafic, les contraintes réglementaires et les dynamiques de marché. Cette approche systémique implique de prendre en compte l'efficacité des opérations dans divers contextes (hubs, réseaux point à point, intermodalité), l'adaptation aux contraintes physiques et réglementaires des infrastructures, ainsi que la réponse aux besoins émergents tels que l'aviation régionale ou les marchés à faible densité. Lever ce verrou nécessite le développement d'outils de simulation multi-échelles, l'intégration de modèles collaboratifs entre industriels, opérateurs et régulateurs, et la mise en œuvre d'une vision globale conciliant enjeux technologiques, économiques et environnementaux.



## PROPULSION ET CONCEPTS AÉRONEFS INNOVANTS

Nouveaux modes de propulsion et combustion haut rendement\*

Nouveaux combustibles\*

Propulsion électrique

Contraintes d'intégration des systèmes

Conception intégrée

Propulsion disruptive

\*Enjeux de 1<sup>er</sup> ordre

### Enjeu 5 : Nouveaux modes de propulsion et combustion haut rendement

#### Production de CSD

La production et l'utilisation de carburant soutenable et durable (CSD) posent des verrous scientifiques de divers ordres. Le premier est de convenir d'un état des lieux précis de la biomasse réellement disponible pour le secteur aérien. Ensuite, il convient d'augmenter le rendement des procédés de conversion de biomasse en hydrocarbures (pyrolyse, catalyseurs) lors de la conversion de la lignine par exemple, tout en gérant la variabilité des matières premières, la réduction de contaminants et la durabilité environnementale et économique du processus. En lien étroit avec les formulations obtenues en production, les comportements physico chimiques lors des transports et stockages (stabilité...) puis la compatibilité moteur carburant en combustion (par exemple : garantir la stabilité des performances en toute conditions, maîtriser les émissions) sont à étudier. Des études scientifiques sur les enjeux économiques de la filière peuvent faire émerger des modèles économiques innovants, rendant les CSD plus compétitifs face aux carburants fossiles.

#### Combustion / émissions

L'augmentation des rendements et des performances des turbomachines, sous contrainte de réduction des émissions de polluants et de bruit, nécessite des efforts continus en termes de compréhension et de modélisation des phénomènes de combustion notamment pour repousser les limites actuelles de dilution. Il s'agit ici, notamment, de gagner en maîtrise de la modélisation et de l'analyse des phénomènes de turbulence, d'injection et d'atomisation des sprays, de combustion (mécanismes réactionnels, description de la flamme...), et de formation des polluants, réglementés ou pas.

Ces sujets génériques de combustion, aujourd'hui avec du kérosène et demain avec des CSD, posent des questions spécifiques avec des carburants alternatifs envisagés comme l'hydrogène ( $H_2$ ) ou l'ammoniac ( $NH_3$ ), nativement sans émissions de  $CO_2$ . Pour ce qui est de l'hydrogène, les spécificités liées aux comportement physico chimiques (spray gazeux, vitesse de flamme intrinsèquement plus élevée...) induisent des verrous spécifiques (limites d'inflammabilité et instabilités thermo diffusives, détonation, émissions de  $NO_x$ ...) sur toutes les conditions de fonctionnement. Il en est de même pour la combustion  $NH_3$ , avec des comportements (vitesse de flamme réduite, imbrûlés, structure du spray et description du mélange à maîtriser) et des enjeux sous-jacents (imbrûlés, rendement,  $NO_x$ ...) très différents. Le craquage de  $NH_3$  en  $H_2$  et  $N_2$  est aussi une voie possible. Pour ces deux carburants, des moyens d'essais spécifiques sont nécessaires (validation des modèles, caractérisation des performances globales).

## Procédés et matériaux

La combustion haut rendement conduit à une augmentation des températures, ce qui demande une compréhension des interactions fluide / parois (transferts thermiques, refroidissement), et surtout des développements de nouveaux matériaux pour repousser les contraintes rencontrées (tenue  $\gg 2700$  K), qui constituent des verrous scientifiques critiques. Les voies prometteuses sont : des alliages haute température (via des renforts particuliers, des mélanges fonctionnalisés...), avec des travaux de modélisation avancée (simulation atomistique) pour mieux contrôler le vieillissement ; des composites à matrice céramique (en maîtrisant la relation microstructure / propriétés lors du processus) ; des matériaux à gradient de propriétés céramique / métal, avec des verrous liés à la microstructure ou la définition des couples liants / poudres métalliques ; le développement de revêtements « autoréparants », en particulier via l'incorporation d'un oxyde cicatrisant. La combustion avec des carburants alternatifs ( $H_2$  par exemple) pose aussi des enjeux scientifiques sur les matériaux à étudier spécifiquement (oxydations menant à une fragilisation...). On pourra se référer aux verrous complémentaires liés aux enjeux 11 et 12 pour plus de précisions.

## Enjeu 6 : Impacts des nouveaux combustibles à bord (CSD, H<sub>2</sub>, NH<sub>3</sub>)

L'utilisation de combustibles alternatifs amène des enjeux de premier ordre sur le stockage. De façon générale, il s'agit de prédire l'abatement des propriétés mécaniques pour développer des solutions technologiques adaptées, ou de travailler sur des matrices adaptées au stockage.

### H<sub>2</sub>

Concernant le stockage (réservoir) de H<sub>2</sub> liquide (pressurisé à quelques bars, sous une température de l'ordre de 20 Kelvin), le principal verrou porte sur la maîtrise de l'isolation thermique du système. La technologie actuellement privilégiée, la MLI (pour *Multi-Layered Insulation*), impose de maintenir autour du réservoir un vide d'isolation de l'ordre de 10<sup>-7</sup> bar, avec par conséquent des critères de perméabilité ou de fuite, plutôt qu'un critère de résistance mécanique. Un stockage de H<sub>2</sub> « basé matériau » (par exemple hydrures) pourrait être de nature à changer la donne du stockage H<sub>2</sub>. Concernant les matériaux, les verrous scientifiques sont dès lors des problématiques liées à la fragilisation par l'hydrogène à très basse température, auxquelles s'ajoute la question du cyclage thermique avec trois verrous principaux : la compréhension des mécanismes d'entrée de l'hydrogène dans le matériau et de la diffusion dans les conditions cryogéniques ; l'influence de la température sur la plasticité et la rupture en l'absence d'hydrogène ; et l'influence de l'hydrogène sur la rupture à basse température. Enfin, pour les matériaux composites, la problématique principale sera de maîtriser la fissuration transverse dans les couches ; il conviendra alors de développer de nouveaux couples fibre/résine spécifiquement adaptés pour les conditions cryogéniques.

Pour ce qui est du circuit carburant, la pénétration de la molécule d'hydrogène dans les structures cristallines induit des risques de fragilisation : il est nécessaire de mieux prédire l'abatement des propriétés mécaniques des alliages en contact avec l'hydrogène.

On trouvera dans les enjeux 11 et 12 les renvois aux verrous spécifiques aux interactions H<sub>2</sub>-matériaux.

### NH<sub>3</sub>

Pour le stockage de l'ammoniac, les enjeux de mise en œuvre sont différents. Si la corrosion par l'ammoniac de certains matériaux est très bien connue, la question de sécurité (toxicité) implique un niveau d'exigence élevé quant aux possibles fuites. Des solutions de stockage dans le cas de l'aviation peuvent être envisagées comme le stockage dans une matrice solide, de type amine métallique ou les halogénures métalliques. Des travaux doivent être menés sur toute la chaîne afin d'évaluer le système le plus approprié pour le cas des aéronefs : un stockage solide et une reliquéfaction (10 bar à température ambiante) pour une injection liquide ou un stockage solide et une injection sous forme gazeuse.

## Enjeu 7 : Propulsion électrique

L'introduction massive de solutions électrifiées comme solution de propulsion unique ou en complément d'une propulsion conventionnelle apporte un potentiel disruptif et des marges de progression très importantes, avec une application croissante jusqu'en 2050 et au-delà.

### Batteries

Les batteries adaptées aux applications et usages aéronautiques appellent avant tout des travaux sur une chimie adaptée aux conditions (C-rate, température, etc.) et permettant une densité d'énergie à l'échelle système, et une gestion thermique de la batterie adaptée à des conditions drastiques de sécurité permettant en particulier d'éviter l'emballement thermique. La batterie solide est un axe majeur, et il convient de traiter avec une grande attention les chimies émergentes.

### Pile à combustible

La solution de la pile à combustible (PAC) avec carburant alternatif (en particulier  $H_2$ ) est une alternative en vue d'une électrification massive. Les technologies visées pour augmenter la densité énergétique, dont la prometteuse pile imprimée ou les piles « tout solide », nécessitent la levée de verrous scientifiques tels que la formulation et le développement de matériaux adaptés (substrat métallique, revêtements, rhéologie des encres, procédés d'impression...), l'appui aux définitions architecturales de la PAC (refroidissement...), son intégration dans le système aéronef ou encore son empreinte environnementale (choix des matériaux, analyse de cycle de vie...).

### Machine électrique et électronique de puissance

La conversion de l'énergie électrique en énergie mécanique nécessite de travailler sur l'augmentation de la puissance massique des moteurs électriques, le plus souvent sur la distribution, avec des défis scientifiques tels que le développement d'architectures innovantes (typologies polyphasées, augmentation des fréquences – tout en maîtrisant les pertes), la mise en œuvre de nouvelles résines, l'introduction des technologies supraconductrices, ou encore des matériaux ferromagnétiques à forte magnétisation et forte résistivité. Des outils de conception avancés (optimisation topologique...) ainsi que des process de fabrication innovants (compaction/frittage de poudres...) doivent être développés pour rendre possible ces architectures. L'électronique de puissance à forte tension pose enfin des enjeux à étudier dans son intégration en particulier (compatibilité électromagnétique...) et pour limiter son impact environnemental (utilisation de nouvelles matrices isolantes polymères...).

## Enjeu 8 : Contraintes d'intégration des systèmes à bord

### Montée en tension

A l'échelle de l'aéronef, la distribution et le pilotage de l'énergie doivent permettre de distribuer de fortes puissances dans un environnement aéronautique sévère (pression, température, humidité, vibratoire ...). L'architecture même de l'aéronef est un sujet d'étude et les défis scientifiques sont en appui de cette définition. Les phénomènes propices tels que les décharges partielles, les arcs électriques, la compatibilité électromagnétique doivent être travaillés pour prédire les comportements (évolution non linéaire des propriétés sous champ électrique), les détecter (automatiquement) et les maîtriser - ainsi que leur impact sur les matériaux ou les systèmes (vieillessement, ...).

### Architecture électrique

Outre l'appui au développement des composants et systèmes (enjeu 7), les problématiques de haute puissance affectent aussi les câbles et les connectiques, avec des impacts sur la définition des matériaux (composition, microstructure) ou la mise en œuvre de solution en rupture (supraconducteurs haute température). Plus généralement, des développements de matériaux innovants comme des nano-composites, co-polymères ou composites multicouches, ou encore des matériaux à fonction de détection d'état sont nécessaires, ainsi que les procédés d'élaboration et d'assemblage associés. Enfin, dans ce domaine comme d'autres, des solutions à faible empreinte environnementale et compatibles avec ces cahiers des charges sont à intégrer, le tout en respectant les contraintes réglementaires liées à la sécurité.

## Enjeu 9 : Conception intégrée des aéronefs

L'objectif ici est l'amélioration des méthodes destinées à concevoir de nouvelles architectures - capacité méthodologique - au service de l'émergence de nouvelles architectures (échelle système complet : grands choix technologiques et les principes d'intégration), et ce dans un environnement hautement prospectif (nouvelles réglementations remettant en cause l'existant notamment les énergies, nouvelles missions et opérations, nouvelles infrastructures de transport...).

Un premier verrou scientifique concerne la mise à disposition d'outils de conception – évaluation – optimisation de nouvelles architectures, caractérisées par un grand nombre de systèmes et sous-systèmes (multi-échelle), de phénomènes physiques en jeu (multidisciplinaire), de niveaux de modélisation (multi-fidélité) et de métriques d'évaluation (multi-objectifs), faisant ainsi intervenir un grand nombre de variables discrètes et catégorielles. Il convient alors de rendre ces outils robustes, exploitables et explicables, et de tirer profit de la conception *data driven* - et son optimisation - appliquées à un système complexe de grande dimension pour faire émerger des solutions non triviales (cf. enjeu 17).

Les nouvelles sources d'énergie propulsive et les chaînes de propulsion associées sont à considérer à l'échelle de l'aéronef complet : au-delà du système propulsif en tant que tel, ces nouveaux enjeux reposent des questions scientifiques sur la gestion thermique globale de l'appareil, les problématiques de très fortes tensions (avion plus électrique) et plus généralement l'intégration au sein d'un processus d'optimisation conjoint composants / architecture avion, de choix topologiques (*architecture in the loop*), avec le besoin de quantifier la fiabilité, la robustesse, dans une logique multifactorielle non adressée correctement par les méthodes actuelles.

Enfin, un verrou scientifique fort consiste à intégrer les disciplines et les métriques d'évaluation associées pour prendre en compte l'intégration de l'aéronef innovant dans le système de transport (cf. enjeu 4).



## Enjeu 10 : Propulsion disruptive à fort rendement

Les nombreux verrous scientifiques de cette feuille de route sont par nature, des verrous à traiter plutôt à moyen - long terme (> 10-15 ans). Sur le domaine de la propulsion, l'électrification massive des avions va alimenter plusieurs générations de technologies (chimie des batteries, supraconductivité...) avec des verrous scientifiques sous-jacents ; ils sont décrits précédemment. Il en est de même pour la combustion, avec une utilisation de carburants sans émission de  $\text{CO}_2$  ( $\text{H}_2$ ,  $\text{NH}_3$  ...), par nature disruptive ; pour améliorer le rendement (avec CSD ou ces carburants alternatifs), des technologies disruptives liées au système de combustion, aujourd'hui à l'état de concept, peuvent émerger également.

### Systèmes de combustion

En appui des très fortes dilution, l'induction plasma ou chauffage électromagnétique peut aider à la stabilité de la flamme, ou aider au rallumage. Parmi les concepts possibles, il s'agit donc de mieux identifier les plus prometteurs dans une application civile, et lever les verrous précis qui permettent de retrouver, en validation expérimentale représentative d'usage réel, les bénéfices théoriques.

D'autres concepts comme les chambres de combustion à géométrie variable (améliorant le rendement), particulièrement complexes à mettre au point du fait des fortes contraintes internes, pourraient aussi voir le jour au gré des progrès réalisés sur les matériaux (par exemple : à mémoire de forme), au prix de développements avancés encore à réaliser.

### Cycles thermodynamiques

Si l'on remet en cause le cycle de combustion, la combustion à volume constant (sans piston) semble très prometteuse, mais présente des verrous scientifiques liés à la compréhension fine et la maîtrise des interactions fortes entre l'aérodynamique, le balayage éventuel, le mélange et la combustion et leurs conséquences sur l'allumage, la variabilité de cycle-à-cycle et les émissions de polluants ( $\text{NO}_x$ , imbrulés, suies). Une autre voie prometteuse en termes de combustion est la détonation rotative, dont les études les plus récentes n'ont pas permis de retrouver les gains de pression prédits numériquement ; les verrous scientifiques résident dans les transferts thermiques aux parois, et également dans l'initiation de la détonation, la maîtrise de la dynamique des fronts de détonation, et in fine la maîtrise des émissions polluantes.

### Le cas des technologies nucléaires

Concernant la propulsion en (très forte) rupture, on pourrait envisager à long terme l'embarquement de technologies nucléaires, que ce soit en nucléo-électrique (production d'électricité) ou en nucléo-thermique (di-enthalpie sans combustion). Les verrous relatifs à la sécurité des occupants (radiations) et à la protection de l'environnement de cet avion sont les plus critiques.



## MATÉRIAUX ET STRUCTURES

Connaissance et représentation des matériaux\*  
Matériaux avancés et fonctionnels\*  
Recyclage et réparation\*  
Représentation et optimisation des structures

\*Enjeux de 1<sup>er</sup> ordre

### Enjeu 11 : Connaissance et représentation des matériaux

#### Maîtrise des procédés

Les procédés de fabrication ne cessent de se renouveler, en particulier avec l'apparition de nouveaux procédés de fabrication additive qui permettent d'envisager de nouveaux types d'assemblages, tels que les matériaux à gradient de composition contrôlé. Ces nouveaux procédés bénéficient de méthodes de mesure et d'acquisition de données de plus en plus précises grâce en particulier à l'analyse d'images et au suivi in situ à l'aide de méthodes optiques de haute résolution permettant d'envisager des résolutions spatiales sub-micrométriques et des résolutions temporelles sub-microsecondes, ce qui nécessite de pouvoir s'appuyer sur des dispositifs de partage des données efficaces permettant d'alimenter en vol des outils d'analyse par intelligence artificielle. La maîtrise des transitions de phase nécessite encore de lever plusieurs verrous, en particulier la nucléation des précipités en présence de  $H_2$ , ou les effets de taille finie dans le cas de la synthèse de parois fines pour l'allègement des structures, les échangeurs thermiques ou pour limiter l'usage de matière première stratégique. La prise en compte des procédés de fabrication dans les modèles de prévision de durée de vie est d'autant plus délicate à mener que la résistance à la corrosion par exemple peut dépendre d'espèces en très faible concentration. Enfin, les simulations des procédés restent des objectifs à long terme compte tenu de la variété des échelles de temps à prendre en compte, et de la difficulté à identifier un volume élémentaire représentatif.

#### Approches multi-échelles

Le comportement des matériaux résulte de l'articulation entre plusieurs échelles spatiales et temporelles, allant des échelles les plus fines contrôlant les mécanismes de rupture et de dissipation locale (ångström, picoseconde) jusqu'à la taille et à la durée de fonctionnement attendue des appareils (mètre, années). Il est crucial de disposer de modèles multi-échelles (en temps et espace) tenant compte des couplages multi-physiques, en particulier pour prédire la durée de vie en fatigue voire formuler des auto-diagnostics, ce qui nécessite par ailleurs de tenir compte fidèlement des effets environnementaux et de la complexité des sollicitations. Plusieurs verrous au niveau des couplages entre échelles empêchent actuellement la réalisation de modèles multi-échelles à la fois précis, robustes et rapides (pour viser le temps réel). De plus, les couplages multiphysiques associant vieillisse-

ment, corrosion, oxydation, et modélisation thermo-mécanique, en fonction des procédés de fabrication et des conditions de mise en œuvre des pièces, sont encore très largement incompris. À la difficulté d'identifier les échelles spatiales pertinentes s'ajoute enfin la difficulté à tenir compte de gammes étendues d'échelles temporelles, en particulier dans le cas de chargements dynamiques transitoires, ou de manière générale pour les méthodes mathématiques et numériques de la dynamique vibratoire des structures.

## **Phénomènes non-linéaires**

Les phénomènes non-linéaires sont des sources d'instabilité, qui sont aussi très difficiles à décrire par les méthodes numériques actuelles. Une bonne connaissance des mécanismes non-linéaires pourrait pourtant permettre un meilleur contrôle de la dissipation et de l'énergie. Cela concerne aussi bien les structures dont le comportement localement non-linéaire pourrait servir d'amortissement, que les matériaux dont on souhaite renforcer la résistance y compris lorsque des sollicitations externes importantes les poussent dans un régime de réponse non-linéaire. Or, pour appréhender ces mécanismes par le calcul, il faudra dépasser les schémas usuels qui deviennent inadéquats, ou nécessitent des pas de temps trop petits. C'est pourquoi une algorithmique plus audacieuse est attendue, qui pourrait être combinée à des méthodes de réduction de modèle et d'apprentissage (enjeux 15 et 17).

## **Matériaux et structures en ambiances extrêmes**

Les engins aérospatiaux doivent supporter des sollicitations hors du commun, que ce soit régulièrement lors du décollage (énergies de l'ordre du MW), en vol à très haute vitesse (forte température au contact avec l'air), ou accidentellement (crash, amerrissage, foudre, givre, irradiation...). Aussi, l'amélioration des rendements des chambres de combustion pourrait reposer sur un point de fonctionnement à plus haute température. Or la durabilité des protections actuelles ne permet pas de répondre à l'augmentation des températures de fonctionnement, ni de garantir une sécurité sur le très long terme. De plus, les mesures de contrôle dépendent elles aussi de la mauvaise prédictibilité de la durée de vie et du vieillissement des capteurs en environnement agressif. Enfin, de nombreuses zones d'ombre subsistent en particulier pour ce qui est de la maîtrise de la transition ductile/fragile dans le comportement des matériaux à très basse comme à haute température.

## Enjeu 12 : Matériaux avancés et fonctionnels

### Procédés de fonctionnalisation

Les avancées récentes dans le domaine des procédés de fonctionnalisation des matériaux s'appuient sur les simulations au service du développement des matériaux et de leurs procédés, en particulier l'hybridation essais/calculs et les essais intégratifs. La fonctionnalisation ne s'appuie pas uniquement sur la réalisation de matériaux dont la structure ou la composition est adaptée à certaines fonctions de réponse (comme les revêtements 2D pour leurs propriétés optiques par exemple), mais peut aussi résulter du développement de capteurs, actionneurs et récupérateurs d'énergie afin d'assurer des fonctionnalités de *monitoring* par exemple. Enfin, la préservation de notre environnement encourage à miser sur des procédés de fabrication parcimonieux, limitant l'utilisation des métaux nobles (Cu, Ag) ou peu consommateurs de matière (matériaux à gradient céramique/métal) obtenus par fabrication additive, imprégnation de céramiques, ou frittage type *metal bonder jetting*.

### Protection face aux agressions

Face aux agressions externes, il est possible soit de développer des revêtements protecteurs fournissant un gradient de protection, soit de concevoir de nouveaux matériaux en volume. Dans ce dernier cas, pour résister aux très hautes températures, les possibilités des alliages intermétalliques n'ont pas été toutes explorées. De même l'usage de phases max ou de matériaux à haute entropie présente un intérêt. Enfin, le développement de CMC (composites à matrices céramique) pour turbomachines est aussi prometteur, mais ne permet pas actuellement d'atteindre les températures de fonctionnement à 2700 °C voire 3000 °C comme attendues. Pour ce qui concerne les revêtements, le point d'achoppement concerne leur durabilité. Enfin, dans la perspective de l'usage de l'hydrogène comme carburant, la résistance à des cycles de température allant des températures cryogéniques à la température ambiante sans induire de transition fragile/ductile, et la préservation de l'intégrité matière en présence de gradients de température permanents (dans les circuits d'approvisionnement) nécessite de proposer de nouvelles combinaisons de matériaux.

Par ailleurs, la protection des structures face aux chocs et impacts passe notamment par l'utilisation de solutions matériaux innovantes aux propriétés dissipatives performantes.

### Matériaux pour la gestion thermique

Outre les revêtements, les composants réfractaires et les matériaux composites à base de céramiques, il est suggéré de proposer des structures innovantes pour la gestion thermique, soit à l'aide de circuits d'évacuation de la chaleur, soit à l'aide de structures type TPMS (*triply periodic minimal surfaces*), en s'appuyant sur de nouveaux procédés de fabrication.

## Enjeu 13 : Recyclage et réparation

### Recyclage

Une fois la structure démontée, la recyclabilité dépend fortement des matériaux considérés. Dans le cas des métaux, le frein à la recyclabilité provient en particulier de l'effet des impuretés qui rend la qualité des pièces insuffisante pour un usage aéronautique et nécessite de repenser les méthodes de métallurgie des poudres. Dans le cas d'un approvisionnement par mines urbaines, nécessaire à l'indépendance stratégique, l'effet des défauts sur la dispersion des propriétés d'usage est toujours en cours d'analyse. Dans le cas des matériaux composites, les obstacles à la recyclabilité sont le réemploi des fibres, de la résine, et la capacité de désassemblage.

### Réparation

En parallèle de la recyclabilité, il est possible de proposer des méthodes de réparation in situ dans l'espoir de prolonger la durée de vie des pièces. Une première avancée serait de trouver des méthodes pour consolider les interfaces lors d'un ajout matière, celles-ci apparaissant comme le principal écart aux jumeaux numériques de matériaux. Une avancée importante serait de développer des matériaux autocicatrisants. Les besoins de réparabilité pourraient être évalués in situ par des capteurs en mesure d'identifier la qualité de la réparation, comme le besoin de réparer. Pour cela, la compréhension des mesures fournies par les capteurs, dans un contexte d'interactions non-linéaires, est cruciale.

### Éco-conception et sobriété

L'autonomie stratégique repose aussi sur la capacité à proposer une conception d'engins aéronautiques respectueuse de l'environnement. Il est possible pour cela de recourir à des matériaux biosourcés ou de veiller à un usage sobre des ressources. Or, la caractérisation et la modélisation des matériaux biosourcés, en particulier de leur durabilité, est encore balbutiante, alors que ce sont des matériaux de microstructure complexe. La sobriété suppose aussi de faire appel à des assemblages de matériaux, qui peuvent devenir résistants lorsqu'ils sont combinés (soudage de polymères, adhésion multi-couches pour la tenue à l'usure et au *fretting*, matériaux architecturés). Afin de limiter l'usage de métaux nobles (Cu, Ag), il est possible de faire appel à des procédés à bas coût qui doivent rester compatibles avec les contraintes environnementales (fabrications additives, fonctionnalisation de surface, etc.). Afin d'anticiper les dépenses matière, il serait intéressant d'intégrer la réutilisation et la maintenabilité dans les méthodes d'optimisation globale, voire d'envisager une adaptation en temps réel des processus industriels pour en tenir compte.

## Enjeu 14 : Représentation et optimisation des structures

### Comportement des structures complexes

À l'échelle de l'avion, les structures doivent présenter une tolérance au dommage accrue de façon à préserver la sécurité. La conception des structures de grande taille évolue depuis des principes architecturaux préliminaires jusqu'à une vision par composants, puis par éléments structuraux, et enfin à la vision exhaustive de tous les détails. Le dialogue entre les échelles et la prise en compte de niveaux de fidélité adaptés sont particulièrement importants dans ce cas. Les phénomènes de non-linéarités, en particulier dans les contacts ou dans la réponse dynamique sont cruciaux à maîtriser, soit pour les éviter, soit pour s'en servir par exemple pour piloter l'amortissement. Dans une approche numérique, l'identification des lois de comportement à l'échelle des structures doit pouvoir s'appuyer sur la connaissance des pièces maîtresses de la structure, dont la taille nécessite d'associer une représentation à l'aide de maillage fins ou de modèles réduits. Enfin, les structures intelligentes avec capteurs, actionneurs et récupérateurs d'énergie intégrés pourraient être utilisées pour un meilleur suivi santé comme pour limiter les dépenses d'énergie.

### Aéro-élasticité

Le couplage fluide-structure reste un sujet difficile à appréhender en particulier aux petites échelles. Ainsi, il est difficile de déterminer avec suffisamment de résolution spatiale et temporelle le chargement en surface de la pression pariétale pour le couplage vibro-acoustique. Un des défis reste l'identification et la prise en compte de ce couplage en temps réel, dans un environnement instationnaire. Une bonne connaissance à la fois de la réponse des structures, des écoulements non-linéaires et de leur couplage permettra de développer des structures adaptées, éventuellement architecturées, pour la maîtrise de la transition laminaire/turbulent. Quant aux enjeux de vibrations, ils dépendent de la capacité à simuler les machines tournantes à grande échelle.

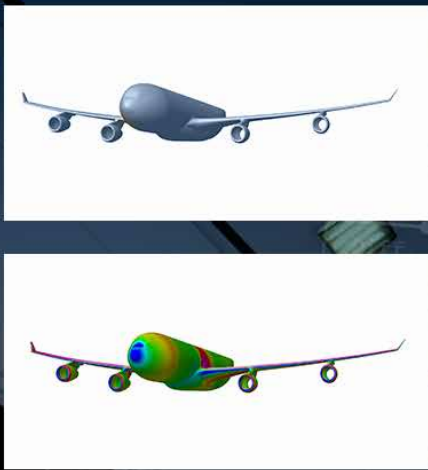
### Conception pour plus de légèreté

La conception de structures plus légères bénéficie de l'utilisation d'alliages eux-mêmes plus légers (contenant du magnésium Mg par exemple) comme de la mise en œuvre de structures architecturées. Dans le premier cas, des verrous sont à lever, liés par exemple au point d'auto-inflammation du magnésium et à la maîtrise des défauts. Dans le second cas, la perte de densité associée à l'architecturation s'accompagne en général d'une diminution des propriétés mécaniques qui doit être compensée par une conception de structure plus complexe. Cette conception peut bénéficier d'une modélisation hybride intelligence artificielle / apprentissage profond tenant compte de la fabricabilité, voire de la démontabilité et de la réparabilité.



## Suivi de l'état de santé des structures

Afin d'améliorer la sécurité des vols et la durabilité des engins aéronautiques, le suivi de l'état des structures suppose l'existence de moyens de mesure de type capteurs associés en réseau pour identifier in situ l'évolution des propriétés de la structure ou de ses pièces maîtresses. L'efficacité de ces moyens suppose d'une part la capacité à faire une insertion sûre et durable des capteurs dans les structures, d'autre part de disposer de critères de mesure robustes et précis – si possible en temps réel, et enfin d'être capable de coupler des informations multi-capteurs (voir aussi enjeu 22).



## MODÉLISATION PHYSIQUE ET EXPÉRIMENTATION

Fiabilisation\*

Enrichissement des modèles\*

Stratégies de calcul et de gestion de données\*

Production massive de jumeaux numériques

\*Enjeux de 1<sup>er</sup> ordre

### Enjeu 15 : Fiabilisation des modèles numériques et des expériences

#### Maîtrise des incertitudes

Un impératif des modèles physiques, qu'ils soient numériques ou expérimentaux, est de pouvoir estimer la confiance dans les résultats ou données qu'ils fournissent et de pouvoir en connaître les limitations. La démarche de quantification d'incertitude étendue à toutes les métrologies d'intérêt est un verrou majeur à lever, non seulement pour permettre l'évaluation critique des métrologies en elles-mêmes, mais également pour garantir un fonctionnement adapté des méthodes hybrides expérimentales / numériques (et d'en quantifier l'incertitude de sortie). Côté numérique, les méthodes de quantification et de propagation des incertitudes (analyse de sensibilité, modélisation stochastique, etc.), erreurs ou biais doivent encore se développer pour les problèmes non linéaires, multi-échelles ou multi-physiques, ce qui constitue un frein à leur déploiement.

Cet enjeu de maîtrise des incertitudes est très transverse et se décline de façon différente en fonction des thèmes :

- thème 1 (Architectures aéronaves innovantes) : conception robuste aéronave sous incertitude ;
- thème 5 (Transport aérien) : optimisation du trafic aérien compte tenu des incertitudes sur l'impact environnemental ou encore les contraintes ATM ;
- thème 8 (Modélisation et simulation mono- ou multi- physiques) : incertitudes dans les modélisations des comportements non linéaires des systèmes multi-échelles (par exemple, la turbulence dans les fluides ou les matériaux soumis à des conditions extrêmes) ;
- thème 10 (Impact environnemental) : incertitudes sur les effets non-CO<sub>2</sub>.

#### Explicabilité

Toute modélisation, en particulier intégrée dans un système complexe, devra de plus en plus apporter la garantie de la pertinence du résultat obtenu : preuve d'optimalité pour les processus d'optimisation pluridisciplinaire, explicabilité du processus de décision dans les interactions humains-systèmes. Un verrou réside dans le déploiement des méthodes de preuve formelle pour les grands systèmes (système de transport aérien, usine de production) et de garantir que ces méthodes puissent être utilisables.



En outre, l'utilisation croissante de l'intelligence artificielle (IA) à toutes les étapes du cycle de vie d'un aéronef (depuis la conception jusqu'à sa maintenance et son démantèlement) nécessite des recherches poussées sur l'explicabilité de l'IA.

### **Traiter la complexité des comportements non linéaires**

L'objectif est de développer des modèles, méthodes numériques et outils de simulation capables de représenter, analyser et prédire avec précision des phénomènes non linéaires, souvent caractérisés par des dynamiques sensibles aux conditions initiales, des bifurcations, et des interactions multi-échelles. Un premier verrou est la compréhension fine des interactions entre les échelles spatiales et temporelles actuellement limitée par une incapacité à représenter ces phénomènes de manière cohérente et simultanée sur toutes les échelles. Un deuxième verrou réside dans la nécessité d'accéder à des ressources de calcul énormes (exaflopiques pour une simulation directe de toutes les échelles de la turbulence en mécanique des fluides par exemple) et d'arriver à optimiser l'efficacité des modèles sur ce type d'infrastructure informatique.

## Enjeu 16 : Enrichissement des modèles

La représentativité de modèles numériques et expérimentaux est un objectif en soi, représentativité qui doit être associée au niveau de fidélité souhaité (variable en fonction des objectifs recherchés).

### Obtenir des modèles réduits fidèles

Un verrou majeur pour les méthodes de réduction de modèle actuelles est de capturer de manière précise les comportements non linéaires ou couplés (par exemple fluides-structure, électromagnétisme-thermique) dans des échelles spatiales et temporelles variées.

En outre, l'un des principaux défis de l'intégration de l'intelligence artificielle pour l'optimisation et la modélisation prédictive est de concevoir des algorithmes capables de généraliser efficacement à des cas non vus tout en restant performants pour des configurations spécifiques. Cela implique un arbitrage entre spécialisation, où l'IA est adaptée à un domaine restreint mais précis, et généralisation, où elle doit traiter des problèmes variés, parfois éloignés des données d'entraînement. Les travaux sur ces méthodes doivent être généralisés et validés pour être ensuite déployés et utilisés.

### Couplages multi-physiques et approches multi-échelles

Le développement de stratégies de couplage est un enjeu important en aéronautique pour modéliser des interactions complexes entre des phénomènes extrêmes dont les conséquences peuvent être désastreuses. Ces approches multidisciplinaires sont indispensables pour anticiper leurs effets combinés. La notion de couplage est étroitement liée à la dynamique des physiques impliquées, aux étendues d'observation des paramètres et variables ainsi qu'à leurs incertitudes. Tous les verrous relatifs aux enjeux 15 « Fiabilisation des modèles numériques et expérimentaux » et 18 « Production massive de jumeaux numériques (JN) » pourraient être repris ici dans ce contexte de couplage multi-physiques (outils de construction de JN, propagation des incertitudes, non linéarités, etc.). On peut y ajouter un verrou lié à l'extrême difficulté de disposer de bancs d'essais reproduisant la complexité des environnements et permettant d'acquérir des données fiables en quantité importante pour les physiques couplées en particulier (manque de bancs d'essais instrumentés à différentes échelles spatiales et ou temporelles).

## Enjeu 17 : Stratégie de calcul et de gestion des données numériques et expérimentales

### Génie logiciel et algorithmique

Nous entrons dans l'ère des machines *exascale* caractérisées par l'arrivée de calculateurs très hétérogènes avec une multiplication des designs des nouvelles puces hardware (CPU, GPU, etc.), une multiplication des langages de programmation et des *frameworks* propriétaires liés à ces différentes puces ainsi qu'un haut niveau de spécialisation nécessaire des experts réalisant les optimisations logicielles pour chacune de ces architectures et pour chaque type de parallélisme. Un premier verrou important consiste à revoir, à l'aune des techniques de génie logiciel avancées, la conception des grands codes de simulation numérique pour les rendre automatiquement portables et adaptés à ces nouvelles architectures *hardware* afin d'en tirer le meilleur profit, en termes d'efficacité et de fonctionnalités haut niveau (différenciation automatique, hybridation avec du *machine learning*, adaptation de maillage, etc.).

Ont ensuite été identifiés un ensemble de verrous importants que l'on peut associer au domaine des mathématiques appliquées, comme par exemple :

- l'efficacité des méthodes d'algèbre linéaire (accélération et qualité de convergence),
- le développement d'algorithmes d'optimisation pour des problèmes non triviaux (problèmes de grande dimension, non convexes, combinant des variables mixtes discrètes et continues, instationnaires),
- les algorithmes avancés de traitement de problèmes à forte combinatoire (application aux trajectoires 4D par exemple).

### Fusion et assimilation de données

Les données issues d'expériences ou de simulations jouent un rôle crucial pour comprendre les processus physiques, valider les modèles et optimiser les performances des systèmes. Ces données sont souvent très hétérogènes et peuvent être traitées grâce aux techniques issues du domaine de l'IA comme le *deep learning*. La fusion de données hétérogènes est une démarche essentielle pour obtenir une vision unifiée, cohérente et exploitable des informations. L'assimilation de données consiste à combiner des observations issues du monde réel (avant ou après si possible fusion des données) avec des modèles numériques basés sur des lois physiques ou mathématiques, pour améliorer les prédictions.

Outre la difficulté liée au prétraitement de ces données, le grand verrou des prochaines années est de parvenir à hybrider les méthodes de *deep learning* et les connaissances a priori du domaine afin de réduire l'espace des solutions en imposant par construction les contraintes connues (symétrie, invariance de groupes, conservation de l'énergie, etc.).

## Enjeu 18 : Production massive de jumeaux numériques (JN)

L'enjeu consiste à pouvoir produire massivement des jumeaux numériques pour générer des modèles virtuels de haute-fidélité, surpassant les limitations des essais et instruments réels (toutes les échelles spatio-temporelles ne pouvant pas être restituées sur les bancs d'essais). Cette approche transformera à terme la gestion et la performance des systèmes complexes, en offrant des solutions plus efficaces et réactives, tout en garantissant la fiabilité et la sécurité.

### Construction et conception de Jumeaux Numériques (JN)

Il n'y a actuellement pas d'outil génératif capable de produire des modèles (EDP : équations aux dérivées partielles, ODE : *ordinary differential equation*, etc.) en lien avec des observations expérimentales (potentiellement solution des équations). L'association des modèles de connaissance physiques, des modèles d'observation et des IA génératives (IAG) représente une étape nécessaire pour la génération automatique des JN et est un premier verrou à lever. Une fois le JN produit, un verrou important réside dans la difficulté à propager dans les modèles les étendues d'observation (ordre de grandeur), les incertitudes et les constantes caractéristiques de temps (bande passante) des variables et paramètres.

### JN pour des systèmes complexes

Le développement de JN sera certainement progressif : construction automatisée de JN à l'échelle de quelques composants, JN à l'échelle de systèmes complets (aéronefs), JN en lien avec les IAG de conception aéronautique pour des systèmes et des espaces de conception adaptatifs.

Le passage à l'échelle d'un aéronef avec des objectifs de représentativité des fonctionnements nominaux et défaillants nécessite des modèles non linéaires dont la viabilité numérique dans la cadre de JN exploités en temps réel (*Hybrid Twin*) met en œuvre des modèles réduits exploitables à l'échelle de systèmes complexes multi composants comme un avion. Les évolutions attendues sont théoriques, méthodologiques et numériques. L'interaction de trois types d'acteurs de recherche contribuera à l'essor de la génération automatique de JN à l'échelle de système complet : les acteurs qui possèdent l'expertise phénoménologique des physiques en jeu, les acteurs de l'ingénierie système et les acteurs des IAG et des méthodes d'assimilation de données.

### Difficulté à prédire et personnaliser les états futurs

La recherche de fonctionnements optimaux ou parfois de durée restante de fonctionnement nominale nécessite la prédiction individualisée des états futurs des systèmes réels, basés sur une instanciation de modèles individuels adaptatifs et aptes à produire une maintenance prédictive, un contrôle non causal et une commande optimale. Les systèmes concernés sont aussi bien les produits que les systèmes de production.



## SYSTEMES INTELLIGENTS DISTRIBUES ET INTERACTIONS HUMAINS / SYSTEMES

### Architecture hardware et software embarquées\*

Avionique et communications  
Certification de la complexité  
Observations de l'état de l'aéronef  
Systèmes au sol  
Interaction humain-système\*

\*Enjeux de 1<sup>er</sup> ordre

## Enjeu 19 : Architecture hardware et software embarquées

### Puissance de calcul

Avec l'augmentation des puissances de calcul des électroniques embarquées, l'automatisation pour le diagnostic, l'analyse de l'environnement, le guidage et le pilotage au sol et en vol, par exemple, qui nécessitent le traitement d'un grand nombre d'informations, reposera de plus en plus sur des processeurs de haute performance et des fonctions d'IA embarquée spécifiques.

Ces nouveaux calculateurs devront être conçus, intégrés et packagés en étant adaptés à des conditions plus complexes et nécessitant plus de robustesse tout en étant certifié ce qui impliquera de nouvelles méthodes. Ce saut quantitatif en termes de calculs à bord de l'aéronef doit également tenir compte des enjeux logiciels en termes de sécurité, de fiabilité ou encore de maintenance.

### Adaptabilité en temps réel

Les nouvelles architectures d'avionique embarquée vont suivre et s'adapter aux augmentations des puissances de calcul ; ces architectures profitent également de l'usage de l'intelligence artificielle afin d'adapter le système et la gestion de ses ressources de façon dynamique. Un verrou sur l'adaptabilité en temps réel apparaît. En effet, l'apport de nouvelles fonctions embarquées et d'un grand nombre de données à analyser notamment exogènes à prendre en charge, la consommation de ressources de calcul embarquées pour fournir des informations en temps réel pourra être importante et nécessiter une mutualisation des ressources pour tirer profit des capacités de calcul mais en même temps d'une supervision globale, et une gestion dynamique des ressources afin d'assurer la répartition de la puissance par une priorisation adaptée aux besoins.

## Enjeu 20 : Avionique et communications

### Connectivité

L'évolution de l'architecture avionique avec sa montée en puissance de calcul et l'usage de données massives et modèles d'intelligence artificielle nécessite un saut qualitatif des protocoles de communication bord-sol et bord-bord qui doit également intégrer des données multimodales, notamment la détection d'événements survenant sur l'aéronef. La gestion de données massives internes et externes nécessite de revoir la connectivité des appareils, notamment dans le cas où la puissance de calcul embarquée doit être complétée par un « *cloud* avionique » au sol, ce qui implique alors une communication permanente. Pour cela, des solutions de connectivité à haute bande passante et sécurisées doivent être développées en complément de nouvelles fonctionnalités de traitement des données.

### Cybersécurité

Avec l'augmentation de la complexité et de la quantité de données traitées dans les systèmes avioniques et leurs solutions de communication bord-bord et bord-sol, la surface d'attaque des aéronefs augmente et nécessite de prendre en compte un plus grand nombre d'éléments dans la chaîne de valeur de l'avionique.

La cybersécurité devra prendre en compte tous ces nouveaux composants, logiciels compris, afin de prévenir des défaillances ou détecter les cyberattaques, y compris la détection d'événements d'origine malveillante survenant sur l'aéronef.

## Enjeu 21 : Certification de la complexité

### **Certification par et de l'intelligence artificielle (IA)**

L'usage de données massives ainsi que de jumeaux numériques doit être développé à des visées de certification des modèles d'IA qui seront embarqués ou serviront eux-mêmes à certifier d'autres composants. L'utilisation de l'IA pour aider à certifier la complexité constituerait une rupture majeure ouvrant la voie à des avioniques plus ouvertes. Cependant, un verrou essentiel est posé par la validation et la certification des systèmes basés sur l'IA, étant donné que ce sont des enjeux cruciaux pour garantir la sécurité et la fiabilité des aéronefs et drones autonomes. Ces systèmes devront assurer une réponse à des exigences rigoureuses dans des environnements de plus en plus complexes, nécessitant des approches innovantes. Les méthodologies modernes combinant données massives, apprentissage automatique, simulation via des jumeaux numériques, et se tournant vers le développement d'une IA de confiance sont donc des enjeux importants.

### **Certificabilité des protocoles de communication**

L'usage de la donnée captée sur l'aéronef ou exogène devenant essentielle à la connaissance de la situation interne comme externe et à l'adaptation des conditions de navigation, les protocoles de communication deviennent un point clé dont la certificabilité doit être assurée pour que les besoins d'interaction et d'interopérabilité soient disponibles partout.

### **Certificabilité des systèmes adaptables**

Toutes les nouvelles architectures hardware et software devront bénéficier d'une certification qui, elle-même, nécessite de nouvelles méthodes notamment un environnement logiciel adapté à la gestion des systèmes flexibles et critiques.

## Enjeu 22 : Observations de l'état de l'aéronef

### Technologies de capteurs

L'interaction entre le système et son pilote nécessite l'observation d'un grand nombre de paramètres et leur mise en forme afin d'informer pour une prise de décision efficace. Les capteurs doivent non seulement être améliorés pour une meilleure précision, mais aussi pour augmenter les données disponibles, et l'assimilation de données doit permettre une meilleure appréhension de l'état de l'aéronef.

Les capteurs doivent non seulement permettre la connaissance des paramètres de navigation (flux d'air, température, fatigue, agressions chimiques, CEM : compatibilité électro-magnétique, etc.), mais aussi les émissions en vol et l'écoulement derrière l'aéronef. Pour cela, de nouveaux instruments fondés sur des lidars multiples et des méthodes hybrides peuvent être développés.

De plus, la mesure d'interférences électromagnétiques doit aussi être mise en œuvre à des fins de détection de nuisances intentionnelles.

Par ailleurs, les données doivent pouvoir être fusionnées avec d'autres données exogènes comme les modèles météo afin d'anticiper par exemple les risques de foudroiement ou encore de givrage.

### Conditions de vol

Les principaux verrous à la maîtrise des conditions de vol résident dans la connaissance des tourbillons de sillage et des mesures en conditions givrantes. Dans le cadre des vols en formation, il est nécessaire de déterminer précisément la position des tourbillons de sillage ou vortex générés par l'avion leader sur l'avion suiveur. Ainsi, l'avion suiveur pourra positionner son aile correctement sur ce dernier, ce qui lui permettra de réduire sa consommation et donc son empreinte écologique.

La détection et l'adaptation des capteurs à toutes les conditions givrantes est également un verrou important, car les différentes technologies actuelles, qui utilisent des méthodologies directes ou indirectes, ne permettent pas de détecter l'ensemble des conditions givrantes. Par ailleurs, ces systèmes doivent évoluer non seulement afin de fournir une estimation en quasi-temps réel mais aussi être adaptable à différents types d'aéronefs (ceux actuels et futurs) et notamment des avions tout électriques et les UAV (*Unmanned Aerial Vehicle*). Il faut ainsi développer des capteurs de petites tailles, de poids faibles et nécessitant de faibles puissances.

### État de l'aéronef

La maîtrise des informations capteurs sur un aéronef vise à garantir la fiabilité, l'intégrité et la sécurité des données critiques pour le pilotage et la navigation. Le suivi de l'état de l'aéronef dans le cadre du *System Health Monitoring* (SHM) pose un premier verrou qui nécessite le développement de nouveaux capteurs intelligents (qu'ils soient physiques, logiciels ou hybrides), capables de surveiller l'état en temps réel et nécessitera également une capacité de fusion de données multimodales optimisée afin d'estimer au mieux l'état de l'aéronef. Par ailleurs, un autre verrou réside dans son évaluation en temps réel, qui pourra bénéficier des progrès constants en intelligence artificielle, alimentée à la fois par des données et par des modèles adaptés (voir aussi enjeu 14).



## Enjeu 23 : Systèmes au sol pour l'aide à la navigation et gestion des aéroports

### Architectures de gestion du trafic

Le suivi au sol du trafic aérien devient un enjeu de modélisation d'un système complexe et l'optimisation du trafic aérien (notamment à des fins de réduction de son impact environnemental) nécessite des nouveaux concepts d'opérations. Développer une méthode de modélisation est actuellement un verrou important, du fait de l'hétérogénéité des phénomènes inhérents au système de transport aérien intégré (sous-systèmes matériel et logiciel, opérateurs, interactions, automatismes) qui conduit à l'absence d'outils théoriques et pratiques de modélisation exhaustive et intégrée de l'ensemble. Cela nécessite une modélisation de ce système très hétérogène ; cette modélisation se révèle complexe du fait des interactions de différentes natures (interactions humains-humains, humains-automatismes, automatismes-automatismes) et à plusieurs échelles (du transport multimodal jusqu'aux capacités cognitives, perceptives et moteurs des humains), et qui doivent également s'adapter à de nouveaux entrants (en palliant l'absence de données).

Ce constat est vrai également pour les aéroports dont un modèle unifié est à développer.

De tels modèles nécessiteront des outils de vérification et de validation adéquats.

### Optimisation des trajectoires

L'optimisation de plans de vol efficaces et durables doit être améliorée pour intégrer des contraintes multi-objectifs complexes comprenant les incertitudes des modèles  $\text{CO}_2$  et non- $\text{CO}_2$ , la conception des avions dont les performances des moteurs ou encore les paramètres opérationnels et météorologiques.

Par ailleurs, il est indispensable de disposer de données météorologiques et environnementales partagées en temps réel (capteurs d'humidité pour détection des ISSR – *ice supersaturated regions* - afin d'éviter les traînées de condensation, capteurs de champ électrostatique en sortie moteur pour effets non- $\text{CO}_2$ , capteurs de détection de toute condition givrante (y compris SLD : *supercooled large droplets* – grosses gouttes), mesure des turbulences de vent par Lidar UV embarquable à grande distance).

### Robustesse et sécurité des données de vol

Le besoin de données de vol nécessaires à la navigation et la gestion des aéroports augmentant, la fiabilité des capteurs et leurs capacités doivent être améliorées afin d'assurer une connaissance la plus fine possible des conditions de vol. Cela inclut l'amélioration des mesures de l'air (pression, température, vitesse, turbulence) notamment en vue d'une navigation automatisée ainsi que le développement de nouveaux capteurs améliorant la résilience des systèmes de navigation comme par exemple l'usage de la physique quantique pour des centrales inertielles embarquées plus précises, ne nécessitant ni GPS ni radar.

## Enjeu 24 : Interaction humain-système pour le pilotage, la navigation, la gestion du trafic

### Prise en compte de l'état de l'opérateur dans la coopération humain / machine

Il s'agit ici d'être en appui des nouvelles technologies d'aide aux opérateurs (pilotage, navigation et gestion du trafic), permettant in fine un pilotage ou un contrôle plus efficace et sûr des systèmes. La première étape consiste en une caractérisation de l'état de l'opérateur, afin de prévenir entre autres une surcharge cognitive. Pour mesurer cet état, il faut identifier les capteurs les plus fiables ainsi que leurs limites, et les indicateurs de mesure de cet état (physiologique et cognitif). Il s'agit ensuite de proposer une démarche de conception de systèmes interactifs visant des interactions à différents niveaux sensoriels et cognitifs. Pour cela, un verrou scientifique réside en la compréhension des interactions et des combinaisons entre les modalités sensorielles multiples (vision, toucher, son, etc.) pour accroître leur accessibilité cognitive.

### Compréhension de mécanismes cognitifs impliqués dans la coopération humain / machine

Pour améliorer la coopération humain-machine, il est crucial de prédire, via des modèles, les actions, décisions et réactions des agents. Cela nécessite de définir des modèles permettant de formaliser leur comportement. Les verrous scientifiques à la mise en œuvre de ces modèles sont de trois ordres : comprendre les mécanismes qui sous-tendent la construction d'un modèle mental du fonctionnement d'un système, via des mécanismes d'agentivité ; identifier la confiance qu'a l'opérateur dans ses prédictions du fonctionnement du système autonome ; rendre personnalisables et explicables des modèles génériques, pour s'adapter aux contextes particuliers.

### Optimisation de la relation humain / système

Améliorer la robustesse et l'explicabilité de la coopération humain-machine (HM) et y intégrer des mécanismes de résilience est essentiel pour garantir que les systèmes automatisés fonctionnent efficacement et de manière sécurisée, et d'être capable de reprendre le contrôle en cas de défaillance du système. D'un point de vue scientifique, cela passe : par la mise en œuvre d'algorithmes permettant une mesure et des ajustements dynamiques de la performance pour anticiper les ruptures de coopération ; par la capacité de contextualiser l'activité en cours et l'état de l'opérateur, pour interagir sur les interactions HM ; par la description systémique des tâches des opérateurs et du comportement du système ; et enfin par la mise en place d'allocation dynamique de fonction et le partage d'autorité.

Ensuite, les interfaces cerveau-machine (ICM) offrent des opportunités innovantes permettant des interactions «mains libres» (ICM actives) avec des systèmes complexes, ou une surveillance en temps réel des états cognitifs et émotionnels des opérateurs (ICM passives) afin de prioriser les informations critiques. En termes de verrous scientifiques (liés à la neurotechnologie, aux sciences cognitives et l'intelligence artificielle), la priorité est d'identifier des neuromarqueurs fiables et précis pour les différents états cognitifs, et de développer des algorithmes robustes de *machine learning* et de transfert learning capables d'assurer une résilience à la variabilité contextuelle. Il s'agit enfin de s'assurer que les ICM restent performants dans des contextes opérationnels dynamiques et bruyants (variations de posture, mouvements, bruits ambiants, etc.).

## Immersion et simulation virtuelle

Le développement d'outils de simulation immersifs pour la conception virtuelle de systèmes automatisés permet d'expérimenter de futures situations/scénarios d'usages et solutions d'interaction humain-machine adaptées. Les enjeux sont alors de développer des environnements virtuels de simulation suffisamment immersifs et réalistes, ce qui permettra la définition de jumeaux numériques pour ces systèmes exploitant les capacités humaines en termes cognitif et sensori-moteur.

## Formation

Les travaux précédents seront en outre utiles pour améliorer la qualité et la performance de la formation des opérateurs (notamment à l'utilisation des systèmes partiellement autonomes) et pour appréhender des situations complexes. Les outils de formation personnalisée dans un milieu immersif complexe posent des verrous scientifiques propres tels que de mettre en place une représentation réaliste des dynamiques physiques et sensorimotrices en milieux spécifiques, d'identifier des mesures fiables des états cognitifs et émotionnels, de concevoir des interfaces cerveau-machine pour la régulation de la charge cognitive et émotionnelle ainsi que de créer des métriques pertinentes et enfin de s'assurer de l'acceptabilité des outils par les opérateurs et les décideurs (transférabilité). Les méthodes de neuromodulation permettront en outre de former les opérateurs aux situations complexes ; il conviendra pour cela de mesurer l'efficacité et la durabilité des effets en contexte aéronautique.

### 3.3. Mise en relief de certains enjeux du premier ordre

Exploiter une quantité aussi importante d'information de nature aussi différente n'est pas une tâche facile, notamment pour réfléchir à un plan d'action. Il a donc été jugé nécessaire de mettre en valeur certains des 24 enjeux clés qui, en fonction de critères décrits ci-dessous, nous ont paru les plus importants au regard de la lettre de mission qui nous a été confiée.

Les critères adoptés pour évaluer « l'importance » d'un enjeu clé sont listés ci-après.

- Impact sur les produits de la filière : la levée des verrous associés à l'enjeu aura-t-elle un impact direct sur les produits industriels ?
- Enjeu de souveraineté : est-il important de lever les verrous dans un contexte national ?
- Caractère amont : parle-t-on bien de verrous scientifiques par opposition à des points durs de nature plus technologiques ?
- Dualité : les verrous à lever sont-ils d'intérêt pour l'aéronautique civile et de défense ?
- Point fort à soutenir : les sujets scientifiques à traiter constituent-ils déjà une force nationale ?
- À développer davantage : les sujets scientifiques à traiter doivent-ils davantage être soutenus en national ?
- Temps long : parle-t-on de recherches dont les retombées vont au-delà de 10 ans ?
- Existe-t-il un ou des verrous très critiques liés à l'enjeu ? Dans le sens : ce verrou est un « noeud » qui, levé, permettrait des avancées particulièrement significatives ?

En appliquant un système de notation de chacun des 24 enjeux avec ces critères ont émergé les 12 enjeux clés de premier ordre suivants, extraits du tableau 3 :

Problématique	Enjeux de premier ordre	
<b>A. L'aéronef dans son environnement : impacts et contraintes</b>	1	<b>Connaissance des impacts réciproques entre climat et aviation</b> : incertitudes sur les effets non-CO <sub>2</sub> / modélisation des impacts environnementaux / impact du climat sur l'aviation
	2	<b>Réduction des nuisances sonores</b> de la source à la perception du bruit : perception et nuisance sonores / sources et propagation du bruit / corrélations entre les impacts (bruit, pollution)
<b>B. Propulsion et Concepts aéronefs innovants</b>	5	<b>Nouveaux modes de propulsion et combustion haut rendement</b> / procédés et matériaux pour la combustion / émissions
	6	Impacts des <b>nouveaux combustibles</b> à bord (CSD, H <sub>2</sub> , NH <sub>3</sub> ) : résistance des matériaux et des structures, modes de stockage
<b>C. Matériaux et structures</b>	11	<b>Connaissance et représentation des matériaux</b> : procédés / approches multi-échelles / phénomènes non-linéaires / ambiances extrêmes
	12	<b>Matériaux avancés et fonctionnels</b> : procédés de fonctionnalisation / protection face aux agressions / gestion thermique
	13	<b>Recyclage et réparation</b> : métaux, composites, céramiques / éco-conception et sobriété : matériaux biosourcés, assemblages, frugalité
<b>D. Modélisation physique et expérimentation</b>	15	<b>Fiabilisation des modèles numériques et des expériences</b> : incertitudes / explicabilité / non-linéarités
	16	<b>Enrichissement des modèles</b> : réduction de modèles / approches multi-échelles / couplages multi-physiques / grands systèmes
	17	<b>Stratégies de calcul et de gestion de données numériques et expérimentales</b> : génie logiciel et algorithmique / fusion de données / hybridation données-physique
<b>E. Systèmes intelligents distribués et Interactions Humains / Systèmes</b>	19	<b>Architecture hardware et software embarquées</b> : puissance de calcul / adaptabilité
	24	<b>Interaction humain-système pour le pilotage, la navigation, la gestion du trafic</b> : caractérisation des opérateurs / coopération humain-machine pour la décision / optimisation de la relation humain-système / simulation virtuelle / formation

Tableau 4 : liste des 12 enjeux clés de premier ordre mis en relief

## 4. COMPÉTENCES NATIONALES : LES ACTEURS

L'activité de recherche nationale dans le domaine aéronautique est importante et portée par de nombreux acteurs. Afin de se faire une représentation du dynamisme de l'écosystème de recherche français dans ce domaine, nous avons croisé plusieurs indicateurs d'activité. Par exemple, un bilan bibliométrique utilisant l'outil d'analyse Scival (base Scopus) sur les années 2020-2023, fait ressortir 4245 publications RICL (revues internationales à comité de lecture) avec au moins un auteur d'une institution française sur la thématique Aérospatiale, 29 entités françaises ayant cosigné chacune plus de 100 articles pendant ces 3 années. Les 15 premiers contributeurs en nombre de publications sur ces années sont listés ci-dessous (tableau 5) :

Institution	Nb
<b>CNRS</b>	1626
<b>Université Fédérale Toulouse Midi-Pyrénées</b>	810
<b>Université Paris-Saclay</b>	480
<b>Office nationale d'études et de recherches aérospatiales</b>	404
<b>Centre national d'études spatiales</b>	336
<b>Airbus groupe</b>	314
<b>Sorbonne Université</b>	179
<b>Institut national des sciences appliquées Lyon</b>	174
<b>CentraleSupélec</b>	171
<b>Université PSL</b>	171
<b>Arts et métiers ParisTech</b>	167
<b>Université de Lille</b>	166
<b>Université de Lyon</b>	161
<b>École centrale de Lyon</b>	159
<b>Institut national de recherche en informatique et en automatique</b>	155

Tableau 5 : les 15 premières institutions dont le nom apparaît dans la liste des co-auteurs de publications sur la thématique Aérospatiale entre 2020 et 2023, et nombre de publications associé. Les co-publications sont comptées plusieurs fois. Remarque : L'Université Fédérale Toulouse Midi-Pyrénées s'appelle désormais Université de Toulouse

L'analyse des financements de projets de recherche a montré de même que, au niveau européen, les entités françaises ont participé à 1325 projets de recherche H2020 ou Horizon Europe sur 8958 projets au total sur le domaine aéronautique, entre 2014 et 2024 (soit 14,8 % des projets), pour des montants globaux de 1,280 Md€ (soit 22 % du budget total de 5,750 Md€). Cela fait de la France le premier pays en nombre de projets (H2020 ou Horizon Europe) acceptés, devant l'Espagne, l'Allemagne et l'Italie par ordre décroissant, et le premier pays aussi en termes de financements reçus, devant l'Allemagne, l'Italie et l'Espagne dans cet ordre.

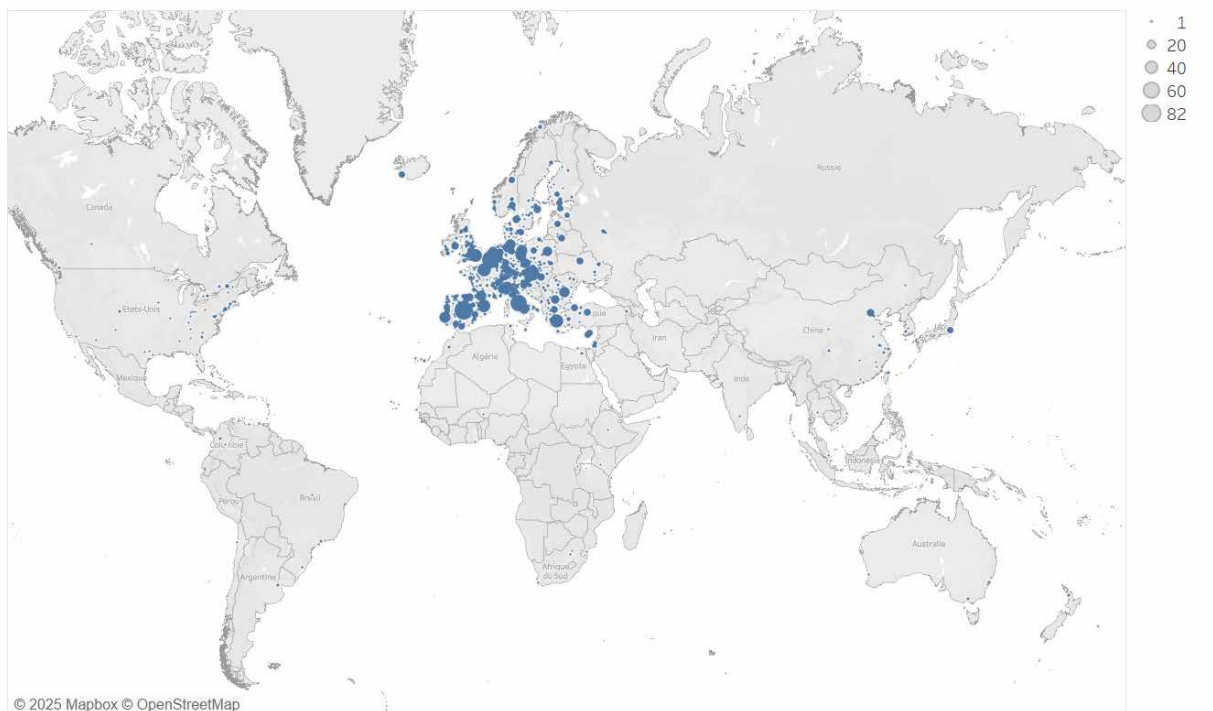


Figure 2 : nombre d'institutions impliquées par ville dans un projet H2020 ou Horizon Europe en lien avec la recherche aéronautique amont, entre 2014 et 2024

L'aérospatiale étant un domaine de haute technologie revêtant une forte dimension stratégique, il existe plusieurs niveaux d'organisation des acteurs de recherche avec un souci de souveraineté nationale. En France, l'ONERA (Office national d'études et de recherches aéros spatiales, qui regroupe aujourd'hui 2157 collaborateurs sur 8 sites nationaux) est un établissement public d'intérêt commercial (EPIC) ayant pour vocation depuis sa création en 1946 de faire le lien entre la recherche académique et la recherche industrielle. Aux côtés de l'ONERA, plusieurs réseaux associant laboratoires de recherche et industriels couvrent l'ensemble des régions de France. Ils sont de plusieurs types, à savoir : trois fédérations de recherche du CNRS (TTM, FERMaT, Ingelyse), trois pôles de compétitivité (AsTech en Île-de-France, Aerospace Valley en Nouvelle Aquitaine/Occitanie, SAFE en PACA), des clusters ou réseaux de type associatifs (ALTYTUD dans les Hauts-de-France, Aerospace cluster en région Auvergne-Rhône-Alpes, Aerocentre en Centre-Val de Loire, Aerotech en Bourgogne Franche-Comté, Bretagne Aerospace, Neopolia dans les Pays de la Loire, Normandie Aerospace, PIAC en Corse), de type technopole (Pegase en PACA), ou de type société par actions simplifiée (Aériades dans le Grand Est). Certains de ces clusters ne sont pas ouverts cependant à la recherche académique. Enfin, certains regroupements universitaires proposent des structures internes apportant une visibilité régionale aux activités d'enseignement ou de recherche en aéronautique : c'est le cas de la Fédération ENAC – ISAE SUPAERO – ONERA à Toulouse (2018), du Paris-Saclay Institute of Aeronautics and Astronautics (2022), du Campus Aéronautique et Transport à Poitiers (2020), ou du projet AVICAR (Mines d'Albi/Mines d'Alès). Cette structuration permet d'identifier les acteurs volontairement et historiquement actifs dans le domaine.



Figure 3 : réseaux régionaux des activités dans le domaine aéronautique. Entourées en marron, les structures avec une forte participation des laboratoires de recherche amont.



Figure 4 : évolution du nombre et du montant global des financements de l'ANR entre 2010 et 2024 (PIA et appels à projets), et du financement des projets européens entre 2010 et 2014 sur les thèmes aéronautiques.



Pour aller plus loin, une analyse des bénéficiaires des appels à projet financés par l'ANR, soit sur les budgets propres de l'ANR (Appel à projets génériques), soit en tant qu'opérateur pour le PIA<sup>12</sup> (par exemple le financement des projets des IRT – ITE) a été effectuée pour les projets acceptés entre 2014 et 2024, et ce à partir des données publiques de l'ANR (<https://www.data.gouv.fr>). Afin d'isoler les projets en lien avec l'aéronautique, l'analyse s'est appuyée sur une sélection par mots clés inclus dans le résumé. Un travail préliminaire sur un sous-échantillon nous a permis de converger sur la liste de mots clés suivants, issus de l'analyse des enjeux : aéronautique, aérospatiale, avionique, aéronef, avion, système propulsif, propulsion, vol. La recherche aéronautique amont, ainsi caractérisée, bénéficie au niveau national de financements conséquents de l'Agence Nationale de la Recherche (ANR), à commencer par les 23 projets PIA qui ont suivi la création en 2010 de l'IRT Jules Verne et de l'IRT St Exupéry, pour un montant total de 595,5 M€. L'ANR a financé par ailleurs sur appel à projets 572 projets entre 2010 et 2024 (avec une augmentation nette après 2020), pour un montant total de 252,9 M€, un montant élevé mais à peu près 3 fois plus faible que le financement obtenu par les équipes françaises (770,5 M€) depuis 2014 par le biais de projets européens (H2020 & Horizon Europe) et 23 fois plus faible (5,95 Md€) que le financement global alloué par la commission européenne sur ces thématiques.



Figure 5 : nombre de laboratoires impliqués dans un projet ANR dans le domaine de la recherche aéronautique amont, entre 2010 et 2024

<sup>12</sup>Programme d'investissement d'avenir – y compris France 2030.

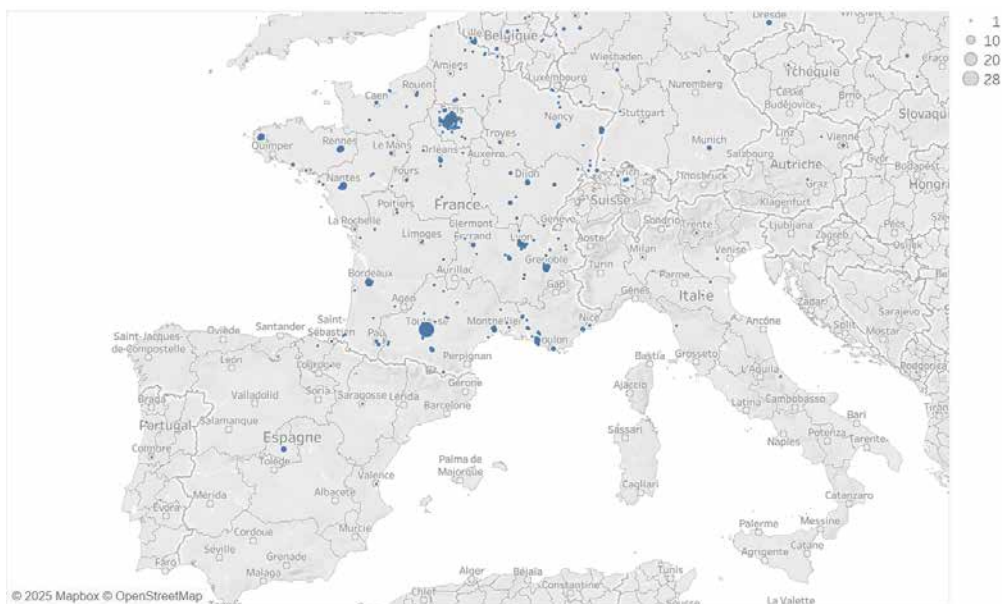


Figure 6 : zoom de la figure précédente sur la France

L'analyse des laboratoires français impliqués dans un projet ANR indique la participation d'un très grand nombre d'entités différentes : 774 laboratoires dont 482 entreprises, soit 292 laboratoires de recherche publique. Parmi ces très nombreux acteurs, une dizaine d'entre eux se démarque singulièrement par le nombre de projets ANR sur l'aéronautique auxquels ils ont participé depuis 2010, et une cinquantaine d'entre eux a participé à plus de 7 projets différents. On retrouve une cinquantaine de laboratoires ayant été financés à plus de 1 M€ par l'ANR sur cette période.

En conclusion, la recherche amont en aéronautique est portée par un grand nombre d'acteurs maillant l'ensemble du territoire français, avec deux pôles en région Île-de-France et en région Occitanie. Cependant, une cinquantaine d'entre eux se démarque, aux côtés de l'ONERA, pour leur activité particulièrement reconnue par l'ANR sur ce sujet.

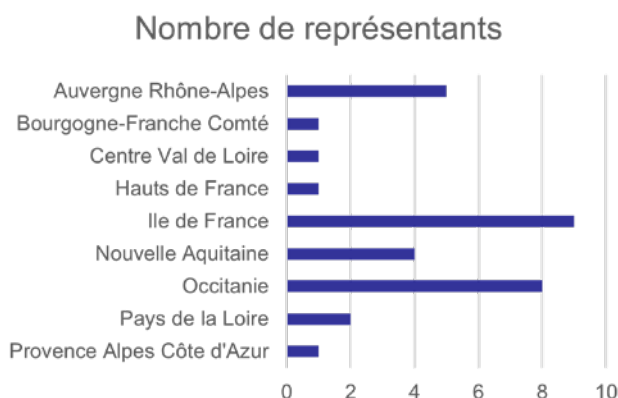


Figure 7 : répartition des acteurs du premier cercle en fonction de leur appartenance régionale. S'y ajoutent 5 structures nationales : ONERA, CNRS, CEA, IFPEN, Université Gustave Eiffel.

Le travail exposé dans cette feuille de route a bénéficié de la contribution directe de chercheurs issus de plus de 150 laboratoires de recherche nationaux, ayant accepté de partager leur analyse des verrous scientifiques à lever de façon à progresser dans chacun des 11 thèmes abordés.

Pour porter ce travail, 25 représentants d'institutions ou de laboratoires, reflétant le poids régional de l'activité de recherche en aéronautique (notamment à travers l'activité de publications et les chaires industrielles) ont été sélectionnés - en complément de l'ONERA - pour constituer le premier cercle des interlocuteurs impliqués dans la construction de cette feuille de route dédiée à la recherche amont dans le domaine. Il s'agit des acteurs suivants : CEA, Centrale Lyon, Centrale Nantes, CERFACS, CIRIMAT (Toulouse), CNRS INSIS, ENAC, ENSAM, FCLab (Belfort), Fédération de Recherche TTM (Lille), IFPEN, INSA Lyon, IPP, IPSL (Paris), IRT St Exupéry, ISAE Supaero, ISAE SupMeca, LAAS (Toulouse), Laplace (Toulouse), LOMA (Bordeaux), Mines PSL, Université Gustave Eiffel, Université Paris-Est Créteil, Université Paris-Saclay, Université de Poitiers.

L'Annexe 3 répertorie l'ensemble des laboratoires et leur contribution aux différents thèmes de la feuille de route.

## 5. RECOMMANDATIONS

Il s'agit ici non pas tant de faire un bilan des verrous mais plutôt de tenter de mettre en valeur certains (sans hiérarchie) qui paraissent particulièrement critiques pour le futur de l'aéronautique civile (et duale) ou présentant un intérêt moins mis en lumière habituellement – et de proposer des suites à ce travail conséquent ayant réuni un grand nombre d'acteurs, de façon à assurer au mieux son exploitation.

### Enjeux paraissant de première priorité :

- Les verrous et les compétences liés à l'**impact environnemental et aux effets non CO<sub>2</sub>** (enjeu 1) semblent de première importance non seulement pour leur rôle clé dans les orientations des technologies futures, de propulsion en particulier (objectif zéro émission), mais également pour pouvoir continuer à peser sur les recommandations des groupements scientifiques pour le climat (GIEC : groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat) et ainsi avoir toute notre place sur la définition des réglementations à venir (dont MRV : *Monitoring, Reporting, and Verification*). Les verrous scientifiques sont de premier ordre, et très bien traités au sein de la chaire Climaviation ; il convient de maintenir cet effort et des travaux à relatif long terme (> 10 ans), pour réduire les incertitudes sur ces effets en améliorant les modélisations associées.
- Les enjeux scientifiques autour du **bruit** (enjeu 2) sont aussi à considérer avec la plus grande attention, du fait de leur impact dans les produits de la filière (systèmes propulsifs en particulier), et plus largement le besoin à l'échelle nationale de se positionner sur les enjeux liés à la gêne ou contraintes sonores et leur impact possible sur le développement de l'aviation (aéroports), y compris les enjeux duaux (discrétion). Les enjeux scientifiques sont critiques (par exemple, lien entre gêne et bruit mesuré, etc.), avec des efforts nécessaires sur la simulation. Les équipes, réduites actuellement, pourraient être renforcées.
- La **combustion haut rendement** - y compris CSD/H<sub>2</sub>/NH<sub>3</sub> - (enjeu 5) est un enjeu qui restera clé, même avec l'essor de l'électrification et des nouveaux carburants car le savoir-faire, dans les outils (numériques et expérimentaux) et les méthodes sont transposables aux nouveaux carburants. Cela reste un domaine stratégique pour les produits développés et la filière, avec des acteurs industriels et de R&I leaders mondiaux, et tout autant en applications défense. Les verrous scientifiques restent nombreux (combustion, matériaux), pour améliorer le rendement ou la connaissance et la maîtrise de toute la variété des émissions.
- Le **stockage des combustibles bas carbone** à bord des avions (enjeu 6) est considéré comme le sujet critique sur la mise en œuvre des nouveaux combustibles (H<sub>2</sub>/NH<sub>3</sub>), et les développements technologiques doivent (continuer à) être accompagnés par des travaux scientifiques, notamment sur le comportement des matériaux. C'est à l'échelle nationale un domaine scientifique plutôt bien pourvu en termes d'expertise – il s'agit donc d'assurer une permanence active des travaux sur le sujet, avec une priorité probablement sur l'hydrogène.
- Les enjeux autour la **fiabilisation des modèles et des méthodes expérimentales** (enjeu 15), leur **enrichissement** (enjeu 16) et les **stratégies de calcul et de gestion des données** (enjeu 17) ont, de par le caractère générique de leurs verrous (application dans de nombreux domaines : mécanique, mécanique des fluides, thermodynamique, etc.) un très grand impact sur la qualité *in fine* des outils et donc des résultats. La dimension scientifique est particulièrement avérée ici. C'est également un sujet où les nouvelles technologies (IA, *big data*, quantique, etc.) ouvrent un grand champ des possibles (hybridation, fusion des données, etc.) au service d'enjeux clés (réduction de modèles, multi-physiques & multi-échelles, grands systèmes, jumeaux numériques, etc.). Les enjeux ne sont pas tant de gagner en performance pure mais le plus souvent de rendre les modèles plus robustes et d'élargir leur application. Ils ne présentent pas d'enjeu absolu de souveraineté nationale en tant que tel mais la maîtrise de nouvelles méthodes d'une part, et la capacité d'assistance des industriels par la recherche d'autre part, donnent un grand avantage, notamment dans la vitesse de développement des technologies. Les compétences sont à accompagner dans leur mutation (dans un contexte de concurrence internationale renforcée), plus que de les faire grandir en nombre. Il s'agit en outre d'enjeux soutenant la qualité des développements technologiques au-delà du seul domaine aéronautique.

- Les enjeux scientifiques de **connaissance et représentation des matériaux** (enjeu 11), **matériaux avancés et fonctionnels** (enjeu 12) et **recyclage et réparation des matériaux** (enjeu 13), conditionnent la mise à disposition de solutions technologiques avancées : amélioration de la prévision de comportement (aux conditions, au vieillissement), et développement de nouveaux matériaux (caractéristiques améliorées, notamment en conditions extrêmes, multifonctionnels). Les nouvelles méthodes (dont celles intégrant l'IA) permettent de lever plus rapidement et plus efficacement les verrous critiques (et donc de gagner en compétitivité) et d'ouvrir de nouvelles possibilités de matériaux adaptés, notamment pour intégrer la dimension environnementale des matériaux. La communauté nationale autour des matériaux est très large : il convient donc d'en assurer la cohésion, et l'évolution des compétences pour intégrer pleinement le potentiel du numérique.
- Le développement technologique des **architectures hardware et software embarquées** (enjeu 19) et ses répercussions en termes de capacité de calcul et donc de fonctionnalités exigent un appui scientifique – même s'il faut davantage en définir les contours dans le contexte d'évolution actuel (miniaturisation, certification, compréhension des architectures embarquées). Parce qu'il s'agit ici d'un véritable enjeu de souveraineté, les équipes de recherche publique seraient à renforcer, et surtout en visant une mutualisation au-delà du seul domaine aéronautique, étant données les forces limitées.
- L'enjeu croissant des **interactions humains-systèmes** (enjeu 24) ouvre un large domaine d'applications (systèmes embarqués, navigation, formation, etc.) avec des verrous scientifiques multidisciplinaires forts, notamment critiques sur le couplage du numérique, en particulier dans les systèmes automatisés, et des sciences cognitives où la France a des compétences reconnues (PEPR Ensemble). Il s'agit ici de mieux identifier les enjeux industriels et les domaines d'application, pour faire la promotion des solutions intégrant des modèles cognitifs et stimuler le développement des compétences surtout les liens pluridisciplinaires de ces équipes. Le caractère dual de ces enjeux est ici aussi à souligner.

Les verrous suivants méritent également une attention spécifique :

- L'enjeu de **conception des aéronefs sous exigences étendues** (enjeu 4) exige de penser la conception en intégrant la globalité du système de production (et non seulement le couplage produit / process) et les intermodalités. L'approche conceptuelle est à affiner (pour bien identifier notamment les verrous scientifiques, les outils et méthodes à développer) et à intégrer progressivement.
- La **propulsion électrique et la montée en tension** (enjeu 7) ont évidemment un impact sur la filière, et représentent un enjeu de souveraineté. Des travaux de recherche conséquents sont réalisés sur les batteries (PEPR Batteries dans France 2030), et il convient à l'avenir de valoriser ces travaux « génériques » par des développements plus ciblés sur les chimies à même de répondre aux enjeux aéronautiques. Les travaux FILAE (IRT St Exupéry), plus applicatifs et envisagés sur l'ensemble des verrous liés aux fortes tensions, sont lancés, ce qui permet de tisser des liens à établir avec la communauté industrielle, et envisager des travaux focalisés à mener dans d'autres cadres. Les systèmes pile à combustible constituent une solution complémentaire aux batteries très intéressante par exemple pour augmenter l'autonomie d'un aéronef à propulsion électrique (transport de passager mais aussi autres aéronefs dont les drones) ou pour réduire l'impact environnemental d'un aéronef kérosène hybridé avec une pile à combustible par exemple.
- La **propulsion disruptive** (enjeu 10) – au-delà des carburants décarbonés et de l'électrification des aéronefs – propose des évolutions en termes de systèmes de combustion, déjà envisagées depuis de nombreuses années. Il s'agit donc de poursuivre ces travaux et d'assurer une veille active sur des solutions émergentes.
- Le développement massif des **jumeaux numériques** (enjeu 18) attendu dans d'autres secteurs suppose ici de bien identifier le contenu scientifique pour accompagner les équipes industrielles. Parmi ces enjeux scientifiques, la génération automatique est peut-être le principal enjeu critique, et des développements sur les méthodes est à approfondir de sorte à accélérer leur utilisation et leur pertinence.
- La **certification de la complexité** (enjeu 21) est un enjeu souverain majeur dans le domaine aéronautique (et une de ses spécificités fortes). La simulation et l'intégration de l'IA a vocation à faire profondément évoluer les méthodes de certification, mais pose aussi des verrous forts en termes d'explicabilité de l'IA. Il faudra probablement renforcer les collaborations pluridisciplinaires entre les métiers aéronautiques (et les équipes scientifiques en soutien) et les équipes de recherche dédiées à l'IA – dans la poursuite des travaux de confiance IA (IRT System X).

**Les autres enjeux ne sont pas moins importants** mais peuvent avoir une dominante technologique (enjeux 8, 9, 14, 20, 22, 23) ou une application qui n'est pas forcément propre au domaine aéronautique (enjeu 3).

Dans les travaux menés, **la dimension transverse est en permanence interrogée** ; nous entendons ici « transverse » dans le sens où les verrous sont avant tout liés à des problématiques plus « amont », sur des sujets concernant un périmètre d'application bien plus large que le seul domaine aéronautique. **Il est particulièrement délicat d'essayer d'aborder les sujets transverses de façon assez complète**, car l'écosystème est démultiplié, et les verrous abordés appellent eux-mêmes des liens avec d'autres sujets scientifiques. Les sujets liés au numérique, aux moyens de calcul, aux technologies de l'information et de la communication (IA, données, cybersécurité, quantique) sont apparus dans quasiment tous les sujets ; il faudrait renforcer encore la définition de ce type de verrous, avec un champ d'expertise élargi.

**Un suivi à cinq ans des évolutions des verrous scientifiques et sociétaux devra par ailleurs aussi être envisagé**, au gré des avancées scientifiques bien entendu, mais aussi de l'évolution du contexte international (environnemental, économique, juridique, sociétal, etc.) et de nouvelles perspectives d'enjeux technologiques.

---

Au-delà de répertorier (autant que possible) les verrous rencontrés dans le domaine aéronautique et de tenter d'en mettre en valeur certains, ce recueil de verrous scientifiques est surtout **une base de travail pour stimuler les écosystèmes de la recherche et innovation autour des enjeux aéronautiques**. Il s'agit d'un travail par nature incomplet, qu'il convient de poursuivre.

**Ce document peut être exploité par différentes communautés, sous différents prismes :**

- La stimulation des **laboratoires et organismes de recherche** pour aller plus loin dans la réflexion scientifique : l'état de l'art scientifique doit-il être complété ? Comment affiner les verrous et développer les approches pertinentes pour les lever ? Certaines avancées scientifiques sont-elles des amorces à des innovations ? En particulier, il sera utile de renforcer les échanges entre les communautés identifiées dans cette feuille de route avec les communautés des domaines plus transverses.
- La prise de connaissance des **communautés industrielles** : les travaux menés peuvent permettre de mieux identifier, en face des technologies cibles, quels verrous scientifiques sont posés. Ils permettent aussi un enrichissement possible des approches et une fertilisation croisée avec les laboratoires impliqués sur des enjeux spécifiques, en particulier en se projetant sur le plus long terme.
- **À un niveau stratégique** (dont l'État), cela peut contribuer à définir des priorités de développement scientifique (contribuant aux avancées des acteurs socioéconomiques), dans les programmes nationaux ou internationaux, et à identifier un ensemble de forces nationales en mesure d'y répondre.

## Valorisation opérationnelle de cette feuille de route

Tout d'abord, elle peut contribuer à définir **l'orientation stratégique des établissements ayant trait au domaine, qu'ils soient publics (laboratoires) ou privés (entreprises...)**, et même ceux développant des connaissances dans les domaines clés dont l'aéronautique est l'un des applicatifs. En pratique, elle peut ainsi contribuer à une feuille de route scientifique des établissements, la vision stratégique ou la consolidation d'une vision technologique, ou un programme de travail pluriannuel. Cette feuille de route peut aussi aider à développer des compétences en interne, et des partenariats avec des établissements de recherche identifiés pour leurs expertises.

Cette feuille de route peut également aider à **construire les travaux à mener** par les entités de recherche publique et les acteurs privés, en lien avec les verrous scientifiques mentionnés :ancements de thèses et post-docs, en lien ou non avec les industriels, chaires ciblées sur des enjeux clés, etc. Les acteurs pourront se saisir également des opportunités existantes de dispositifs de recherche collaboratifs pour poursuivre les réflexions ou lancer des travaux dans un cadre aéronautique : collaborations entre les organismes de recherche, travaux menés dans le cadre IRT/ITE, PEPR en cours (batteries, cybersécurité, IA, quantique ...).

Elle peut également nourrir les autorités (et les acteurs dans certains cas) pour **la définition de nouveaux outils ou la définition des programmes**. Sur le plan européen, par exemple, cela peut alimenter la définition des appels à projets en cours d'Horizon Europe, et pointer la nécessité de mettre l'accent sur des enjeux et verrous aéronautiques en prévision du prochain programme cadre. Sur le plan national, elle peut aider à définir de nouveaux outils, si des opportunités se présentent, mettant en valeur la levée de verrous scientifiques avec plus particulièrement des exigences dans le domaine aéronautique.

Cette feuille de route a confirmé que l'aéronautique recèle de très nombreux enjeux et verrous scientifiques pour développer une vision, des architectures et des systèmes technologiques permettant à la France de maintenir un leadership industriel, tout en contribuant aux enjeux environnementaux et sociétaux. Le **cadre spécifique du domaine aéronautique** (temps de développement relativement long – malgré le raccourcissement des cycles de conception, complexité des exigences, primauté de la performance, etc.) **se prête bien à donner une perspective applicative à des travaux de recherche prospectifs**, notamment sur des domaines scientifiques fondamentaux qui, outre le domaine aéronautique, trouveront des débouchés pour de nombreux autres domaines industriels.



## 6. REMERCIEMENTS

---

L'exercice réalisé, à la demande de la DGRI, la DGA et la DGAC, n'aurait pu être mené à son terme sans l'implication et le dévouement sans faille d'un nombre considérable d'acteurs, dont une liste complète est répertoriée en annexe.

Les 7 auteurs de ce rapport qui ont constitué la *core-team* de pilotage de l'action tiennent à adresser leurs sincères remerciements à tous les contributeurs à cette réflexion, en particulier :

- aux pilotes et copilotes de chacun des 11 thèmes initiaux de travail qui ont su, par leur sens du travail collectif, leurs compétences et leur ouverture d'esprit, faire appel à un panel très large d'experts pour répertorier les informations contenues dans le document détaillé (non public) ;
- aux organisations qui ont constitué le premier cercle des acteurs, qui ont accepté que leurs équipes consacrent le temps nécessaire à cette réflexion ;
- à tous les autres contributeurs, au-delà de ce premier cercle par leur volonté de rejoindre les groupes thématiques pour y contribuer.

Nous tenons également à remercier le GIFAS qui a suivi l'avancement de cet exercice de longue haleine, ainsi que les 3 acteurs industriels (Jérôme Bonini pour Safran, Didier Tourrade pour Airbus et Serge Béranger pour Thales) qui ont fait l'objet d'interviews afin d'apporter un éclairage industriel des grands enjeux technologiques du futur au tissu national de la recherche aéronautique amont.



# ANNEXE

## Statistiques sur les projets ANR et répartition des laboratoires par thème

### Annexe 1 : Liste des laboratoires français publics et privés ayant participé à plus de 7 projets ANR entre 2010 et 2024 (représentant 30 % des projets financés par l'ANR sur cette période)

Le chiffre en colonne indique le nombre de projets ANR dans lesquels le laboratoire ou l'établissement est impliqué

Office national d'études et recherches aérospatiales	46
Institut P' : Recherche et Ingénierie en Matériaux, Mécanique et Énergétique	27
Airbus	25
Safran SA	25
Thales	22
Institut supérieur de l'Aéronautique et de l'Espace	20
Laboratoire d'Énergétique moléculaire et macroscopique, combustion	20
Complexe de Recherche interprofessionnel en Aérothermochimie	16
ARMINES	15
EADS France	15
Institut Clément Ader	13
Institut Franche-Comté Électronique Mécanique Thermique et Optique - Sciences et Technologies	13
Laboratoire d'Intégration des Systèmes et des Technologies	13
Centre européen de Recherche et de Formation avancée en Calcul scientifique	12
Centre interuniversitaire de Recherche et d'Ingénierie des Matériaux	12
Laboratoire d'Analyse et d'Architecture des Systèmes	12
Laboratoire des Sciences de l'Ingénieur, de l'Informatique et de l'Imagerie (UMR 7357)	12
Laboratoire des Sciences et Techniques de l'Information, de la Communication et de la Connaissance	12
Matériaux : Ingénierie et Science	11
Sciences et Ingénierie, Matériaux, Procédés	11
Institut de Mécanique et d'Ingénierie de Bordeaux	10
Institut d'Électronique et des Technologies du numérique (IETR)	10
Institut Jean Lamour	10
Laboratoire des Sciences des Procédés et des Matériaux	10
Laboratoire interdisciplinaire Carnot de Bourgogne – UMR 6303	10
Laboratoire Plasma et Conversion d'Énergie	10
Centre d'Élaboration de Matériaux et d'Études structurales	9
École nationale de l'Aviation civile	9
Institut de Combustion, Aérothermique, Réactivité et Environnement	9
Laboratoire de Mécanique des Fluides et d'Acoustique	9
Institut de Mécanique des Fluides de Toulouse	8
Laboratoire d'Acoustique de l'Université du Mans	8

Laboratoire de Météorologie dynamique	8
Laboratoire d'Électronique et de Technologie de l'Information	8
Procédés et Ingénierie en Mécanique et Matériaux	8
Centre Inria de l'Université de Rennes	7
Dassault	7
Laboratoire de Mécanique des Contacts et des Structures	7
Laboratoire de Tribologie et Dynamique des Systèmes	7
Laboratoire d'Étude des Microstructures et de Mécanique des Matériaux	7
Peugeot Citroen Automobiles SA	7
UMR 8520 - IEMN - Institut d'Électronique, de Microélectronique et de Nanotechnologie	7

## Annexe 2 : Focus sur les entreprises françaises privées ayant participé à plus d'un projet ANR entre 2010 et 2024

Le chiffre en colonne indique le nombre de projets ANR dans lesquels l'entreprise est impliquée

Airbus	25
Safran SA	25
Thales	22
EADS France	15
Dassault	7
Peugeot Citroën Automobiles SA	7
Xlim	6
Aubert & Duval	5
Snecma	5
EDF France	4
Arkema France	3
Astrium SAS	3
AXESSIM	3
ESI GROUP	3
Ingenuity i/o	3
Liebherr Aerospace Toulouse SAS	3
ZODIAC	3
ACB	2
ArcelorMittal	2
Areva	2
Constellium CRV	2
Continental Automotive France	2
Diotasoft	2
EDF R&D (Ecuelles-Moret)	2
Elliptika	2
Fibercryst	2

France Innovation Scientifique et Transfert (FIST SA)	2
Grenoble Images Parole Signal Automatique	2
Holo3	2
Ingénierie Mathématique et Calcul scientifique (Imacs)	2
Inpixon	2
Kineo Computer Aided Motion C A M	2
Mapaero	2
Marion Technologies	2
MBDA FRANCE	2
Mecano ID	2
Meteorage	2
Phasics	2
Phi-Meca Engineering	2
Poly-Shape	2
Rescoll	2
Roxel France	2
Sagem Défense Sécurité	2
SAMOVAR (Services répartis, Architectures, MODélisation, Validation, Administration des Réseaux)	2
STMicroelectronics SA	2

### Annexe 3 : Laboratoires français publics et privés ayant reçu plus de 1 M€ sur projets ANR entre 2010 et 2024

En colonne le montant total

Office national d'Études et Recherches aérospatiales	7549642,34
Institut P' : Recherche et Ingénierie en Matériaux, Mécanique et Énergétique	5714177,38
Laboratoire d'Énergétique moléculaire et macroscopique, Combustion	4073258,4
Laboratoire de Mécanique des Fluides et d'Acoustique	3990375,32
Armines	3756183,16
Complexe de Recherche interprofessionnel en Aérothermochimie	3521328,48
Laboratoire d'Intégration des Systèmes et des Technologies	2630390,37
Institut supérieur de l'Aéronautique et de l'Espace	2612809,34
Laboratoire d'Acoustique de l'Université du Mans	2590445,82
Laboratoire des Sciences de l'Ingénieur, de l'Informatique et de l'Imagerie (UMR 7357)	2290980,33
Centre interuniversitaire de Recherche et d'Ingénierie des Matériaux	2173621,23
Laboratoire de Mécanique, Modélisation et Procédés Propres	2167902,42
Laboratoire de Tribologie et Dynamique des Systèmes	2040041,4
Laboratoire d'Analyse et d'Architecture des systèmes	2037781,21
Laboratoire des Sciences et Techniques de l'Information, de la Communication et de la Connaissance	2030993,97
Institut Franche-Comté Électronique Mécanique Thermique et Optique - Sciences et Technologies	2001469,76

Institut de Combustion, Aérothermique, Réactivité et Environnement	1945673,2
Institut Clément Ader	1898400,16
Laboratoire d'Electronique et de Technologie de l'Information	1767522,51
Institut Pascal	1717457
Matériaux : Ingénierie et Science	1709817,8
Thales	1703342,47
Centre d'Élaboration de Matériaux et d'Études structurales	1686599,3
Institut Jean Lamour	1675529,81
Ea 4229 Laboratoire pluridisciplinaire de Recherche en Ingénierie des Systèmes, Mécanique et Energétique	1646499,68
Institut d'Électronique et des Technologies du numérique (IETR)	1645636,88
Procédés et Ingénierie en Mécanique et Matériaux	1599239,78
Laboratoire Plasma et Conversion d'Énergie	1583709,92
Laboratoire interdisciplinaire Carnot de Bourgogne - UMR 6303	1569140,41
Institut de Biologie du Développement de Marseille	1564426,92
Laboratoire des Sciences des Procédés et des Matériaux	1543650,84
Sciences et Ingénierie, Matériaux, Procédés	1519759,66
Institut de mécanique et d'ingénierie de Bordeaux	1502037,11
EADS France	1493134,99
École nationale de l'Aviation civile	1481066,69
Institut de Recherche sur les Lois fondamentales de l'Univers	1462569,37
Institut de Mécanique des Fluides de Toulouse	1439864,19
Centre Inria de l'Université de Rennes	1433251,2
UMR 8520 - IEMN - Institut d'Électronique, de Microélectronique et de Nanotechnologie	1426490,52
Airbus	1405226,6
Centre de Mise en Forme des Matériaux	1368662,1
Laboratoire de Mécanique des Contacts et des Structures	1366873,12
Institut de Chimie de la Matière condensée de Bordeaux	1256866,96
Département Physique Instrumentation Environnement Espace	1256567,88
Institut Néel	1251576,17
XLIM	1098949,44
Laboratoire d'Étude des Microstructures et de Mécanique des Matériaux	1086344,85
Centre européen de Recherche et de Formation avancée en Calcul Scientifique	1083408,66
Laboratoire d'Innovation pour les Technologies des Énergies nouvelles et les Nanomatériaux	1076192,16
Institut de Recherche en Informatique et Systèmes aléatoires	1073367,76
Institut de Recherche de Chimie Paris	1070083,16
Institut Lumière Matière	1047828,21

**Annexe 4 : Liste des laboratoires français et de leur implication par thème. Cette liste est construite sur la foi des participants à la feuille de route aéronautique. On retrouve les acteurs identifiés précédemment pour leur activité sur des projets ANR, ainsi que les acteurs du premier cercle choisis pour construire cette feuille de route (30 % des acteurs). On ne peut pas garantir l'exhaustivité, notamment dans les domaines d'expertise largement répandus en dehors du domaine aéronautique.**

Surligné en jaune ci-dessous : les laboratoires représentés par les acteurs du premier cercle. Ils représentent 30 % des acteurs identifiés sur l'ensemble des thèmes.

Surligné en bleu : laboratoires qui ne font pas partie des acteurs du 1<sup>er</sup> cercle mais dont les activités dans le domaine aéronautique sont importantes.

Laboratoire	Nom complet
<b>ONERA</b>	Office national d'Études et de Recherches aérospatiales
<b>ISAE-SUPAERO</b>	Institut Supérieur de l'Aéronautique et de l'Espace - SUPAERO
<b>PPRIME</b>	Laboratoire PPRIME
<b>EM2C</b>	Laboratoire Énergétique moléculaire et macroscopique, Combustion (EM2C)
<b>CORIA</b>	Complexe de Recherche interprofessionnel en Aérothermochimie
<b>CIRIMAT</b>	Centre interuniversitaire de Recherche et d'Ingénierie des Matériaux
<b>CERFACS</b>	Centre Européen de Recherche et Formation avancée en Calcul Scientifique
<b>MATEIS</b>	MATEIS
<b>Institut Clément Ader (ICA)</b>	Institut Clément Ader
<b>LAAS</b>	Laboratoire d'Analyse et d'Architecture des Systèmes
<b>ENAC</b>	École nationale de l'Aviation Civile
<b>ICB</b>	Institut de Chimie de Bourgogne
<b>LAPLACE</b>	Laboratoire Plasma et Conversion d'Énergie
<b>CEMES</b>	Centre d'Élaboration de Matériaux et d'Études structurales
<b>IMFT</b>	Institut de Mécanique des Fluides de Toulouse
<b>LAUM</b>	Laboratoire d'Acoustique de l'Université du Mans
<b>LEM3</b>	Laboratoire d'Étude des Microstructures et Mécanique des Matériaux
<b>LMFA</b>	Laboratoire de Mécanique des Fluides et d'Acoustique
<b>CEA LITEN Grenoble</b>	CEA LITEN (Laboratoire d'Innovation pour les Technologies des Énergies Nouvelles)
<b>CNES</b>	Centre National d'Études Spatiales
<b>LaMCoS</b>	Laboratoire de Mécanique des Contacts et des Structures
<b>LETI</b>	Laboratoire d'Électronique des Technologies de l'Information
<b>LTDS</b>	Laboratoire de Tribologie et Dynamique des Systèmes
<b>Cemef</b>	Centre de Mise en Forme des Matériaux
<b>Centrale Nantes</b>	École Centrale de Nantes
<b>Centres des Matériaux - Pierre Marie Fourt</b>	Centre des Matériaux des Mines Paris - CNRS
<b>CNRM</b>	Centre National de Recherches Météorologiques
<b>IJLRDA</b>	Institut Jean Lamour de Recherche en Dynamique et Analyse
<b>Institut Pascal</b>	Institut Pascal

<b>IRIT</b>	Institut de Recherche en Informatique de Toulouse
<b>LAMP</b>	Laboratoire de Mécanique de Paris
<b>LCTS</b>	Laboratoire Capteurs, Transducteurs, Signaux
<b>IEMN</b>	Institut d'Électronique, de Microélectronique et de Nanotechnologie
<b>INERIS</b>	Institut national de l'Environnement industriel et des Risques
<b>INRIA</b>	Institut national de Recherche en Informatique et Automatique
<b>INPT</b>	Institut national polytechnique de Toulouse
<b>IRCER</b>	Institut de Recherche sur les Céramiques
<b>LATMOS</b>	Laboratoire Atmosphères, Milieux, Observations Spatiales
<b>LIP6</b>	Laboratoire d'Informatique de Paris 6
<b>LMA</b>	Laboratoire de Mécanique et d'Acoustique
<b>Université de Lorraine</b>	Université publique
<b>Ampere</b>	Laboratoire Ampère (École Centrale de Lyon)
<b>Ecole de l'Air et de l'Espace</b>	École de l'Air et de l'Espace (École militaire de formation aéronautique)
<b>GEEPS</b>	Génie Électrique et Électronique de Paris
<b>GEM Nantes</b>	Groupe d'Études de la Mécanique Nantes
<b>IMT</b>	Institut Mines-Télécom
<b>INSA Lyon</b>	Institut National des Sciences Appliquées de Lyon
<b>LAERO</b>	Laboratoire d'Aérodynamique
<b>LAMIH</b>	Laboratoire d'Automatique, de Mécanique et d'Informatique industrielle et humaine
<b>LEGI</b>	Laboratoire des Écoulements géophysiques et industriels
<b>LGF</b>	Laboratoire Georges Friedel
<b>LISA</b>	Laboratoire interuniversitaire des Systèmes atmosphériques
<b>LOMA</b>	Laboratoire Ondes et Milieux complexes
<b>LSCE</b>	Laboratoire des Sciences du Climat et de l'Environnement - ICOS
<b>MSME</b>	Laboratoire de Modélisation et Simulation multi-échelles
<b>CEA GRAMAT</b>	CEA - Centre de Gramat
<b>Centrale Lyon</b>	CentraleSupélec - campus de Lyon (ex École Centrale de Lyon)
<b>Centrale Paris</b>	École CentraleSupélec - campus de Paris
<b>CETHIL</b>	Centre Thermique de Lyon
<b>ENSMa Poitiers</b>	École Nationale Supérieure de Mécanique et d'Aérotechnique
<b>G-SCOPE-COSYS</b>	G-SCOPE-COSYS (Groupement Scientifique Coopération et Systèmes)
<b>IFPEN</b>	Institut Français du Pétrole et des Énergies nouvelles
<b>IMSIA</b>	Institut des Mécaniques et des Sciences de l'Ingénieur d'Aix
<b>LMPS</b>	Laboratoire de Mécanique Paris-Saclay
<b>LMSSC</b>	Laboratoire de Mécanique des Structures et des Systèmes couplés
<b>M2P2</b>	Laboratoire de Mécanique, Modélisation et Procédés propres
<b>PRISME</b>	Laboratoire PRISME
<b>SATIE</b>	Laboratoire Systèmes et Applications des Technologies de l'Information et de l'Énergie
<b>UMET</b>	Laboratoire Unité Matériaux et Transformations
<b>Université de Limoges</b>	Université publique

<b>Université Paris Cité</b>	Université publique
<b>Centre Borrelli</b>	Centre Borelli
<b>CERAMATHS</b>	CERAMATHS
<b>CETIM Nantes</b>	Centre Technique des Industries Mécaniques – site de Nantes
<b>CNAM</b>	Conservatoire National des Arts et Métiers
<b>Euromov</b>	Laboratoire Euromov – Biomécanique et Mécanique du Mouvement
<b>Gipsalab</b>	Gipsa-lab (Laboratoire Grenoble Image Parole Signal Automatique)
<b>Institut Lumière Matière</b>	Institut Lumière Matière
<b>IRT Jules Verne</b>	Institut de Recherche technologique Jules Verne
<b>IRT Saint-Exupéry</b>	Institut de Recherche technologique Saint-Exupéry
<b>LJLL</b>	Laboratoire Jacques-Louis Lions
<b>LMFL</b>	Laboratoire de Mécanique des Fluides et des Lasers
<b>LVA</b>	Laboratoire de Vision et Apprentissage
<b>Mines Paris</b>	École des Mines de Paris (MINES ParisTech)
<b>Navier</b>	Laboratoire Navier
<b>PC2A</b>	PhysicoChimie des Processus de Combustion et de l'Atmosphère
<b>Université de Toulouse</b>	Université publique
<b>Université Paris Saclay</b>	Université publique
<b>Aero Astro MIT</b>	Department of Aeronautics and Astronautics - MIT
<b>AFIHM</b>	Association Francophone d'Interaction Homme-Machine
<b>AFXR</b>	Association Française du eXtended Reality (de réalité étendue)
<b>Air Parif</b>	Airparif - Association de surveillance de la qualité de l'air en Île-de-France
<b>ANITI</b>	Artificial and Natural Intelligence Toulouse Institute
<b>Arts et Métiers (I2M, LAMPA, PIMM)</b>	Institut Image (LAMPA), I2M (Bordeaux), PIMM (Paris) - Arts et Métiers
<b>CEA</b>	Commissariat à l'Énergie Atomique et aux Énergies Alternatives (générique)
<b>CEA Saclay</b>	CEA - Centre de Saclay
<b>CEA/DES</b>	CEA - Direction de l'Énergie Nucléaire (DES)
<b>CEREA</b>	Centre d'Enseignement et de Recherche en Environnement atmosphérique
<b>CERI MP</b>	Centre d'Enseignement, de Recherche et d'Innovation Matériaux et Procédés - IMT Nord Europe
<b>CMAF</b>	Centre de Mathématiques Appliquées (École Polytechnique)
<b>CM-EMP</b>	Centre de Morphologie Mathématique – École des Mines de Paris
<b>CNRS</b>	Centre National de la Recherche Scientifique
<b>CNRS Chimie</b>	CNRS - Institut de Chimie
<b>CNRS Ingénierie</b>	CNRS - Institut des Sciences de l'Ingénierie et des Systèmes (INSIS)
<b>CNRS Physique</b>	CNRS - Institut de Physique
<b>Concace</b>	COMposabilité Numérique and parallèle pour le CAIcul haute performanCE - Centre INRIA de Bordeaux (Projet)
<b>CONCORD</b>	CONCORD (Consortium pour la Conception Robuste distribuée – projet collaboratif)
<b>Consotium Open Turn</b>	Consortium OpenTURNS (Open source initiative for uncertainty treatment)
<b>CRISTAL</b>	Centre de Recherche en Informatique, Signal et Automatique de Lille
<b>EUROCONTROL</b>	Organisation européenne pour la Sécurité de la Navigation aérienne
<b>FEMTO-ST</b>	Institut FEMTO-ST (Franche-Comté Électronique Mécanique Thermique et



	Optique - Sciences et Technologies)
<b>FONISEN</b>	Fondation Nationale d'Innovation en Systèmes et Réseaux (FONISEN)
<b>FRH2 CNRS</b>	FRH2 (Fédération Rhône-Alpes de Recherche en Hydrogène)
<b>GDR (CMC)2</b>	Groupe de Recherche CNRS (Calcul Mathématique et Compléments pour la Chimie et la Chimie Quantique)
<b>GDR CNRS IG-RV</b>	Groupe de Recherche CNRS en Informatique Graphique et Réalité Virtuelle
<b>GDR CNRS IHM</b>	Groupe de Recherche CNRS Interaction Homme-Machine
<b>GDR FATATRACK</b>	Groupe de Recherche CNRS FATATRACK (méthodes formelles pour systèmes embarqués)
<b>GDR GLP</b>	Groupe de Recherche CNRS GLP (Géométrie, Logique, Programmation)
<b>GDR HEA</b>	Groupe de Recherche CNRS HEA (Hydro-Électricité et Applications)
<b>GDR I-GAIA</b>	Groupe de Recherche CNRS I-GAIA (Intelligence Artificielle, Gestion et Applications)
<b>GDR interaction Humain in Machine</b>	Groupe de Recherche CNRS Interaction Humain-Machine
<b>GDR MACS</b>	Groupe de Recherche CNRS MACS (Matériaux, Applications, Composants et Systèmes)
<b>GDR MePhy</b>	Groupe de Recherche CNRS (Mécanique Physique)
<b>GDR Robotique</b>	Groupe de Recherche CNRS Robotique
<b>GDR sécurité</b>	Groupe de Recherche CNRS Sécurité
<b>GDR SoC2</b>	Groupe de Recherche CNRS SoC2 (Systèmes sur puce)
<b>GDR TAMARYS</b>	Groupe de Travail CNRS TAMARYS
<b>GIS HEAD</b>	Groupement d'Intérêt Scientifique (GIS) HEAD (Human Experience and Design)
<b>GIS LARTISSTE</b>	GIS LARTISSTE (Laboratoire Arts, Sciences et Techniques) Plateau de Saclay
<b>GSMA</b>	Groupe de Spectrométrie Moléculaire et Atmosphérique
<b>SMS</b>	Laboratoire Sciences et Méthodes Séparatives
<b>SRMP-CEA Université Paris Saclay</b>	Service de Recherches de Métallurgie Physique
<b>INSA</b>	Institut National des Sciences Appliquées
<b>IP Paris (M4S, IMSIA, LMS, CMAP)</b>	Institut Polytechnique de Paris, regroupement de laboratoires M4S, IMSIA, LMS, CMAP
<b>IPSL</b>	Institut Pierre-Simon Laplace
<b>ISA</b>	Institut Supérieur d'Aéronautique
<b>ISAE-Supméca</b>	Institut Supérieur de l'Aéronautique et de l'Espace - Supméca
<b>L2EP</b>	Laboratoire d'Électrotechnique et d'Électronique de Puissance
<b>Ladhyx</b>	Laboratoire d'Hydrodynamique (LadHyX)
<b>LaMcube</b>	Laboratoire de Mécanique, Multiphysique, Multiéchelle
<b>LaMI</b>	Laboratoire de Mécanique et d'Ingénierie
<b>LIRIS</b>	Laboratoire d'InfoRmatique en Image et Systèmes d'information
<b>LISV</b>	Laboratoire d'Ingénierie des Systèmes de Versailles
<b>LMSM</b>	Laboratoire de Météorologie Dynamique
<b>LNCMI</b>	Laboratoire National des Champs Magnétiques Intenses
<b>LNE</b>	Laboratoire National de Métrologie et d'Essais
<b>ISAE (REDONDANT)</b>	Institut Supérieur de l'Aéronautique et de l'Espace
<b>MaxPlanck</b>	Max Planck Institute
<b>Mines Saint-Étienne</b>	École des Mines de Saint-Étienne

<b>NASA</b>	National Aeronautics and Space Administration
<b>PMMH</b>	Laboratoire de Physique et Mécanique des Milieux hétérogènes
<b>QUARTZ</b>	Laboratoire QUARTZ
<b>THALES</b>	Thales Group
<b>TNO</b>	TNO (Nederlandse Organisatie voor Toegepast Natuurwetenschappelijk Onderzoek)
<b>UMA ENSTA</b>	Unité de Mécanique appliquée de l'ENSTA Paris
<b>Université Gustave Eiffel (ex. IFSTTAR)</b>	Université publique
<b>Université Polytechnique Hauts de France</b>	École Polytechnique universitaire Hauts-de-France
<b>UTBM</b>	Université de Technologie de Belfort-Montbéliard
<b>Institute for Sustainable Aviation</b>	Institute for Sustainable Aviation
<b>LG2EPS (UMR8507)</b>	Laboratoire de Génie électrique de Paris - Systèmes
<b>ONERA - DMAS</b>	Département de Mécanique des Structures à l'ONERA
<b>ONERA départements</b>	Départements de l'ONERA
<b>ONERA/ DS</b>	Division Systèmes à l'ONERA
<b>Université Hauts de France</b>	Université publique
<b>UPHF</b>	Université Polytechnique Hauts-de-France

Laboratoire	Thème 1	Thème 2	Thème 3	Thème 4	Thème 5	Thème 6	Thème 7	Thème 8	Thème 9	Thème 10	Thème 11
	Architectures Aéronef Innovantes	Systèmes propulsifs	Systèmes embarqués et avionique	Matériaux et Structures	Trafic aérien	L'aéronef dans son environnement	Opérateurs et sciences humaines	La modélisation et la simulation mono- ou multi-physiques	Expérimentations avancées	Impact Environnemental	Système industriel et autres grands systèmes
<b>ONERA</b>	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
<b>ISAE-SUPAERO</b>	x				x	x	x			x	
<b>PPRIME</b>	x	x		x				x	x		
<b>EM2C</b>		x						x			
<b>CORIA</b>		x						x			
<b>CIRIMAT</b>		x		x				x			
<b>CERFACS</b>	x	x			x	x		x		x	
<b>MATEIS</b>									x		
<b>Institut Clément Ader (ICA)</b>	x			x					x		
<b>LAAS</b>	x					x		x			
<b>ENAC</b>	x				x		x			x	
<b>ICB</b>				x							
<b>LAPLACE</b>	x			x							
<b>CEMES</b>				x							
<b>IMFT</b>		x						x			

Laboratoire	Thème 1	Thème 2	Thème 3	Thème 4	Thème 5	Thème 6	Thème 7	Thème 8	Thème 9	Thème 10	Thème 11
LAUM								x	x		
LEM3								x			
LMFA								x	x	x	
CEA LITEN Grenoble	x			x				x			
CNES						x					
LaMCoS				x				x	x		
LETI				x							
LTDS				x					x		
Cemef				x							
Centrale Nantes							x		x		
Centres des Matériaux - Pierre Marie Fourn				x				x			
CNRM					x	x				x	
IJLRDA		x		x				x	x		
Institut Pascal								x			
IRIT					x						
LAMP						x					
LCTS				x							
IEMN				x							
INERIS										x	
INRIA							x	x			
Institut national polytechnique de Toulouse (INPT)				x							
IRCER				x							
LATMOS						x					
LIP6								x			
LMA				x				x	x		
Université de Lorraine	x										
Ampere	x					x					
École de l'Air et de l'Espace							x		x		
GEEPS				x							
GEM Nantes				x				x			
IMT	x										
INSA Lyon						x			x		x
LAERO						x					
LAMIH				x							
LEGI								x			
LGF				x							

Laboratoire	Thème 1	Thème 2	Thème 3	Thème 4	Thème 5	Thème 6	Thème 7	Thème 8	Thème 9	Thème 10	Thème 11
LISA						x					
LOMA						x					
LSCE						x					
MSME								x			
CEA GRAMAT						x					
Centrale Lyon	x			x							
Centrale Paris				x							x
CETHIL		x									
ENSMA Poitiers				x							
G-SCOPE-COSYS	x										
IFPEN	x	x						x		x	
IMSIA				x							
LMPS				x				x	x		
LMSSC								x	x		
M2P2		x						x			
PRISME		x									
SATIE				x							
UMET				x							
Université de Limoges				x							
Université Paris Cité										x	
Centre Borrelli								x			
CERAMATHS				x							
CETIM Nantes				x							
CNAM									x		x
Euromov							x				
Gipsalab						x					
Institut Lumière Matière				x							
IRT Jules Verne						x					
IRT Saint-Exupéry	x	x		x							
LJLL								x			
LMFL								x			
LVA								x	x		
Mines Paris	x			x							
Navier								x			
PC2A				x							
Université de Toulouse				x	x						
Université Paris Saclay				x						x	
Aero Astro MIT							x				
AFIHM							x				

Laboratoire	Thème 1	Thème 2	Thème 3	Thème 4	Thème 5	Thème 6	Thème 7	Thème 8	Thème 9	Thème 10	Thème 11
AFXR							x				
Air Parif										x	
ANITI	x										
Arts et Métiers (I2M, LAMPA, PIMM)				x		x		x	x		x
CEA	x	x		x			x	x	x		x
CEA Saclay				x				x			
CEA/DES									x		
CEREA								x			
CERI MP				x							
CMAP								x			
CM-EMP								x	x		
CNRS								x			
CNRS Chimie				x							
CNRS Ingénierie				x							
CNRS Physique				x							
Concace								x			
CONCORD				x							
Consotium Open Turn	x										
CRISTAL						x					
EUROCONTROL					x						
FEMTO-ST								x	x		
FONISEN					x						
FRH2 CNRS	x	x		x							
GDR (CMC)2				x							
GDR CNRS IG-RV							x				
GDR CNRS IHM							x				
GDR FATATRACK				x							
GDR GLP			x			x					
GDR HEA				x							
GDR I-GAIA									x		
GDR interaction Humain in Machine							x				
GDR MACS						x					
GDR MePhy				x							
GDR Robotique						x					
GDR sécurité			x								
GDR SoC2			x								
GDR TAMARYS				x							
GIS HEAD				x							
GIS LARTISSSTE	x										
GSMA						x					

Laboratoire	Thème 1	Thème 2	Thème 3	Thème 4	Thème 5	Thème 6	Thème 7	Thème 8	Thème 9	Thème 10	Thème 11
SMS				x							
SRMP-CEA Université Paris Saclay				x							
INSA						x					
IP Paris (M4S, IMSIA, LMS, CMAP)				x				x			
IPSL					x	x				x	
ISA					x						
ISAE-Supméca									x		x
L2EP		x									
Ladhyx								x			
LaMcube									x		
LaMI								x	x		
LIRIS									x		
LISV								x			
LMSM								x	x		
LNCMI		x									
LNE								x	x		
ISAE							x	x			
MaxPlanck							x				
MInes Saint-Étienne				x							
NASA							x				
PMMH				x							
QUARTZ								x	x		
THALES					x						
TNO							x				
UMA ENSTA								x			
Université Gustave Eiffel / IFSTTAR						x	x	x	x	x	
Université Polytechnique Hauts de France	x			x							
UTBM				x							
Université Hauts de France											x

## Contributeurs à la réflexion suscitée par la mission

Sont remerciés tous les contributeurs de la recherche publique française ayant contribué à la mission, en particulier :

J-M Allard  
Florence Ansart, Univ Toulouse  
Laurent Artola, ONERA  
Laurent Arurault, Univ. Toulouse  
Stéphane Aubert, Centrale Lyon LMFA  
Mathieu Aucejo, LECNAM  
B. Augère  
Eugénie Avril, UPHF  
Valérie Baco, Univ Toulouse  
Christophe Bailly, EC Lyon  
Claude Baron, LAAS  
Marc Bellenoue, ENSMA  
Thierry Bellet, UGE  
A. Benabou, L2EP Univ Lille  
Emmanuel Benard, ISAE-Supaero  
Stéphane Benayoun, EC Lyon  
Bruno Berberian, ONERA  
Laurent Berthe, CNRS  
Bruno Berthel, EC Lyon  
Nicolas Bertier, ONERA  
Eric Bideaux, INSA Lyon  
Jean-François Blachot, ONERA  
Christine Blanc, Toulouse INP  
Sébastien Boisseau, CEA  
Pierre Boivin, Univ AMU  
Vincent Bonnefoy, CEA  
Jacques Borée, P Poitiers  
Jean-Charles Bornard, UGE  
Pierre-Alain Boucard, ENS Paris-Saclay  
A. Bouchard  
Olivier Boucher, Univ Sorbonne IPSL  
Laurent Boudou, Laplace Univ Toulouse  
Alain Bouscayrol, L2EP Univ Lille  
Nathalie Brassart, IFPEN  
Saï Bravo, ENAC  
Philippe Cabon, Univ. Paris Cité  
Karine Caillault, ONERA  
Aymeric Canton, CEA

Gerald Carrier, ONERA  
G. Cayez  
Salim Chaki, IMT Nord Europe  
B. Chapuis, Univ Lyon 1  
Paola Cinnella, Sorbonne université  
Richard Clergereaux, Laplace Univ Toulouse  
Fabio Coccetti, IRT Saint Ex  
Mikael Colin, CEA  
Manuel Collet, EC Lyon  
Damien Connetable, Toulouse INP  
Stéphane Conversy, ENAC  
Laurent Cordier, Univ Poitiers  
Michel Coret, EC Nantes  
Christophe Corre, EC Lyon  
Sylvie Costil, UTBM  
Nathalie Couture, ESTIA  
Cutard, Mines Albi  
Karim Dahia, ONERA  
Davy Dalmas, EC Lyon  
Eric Dantras, Univ Toulouse  
Michael Darques, IRT Saint Ex  
Cécile Davoine, ONERA  
Sébastien Defoort, ONERA  
Frédéric Dehais, ISAE Supaero  
Christophe Delaveaud, CEA  
Scott Delbecq, ISAE-Supaero  
Thomas Delcol, IRT Saint Ex  
Alain Denoirjean, Unilim  
C. Desrayaud, EMSE  
Sombel Diaham, Laplace Univ Toulouse  
Jean-Luc Dion, ISAE-Supméca  
Elhadj Dogheche, UPHF  
Douin, CEMES  
Sylvain Drapier, EMSE  
André Dubois, UPHF  
Thomas Dubot, ONERA  
Sébastien Ducruix, CentraleSupelec  
Sandrine Duluard, Univ Toulouse



David Duvivier, Univ Polytechnique Hauts de France  
 Olivier Eichwald, Laplace  
 Claude Estournes, Univ Toulouse  
 Ludovic Fabre, ISAE  
 Béatrice Faverjon, INSA Lyon  
 Julien Favre, Mines Saint-Étienne  
 Ferrier, EMSE  
 Benoit Fiorina, CentraleSupélec  
 Eleanor Fontaine, ENSAM  
 Samuel Forest, Mines Paris PSL  
 Paola Formenti, CNRS  
 David Fraboulet, CEA  
 F. Fraczkiewicz, EMSE  
 Vincent Fridrici, EC Lyon  
 Quentin Gaillard, Mines Saint-Étienne  
 Cédric Galizzi, INSA Lyon  
 Laurent Gicquel, CERFACS  
 Pierre Gosselet, Univ Lille  
 Daniel Grande, Univ Paris-Est Créteil ICMPE  
 Marie Gressier, Univ Toulouse  
 Frédéric Grisch, INSA Rouen  
 Laurent Grosclaude, Univ Toulouse Capitole  
 François Gruson, L2EP  
 Denis Gueyffier, ONERA  
 Martial Haefelin, IPP  
 Grégory Haugou, UPHF  
 Anne Hemeryck, LAAS  
 Gilbert, Henaff, ISAE-ENSMA  
 Bruno Herisse, ONERA  
 Jean Hermetz, ONERA  
 Laurent Hespel, ONERA  
 Daniel Hissel, Univ Belfort FCLab  
 Laurent Houssin, LAAS  
 Béatrice Icard, CEA  
 Mohamed Ichchou, EC Lyon  
 Christophe Jallais, UGE  
 Laurent Joly, ISAE Supaero  
 Pierrick Joseph, ENSAM  
 Jean-Christophe Jouhaud, CERFACS  
 Karl Joulain, Univ. Poitiers  
 Isabelle Junqua, ONERA  
 Laurent Keirsbulck, Univ Polytechnique Hauts de France  
 Pierre Kerfriden, Mines Paris PSL  
 Christophe Kinkelin, CEA  
 Patricia Krawczak, IMT Nord Europe  
 Michael Kuhni, INSA Lyon  
 Manuel Kuhni, INSA Lyon  
 Catherine Lambert, CERFACS  
 Cécile Langlade, UTBM

Florence Laporterie-Dejean, ENAC  
 Christophe Laurent, Univ Toulouse  
 Franck Lauro, UPHF  
 Benjamin Leclaire, ONERA  
 Quentin Leclerc, INSA Lyon  
 Marion Leflem, CEA  
 Guillaume Legros, Sorbonne Université  
 Arnaud Leleve, INSA Lyon  
 Pascal Lenormand, Univ Toulouse  
 Annie Leroy, EAA Salon  
 W. Lhomme  
 Nathalie Limodin, Centrale Lille  
 Marie-Laure Locatelli, Laplace Univ Toulouse  
 Patrice Longere, ISAE Supaero  
 Hubert Maigre, INSA Lyon  
 Estelle Malavolti, ENAC  
 Cédric Malherbe, ENS Paris-Saclay  
 Xavier Margueron, L2EP Centrale Lille  
 Eric Markiewicz, Fédération TTM  
 Franck Mars, CNRS  
 Frédéric Marty, CNRS  
 Franck Massa, UPHF  
 Paolo Massioni, INSA Lyon  
 Mickaël Matrat, IFPEN  
 Michael Meheut, ONERA  
 Guilhem Michon, ISAE Supaero  
 Daniel Monceau, ENSIACET  
 Monchoux, CEMES  
 Raphaël Morvillier, CEA  
 Vincent, Moureau, CORIA  
 Naim, Naouar, INSA Lyon  
 N.K. Nguyen  
 Delphine Notta, UPHF  
 Philippe Novelli, ONERA  
 Mohammadi Ouafatouh, UPHF  
 Morvan Ouisse, FEMTO-ST  
 Philippe Palanque, ICS  
 Chung-Hae Park, IMT Nord Europe  
 Fabien Perdu, CEA  
 Nicolas Peteilh, ENAC  
 Jean-Marc Petit, LIRIS CNRS  
 Florence Pettinari, CEMES  
 Hubert Piquet, Laplace Univ Toulouse  
 Fabio Pistolesi, CNRS LOMA  
 Laurent Pizzagalli, Univ Poitiers  
 Jean-Philippe Poirot, CEA  
 Thomas Polacsek, ONERA  
 Pascal Reynaud, INSA Lyon  
 Michael Ridel, ONERA

Emmanuel Rigaud, EC Lyon  
Xavier Roboam, Laplace  
Christine Rousselle, Univ. Orléans  
Sébastien Rosini, CEA  
Antoine Ruffini, ONERA  
Pierre Sagaut, ENSMA  
Emilia Sanchez Gomez, MeteoFrance  
Jean-Christophe Sarrazin, ONERA  
Aurélien Saulot, INSA Lyon  
Laurent Selle, IMFT  
Thierry Schuller, IMFT  
Eric Semail, L2EP  
Patrick Senac, ENAC  
Sentenac, Mines Albi  
Modessar Shakoov, IMT Nord Europe  
Mickaël Sicard, ONERA  
Patrick Simon, Univ Toulouse  
Anne Tanguy, INSA Lyon  
Dome Tanguy, Univ Lyon  
Hélène Tattegrain, UGE  
Pierre Temple-Boyer, Univ Toulouse LAAS  
Yohann Thimont, Univ Toulouse  
Olivier Thomas, ENSAM  
Fabrice Thouverez, EC Lyon  
David Tomline Michel, ONERA  
Christophe Turpin, Laplace Univ Toulouse  
M. Valla  
Dmytro Vasiukov, IMT Nord Europe  
Franck Vial, CEA  
Arnaud Videt, Univ Lille  
Patrick Villechaise, ENSMA  
Rob Vingerhoeds, ISAE-Supaero  
Vinhola, LCTS Bordeaux  
Romain Vuillemot, LIRIS CNRS  
Jean-François Witz, Centrale Lille  
Stéphane Zaleski  
Redouane Zitoune, Univ Toulouse