

RÉALITÉS INDUSTRIELLES

« Se défier du ton d'assurance qu'il est si facile de prendre et si dangereux d'écouter »
Charles Coquebert, Journal des mines n°1, Vendémiaire An III (septembre 1794)



**L'industrie aéronautique face aux défis
de la concurrence et du changement climatique**



Publiées avec le soutien
de l'Institut Mines Télécom

UNE SÉRIE DES
**ANNALES
DES MINES**
FONDÉES EN 1794

RÉALITÉS INDUSTRIELLES

ISSN 2271-7978 (en ligne)

ISSN 1148-7941 (imprimé)

Série trimestrielle - Mai 2024

Rédaction

Conseil général de l'Économie (CGE)
Ministère de l'Économie, des Finances
et de la Souveraineté industrielle et numérique
120, rue de Bercy - Télédock 797
75572 Paris Cedex 12
Tél. : 01 53 18 52 68
<http://www.annales.org>

Grégoire Postel-Vinay
Rédacteur en chef

Alexia Kappelmann
Secrétaire générale

Daniel Boula
Secrétaire général adjoint

Magali Gimon
Assistante de rédaction et Maquettiste

Frédérique Linque
Webmestre et Maquettiste

Publication

Photo de couverture
Gulliver Flight Onera ©Onera

Iconographie
Alexia Kappelmann et Frédérique Linqué

Mise en page
Frédérique Linqué

Impression
Duplprint Mayenne

Membres du Comité de rédaction

Serge Catoire
Président du Comité de rédaction

Godefroy Beauvallet

Pierre Couveinhes

Jean-Pierre Dardayrol

Jean-Marc Grognet

Hervé Mariton

Grégoire Postel-Vinay

Françoise Roure

Rémy Steiner

Christian Stoffaës

Claude Trink

Benjamin Vignard

La mention au regard de certaines illustrations du sigle
« D. R. » correspond à des documents ou photographies
pour lesquels nos recherches d'ayants droit ou d'héri-
tiers se sont avérées infructueuses.

Le contenu des articles n'engage que la seule responsa-
bilité de leurs auteurs.

Introduction

05

Préface

Grégoire POSTEL-VINAY

06

Introduction

Stéphane MOLINIER

Les marchés et l'impact des réglementations

11

Les défis de la croissance du trafic et de la transition écologique

Damien CAZÉ

15

Prospective des marchés mondiaux de l'aéronautique, décarbonation et stratégie d'Airbus

Guillaume FAURY

18

La réglementation, la certification et leurs effets

Luc TYTGAT

22

Air Traffic Management

Raúl MEDINA

28

Le développement du trafic aérien, les compagnies aériennes et les effets de leur concentration

Pierre CAVÉ

36

Décarbonation de l'aérien et nouveau paradigme économique

Augustin de ROMANET

La décarbonation de la filière et les actions pour la compétitivité

40

L'action de la direction générale des Entreprises (DGE) en faveur de la filière aéronautique

Thomas COURBE

44

ATR dessine aujourd'hui la connectivité responsable de demain

Nathalie TARNAUD LAUDE

50

L'aviation générale, laboratoire de la décarbonation du transport aérien

Didier KAYAT

54

La propulsion hybride pour des VTOL : une solution qui associe performance et faibles émissions

Jean-Christophe LAMBERT

56

Les défis de la propulsion aéronautique décarbonée

Thibaud NORMAND et Éric DALBIES

61

Les hélices de forte puissance : des solutions performantes pour une aviation décarbonée

Jean-François CHANUT

66

La filière industrielle aéronautique et spatiale en route vers une aviation décarbonée

Frédéric PARISOT

69

Aerospace Valley et la mobilité aérienne légère décarbonée

Philippe LAGARDE

Les ruptures technologiques en réponse à la décarbonation du transport aérien

76

Airbus pionnier d'une aviation durable, pour un monde ouvert et respectueux de l'environnement

Alain DE ZOTTI et André BOURDAIS

82

CORAC : Conseil pour la recherche aéronautique civile

Pierre MOSCHETTI

85

La décarbonation de l'aviation passe par la recherche !

Bruno SAINJON

88

Les carburants d'aviation durables (CAD), levier incontournable pour la décarbonation du secteur aérie

Florence DELPRAT-JANNAUD,
Jean-Philippe HÉRAUD
et Julie LHOMME-MAUBLANC

94

Les défis de l'électrification

Magali VAISSIÈRE, Thomas DELSOL,
Lionel BOURGEOIS et Denis DESCHEEMAERKER

99

L'avion à hydrogène ZEROe : défis technologiques et impacts sur l'écosystème

Karine GUÉNAN

104

L'hybridation électrique au service de la décarbonation de l'aviation

Régine SUTRA-ORUS, Dr Christophe Viguié,
Dr Pierre Alain Lambert, Dr Stéphane Azzopardi,
Dr Thierry Lebey et Dr Bertrand Revol

112

Réduire la consommation énergétique des avions

Alain CASSIER

117

« Cybersécuriser » l'aviation, un enjeu essentiel

Yannick ASSOUAD

121

Jouer collectif pour booster notre compétitivité grâce au numérique, et gagner tous ensemble

Pierre FAURE

128

Apport et utilisation de l'IA dans le domaine de l'aéronautique

Pascal TEA et Guillaume SOULÉ

Compétences et talents

133

Adapter la formation et la recherche
aux besoins de la filière aéronautique,
dans un contexte global de transition
écologique

Olivier LESBRE

137

L'aéronautique face à son urgence :
booster les synergies pour que
les acteurs s'imposent une vision
commune et partagée

Francis MASSÉ

145

Les campus des métiers et qualifications,
et leurs apports à l'aéronautique

Christophe MEYRUEY

148

Traductions des résumés

154

Biographies des auteurs

Ce numéro a été coordonné
par Stéphane MOLINIER

Préface

Par Grégoire POSTEL-VINAY

Ingénieur général des mines, Rédacteur en chef des Annales des Mines

L'industrie aéronautique est un septuple symbole : de réussite industrielle pour notre pays dans un domaine de haute technologie ; de succès de travail en commun entre les entreprises et les puissances publiques ; de succès européen, ayant permis de remonter une situation initialement dominée par les États-Unis et faire actuellement mieux qu'eux ; d'accroissement de la liberté pour un nombre de plus en plus grand de clients avides de connaître le monde ; de contribution positive à notre commerce extérieur ; de coopération duale, où la recherche pour la motorisation des avions requis par la défense sert aux avions civils, et où réciproquement le succès des avions civils donne une assise suffisante pour assurer une industrie de souveraineté ; de coopération territoriale dans les régions où elle représente un atout majeur.

Simultanément, elle est confrontée à des défis considérables : la lutte contre le changement climatique impose des évolutions majeures, technologiques, mais aussi liées aux usages, à la diplomatie pour disposer d'un cadre équilibré et d'objectifs communs. Elle implique une mobilisation de moyens humains et financiers de grande ampleur pour répondre aux investissements nécessaires. D'autre part, la compétition internationale, longtemps cantonnée pour l'essentiel aux États-Unis et à l'Europe, reste intense entre ces deux entités (le programme de l'IRA américain en témoigne), et se diversifie par ailleurs.

Ces enjeux nécessitent d'abord une coordination internationale : si la France agissait seule sous une forme contraignante sans que ce soit suivi par d'autres pays, cela n'aboutirait pas à une diminution, mais à un accroissement des émissions de gaz à effet de serre, en même temps qu'une perte d'un atout économique, stratégique, et social de premier plan. En l'espèce, l'accord obtenu par les gouvernements à l'OACI d'arriver à la neutralité carbone en 2050 crée bien le cadre international requis, et la France a joué un rôle notable pour cela. Simultanément à cette action publique, l'IATA et l'ATAG ont, pour les transporteurs aériens et les constructeurs, pris des engagements semblables.

Ils demandent ensuite une coopération européenne, et là aussi, elle existe tant par les efforts menés en R&D au niveau de l'UE que par les programmes en coopération bilatérale.

Ils requièrent des actions cohérentes au niveau national : qu'il s'agisse de la R&D avec le CORAC, de l'évolution des aéroports pour tenir compte des nouveaux carburants et d'une électrification accrue, de la planification énergétique pour avoir des objectifs réalistes en matière de carburants décarbonés, des formations initiales et permanentes requises pour un verdissement accéléré de la filière, en partenariat avec les régions, et aussi de dispositions législatives qui ont été prises pour une plus grande sobriété lorsque coexistent des moyens de transport quasi équivalents sur courtes distances, où les moins émetteurs de gaz à effet de serre sont privilégiés.

Ces enjeux sont décrits par ce numéro des *Annales des Mines*, conçu pour en éclairer différentes facettes, et permettre aux acteurs de se positionner en connaissance de cause. Je souhaite qu'il contribue ainsi à rendre possibles les évolutions nécessaires, et que la France qui a été pionnière dans l'aéronautique continue, face aux enjeux nouveaux, de tracer des voies d'avenir.

Introduction

Par Stéphane MOLINIER,

Ingénieur général des mines et membre du Conseil général de l'Économie

Poursuivre l'aventure humaine du transport aérien et offrir les mêmes chances de voyage aux générations futures avec l'enjeu de la neutralité carbone en 2050 impose à toutes les parties prenantes du secteur aéronautique des investissements massifs dans la chaîne de production et la décarbonation, dans un contexte de croissance du trafic et de mise en tension de la chaîne de valeur résultant des crises sanitaires et géopolitiques.

Atteindre la neutralité carbone en 2050 oblige à mobiliser plusieurs leviers : le renouvellement des flottes par des avions plus performants, plus légers, plus efficaces ; la quête de sobriété et de performance grâce aux progrès technologiques ; l'électrification ; le développement de carburants de substitution au kérosène : les carburants d'aviation durables et l'hydrogène ; l'optimisation des opérations au sol comme en vol ; l'incitation par la réglementation ; la compensation des émissions résiduelles ; l'adaptation des compétences de la filière ; et enfin l'implication des consommateurs.

Depuis le début du XX^e siècle, le transport aérien est passé du temps des pionniers et des voyages d'exception à celui d'un monde ouvert, connectant les hommes et les femmes, les territoires, permettant les échanges avec les régions enclavées ou insulaires, l'accès aux soins et à la culture, soutenant le développement des économies.

La crise sanitaire de 2020, la montée en puissance des visioconférences, les enjeux climatiques, ont certes réduit le taux de croissance du trafic aérien ; néanmoins, il reste en croissance. Et face à cette croissance attendue par les acteurs de l'aéronautique dans les prochaines décennies, et à la prise de conscience de l'impact de l'aviation sur le changement climatique, **Damien Cazé** (DGAC) rappelle que les acteurs du domaine, industriels et aéroports membres de l'Air Transport Action Group (ATAG), compagnies aériennes membres de l'Association du transport aérien international (IATA), et gouvernements réunis au sein de l'Organisation de l'aviation civile internationale (OACI), font ensemble le pari de poursuivre cette aventure humaine et d'offrir les mêmes chances de voyage aux générations futures tout en affirmant leur engagement à atteindre la neutralité carbone en 2050, en appui à l'objectif de l'Accord de Paris de limiter le réchauffement planétaire à 1,5°C.

Selon Airbus, après la brutale chute du trafic aérien due à la pandémie, le transport aérien a retrouvé progressivement son niveau de 2019, avec une croissance qui semble désormais repartir à un rythme de l'ordre de 3,6 % par an. Cela conduit à la production de 40 850 avions au cours des vingt prochaines années. **Guillaume Faury** (Airbus) présente les défis à relever par Airbus, pionnier d'une aviation décarbonée, et sa chaîne de sous-traitants mise sous tension par la forte demande, mais affaiblie par la crise.

À l'échelle mondiale, en 2019, le transport aérien représentait 2,5 % des émissions de CO₂ d'origine humaine, 3,5 % en ajoutant les effets dits « non CO₂ ». Les émissions directes des aéronefs en phase d'exploitation représentent 98 % des émissions générées par la filière aéronautique, scope 1 des compagnies aériennes, ou scope 3 des constructeurs d'aéronefs selon la classification du "Green House Gas Protocol". La décarbonation du transport aérien est donc un enjeu majeur.

Luc Tytgat (EASA) présente le rôle joué par l'Agence européenne de la sécurité aérienne dans la supervision de cette transition vers une aviation décarbonée, assurant la sécurité et adaptant les cadres réglementaires pour soutenir l'innovation et la durabilité environnementales. La phase de certification des nouveaux équipements, des nouveaux carburants, sera d'autant plus critique que les prochains programmes seront innovants. Elle se prépare donc très en amont, en collaboration entre industriels, institutions de recherche et organismes réglementaires.

Raúl Medina (EUROCONTROL) donne un aperçu des principaux défis à relever par la gestion du trafic aérien (ATM). L'ATM gère l'espace aérien de manière sûre, sécurisée, rentable et durable pour répondre à la demande de trafic. Après une présentation des dernières statistiques du trafic aérien européen, l'article aborde les défis à long terme de la décarbonation et de la numérisation de l'ATM ainsi que l'impact de l'intelligence artificielle.

Pierre Cavé (BDO) fait le point sur l'évolution du trafic aérien mondial qui atteint, avec 4,4 milliards de passagers transportés en 2023, 94 % de son niveau de 2019, après une chute de 60 % en 2020. BDO estime que le trafic aérien atteindra les 8 milliards de passagers d'ici vingt ans, croissance principalement portée par les marchés non matures aujourd'hui : Asie-Pacifique, Moyen-Orient, Afrique et Amérique latine, en lien avec la croissance démographique et la hausse du PIB.

Augustin de Romanet (ADP) rappelle que si le transport aérien a longtemps bénéficié d'une image très positive, associée au rêve et au progrès, l'enjeu de la lutte contre le réchauffement climatique entraîne un changement de l'attitude du consommateur, avec le risque de le voir se détourner de l'avion, et avec un accroissement des obligations réglementaires pour limiter les émissions.

Assurer la compétitivité de la filière tout en œuvrant à la décarbonation

Doubler la flotte mondiale d'ici 2042 dans un contexte de décarbonation de la filière va demander un investissement de grande ampleur en recherche et développement et en capacité d'industrialisation, alors que la filière se trouve confrontée à une succession de crises.

Thomas Courbe (DGE) rappelle que la DGE accompagne la dynamique de transformation des 4 480 entreprises du secteur, fleuron français et enjeu de souveraineté majeur, en coopération avec le GIFAS et les ministères des Transports et des Armées notamment, avec en particulier le contrat stratégique de la filière aéronautique signé en 2023.

Frédéric Parisot (GIFAS) présente l'action du GIFAS pour structurer la "supply chain" aéronautique et la rendre résiliente, souveraine, cyber résistante, compétitive dans un marché mondial, tout en réduisant son empreinte environnementale. En application de l'article 301 de la loi climat et résilience, la feuille de route de décarbonation du transport aérien a été construite sous le copilotage de la DGAC et du GIFAS, en anticipant la stratégie nationale bas carbone 3 dont l'adoption est prévue en 2024.

Nathalie Tarnaud Laude (ATR) présente la démarche d'amélioration continue de l'avionneur régional ATR pour optimiser l'utilisation des turbopropulseurs de ses appareils, tester les biocarburants et étudier l'hybridation légère, qui combine un nouveau moteur thermique avec un moteur électrique et des batteries.

Didier Kayat (Daher) présente la démarche incrémentale de décarbonation de Daher. À la fois avionneur et équipementier aéronautique, Daher a adopté une approche multiaxe autour de la propulsion, l'allègement, et l'aérodynamique.

Jean-Christophe Lambert (Ascendance) propose une propulsion hybride électrique pour des VTOL (*vertical take-off and landing*), formes d'aéronefs positionnées comme des alternatives à l'hélicoptère. Cette innovation conduit à développer la capacité à distribuer électriquement la propulsion sur de nombreux moteurs électriques et hélices, apportant une redondance et une sûreté accrues.

La décarbonation de l'aviation passe aussi par une approche globale de toute la chaîne de production, de la conception au démantèlement, avec la réduction des scopes 1 et 2 des constructeurs, comme le rappellent **Alain De Zotti**, **André Bourdais** (Airbus) et **Nathalie Tarnaud Laude** (ATR), avec une attention particulière portée à la diminution des déchets et à la recyclabilité des pièces après démantèlement des avions en fin d'exploitation.

Pour atteindre la neutralité carbone en 2050, plusieurs leviers d'action devront être mobilisés

Le renouvellement des flottes : premier facteur de réduction de 20 % à 30 % des émissions

Le renouvellement des flottes par des avions plus performants, plus légers, plus efficaces (génération 2018) permet aux compagnies aériennes de tirer bénéfice de la recherche, des développements et investissements industriels, et de réduire de manière importante les émissions par passager-kilomètre (20 % environ). En 2024, seulement 20 % des flottes mondiales sont constituées d'avions de dernière génération.

À l'horizon 2035-2040, de nouvelles générations d'appareils amèneront des gains supplémentaires en termes d'émissions. L'acquisition par les compagnies aériennes d'aéronefs de nouvelle génération suppose la conception et l'industrialisation d'une gamme complète d'appareils d'efficacité énergétique accrue, capables d'utiliser des énergies bas carbone (électricité, carburants d'aviation durables, hydrogène), et à forte efficacité économique et environnementale.

Un scénario de renouvellement raisonnablement optimiste correspond à un taux de renouvellement de 5 % par an en moyenne, équivalent à un âge moyen de retrait après vingt ans d'exploitation.

La quête de sobriété et de performance grâce aux progrès technologiques, amélioration continue et défis de l'électrification

Grâce aux progrès technologiques et opérationnels, les émissions unitaires, c'est-à-dire par passager et kilomètre parcouru ont été divisées par cinq depuis 1960, et par deux depuis 1992.

À l'horizon 2050, le progrès technologique contribuera à une réduction globale des émissions de CO₂ du secteur aérien de l'ordre de 40 % en termes de kg/passager-kilomètre, en intégrant le renouvellement des flottes avec les technologies actuelles et les gains des technologies futures.

Pierre Moschetti (DGAC) présente le modèle original du CORAC, Conseil pour la recherche aéronautique civile, organe de concertation et de dialogue stratégique entre l'État et les industriels qui permet d'accélérer et de structurer, depuis 2008, les efforts de R&D de la filière et le soutien de l'État pour apporter une solution aux défis de la décarbonation du secteur. Le programme d'innovation du CORAC est coordonné avec Clean Aviation Joint Undertaking, principal programme de recherche et d'innovation aéronautique de l'Union européenne lancé en 2021.

Bruno Sainjon (ONERA) présente les nombreux partenariats et axes de recherche de l'ONERA, acteur central de la recherche aéronautique, spatiale et de défense, impliqué dans plusieurs projets européens dans le cadre de "Clean Aviation", notamment déclinés en trois thèmes de recherches : motorisation plus efficace à émissions réduites ; cellule avion et intégration motrice innovantes ; et enfin impact environnemental et climatique.

Alain De Zotti et André Bourdais (Airbus), **Alain Cassier** (Académie de l'Air et de l'Espace) explorent les voies d'amélioration permettant de réduire l'énergie consommée pour voler : aile volante, augmentation de l'envergure, optimisation de l'aérodynamique, contrôle de la laminarité à la surface des ailes, intégration de la motorisation sous l'aile ou à l'arrière du fuselage, amélioration de l'efficacité thermopropulsive des moteurs à soufflante carénée ou non, optimisation des échanges d'énergies *via* un réseau électrique à forte puissance.

Éric Dalbies et Thibaud Normand (Safran) rappellent que la propulsion aéronautique constitue un levier majeur de décarbonation du secteur aérien. L'article présente plusieurs pistes d'innovation pour les systèmes propulsifs : efficacité énergétique du moteur pour réduire la consommation de carburants d'autant plus nécessaire que le prix des carburants d'aviation durables ou de l'hydrogène est élevé ; électrification des moteurs et des systèmes non propulsifs ; propulsion hybride électrique-turbine à gaz ; architecture non carénée Open Fan.

Les gains importants qui peuvent être obtenus par des modifications de l'architecture des avions et de leur voilure sont les plus risqués financièrement et techniquement.

Karine Guénan (Airbus) présente les défis technologiques de l'avion à hydrogène ZEROe propulsé par des piles à combustible ou des moteurs à combustion d'hydrogène. La très faible densité de l'hydrogène nécessitera un stockage sous forme liquide LH₂ à température cryogénique (20°K soit - 253°C). Dans les deux cas, l'eau remplace le CO₂ comme produit essentiel de l'extraction d'énergie du carburant, générant des traînées de condensation dont l'impact sur le climat reste à étudier.

Jean-François Chanut (Ratier-Figeac) présente des projets d'innovation ayant pour objet l'optimisation des systèmes d'hélices et le développement de nouvelles architectures de contrôle d'hélices pour la propulsion hybride électrique et pour l'optimisation aéro-acoustique.

Philippe Lagarde (Aerospace Valley) explore différentes technologies de propulsion pour l'aviation légère (Projet MAELE), tremplin à l'aviation commerciale décarbonée dont les premières réalisations n'apparaîtront que lors de la prochaine décennie.

L'article de Safran Tech (**Régine Sutra-Orus, Christophe Viguier, Pierre Alain Lambert, Stéphane Azzopardi, Thierry Lebey et Bertrand Revol**) développe quelques challenges à résoudre dans le cadre d'une plus grande électrification liée à l'hybridation électrique des moteurs, tels que les décharges partielles, les arcs électriques, ou la mise en œuvre de technologies supraconductrices.

Magali Vaissiere, Thomas Delsol, Lionel Bourgeois et Denis Descheemaeker (IRT Saint Exupéry) présentent les verrous technologiques clés de l'électrification de l'aviation traités par le projet FILAE « FILière Aéronautique Électrique ».

Pour réduire la consommation, Airbus, Safran Tech ou l'IRT Saint Exupéry soulignent l'importance des travaux visant à réduire la masse des aéronefs avec, notamment, une plus grande utilisation des matériaux composites, le développement des procédés de fabrication additive, la réduction de la masse des systèmes avioniques et électriques, le remplacement des systèmes hydrauliques et pneumatiques par des systèmes électriques, et l'électrification des systèmes embarqués.

Le développement des carburants d'aviation durables et de l'hydrogène

À ce jour, l'essentiel des vols sont propulsés grâce à la combustion de kérosène d'origine fossile. Les combustibles liquides non fossiles à fort contenu énergétique candidats au remplacement du kérosène sont l'hydrogène et les carburants d'aviation durables (CAD) ou *sustainable aviation fuels* (SAF). Les CAD sont conçus pour être compatibles avec les moteurs d'avion existants, et peuvent d'ores et déjà être utilisés en mélange jusqu'à 50 % avec le kérosène sans perdre les propriétés du carburant classique. Cette limite peut être relevée en introduisant des aromatiques de synthèse, pour atteindre progressivement 100 % de CAD.

Florence Delprat-Jannaud, Jean-Philippe Héraud, et Julie Lhomme-Maublanc (IFP Énergies nouvelles) présentent les différentes voies de production des CAD à partir de la biomasse lignocellulosique, glucidique ou

oléagineuse, d'huiles de cuisson usagées ou de graisses animales (biocarburants) ou à partir d'eau et de CO₂ capté dans l'atmosphère par la voie dite des électrocarburants (*e-fuels*). Les CAD à base de biomasse peuvent réduire de 80 % les émissions de gaz à effet de serre tout au long du cycle de vie de l'avion.

Le développement d'une filière de carburants aéronautiques durables et l'incorporation croissante de ces derniers nécessitent de créer des unités de production. L'ATAG évalue le besoin de CAD entre 330 et 445 millions de tonnes par an à partir de 2050 pour la filière. Compte tenu des enjeux spécifiques à la biomasse et des quantités majeures d'électricité verte nécessaires pour produire des électrocarburants, ces carburants présenteront un coût élevé, et le secteur aéronautique sera confronté à une forte concurrence pour accéder à ces énergies décarbonées.

L'optimisation des opérations au sol et adaptation des infrastructures

L'adaptation des procédures opérationnelles au sol et des équipements disponibles constitue également un facteur de réduction des émissions de gaz à effet de serre. Les technologies pour décarboner les engins évoluant en piste autour des avions pour assurer le traitement de l'escale sont matures, mais l'équilibre économique de ces solutions est parfois difficile à trouver.

Augustin de Romanet (ADP) présente la stratégie du Groupe ADP pour « devenir un *hub* de connectivité multimodale, offrant le mode de transport au plus faible impact environnemental pour chaque destination ». Il s'agit de développer les mobilités douces et les transports en commun pour accéder aux aéroports, d'électrifier les points de parking avions et les opérations au sol pour alimenter les avions, d'adapter des infrastructures aéroportuaires aux nouvelles formes d'avions, de sécuriser l'approvisionnement, de garantir la distribution en carburants alternatifs, et d'anticiper le déploiement de nouvelles infrastructures pour l'approvisionnement de l'aéroport et l'avitaillement des avions en hydrogène.

Les constructeurs et les compagnies aériennes ont également défini des procédures opérationnelles vertes telles que la limitation de l'utilisation des inverseurs de poussée à l'atterrissage ou le roulage avec un moteur éteint.

L'optimisation des opérations en vol, jusqu'à 10 % de réduction des émissions

La maîtrise des opérations en vol des avions conduit aussi à diminuer les émissions de CO₂ de l'aérien. Les leviers d'action sont, pour la majorité, déjà partiellement déployés en raison des économies de carburant qu'ils permettent. Le premier de ces leviers est l'amélioration du taux de remplissage des avions.

Raúl Medina (EUROCONTROL) et **Damien Cazé** (DGAC) présentent d'autres leviers mobilisables : l'optimisation des trajectoires (cheminement libre) grâce au réaménagement des procédures ATM et de l'espace aérien ; des descentes et des montées continues s'appuyant sur la navigation par satellites, couplées à une gestion évoluée des arrivées et départs pour limiter les attentes ; ainsi que des moyens de communication et outils collaboratifs numériques permettant au final une trajectoire de vol plus éco-responsable, en recherchant un optimum global.

Partager l'information et gérer les données

Le partage de l'information et l'exploitation des données sont des éléments essentiels pour gagner en compétitivité et en sécurité, accélérer les processus d'innovation, de construction, et augmenter l'efficacité opérationnelle en vol comme au sol.

Pierre Faure (AFNeT) rappelle que la numérisation et la standardisation des échanges entre les donneurs d'ordre et leurs sous-traitants s'imposent comme des leviers de compétitivité, d'innovation et de souveraineté pour assurer la transition écologique et accélérer la mise sur le marché d'aéronefs de nouvelle génération.

Pascale Tea et Guillaume Soulé (Palantir) présentent les apports de l'intelligence artificielle pour la gestion d'énormes quantités de données générées de manière quotidienne par l'industrie aéronautique. Leur exploitation accélère la prise de décision dans divers domaines (maintenance prédictive, sûreté et sécurité, formation et simulation, production, etc.). L'arrivée des *large language models* (LLM) en 2023 accélère encore ces changements, mais s'accompagne de risques liés à la précision des modèles, la propagation des erreurs, la cybersécurité, ou le manque de transparence des modèles.

Yannick Assouad (Thales) rappelle que l'interconnexion, la collaboration, les transmissions de données et leur exploitation, s'accompagnent de préoccupations critiques en matière de cybersécurité, qui doivent être intégrées dès la conception "*cybersecure by design*", et tout au long de leur cycle de vie opérationnel.

La réglementation : une incitation à la décarbonation

Damien Cazé (DGAC) présente le rôle joué par les gouvernements et les organismes de réglementation pour l'élaboration de normes et de réglementations visant à encourager l'aviation à adopter des pratiques plus durables et à réduire les émissions de CO₂.

Avec le "Green Deal", l'Union européenne s'est fixé pour objectif d'atteindre la neutralité carbone en 2050, avec une étape intermédiaire en 2030 de moins 55 % d'émissions nettes de gaz à effet de serre par rapport au niveau de 1990. Le règlement «ReFuelEU Aviation» du 18 octobre 2023 fait passer la part de CAD de 2 % en 2025 à 6 % en 2030, pour atteindre 70 % en 2050. Dès 2022, la France a instauré un mandat d'incorporation obligatoire de CAD (1,5 % en janvier 2024) *via* la taxe incitative relative à l'incorporation d'énergie renouvelable dans les transports.

Le 6 février 2024, la Commission a émis une recommandation visant à réduire les émissions globales de GES de 90 % par rapport à 1990, dès 2040. Il est trop tôt pour apprécier les conséquences de cette proposition, dont les détails ne sont pas connus.

Aux États-Unis, l'"Inflation Reduction Act" de 2022 a mis en place un soutien à la production et à l'achat de CAD, afin de viser un taux d'incorporation supérieur, de 10 % en 2030.

En France, l'article 145 de la loi climat et résilience interdit les services réguliers de transport aérien public de passagers sur toutes les liaisons aériennes à l'intérieur du territoire français dont le trajet est également assuré en moins de deux heures trente par le réseau ferré.

Adaptation des compétences

Le déploiement des différents leviers de décarbonation du secteur aérien nécessitera de fortes évolutions des emplois et des compétences sur toute la chaîne de valeur. Airbus a estimé en 2023 que le secteur aurait besoin de 590 000 nouveaux pilotes, 680 000 techniciens de maintenance et 920 000 membres d'équipage ces vingt prochaines années. En France, le secteur de l'aérien totalise 1 142 000 emplois directs et indirects.

Olivier Lesbre (ISAE-SUPAERO) rappelle que les ingénieurs peuvent avoir un impact maximal en inventant le transport aérien décarboné de demain grâce à la mobilisation des ressources des sciences et des technologies.

Expliquer, convaincre et créer des vocations pour rejoindre le monde de l'aéronautique, c'est notamment la vocation du campus des métiers et qualifications aéronautique et spatial d'Occitanie, rattaché au lycée Saint-Exupéry, que présente **Christophe Meyruey**.

Francis Massé met l'accent sur l'Université du transport aérien (UTA), formation professionnelle développée par la DGAC et l'École Nationale de l'Aviation Civile (ENAC), avec l'appui de toute la filière. Le format pédagogique, LOGOTIQUE, vise à favoriser les transformations, innovations et ruptures technologiques, en misant sur les ressources humaines des parties prenantes.

Compensation des émissions résiduelles

Damien Cazé (DGAC) et **Augustin de Romanet** (ADP) rappellent que l'OACI a adopté dès 2016 le dispositif CORSIA "Carbon Offsetting and Reduction Scheme for International Aviation", qui prévoit le principe de croissance neutre en carbone à partir de 2019, par la compensation de toutes les émissions des vols internationaux dépassant le niveau de 2019.

En France, l'article 147 de la loi climat et résilience oblige les compagnies aériennes à compenser leurs émissions de gaz à effet de serre de leurs vols intérieurs à compter de 2022.

Le signal prix et l'implication des consommateurs

La décarbonation du secteur aérien nécessite des investissements massifs de la part des acteurs industriels afin de permettre le développement des technologies nécessaires et la production des carburants aéronautiques durables, qui se traduiront en coûts supplémentaires pour les compagnies aériennes et leurs passagers. L'augmentation du prix des carburants (25 % à 30 % du coût d'un billet) dans les proportions du prix des combustibles de substitution au kérosène, quatre fois plus élevé pour la biomasse à jusqu'à quinze fois plus élevé pour l'hydrogène liquide, aura donc un impact très significatif sur les coûts du transport aérien. Les coûts réglementaires relatifs à la taxation ou à la compensation du CO₂ viendront s'y ajouter.

Ces mesures vont par conséquent limiter la croissance du trafic, effet dont l'ampleur dépendra néanmoins de l'élasticité prix et de la hausse tendancielle du trafic. Pour **Augustin de Romanet** (ADP) la transparence des prix est essentielle pour impliquer le consommateur, qui devra *in fine* payer à travers son billet les investissements dans la décarbonation du secteur.

Les défis de la croissance du trafic et de la transition écologique

Par **Damien CAZÉ**

Directeur général de l'Aviation civile (DGAC)

L'année 2023 a confirmé le rebond du trafic aérien depuis son arrêt brutal en mars 2020 causé par la crise sanitaire. Le retour annoncé à son niveau pré-pandémique n'a fait qu'accroître les critiques des détracteurs du transport aérien qui l'accusent d'être un des principaux contributeurs au dérèglement climatique. Des progrès technologiques considérables ont pourtant été accomplis pour construire des avions dont la consommation de carburant par passager kilomètre transporté et les émissions de CO₂ associées soient réduites de l'ordre de 80 % par rapport aux avions des années 1960. Aujourd'hui, le transport aérien représente à l'échelle mondiale 2,5 % des émissions de CO₂ d'origine humaine.

Face à la croissance continue du trafic dans les prochaines décennies, le secteur aérien se mobilise pour atteindre son objectif de zéro émission nette en 2050. L'Organisation de l'aviation civile internationale a défini une stratégie globale ; le Pacte vert de l'Union européenne inclut un objectif intermédiaire de réduction des émissions de CO₂ de l'aviation de 55 % en 2030 ; et la France s'est dotée d'une feuille de route pour les carburants d'aviation durables, et ambitionne de concevoir l'avion bas carbone.

Mars 2020, le trafic aérien s'effondre, touché de plein fouet par la crise sanitaire. Cette véritable catastrophe pour le transport aérien inspire ses détracteurs qui y perçoivent une solution pour mettre un terme à ses nuisances. Pour les plus radicaux, un avion qui ne pollue pas est un avion qui ne vole pas ! En France, le transport aérien est pourtant un contributeur essentiel au dynamisme de notre économie nationale et à sa compétitivité internationale. Il répond à la fois aux besoins de mobilité et de continuité territoriale, et à l'impératif de connectivité de la France avec le reste du monde, permettant à notre pays de conserver sa place de première destination mondiale du tourisme.

Attentif aux évolutions sociétales, le secteur aérien n'a pas attendu la vogue de l'aviation "bashing" pour réduire son empreinte environnementale. Des progrès technologiques considérables ont été accomplis pour construire des avions dont le niveau de bruit est inférieur de plus de 75 %, la consommation de carburant par passager kilomètre transporté et les émissions de CO₂ associées réduites de l'ordre de 80 % par rapport aux avions des années 1960. « En 2019, à l'échelle mondiale, le transport aérien représente 2,5 % des émissions de CO₂ d'origine humaine, soit 915 M de tonnes. 1/3 de ces émissions proviennent des vols domestiques et 2/3 des vols internationaux », selon la feuille de route de décarbonation du transport aérien publiée en mars 2023¹, élaborée en application de la loi Climat et Résilience d'août 2021. « Sur le périmètre France, le transport aérien a émis 5,4 Mt de

CO₂ en 2019, soit 4 % des émissions du secteur des transports et 1,2 % de celles de l'économie française ».

Malgré les crises énergétiques et géopolitiques, le transport aérien retrouve le chemin d'une croissance qui s'annonce forte à moyen et long terme. La crise climatique y mettra-t-elle un terme ? Comment le secteur aérien atteindra-t-il la neutralité carbone en 2050, comme il s'y est engagé, alors que les prévisions annoncent un doublement de la flotte mondiale d'avions ?

Flotte mondiale multipliée par deux dans vingt ans

2023 : le trafic aérien se rapproche encore du niveau de 2019

Depuis la pandémie, le trafic aérien se rétablit et connaît désormais une forte reprise. En 2023, le transport aérien mondial a retrouvé 94,1 % de son trafic passagers de 2019 (en passagers-kilomètres payants), selon l'Association du transport aérien international (IATA)². La fréquentation des avions a même atteint au quatrième trimestre 98,2 % des niveaux de la période correspondante quatre ans plus tôt. Une exception à ce bilan positif, la Chine dont le trafic international reste très en retrait par rapport à 2019. En 2024, selon les prévisions de l'IATA, ce rebond devrait se poursuivre jusqu'à atteindre un nouveau record : pour la première fois, le trafic devrait dépasser le niveau pré-pandémique, avec plus de 4,7 milliards de passagers attendus, contre 4,5 milliards en 2019.

¹ <https://www.ecologie.gouv.fr/sites/default/files/Proposition%20de%20feuille%20de%20route%20d%C3%A9carbonation%20transport%20a%C3%A9rien.pdf>

² <https://www.iata.org/en/ressroom/2024-releases/2024-01-31-02/>

En France, le transport aérien de passagers est en hausse de 17 % par rapport à 2022, revenant à 94,5 % de son niveau de 2019, selon les données de la Direction générale de l'Aviation civile (DGAC). Cette hausse résulte d'une forte hausse du trafic international revenu tout près de son niveau d'avant-crise, tandis que le trafic intérieur en France stagne à 80 %.



Figure 1 : Aéroport de Nice-Côte d'Azur - Passagers dans le patio du terminal 1 le 11 octobre 2022.

Doublement de la flotte mondiale en 2042

Dans ce contexte de remise à niveau du trafic aérien, les compagnies aériennes parient de nouveau sur l'avenir. Le record de commandes enregistré par Airbus en 2023 en atteste, avec 2 094 commandes nettes pour l'avionneur européen qui détient un carnet de commandes de 8 598 appareils. Airbus anticipe 40 850 livraisons d'avions passagers et cargo neufs d'ici à 2042, portant la flotte mondiale à 46 560 appareils, contre 22 880 début 2020, en phase avec les prévisions de Boeing. Entre 2023 et 2042, Airbus estime que le trafic domestique chinois devrait être multiplié par 3,3 et les vols intérieurs indiens par 5. Dans les marchés dits « matures », la progression sera moindre : le trafic intérieur des États-Unis devrait être multiplié par 1,4, les vols intra-européens par 1,3. La feuille de route de la décarbonation du transport aérien base ses travaux sur une hypothèse de croissance du trafic de 1,1 % par an à l'international (en passagers-kilomètres) et de 0,8 % pour la France.

Ces perspectives créent d'ores et déjà des difficultés au niveau de la production industrielle tout d'abord. Si Airbus a pu en 2023 dépasser son objectif de livraison d'avions (735 avions livrés pour un objectif de 720), il ne l'avait pas atteint en 2022. Déstabilisées par la crise sanitaire, les chaînes de production de ses sous-traitants et prestataires, en grande majorité des PME-ETI, peinent à suivre la cadence imposée par la croissance du carnet de commandes du leader mondial de la construction aéronautique. En cause, notamment, la pénurie de personnels qualifiés, dont certains ont été licenciés pendant la pandémie, et les difficultés d'approvisionnement en matières premières stratégiques, en particulier depuis le déclenchement de la guerre en Ukraine. Conséquence inéluctable, les délais de livraison s'allongent.

La pénurie de personnels affecte aussi les compagnies aériennes, surtout pour les pilotes de ligne. L'IATA les a déjà prévenues l'an dernier qu'elles devront recruter entre 500 000 et 600 000 pilotes d'ici vingt ans.

Dès 2011, l'Organisation de l'aviation civile internationale (OACI), un organisme spécialisé des Nations unies, pointait ce risque de pénurie dans un rapport³. L'Organisation a réactualisé ses prévisions en 2016 avec un scénario d'un doublement du trafic aérien mondial d'ici 2032. Elle estimait alors que « le secteur aviation devrait recruter d'ici 2036 1,3 millions de nouveaux techniciens, 125 000 contrôleurs aériens et plus de 620 000 pilotes⁴ ».

Face à ces perspectives, la question de fond est la suivante : comment concilier croissance du trafic aérien et réduction des émissions de carbone de l'aviation ? La croissance des émissions mondiales de l'aviation est certes corrélée à celle du trafic. « Néanmoins, les émissions unitaires, c'est-à-dire par passager et kilomètre parcouru, ont drastiquement baissé. Elles ont été divisées par 5 depuis 1960 et par 2 depuis 1992 », indique la feuille de route de décarbonation du transport aérien. Mais des efforts supplémentaires s'imposent pour atteindre la neutralité carbone en 2050.

Objectif zéro émission nette en 2050

La stratégie globale de l'OACI

Pour réduire les émissions de carbone de l'aviation, l'OACI a adopté une stratégie globale fondée sur quatre leviers.

L'amélioration de la performance environnementale des avions

Pour améliorer la performance environnementale des avions, l'OACI adopte en 2016 la première norme de certification pour leurs émissions de CO₂, qui a concerné d'emblée aussi bien les appareils en production que les aéronefs en phase de conception.

Des procédures opérationnelles conduisant à réduire la consommation de carburant

En Europe, le programme de recherche et développement SESAR vise la réduction des émissions gazeuses en intervenant dans toutes les phases du vol : au sol, en généralisant le concept de décision collaborative entre tous les acteurs de l'aéroport ; en vol, en déployant des routes plus directes, des trajectoires optimisées, et en mettant en œuvre des descentes et des montées continues couplées à une gestion évoluée des arrivées et départs pour limiter les attentes, et donc les émissions de CO₂.

³ https://www.icao.int/Newsroom/Pages/FR/icao-study-reveals-strong-demand-for-qualified-aviation-personnel-up-to-2030_FR.aspx

⁴ <https://oaci.delegfrance.org/Programme-Nouvelle-Generation-des-Professionnels-de-l-Aviation-NGAP>

Un mécanisme de compensation des émissions de CO₂

Avec l'adoption d'un mécanisme de compensation, fin 2016, l'aviation internationale devient le premier secteur économique à se doter d'un dispositif mondial de lutte contre le changement climatique. Dénommé CORSIA (Carbon Offsetting and Reduction Scheme for International Aviation, régime de compensation et de réduction des émissions carbonées pour l'aviation internationale), ce mécanisme prévoit l'obligation pour les transporteurs aériens de quantifier puis déclarer leur consommation de carburant depuis le 1^{er} janvier 2019.

Le développement des biocarburants aéronautiques

À court et moyen terme, les carburants d'aviation durables (CAD, SAF en anglais) offrent les meilleures perspectives de réduction des émissions de gaz à effet de serre. Lors de la conférence de l'OACI à Dubaï, en novembre 2023, un objectif pour 2030 de 5 % de réduction des émissions résultant de l'utilisation des CAD a été adopté, grâce à une implication très forte de la France et des pays européens.

Cette conférence s'inscrivait dans le cadre de la mise en œuvre de la décision de la 41^e assemblée de l'OACI, qui a adopté en 2022 un accord historique sur l'objectif de neutralité carbone à l'horizon 2050. Celui-ci a été conclu dans la continuité de la déclaration issue du Sommet de l'aviation de Toulouse, organisé en France pendant la présidence française du Conseil de l'Union européenne cette même année.



© Arnaud Bouissou / Terra

Figure 2 : Camion-citerne destiné à l'avitaillement en biocarburant du vol Air France 6235 Nice-Paris le 1^{er} octobre 2021.

L'aviation dans le Pacte vert européen

Parallèlement, l'Union européenne poursuit la mise en œuvre de son Pacte vert ("Green Deal") qui acte la fin des émissions nettes de gaz à effet de serre pour 2050. Fin 2023, elle adopte la majeure partie du paquet législatif dit « Ajustement à l'objectif – 55 % » ("Fit for 55"), qui prévoit une étape intermédiaire avec une réduction de 55 % des émissions nettes de gaz à effet de serre en 2030 par rapport à 1990. Ce paquet, présenté par la Commission européenne en juillet 2021, contient quatre textes concernant le secteur de l'aviation. Sur les aéroports, le règlement dit « AFIR » instaure à partir de 2025 l'obligation progressive d'électrifier les postes

de stationnement des avions, afin de réduire l'utilisation de leurs moteurs auxiliaires pour leur alimentation en énergie. La révision de la partie aviation de la directive ETS articule le CORSIA avec le système d'échange de quotas d'émission de l'UE (SEQUE-UE ou European Union Emissions Trading Scheme, EU-ETS), qui intègre les émissions du transport aérien depuis 2012 pour les vols intra-européens. Elle vise aussi à mettre fin à l'attribution de quotas d'émissions gratuits dès 2026, mais prévoit l'allocation de quotas gratuits pour les carburants d'aviation durables. Pour encourager leur production et leur consommation, le règlement dit "ReFuel EU Aviation" instaure des objectifs d'incorporation de carburants d'aviation durables (CAD) de 2 % en 2025 jusqu'à 70 % en 2050, avec une augmentation tous les cinq ans. Enfin, la révision de la directive sur la taxation de l'énergie, dont le kérosène, est toujours en négociation car elle nécessite l'unanimité des 27 États membres, à l'instar de tous les projets de textes portant sur la fiscalité.

CAD : la feuille de route de la France

La France a été pionnière dans le monde en élaborant une feuille de route pour le déploiement des CAD dès 2020, qui a inspiré le règlement "ReFuel EU Aviation" en prévoyant des taux d'incorporation jusqu'à 50 % en 2050.

Incitation fiscale

Elle a instauré dès 2022 un mandat d'incorporation obligatoire *via* la taxe incitative relative à l'incorporation d'énergie renouvelable dans les transports (TIRUERT). Le montant de la pénalité associée en cas de non-respect est de 168 €/hl. Le taux minimal d'incorporation de CAD a été relevé de 1 à 1,5 % en janvier 2024, afin de préparer la mise en œuvre du règlement "ReFuel EU Aviation". Celle-ci, en outre, nécessitera de réformer en profondeur le mécanisme de la TIRUERT *via* des mesures législatives en cours d'élaboration.

Développer une filière de production de CAD en France

Mais l'incitation fiscale ne permettra pas de lever tous les obstacles. L'usage des CAD implique l'existence de ressources de qualité adéquate et en quantité suffisante, ce qui nécessite notamment une diversification des matières premières et des procédés de transformation. La logistique (mélange, stockage et transport vers les plateformes aéroportuaires) doit quant à elle être dimensionnée dans une optique de simplicité, d'efficacité et de limitation des émissions de CO₂, en s'intégrant lorsque cela est possible aux circuits de distribution existants. Enfin, le facteur coût reste une problématique à part entière, les carburants représentant aujourd'hui environ 30 % des coûts d'exploitation des compagnies aériennes. Or, les biocarburants sont actuellement trois à quatre fois plus chers que le kérosène. Enfin, le contexte de crise énergétique dû à la guerre russo-ukrainienne rend d'autant plus prégnant les enjeux de souveraineté énergétique.

Lors du Salon du Bourget 2023, le président de la République a confirmé la volonté de l'État de soutenir la mise en place d'une filière de production de CAD en

France. Une enveloppe de 200 millions d'euros permettra de massifier la production de CAD pour décarboner le secteur aérien tout en soutenant la souveraineté énergétique du pays. Cette annonce s'inscrit dans le prolongement du premier appel à projets mené entre 2021 et 2022, qui a abouti au soutien de cinq projets pour des études d'ingénierie et la mise en place de démonstrateurs (18 M€). Ce nouvel appel à projets lancé mi-décembre 2023 doit être clôturé mi-2024.

Concevoir l'avion bas carbone en France

À plus long terme, la transition énergétique de l'aviation nécessitera des aéronefs ultrasobres. Là aussi, la France, l'un des deux berceaux de l'aviation, est à la pointe de l'innovation. La construction aéronautique civile est une filière stratégique de notre industrie, structurée autour d'un nombre restreint de grands intégrateurs (Airbus, Dassault Aviation, Safran, Thales) occupant des positions de *leaders* mondiaux, et de grands fournisseurs de rang 1 (Daher, Latécoère, Mécachrome...) de dimension internationale. Ces entreprises s'appuient sur un large tissu industriel constitué de près d'un millier de sous-traitants et prestataires, en grande majorité des PME-ETI, répartis sur l'ensemble du territoire national. Le secteur aéronautique représente l'un des tout premiers postes excédentaires de notre balance commerciale et l'un des tout premiers contributeurs aux créations d'emplois industriels sur notre territoire.

Depuis 2008, la filière coordonne et structure ses efforts de R&D, et l'État son soutien, autour de la feuille de route technologique du Conseil pour la recherche aéronautique civile (CORAC), qui rassemble toutes les composantes de l'industrie du transport aérien et l'ensemble des ministères compétents (transport, défense, industrie et recherche).

La filière aéronautique a été lourdement et durablement touchée par la pandémie de Covid-19. Dans ce contexte inédit, l'État a lancé mi-2020 un plan de soutien exceptionnel à l'aéronautique, doté de 15 Md€, pour aider la

filière à traverser la crise et à accélérer sa transformation environnementale, dont près de 1,6 Md€ pour la R&D sur la période 2020-2022. Cette action de soutien à la R&D aéronautique, pilotée par la DGAC, a été inscrite dans le plan France Relance lancé en septembre 2020.

La mise en œuvre de cette action repose sur la nouvelle feuille de route que l'État a définie en concertation avec la filière dans le cadre du CORAC, lors de la préparation du plan de soutien aéronautique. Elle vise à préparer technologiquement l'entrée en service, dès la fin de la décennie, du successeur de l'A320 et de nouveaux aéronefs (hélicoptère léger, avion régional, etc.) extrêmement ambitieux sur le plan environnemental, voire « zéro émission », qui fonderont la décarbonation du transport aérien. L'objectif de cette feuille de route porte aussi sur la réalisation de gains d'efficacité sur l'ensemble du cycle de vie des aéronefs, afin d'accélérer l'introduction en flotte de ces appareils bas carbone à des coûts soutenables pour le marché.

Lors du Salon du Bourget 2023, le président de la République a annoncé « investir 300 M€ par an dans la filière » dès 2024, pour « devenir les champions de l'avion ultrasobres et le produire en France ».

Conclusion

Face aux perspectives de croissance du trafic aérien mondial, notamment en Chine et en Inde, le transport aérien doit faire sa révolution énergétique pour atteindre la neutralité carbone en 2050. La France, seul pays avec les États-Unis à maîtriser de bout en bout la fabrication d'un aéronef, devra y jouer un rôle central. L'aviation a traversé de nombreuses crises, et relevé encore plus de défis technologiques pour parvenir à être le mode de transport le plus sûr. Aujourd'hui, notre défi est d'en faire un des modes de transport les plus durables et respectueux de notre planète.

Prospective des marchés mondiaux de l'aéronautique, décarbonation et stratégie d'Airbus

Par Guillaume FAURY,
Président exécutif d'Airbus

La pandémie de Covid-19 a créé une crise sans précédent pour le transport aérien mondial, menant de nombreux observateurs à penser que l'aviation ne retrouverait jamais la croissance des années passées, et qu'elle pourrait même connaître un certain déclin.

C'était oublier que le transport aérien est devenu un bien irremplaçable de nos sociétés modernes, transportant des biens et reliant les personnes, les cultures et les territoires, autant de facteurs de développement et de progrès. Ainsi, à la suite de mesures sanitaires strictes, le transport aérien a pu retrouver progressivement son niveau de 2019, avec une croissance qui semble désormais repartir à un rythme de l'ordre de 3,6 % par an.

Cette forte demande met sous tension les chaînes de production d'Airbus et de ses sous-traitants, affaiblis par la crise. Mais le principal enjeu est d'assurer une croissance durable du transport aérien, compatible avec les objectifs de l'Accord de Paris sur le climat. C'est le défi que s'est donné Airbus avec l'ambition d'être le pionnier d'une aviation totalement décarbonée grâce à des avions de plus en plus performants en termes d'émissions, à des technologies de rupture, comme l'avion à hydrogène, et au recours massif aux carburants durables. Et ce, pour une aviation durable, mais aussi un monde plus sûr et plus uni.

Surmonter une crise sans précédent

Avec la pandémie de Covid-19, l'industrie aéronautique a été confrontée à la crise la plus grave et la plus longue de son histoire. Les frontières se sont fermées, et le trafic aérien international a pratiquement été réduit à zéro. Chez Airbus comme chez nombre d'acteurs de la filière, il a fallu prendre des décisions urgentes pour assurer notre survie mais aussi préparer l'avenir.

La première décision essentielle d'Airbus a été de se financer sur les marchés privés de capitaux pour préserver notre trésorerie, mais aussi pouvoir continuer à produire nos avions.

Car nous avons décidé de réduire notre production de 40 %, mais de ne pas stopper nos chaînes de production. Cela, pour deux raisons stratégiques. La première était de pouvoir continuer à livrer nos avions aux compagnies aériennes qui le souhaitaient. La deuxième était de maintenir en activité les milliers de fournisseurs qui concourent à notre production dans le monde entier. Nous avons ainsi pu conserver nos contrats avec la plupart de nos clients et éviter la faillite de nos sous-traitants.

Ceci a été primordial pour la remontée progressive de nos activités après la crise du Covid-19.

La troisième décision stratégique que nous avons prise a été de sauvegarder nos ressources humaines en ingénierie et technologies, en ne suspendant pas nos activités de recherche mais au contraire en les accélérant.

Il nous est apparu en effet assez évident que surmonter le Covid-19 ne suffirait pas. Et qu'il fallait en même temps s'attaquer à un autre défi existentiel pour l'avenir de l'aviation : celui de la décarbonation du transport aérien.

Retrouver une croissance durable

Beaucoup se sont demandé lors de la pandémie s'il était possible que le transport aérien se redresse de cette crise. Si les gens allaient reprendre l'avion, ou si, au contraire, on allait assister à un changement généralisé des comportements et à une réticence accrue à se déplacer en avion.

Pour notre part, nous sommes restés convaincus que l'aviation offre des atouts considérables et irremplaçables pour nos sociétés, en soutenant la coopération internationale, le développement économique et le partage des cultures à travers le monde. Depuis qu'elle existe, l'aviation a permis à un nombre de plus en plus important de gens de voyager, de travailler, de se connecter et d'échanger.

Et ceci s'est confirmé à la reprise du trafic aérien après le Covid. Avec des mesures sanitaires très strictes, le transport aérien a pu redémarrer après la crise, et les passagers sont revenus plus vite que prévu. À tel point que bon nombre de compagnies aériennes se sont retrouvées en sous-capacité. Car toutes les industries du transport aérien ont eu du mal à retrouver une capacité normale après la crise du Covid-19.

Chez Airbus, nous n'avons pas encore retrouvé le niveau de production d'avant la crise, car nos sous-traitants continuent de souffrir des suites du Covid et du nouveau contexte international, avec des difficultés de recrutement et d'approvisionnement, ainsi que des coûts d'énergie en très forte hausse.

Mais nous remontons progressivement les cadences de nos usines, car la demande est bien là. Nous avons en effet enregistré en 2023 un record historique de plus de 2 000 commandes au total, ce qui porte notre carnet de commandes au-delà de 8 500 avions, soit près de dix ans de livraisons.

Selon nos prévisions, la croissance du trafic aérien mondial devrait se poursuivre à un rythme d'environ 3,6% par an, ce qui correspond à 40 850 nouveaux avions dans les vingt prochaines années. C'est une croissance un peu inférieure à celle d'avant la crise, mais qui reste soutenue, surtout dans les pays émergents et en voie de développement. Car le transport aérien est pour eux un outil essentiel de leur développement intérieur comme de leurs échanges extérieurs.

Avec une gamme très complète d'avions de dernière génération (A220, A320neo, A330neo, A350), qui affichent les meilleures performances en termes d'émissions, nous pensons pouvoir répondre à cette demande très forte de nouveaux avions. Nous avons clairement pris le *leadership* sur les avions monocouloirs (A220, A320neo) et remontons au niveau de notre concurrent Boeing sur les avions long-courriers (A330neo et A350). C'est pourquoi il nous faut augmenter rapidement les cadences de production au-delà des niveaux d'avant-Covid. L'un de nos principaux objectifs est de produire 75 avions de la famille A320 par mois à l'horizon 2026. Et ceci dans un marché où la concurrence va s'accélérer, avec notamment la montée en puissance du constructeur chinois Comac. Un nouveau marché pourrait aussi émerger sur des avions plus légers mais fortement décarbonés avec de la technologie électrique, hybride ou hydrogène, comme on le voit avec les projets d'Aura Aero ou ZeroAvia, par exemple.

Car cette croissance du trafic aérien doit rester compatible avec une décarbonation totale de l'aviation à l'horizon 2050. C'est cette croissance durable, correspondant aux objectifs de l'Accord de Paris sur le climat, que nous voulons poursuivre.

Être les pionniers de la décarbonation du transport aérien

La transition écologique est au cœur de la stratégie d'Airbus. Nous avons l'ambition d'être les pionniers d'une industrie aéronautique et spatiale durable, pour un monde plus sûr et plus uni. Nous avons ainsi pris des engagements très forts pour réduire l'impact environnemental de nos activités et de nos produits, depuis leur conception jusqu'à leur fin de vie. Ces engagements ont été validés par le SBTi¹, ce qui signifie qu'ils

sont conformes à l'Accord de Paris, et démontrent bien notre niveau d'ambition. Nous nous sommes ainsi fixés un objectif de baisse de 63 % de nos émissions de scope 1 et 2 (liées à nos opérations industrielles) entre 2015 et 2030.

Et pour notre scope 3 (émissions des avions en service), nous nous sommes fixés un objectif de baisse de l'intensité carbone (gCO₂ émis par passager kilomètre) des avions que nous livrons, de 46 % entre 2015 et 2035.

La contribution la plus immédiate que nous apportons à la décarbonation du transport aérien est la mise en service de notre dernière génération d'avions. Aujourd'hui, moins de 30 % des flottes en service sont constituées d'avions de dernière génération. Moderniser les quelque 70 % restants avec des appareils de 20 % à 25 % plus économes en carburants va réduire considérablement les émissions mondiales émises par le secteur, jusqu'à l'arrivée d'une nouvelle génération d'avions.

Cette dernière arrivera au cours de la prochaine décennie et intégrera diverses améliorations technologiques dans les nouveaux matériaux, les systèmes de propulsion, les ailes, l'aérodynamisme et l'adaptation aux carburants aériens durables.

Car nos avions sont déjà capables d'emporter 50 % de carburants durables (SAF) et nous nous sommes engagés à les rendre capables de 100 % de SAF à partir de 2030, ce qui doit permettre une réduction des émissions de CO₂ de l'ordre de 80 % et même au-delà.

Nous prévoyons en outre la mise en service vers 2035 du premier avion commercial utilisant une propulsion à hydrogène. Il nous faudra pour cela de nombreuses innovations, adapter les aéroports et les infrastructures existantes, et financer la recherche. Nous nous y employons avec le soutien de nos partenaires industriels mais aussi des politiques publiques. C'est le cas de l'État français qui nous apporte son aide à la recherche au travers du CORAC², mais aussi de l'Allemagne, de l'Espagne, du Royaume-Uni et du programme "Clean Aviation" au niveau européen.

Car cet avenir durable du transport aérien ne peut devenir réalité qu'avec l'effort de tous.

C'est l'esprit de l'engagement collectif qui a été pris en 2021 par tous les partenaires industriels de l'ATAG³ (constructeurs aéronautiques, compagnies aériennes, aéroports et services de navigation aérienne) en se fixant l'objectif commun d'atteindre le net zéro émission de CO₂ en 2050 pour l'ensemble du transport aérien international. Et c'est le même objectif que se sont fixés les États membres de l'Organisation de l'aviation civile internationale (OACI) en 2022.

Ces engagements s'accompagnent d'une feuille de route claire et robuste validée par l'industrie (ATAG) mais aussi les États de l'OACI. L'Agence internationale de l'énergie (IEA) reconnaît elle-même dans son

¹ Science-Based Targets initiative

² CORAC: Conseil pour la recherche aéronautique civile

³ ATAG: Air Transport Action Group

dernier rapport ("World energy outlook", 2023) qu'une croissance modérée de l'aviation (3,7 % en moyenne annuelle entre 2022 et 2050) reste compatible avec un objectif net zéro en 2050 si toutes les mesures de cette feuille de route (nouvelles technologies, carburants durables, meilleures opérations et capture de carbone) sont mises en œuvre avec l'intensité et donc le niveau d'investissement nécessaires.

Nous voulons être le fer de lance de cette transformation car nous croyons fermement à une aviation durable, capable de garantir que les générations futures puissent continuer à se déplacer en avion à travers le monde, dans le plus grand respect de la planète.

La réglementation, la certification et leurs effets

Par Luc TYTGAT

Directeur exécutif par intérim de l'Agence européenne de la sécurité aérienne (EASA)

L'article traite des défis et des efforts de transformation nécessaires dans l'industrie aéronautique pour faire face à la concurrence et au changement climatique. Il souligne la nécessité pour l'industrie d'adopter des carburants d'aviation durables (SAF) et d'explorer les technologies d'avions électriques, hybrides et à hydrogène pour réduire les émissions de carbone. Le "Green Deal" de l'Union européenne et des initiatives comme "ReFuelEU Aviation" sont mentionnés comme stratégies clés pour décarboner l'aviation en encourageant l'intégration des SAF. L'Agence européenne de la sécurité aérienne (EASA) joue un rôle crucial dans la supervision de cette transition, assurant la sécurité et adaptant les cadres réglementaires pour soutenir l'innovation et la durabilité environnementale. La collaboration entre les parties prenantes de l'industrie, les institutions de recherche et les organismes réglementaires est soulignée comme essentielle pour atteindre un avenir neutre en carbone dans l'aviation.

Les défis de l'aviation face à la concurrence et au changement climatique sont énormes.

Après une brève description de l'AESA, nous présentons les moyens mis en œuvre et les défis associés à la décarbonisation de l'aviation.

Concurrence

L'industrie aéronautique est hautement concurrentielle, avec plusieurs acteurs majeurs sur le marché. La pression pour innover, réduire les coûts et offrir des produits plus efficaces est constante. Cette concurrence est exacerbée avec l'arrivée de nouveaux entrants sur tous les marchés.

Ce qui est plus problématique pour l'industrie aéronautique est l'interdiction du secteur aérien d'être en concurrence sur certains marchés sous couvert de réduction d'impact environnemental.

Au-delà des débats sur l'empreinte carbone d'un moyen de transport ou d'un autre, on voit bien que l'avenir de l'aviation sera vert ou ne sera pas. L'industrie de l'aviation, si elle veut survivre à une échelle comparable, se doit d'opérer une transformation essentielle.

Transformation de l'industrie aéronautique

Cette transformation se doit d'être globale, et doit impliquer tous les acteurs de la filière. Constructeurs, opérateurs, aéroports, organisation de formation des pilotes et des mécaniciens, autorités, mais aussi certainement la société.

La compétitivité actuelle de l'aviation européenne se doit d'être maintenue. Et le maintien de compétitivité

dépendra de la capacité du secteur à introduire de manière sûre des technologies disruptives poussées par l'agenda politique, telles que les aéronefs 100 % électriques et les aéronefs à hydrogène.

Pour ce faire, l'industrie aéronautique aura besoin d'une certaine capacité d'autofinancement, mais aussi d'un accès à des financements « verts ». C'est un des points clés de la bataille autour du règlement européen dit « Taxonomy », qui établit une liste de secteurs dits « verts » où les investissements seront favorisés.

Il sera aussi peut-être nécessaire de remettre en cause certains modèles d'affaires afin d'assurer l'amortissement de certains investissements.

L'Agence européenne de la sécurité aérienne (AESA) se doit d'accompagner cette transformation, et se doit également de s'adapter à cette transformation.

L'Agence européenne de la sécurité aérienne (AESA)

Depuis plus de vingt ans, l'AESA (EASA en anglais) est responsable de la sécurité et de la protection de l'environnement en Europe pour tous les aspects relatifs à l'aérien.

Organisme indépendant et neutre, l'AESA garantit la confiance dans la sécurité des opérations aériennes en Europe.

En ce sens, une des missions de l'AESA est d'accompagner le secteur dans sa transformation, tout en s'y adaptant également.

Il y aura plusieurs phases car le secteur aérien se doit de réagir rapidement, mais assurer une transformation profonde nécessitera des développements à long et très long terme.

Phase transitoire – SAF et information passagers

Sustainable aviation fuel ou carburants d'aviation durables

Il est nécessaire de mettre en œuvre les SAF (*Sustainable aviation fuels*) pour la décarbonisation du secteur aérien sur les court et moyen termes. Les technologies 100 % électriques sont encore limitées sur le très court courrier, et les évolutions vers le moyen-courrier se feront plus tardivement. Pour le long courrier, la seule solution potentiellement viable aujourd'hui est le SAF, et, potentiellement à très long terme, les technologies à base d'hydrogène qui demanderont des changements radicaux.

En 2019, l'Union européenne (EU) a présenté l'initiative "Green Deal" visant à rendre le continent climatiquement neutre d'ici à 2050. "ReFuelEU Aviation" est une proposition législative publiée sous forme de règlement en octobre 2023.

"ReFuelEU Aviation" est un instrument politique très important, que l'UE utilisera pour décarboner l'aviation en Europe en encourageant l'utilisation des SAF avec l'obligation d'intégrer progressivement des SAF dans le carburant (de 2 % en 2025 à 70 % minimum en 2050). L'EASA sera un instrument essentiel de ReFuelEU avec la charge de collecter et de publier dans un rapport annuel le niveau d'utilisation du SAF.

L'EASA évalue la possibilité de certifier les différents SAF, afin d'assurer une qualité de fuel et de certifier aussi le vrai impact écologique de ces nouveaux carburants.

Le Label Environnemental EU/EASA

L'« EU/EASA Label Environnemental » est une initiative qui informera les passagers sur les choix durables qu'ils peuvent faire lorsqu'ils réservent leurs billets d'avion, de manière transparente et impartiale. C'est un outil qui, nous l'espérons, incitera les compagnies à investir dans les appareils et carburants plus performants et économes.

À partir de 2025, sur une base volontaire, les compagnies aériennes pourront demander à l'AESA d'obtenir un label pour les vols qu'elles proposent.

Anticipation des nouvelles technologies

Le SAF n'est pas la solution miracle. Tout d'abord, sa production de manière verte à base d'énergie renouvelable est un défi d'envergure à l'échelle mondiale. Ensuite, beaucoup d'industries autres que l'aviation ont la même approche à court terme, ce qui pose un problème d'accès de la filière.

Les industriels se doivent d'anticiper. Pour ce faire, ils se sont regroupés au sein de l'Alliance for Zero-Emission Aviation (AZEA).

AZEA – Alliance for Zero-Emission Aviation

L'Alliance est une initiative volontaire de partenaires privés et publics qui partagent l'objectif de préparer l'entrée en service commercial des avions électriques et à hydrogène. L'EASA est partie intégrante de l'Alliance.

Elle est ouverte à tous les acteurs de la chaîne de valeur. À ce jour, plus de 150 organisations sont membres d'AZEA.

AZEA se focalise sur les aspects suivants :

- les infrastructures aéroportuaires ;
- les exigences et l'offre en matière d'énergies renouvelables ;
- la certification, les normes et la réglementation ;
- les besoins d'investissement ;
- l'exploitation d'aéronefs électriques et à hydrogène ;
- l'analyse de rentabilité des compagnies aériennes, des aéroports, des constructeurs aéronautiques et des fournisseurs d'énergie ;
- les compétences ;
- le financement (investissements privés, et financement par l'UE et les programmes nationaux) ;
- la sensibilisation et les partenariats internationaux.

Recherche et développement

Afin de répondre au plus près des besoins de l'industrie, une collaboration avec les programmes de recherche aéronautique a été mis en place au travers du programme European Clean Aviation et SESAR3. Cette collaboration se traduit par une implication de l'EASA dans les nouveaux concepts bien plus en amont que précédemment.

Clean Aviation

Clean Aviation Joint Undertaking est le principal programme de recherche et d'innovation de l'Union européenne visant à emmener l'industrie aéronautique vers un avenir durable et neutre sur le plan climatique.

Le programme Clean Aviation s'articule autour de trois axes principaux :

- des avions régionaux hybrides électriques ;
- des avions à courte et moyenne portée ultra-efficaces ;
- des technologies de rupture pour permettre aux avions de fonctionner à l'hydrogène.

Certification et opérations

Un des rôles fondamentaux de l'implication de l'EASA dans Clean Aviation est de s'assurer que les activités de recherche prennent en compte en amont les contraintes de certification et d'exploitation.

Pour ce faire, chaque projet fait l'objet d'une analyse visant à identifier les potentielles difficultés réglementaires *via* :

- l'exposition en amont des équipes de l'AESA aux nouvelles technologies ;
- l'analyse de la réglementation actuelle et l'identification des écarts pour couvrir les nouvelles technologies proposées par l'industrie ;
- l'analyse de ces écarts et la proposition de potentiels nouveaux règlements ou de nouveaux moyens de conformité en collaboration avec l'industrie.

L'objectif est de s'assurer qu'une technologie est potentiellement certifiable, mais aussi opérable.

SESAR3

Au-delà de l'amélioration incrémentale ou disruptive des aéronefs, il est aussi important d'assurer que nous optimisons le trafic aérien.

Une grande partie des travaux du programme de recherche a porté sur l'amélioration de la prévisibilité et de l'efficacité des opérations de taxi-out, la réduction des schémas d'attente et du guidage dans l'espace aérien terminal à l'arrivée, et l'optimisation des trajectoires grâce à l'utilisation de l'i4D¹, entre autres technologies.

On estime qu'un ciel européen numérique permettrait d'économiser 28 millions de tonnes de CO₂ par an.

Introduction et vitesse déploiement

Il est évident que les technologies évoquées devront être déployées progressivement, afin de s'assurer que les niveaux de sécurité sont au standard des niveaux du secteur aérien actuel.

Il est aussi essentiel de permettre un retour d'expérience rapide afin d'adapter la réglementation au plus vite avant un déploiement à large échelle. Pour ce faire, l'AESA voit deux moyens essentiels à mettre en place :

- l'utilisation des lignes avec obligation de service public (*public service obligation*) ;
- des bacs à sable réglementaires (*regulatory sandbox*).

Les lignes avec obligation de service public

Il sera essentiel de permettre à ces nouveaux moyens décarbonés d'entrer sur le marché au travers d'incitations et potentiellement de subventions.

Un des moyens par exemple sera de retenir l'exploitation des moyens aériens moins émetteur de CO₂ dans les critères de sélection des opérateurs de ligne de service public. Ces lignes étant subventionnées, elles permettront une introduction des nouvelles technologies sur le marché.

Les États joueront donc un rôle aussi fondamental que l'industrie pour assurer la mise sur le marché.

¹ <https://intelligence.airbus.com/industries/defence/joint-isr/multi-int-exploitation/i4d-intelligence-for-decision/>

Comment l'EASA s'adapte à ces changements et se transforme

La façon dont les autorités de certification ont travaillé jusqu'à présent pourrait être qualifiée d'itérative, en empilant des exigences techniques ou opérationnelles souvent basées sur l'expérience en service, et donc « prescriptives ».

La démarche s'est avérée efficace pour accompagner les évolutions progressives des concepts d'opération et des technologies traditionnelles, et le niveau de sécurité du transport aérien en est une des meilleures preuves.

La question est de savoir comment devrait évoluer une autorité de réglementation et de certification maintenant un niveau de sécurité de l'aviation civile uniforme et élevé tout en intégrant rapidement les évolutions technologiques, opérationnelles, environnementales et sociétales nécessaires.

Il n'y a pas de réponse unique à cette question, mais nous avons déjà pris de nombreuses initiatives pour y répondre.

Tout commence par un effort constant en vue d'élaborer un cadre réglementaire moins prescriptif et davantage axé sur la maîtrise du risque et de la performance.

Un autre point très important est la notion de « partenariat ». L'AESA a commencé à développer de nouveaux outils, bien en amont du processus de certification, pour mieux collaborer avec la Commission européenne, les instituts de recherche, le milieu universitaire et l'industrie.

Sur le plan institutionnel, l'AESA travaille en étroite collaboration avec les États membres. Notre objectif est d'y établir des priorités communes tout en renforçant les synergies entre des programmes régionaux, nationaux, et du ressort de la Commission européenne lorsqu'ils sont dans notre domaine de compétence.

Sans attendre une évolution du règlement de base, l'Agence espère, en étroite collaboration avec les autorités nationales :

- trouver des moyens pour que les innovateurs puissent tester la faisabilité de leurs projets et déterminer dans quelle mesure les exigences réglementaires pourraient faire obstacle à leurs développements ;
- identifier comment et où les réglementations devraient évoluer, tout en maintenant, voire augmentant, les niveaux de sécurité actuels.

L'objectif étant de réduire les coûts et les délais de mise sur le marché des nouvelles technologies tout en répondant aux attentes sociétales que ce soit en termes de sécurité ou de protection de l'environnement.

Un autre grand défi (peut-être le plus grand) auquel les autorités de certification et l'ensemble de la communauté aéronautique doivent se préparer est le maintien des compétences existantes, tout en développant de nouvelles pour pouvoir certifier la prochaine génération d'aéronefs.

Une évolution graduelle vers un modèle « EASA+ » ?

Lors de la dernière Annual Safety Conference, les conclusions suivantes se sont imposées :

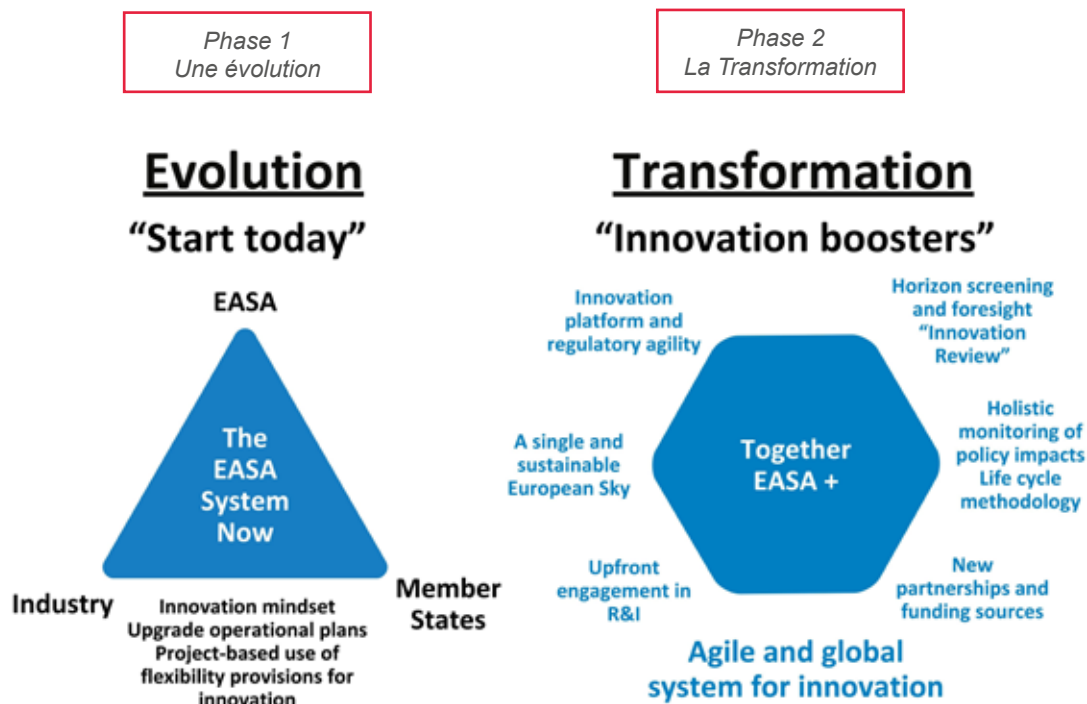
- Pour relever les défis posés par l'innovation et transformer ces défis en opportunités, il faut adopter une approche multidimensionnelle dans laquelle les organismes de réglementation, les organismes de normalisation de l'industrie, les nouveaux entrants et acteurs existants collaborent pour assurer une entrée sûre et rapide sur le marché des solutions innovantes.
- Une approche centrée sur les opérations, fixant un niveau de sécurité proportionnel aux risques (sol et air), et à la performance des produits, doit permettre de réglementer ce nouveau domaine de manière sûre et proportionnelle.

Une évolution du système AESA en deux phases pourrait être envisagée pour relever les défis auxquels l'Agence est déjà confrontée :

- Phase 1 : sera une évolution en utilisant la flexibilité du système réglementaire actuel dans toute la mesure du possible.
- Phase 2 : sera une transformation.

Six axes de travail ont été identifiés :

- Développer des plateformes d'innovation et d'agilité réglementaires pour tester rapidement.
- Préparation du futur et planification prévisionnelle : anticipation des orientations à suivre dans un avenir complexe, pour mieux anticiper les risques émergents et répondre aux attentes de la société.
- Rechercher de nouveaux partenariats et modèles de financement pour le système de l'AESA.
- Renforcer l'engagement initial dans la R&I pour développer des règlements « prototypes » et accompagner les évolutions technologiques.
- Consolider un ciel européen unique et durable.
- Faire un suivi global de l'impact des évolutions et décisions réglementaires sur la base d'une méthodologie fondée sur le cycle de vie.



Conclusions

L'industrie du transport aérien doit faire face au plus grand défi de son histoire. Décarboner l'aviation n'est pas une option, c'est une nécessité.

Le secteur l'a bien compris, et une stratégie multi-domaines, multidisciplinaires, impliquant tous les acteurs autour de cet objectif a été élaborée. Cette

stratégie nécessite d'important moyens ainsi qu'une forte collaboration internationale.

Enfin, cette stratégie demande aussi aux acteurs institutionnels telle l'AESA non seulement de s'adapter, mais aussi de se transformer. L'AESA est déterminée à assumer son rôle de facilitateur de la transition vers une aviation décarbonée.

Air Traffic Management (ATM)

By Raúl MEDINA,

Director General, EUROCONTROL

This paper provides a high-level overview of some of the principal challenges facing Air Traffic Management (ATM). It explains that air traffic control is a natural monopoly that nevertheless facilitates competition among the various actors in the air transport industry. ATM provides airspace capacity to meet traffic demand. The paper provides the latest historical and forecast air traffic statistics, confirming that it will take seven years for European air traffic to fully recover from the pandemic.

Airspace capacity must be provided in a safe, secure, cost-efficient, and sustainable manner to meet demand. Doing so is complex and becomes particularly challenging in the face of external events, such as Russia's invasion of Ukraine, whose impact on ATM is described. The long-term challenges of the decarbonization and digitalization of ATM are addressed, as well as the impact of Artificial Intelligence (AI), with some examples provided of how ATM is adapting.

INTRODUCTION

The ICAO Chicago Convention requires States to provide Air Traffic Services, and to ensure a safe and expeditious flow of air traffic. The States do this, in principle, through their Air Navigation Service Providers (ANSPs), which are natural monopolies controlling their State sovereign airspace, or, through ATS delegation agreements, airspace over other States. The monopolistic situation arises from the fact that two different ANSPs cannot provide air traffic services in the same volume of airspace. ANSPs must ensure that the ATM system has adequate capacity, at the right place and at the right time, to meet demand. Capacity is a function of the airspace design and structure, operational procedures, number of air traffic controllers, technical system support and other supporting infrastructure. If there is too much demand to fly through a specific volume of airspace (a "sector", under an air traffic controller's direct responsibility), then action needs to be taken before flights depart to protect that sector from "overload", including delaying or re-routing flights.

Commercial and competitive pressures from the airspace users to meet demand, challenge ATM to grow system capacity while protecting safety levels, prudently managing costs, and ensuring aircraft are flown as efficiently as possible to reduce fuel burn and emissions. As air traffic grows, so does the complexity of these challenges. A more cross-border approach will be required to adapt airspace structures to traffic flows; a more accelerated recruitment of controllers will be needed; the implementation of more advanced operational concepts and technical solutions will be required. Those will come, indeed, with challenges related to ATS delegations, availability of sufficient interested staff, cultural changes to accept more innovative concepts, and, as a result of more digitalization and artificial intelligence, the risk of bringing with them more intelligent cybersecurity attacks that require appropriate responses from the aviation community.

THE CHALLENGE OF DEMAND - EUROPEAN AIR TRAFFIC IN 2023

10.2 million flights were controlled in European airspace in 2023, reaching 92% of 2019's 11 million flights (Figure 1)¹. The maximum number of flights in a 24-hour period was 34,367, compared to the all-time peak of 37,228 flights in 2019.

Air traffic is expected to reach 2019 levels in 2026 (Figure 2), with 11.2 million flights, according to EUROCONTROL's latest 7-year forecast, covering the period 2024-2030².

Air traffic growth is driven by society's demand for business and leisure travel (1.19 billion passengers at Europe's top 40 airports in 2023), and by the strong competition among air carriers to each serve as high a proportion of that demand as possible.

Traffic is majority intra-European. Ryanair Group operated 2,813 flights/day on average in 2023, followed by Lufthansa Group (2,583), IAG (2,167), Air France-KLM Group (1,787), easyJet (1,477), and Turkish Airlines (1,443). Mainline carriers grew their market share from 32% to 35%, with low-cost carriers growing by 1 point to 33%.

Our top airports in 2023 were Istanbul IGA (1,365 flights/day), Amsterdam (1,255), London Heathrow (1,251), Paris CDG (1,247), Frankfurt (1,179), and Madrid (1,066). They were the only airports with more than 1,000 flights/day, with the top 10 completed by Barcelona, Munich, Rome Fiumicino, and London Gatwick. Airline and airport rankings are very similar to those of 2019.

¹ <https://www.eurocontrol.int/sites/default/files/2024-01/eurocontrol-european-aviation-overview-20240118-2023-review.pdf> (The source of the traffic statistics quoted in this paper).

² <https://www.eurocontrol.int/publication/eurocontrol-forecast-2024-2030>

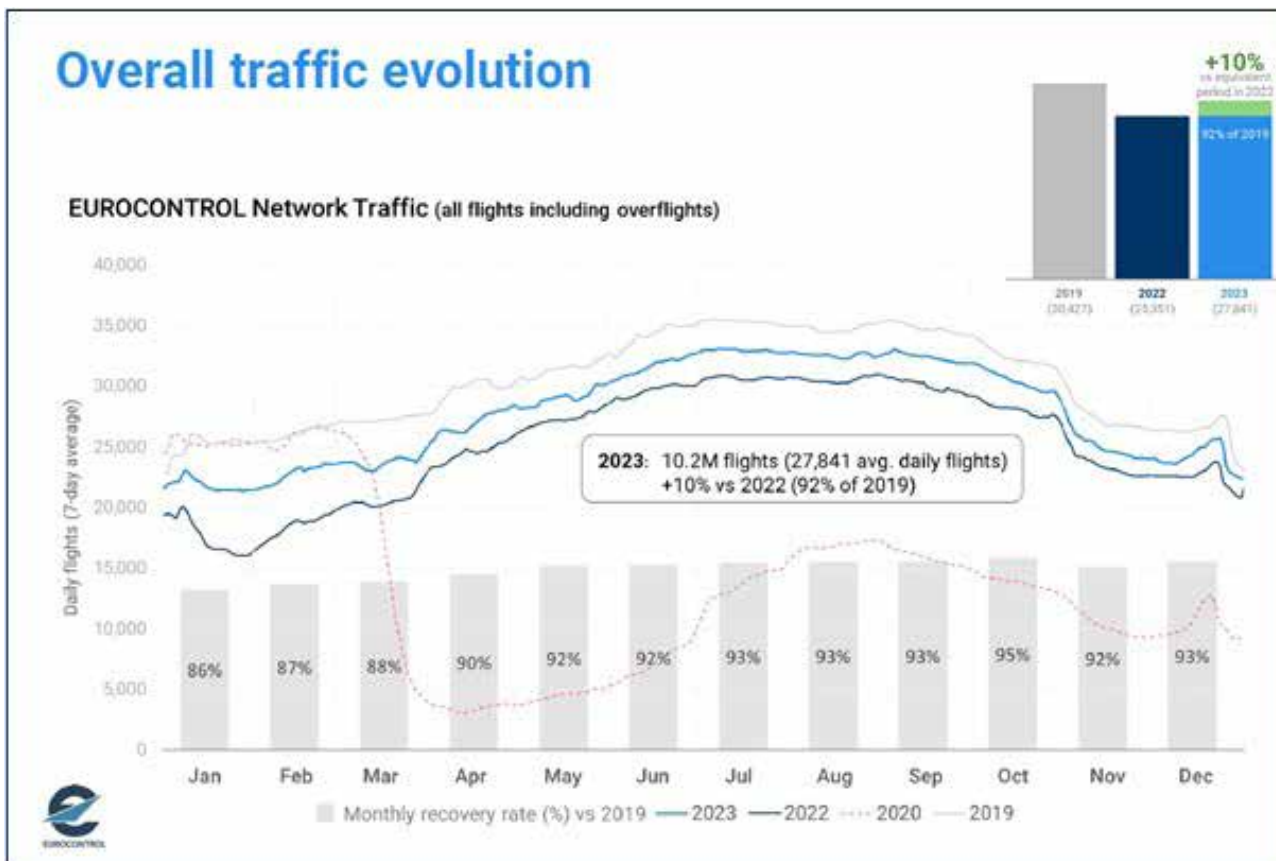


Figure 1: Evolution of European Air Traffic 2019-2023

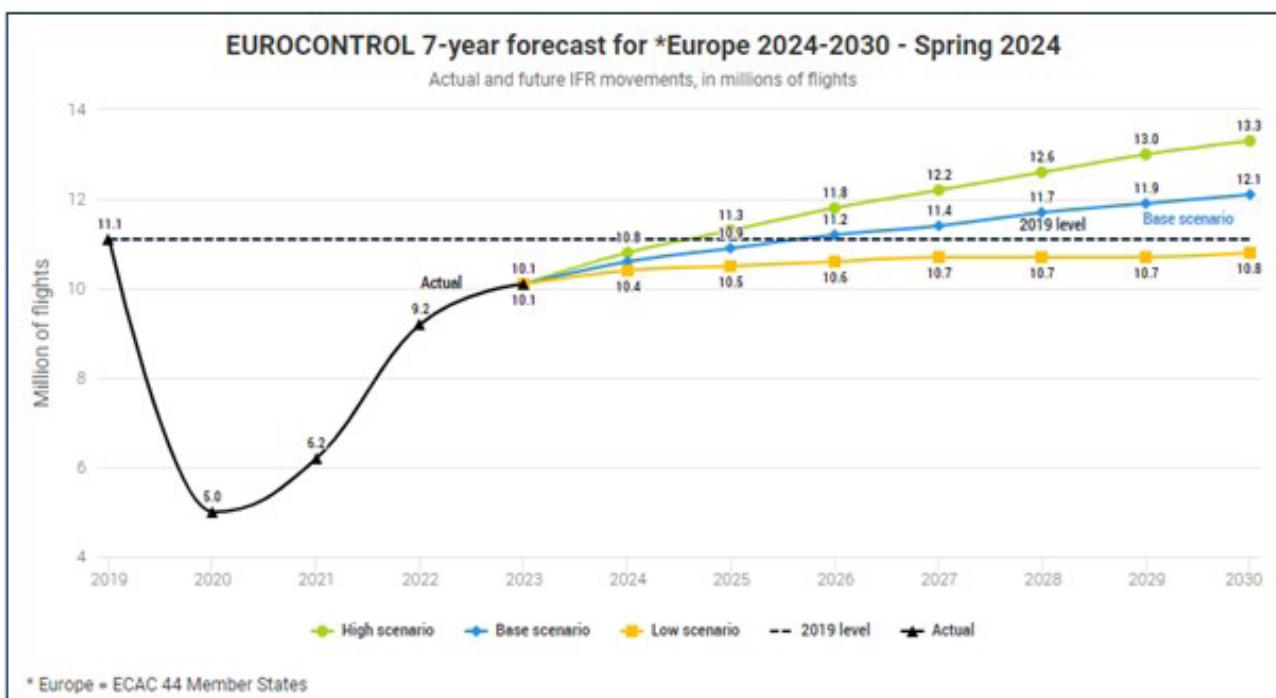


Figure 2: EUROCONTROL 7-year traffic forecast for 44 ECAC Member States 2024-2030

This is reflected in country-by-country statistics, with the UK, Spain, and Germany each handling more than 4,500 departures and arrivals daily. Türkiye posted the highest increase (+16%) as part of the dynamic South-East axis flows, owing to tourist flights, the continuing expansion of Istanbul IGA Airport and the shift of some

flights from Russian to Turkish airspace. Indeed, the Europe-Middle East traffic flow is now greater than the North Atlantic flow (1,401 vs 1,227 flights/day) The Europe-North Africa traffic flow is the only other with over 1,000 flights/day, with these three accounting for 2/3 of the traffic to/from Europe.

THE CHALLENGE OF WAR – RUSSIA'S INVASION OF UKRAINE

European ATM is coping with a geographic reconfiguration of traffic as a result of Russia's unprovoked invasion of Ukraine. For Ukrainian aviation, it has been disastrous with the closure of its airspace to civil air traffic (Figure 3).

Approximately 20% of Europe's airspace is not available to civilian air traffic due to the war. Although overall traffic is 8-9% below what it was in 2019, it is now consistently above 2019 numbers in South-West, South-East, and Central Europe. This concentration of

traffic means that the skies are more congested than before, potentially leading to an increase in departure and arrival delays.

Flows between the EUROCONTROL area and other parts of the ICAO EUR Region including Russia are down by 68% in comparison with 2019 (Figure 4). Russian airspace is closed to most European long-haul airlines heavily impacting carriers, such as Finnair that operated through the Russian airspace to reach the Far East. Russia's invasion means that aircraft will fly greater distances, take longer to reach their destinations, burn more fuel, and release more greenhouse gases.

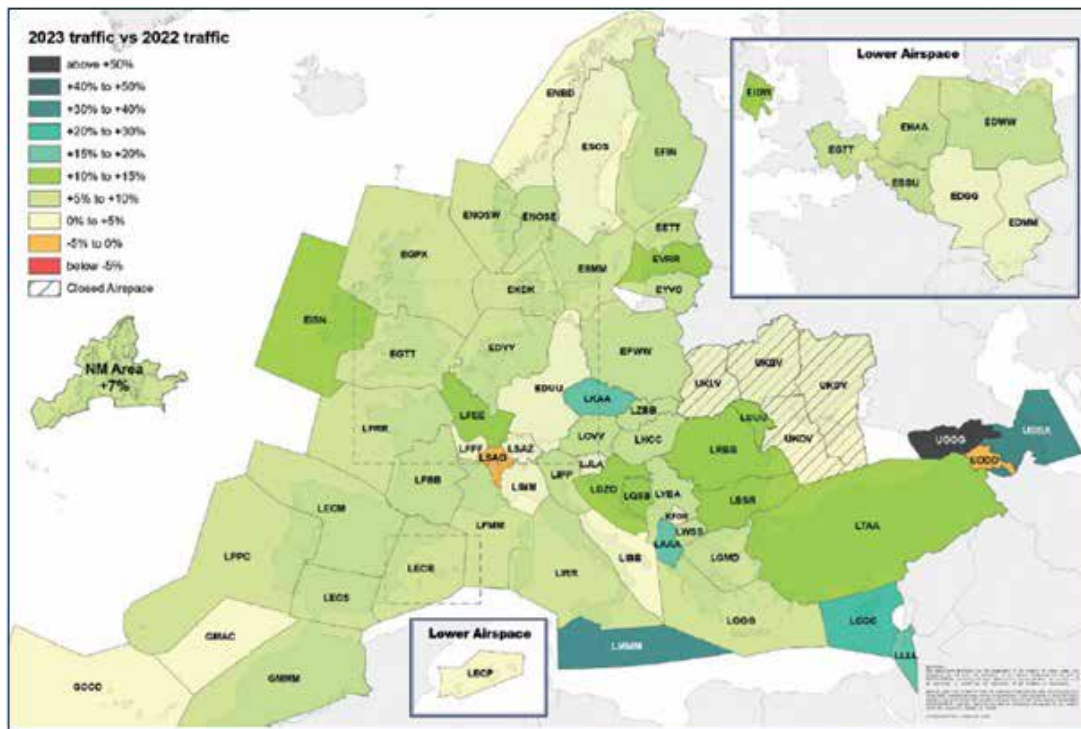


Figure 3: Increase/decrease in traffic for European flight information regions 2022-2023.

Region	Average daily flights	% 2022	% 2019
Intra-Europe	21,660	↑ +8%	↓ -6%
Europe ↔ Middle-East	1,401	↑ +17%	↓ -1%
Europe ↔ North Atlantic	1,227	↑ +14%	↑ +4%
Europe ↔ North-Africa	1,098	↑ +28%	↑ +7%
Europe ↔ Asia/Pacific	712	↑ +33%	↓ -10%
Europe ↔ Other Europe	332	↑ +8%	↓ -68%
Europe ↔ Southern Africa	297	↑ +9%	↓ -5%
Europe ↔ Mid-Atlantic	175	↑ +1%	↑ +1%
Europe ↔ South-Atlantic	172	↑ +18%	↓ -7%
Non Intra-Europe	5,414	↑ +18%	↓ -12%

Figure 4: Average daily departure/arrival flights between regions 2023.

THE CHALLENGE OF CLIMATE CHANGE – DECARBONIZING ATM

Improving flight efficiency remains ATM's main contribution to the European "Green Deal", reducing fuel burn and its associated greenhouse gas emissions. In April 2022, EUROCONTROL published a major study³ which analyzed long-term air traffic and emissions forecasts, to outline how our industry might achieve net zero CO₂ emissions by 2050.

Sustainable Aviation Fuels (SAFs) have the highest potential to reduce emissions, by over 40%. Nevertheless, improved flight efficiency could deliver 22 million tonnes (8%) of the 279 million tonnes of CO₂ emissions savings required to meet the net zero target. Fuel and emissions savings come from ATM facilitating cross-border free-route operations in the entire airspace of the EUROCONTROL member states, reducing airspace restrictions, supporting airspace users in more efficient flight planning, optimized ascent and descent to/from cruising levels, and more efficient movement of aircraft at airports. Research is also underway into how ATM can facilitate avoidance of contrails, in an initiative to reduce the non-CO₂ impacts of aviation.

ATM is also decarbonizing its ground infrastructure of area control centers, airport towers, offices, and ground equipment for communications, navigation, and

surveillance. A 2022 EUROCONTROL Think Paper⁴ estimated that European ATM's ground infrastructure consumed approximately 1,140 GWh of electricity in 2020, the generation of which would produce 311,000 tonnes of CO₂ emissions when calculated using carbon intensity of electricity production data. A total decarbonisation of that energy could save over 6 million tonnes of CO₂ by 2050.

ANSPs highlighted some initiatives to "green their infrastructure" at a recent webinar organized by NM. The Croatian, German, and Italian ANSPs, together with NM, shared their experiences, ranging from cloud computing, improved cooling at data centers, renewable energy contracts, and developing local renewable energy solutions (Figure 5) for their facilities (solar power, wind turbines, and even hydrogen fuel cells). Virtualization, embracing cloud-based solutions, is emerging as a key mechanism for conserving energy.

Network Manager's recently opened Network Operations Centre has over 460 solar panels on its roof (Figure 6), generating up to 700kWh of power per day and approximately 137 MWh over the year. It is being certified to the construction industry's BREEAM excellent environmental standard.

ATM, from both the operational and infrastructure perspectives, is innovating to support the European "Green Deal".

³ Downloadable at <https://www.eurocontrol.int/press-release/eurocontrol-2050-air-traffic-forecast-showing-aviation-pathway-net-zero>

⁴ Downloadable at <https://www.eurocontrol.int/publication/eurocontrol-think-paper-13-greening-european-atms-ground-infrastructure>



Figure 5: Ground-based navigation facility (DME - Distance Measuring Equipment) on Lošinj Island, Croatia, powered primarily by solar energy (Photo courtesy of Croatia Control).



Figure 6: EUROCONTROL new Network Manager Operations Centre

THE CHALLENGE OF COST EFFICIENCY – PLANNING THE EVOLUTION OF THE GROUND INFRASTRUCTURE

Communications, Navigation and Surveillance (CNS) infrastructure, coupled with the associated avionics on board aircraft, make up ATM's sensory system. Controllers and pilots need to know the speed, height, heading, and position of their aircraft. Without CNS, an air traffic control officer cannot give an instruction to a pilot, nor the pilot acknowledge it.

Over 6,000 European ground-based facilities support CNS, costing approximately €1.3bn annually to run. The advent of space-based CNS systems (e.g. Aerion, Galileo, GPS & Iris) has added a new layer of technology, allowing us to reduce some of the layers on the ground, by optimizing the numbers of legacy navigation facilities - Non-Directional Beacons (NDB) and VHF Omnidirectional Range (VOR) in particular. This reduces costs, and also helps to reduce frequency congestion.

For surveillance, we are seeing less and less reliance on what most people think of as the "traditional" radars, and a big increase in the deployment of a mix of facilities all of which have ADS-B (Automatic Dependent Surveillance) at their core.

On the communication front, we know that datalink (think of a tailored SMS between controllers and pilots) improves capacity and safety. But we also know that both ATC

and airlines will need more and more data bandwidth in the future, which today's datalink systems may struggle to handle. So, we are working with the SESAR Joint Undertaking (SJU) and SESAR Deployment Manager (SDM) to finalize the business case for future communications infrastructure as the way ahead.

There is much, therefore, to ponder and to plan. To that end, EUROCONTROL has accepted an invitation from the European Commission to include a new "CNS Programme Manager" function within its Network Manager responsibilities⁵. Now operational, the CNS PM will lead the development of a European CNS Evolution Plan that will chart a course for the future of the ground and space infrastructure and associated avionics. It will be compatible with the forthcoming version of the European ATM Master Plan being developed by the SJU.

However, Russia's invasion of Ukraine and increased disruption of satellite navigation signals near conflict zones probably means that, for security reasons, infrastructure optimization will be more limited, compared to what was being considered.

⁵ Article 7 of the Network Functions Implementation Regulation 2019/123 (NFIR 2019/123) within the EU Single European Sky legislation

THE CHALLENGE OF DIGITALIZATION – DATA, ARTIFICIAL INTELLIGENCE AND CYBERSECURITY

ATM is a technology heavy industry, and works on decades-long investment horizons. This is expressed in the European ATM Master Plan, whose ambitious objectives foresee a transition towards the “Digital European Sky” through investing €25-53 billion in the period 2012-2050, of which 80% would be invested by 2035⁶.

Digitalization allows observation – that is, monitoring of performance – and then modification by reprogramming digital equipment to improve operational performance. It works best when everything is connected to a network. Digitalization allows for faster reactions and more agility, providing the basis for new digital services.

ATM's digital transition covers the gathering, processing, transporting, sharing, and publication of data, as well as the introduction of new, more efficient ground equipment and software-defined radios on-board aircraft. Digitalization is already happening at pace as the following examples demonstrate.

System-Wide Information Management (SWIM) provides the means to share information and data. At an airport, SWIM allows all relevant actors to know when an aircraft is going to land and arrive at its gate. This allows ATC, the airline, the ground handling agents, and the airport operator to ensure that all relevant services are ready, covering stand allocation, passenger disembarkation, aircraft refuelling, cabin cleaning, catering, customs and passport control, and the introduction of a new crew.

NewPENS – the digital network for the transport of data throughout the ATM system – is an ultra-resilient IP network for exchanging critical and common aeronautical information reliably, securely, and safely in a cost-efficient way. Its architecture guarantees an increased level of end-to-end control and authority, connecting over 100 locations in 47 countries. It operates with 99.999% availability, and includes elaborate cybersecurity precautions. It will evolve to meet business needs, providing the backbone on which more SWIM applications will run. NewPENS is supported by a service desk at EUROCONTROL.

Because SWIM is at the heart of the digitalization of ATM, it needs to be secured against cyberattacks, which are increasing. The purpose of a Public Key Infrastructure (PKI) is to facilitate the secure electronic transfer of information for a range of activities on a network. EUROCONTROL and the SDM have developed a new service to ensure that stakeholders' data and information are transferred securely, in which sending/receiving parties are identified and authenticated using a PKI. It will be used where the identities of counterparties involved must be ensured.

Artificial Intelligence (AI) is developing at pace in all ATM domains, notably since the emergence of large language models, such as ChatGPT. Whilst waiting for regulations addressing aviation safety-related applications, AI is already being used to:

- increase productivity in the Network Operations Centre;
- improve weather predictions and anticipate regulations to reduce impacts at airports;
- introduce speech recognition capability to replace pseudo-pilots in ATC training;
- improve monitoring the performance of European ATM surveillance and navigation services;
- monitor, and classify drone trajectories.

To respond to the recent more intelligent AI-based cyberattacks, EUROCONTROL is developing new AI services to determine the source of cyberattacks.

EUROCONTROL's “integrated Network Management” (iNM) programme will replace our core systems which have successfully ensured the safe and efficient flow of aircraft across the European airspace for over 25 years. It will deliver a range of innovative digital products, enabling EUROCONTROL to maximize the efficiency, safety, and sustainability of the European aviation network through a new generation of cutting-edge, resilient, and scalable operational systems. The incremental renewal of all of NM's main operational systems will be achieved by 2030, resulting in a new digital architecture enabling NM to deliver ever more integrated business services and products to its stakeholders.

CONCLUSION

ATM has been successfully dealing with many different challenges over the decades, and will continue to do so, ensuring that flying remains safe, secure, punctual, cost-efficient, and sustainable through cooperative planning of modernization programmes, and taking advantage of new digital products.

⁶ European ATM Master Plan 2020 – Executive View, p118 (downloadable from <https://www.sesarju.eu/masterplan2020>)

Le développement du trafic aérien, les compagnies aériennes et les effets de leur concentration

Par **Pierre CAVÉ**

Associé en charge de l'activité Aviation de BDO

Avec une croissance du PIB monde fortement corrélée à celle du trafic aérien, l'année 2023 rattrape le niveau du trafic 2019 en nombre de passagers. Les dynamiques de reprise restent contrastées selon les zones géographiques : l'Europe se démarque par une reprise portée par les pays d'Europe du Sud ; l'Amérique du Nord affiche un trafic pré-crise quasi retrouvé ; l'Asie-Pacifique reste une zone dynamique représentant un tiers du trafic mondial. Pour autant, les compagnies aériennes n'ont pas retrouvé la marge nette qu'était la leur avant la crise sanitaire. Côté production aéronautique, Airbus conserve son statut de leader pour la cinquième année consécutive, malgré des délais de production importants. Sur le long terme, le trafic devrait poursuivre sa croissance avec des défis environnementaux à relever, couplée à une évolution des clientèles pré-Covid.

Cet article a été écrit avec la participation de Marie Bonnot et Matthieu Guimard, consultants en stratégie spécialisés dans le secteur.

À propos de BDO

Cinquième groupe mondial d'audit et de conseil, BDO accompagne ses clients grâce à diverses expertises fonctionnelles et métiers. L'équipe Strategy apporte depuis plus de 70 ans ses analyses, afin d'éclairer les dirigeants dans leurs prises de décisions.

Une croissance du PIB monde fortement corrélée à la croissance du trafic aérien

Sur le long terme, la croissance annuelle du trafic aérien en passagers-kilomètres transportés avoisine les 1,9 fois la croissance du PIB monde.

Cette évolution masque cependant toujours de très fortes disparités entre les zones les plus matures pour le transport aérien et les pays émergents.

En 2019, l'Amérique du Nord est le marché du transport aérien le plus mature, avec un taux de croissance annuel moyen (TCAM) à 3,0 % entre 2010 et 2019. La croissance moyenne du PIB des États-Unis à 2,3 % sur cette période témoigne de cette croissance mesurée



Figure 1 : Croissance mondiale comparée du PIB et du trafic aérien en RPK pré-Covid (en % de croissance annuelle)
(Source : BDO, La Banque mondiale).

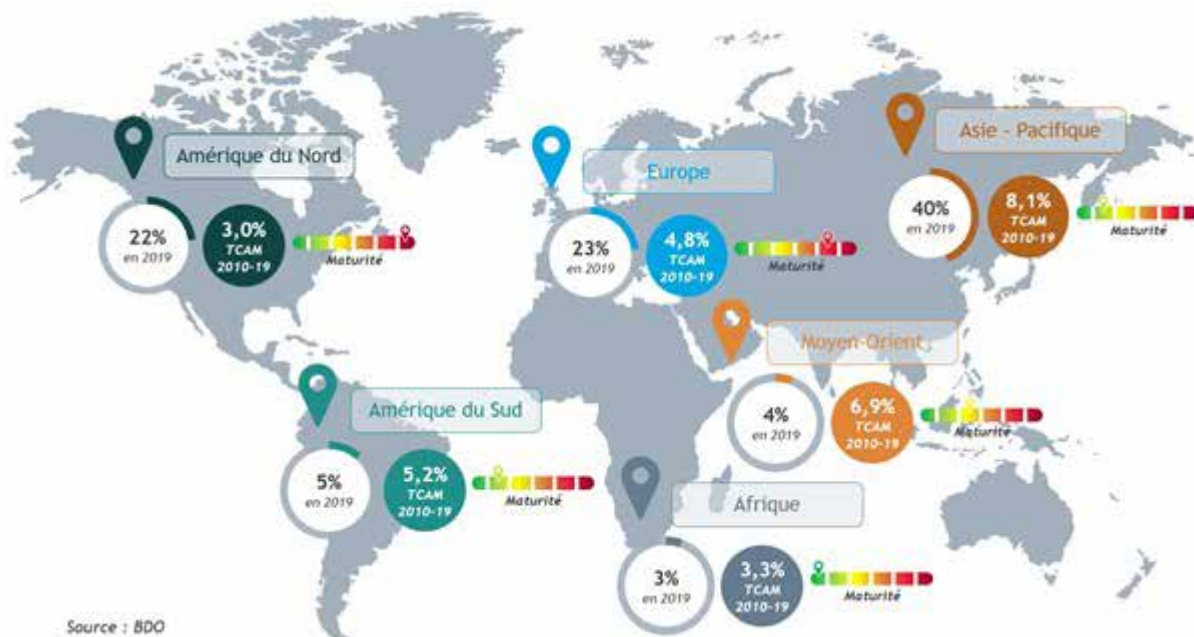


Figure 2 : Parts de marché en 2019, taux de croissance annuel moyen 2010-2019 et niveau de maturité du trafic au départ des continents (Source : BDO).

du trafic aérien par rapport au reste du monde. Ce marché couvre 22 % du trafic mondial en 2019, et est principalement porté par les États-Unis (TCAM 2010-2019 : 3,0 % ; PDM (part de marché) 2019 : 14 %).

L'Europe est le second marché en termes de maturité, affichant un TCAM 2010-2019 de 4,8 %. La croissance a été stimulée ces dernières années grâce à l'émergence des compagnies *low-cost*. La part de marché qu'elle occupe est équivalente à celle de l'Amérique du Nord.

L'Asie-Pacifique, quant à elle, est portée par la Chine qui affiche en 2019 une part de marché de 20 % du trafic aérien mondial (36 % de parts de marché sur la région Asie-Pacifique), avec un TCAM 2010-2019 de près de 10 %. La croissance moyenne du PIB de la Chine à 7,7 % sur cette période est portée par la forte croissance du trafic chinois. C'est en 2009, lors de la crise financière, que le trafic aérien au départ du continent asiatique dépasse celui d'Amérique du Nord. Il devient alors le premier marché aérien mondial en termes de passagers transportés.

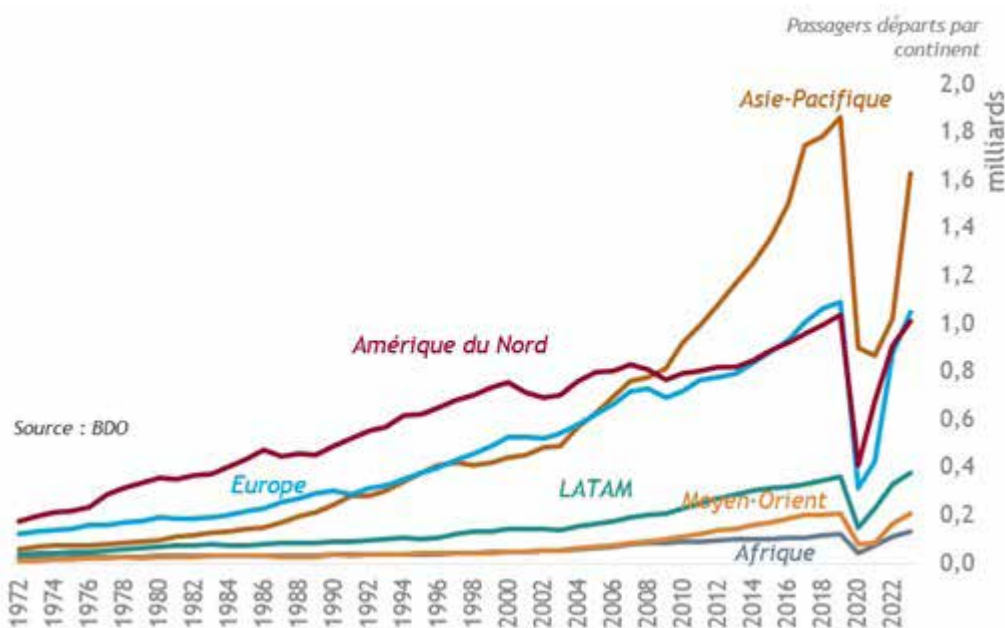


Figure 3 : Évolution du trafic aérien par continent (en Mds de passagers départs) (Source : BDO).

Dans le reste du monde : en Amérique du Sud, en Afrique ou encore au Moyen-Orient, la moindre maturité des marchés témoigne du potentiel de croissance du trafic aérien de ces continents inter et intra-zones. Notamment, l'Afrique et le Moyen-Orient, qui sont des marchés principalement tournés vers l'international, ont respectivement 58 % et 46 % de leur trafic intra-Afrique et intra-Moyen-Orient, lorsque les autres plaques géographiques affichent des parts de trafic intra-continent de plus de 80 %.

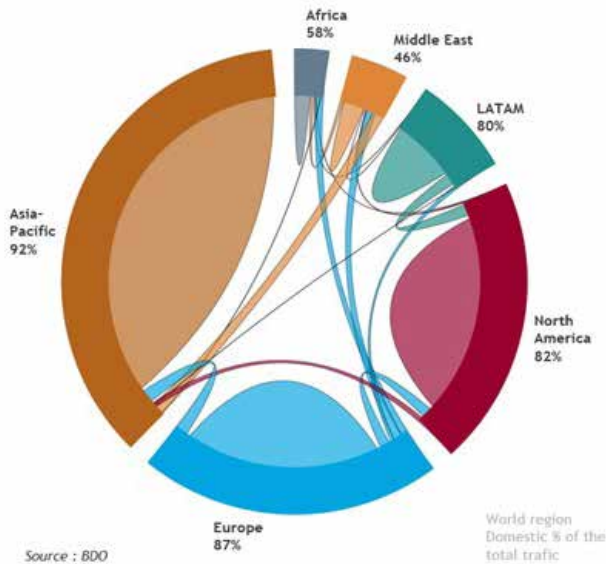


Figure 4 : Répartition des trafics passagers domestiques et internationaux de chaque région du monde en 2023 (Source : BDO).

Ces évolutions soulignent ainsi une nouvelle fois les fortes différences entre zones matures et zones émergentes :

- L'Asie-Pacifique continue de structurer son réseau aéroportuaire domestique et moyen-courrier, pour accompagner la croissance économique, démographique et la propension à voyager des pays asiatiques. Le trafic intra-Asie-Pacifique constitue en 2019 encore 92 % de l'offre totale de la zone. Avec un taux de croissance annuel moyen du trafic aérien de près de 8,1 %, ce marché est loin d'avoir atteint sa pleine maturité.
- En Afrique, les tendances macroéconomiques beaucoup plus contrastées dans les pays conduisent à des évolutions beaucoup plus incertaines à moyen terme sur le trafic intra et inter-zones.
- La forte demande extérieure au Moyen-Orient permet à la zone de structurer son réseau aéroportuaire local autour des grands *hubs* intercontinentaux.
- En revanche, en Europe et en Amérique du Nord, la maturité du trafic observée ces dernières années limite le potentiel de croissance des compagnies traditionnelles. Cependant, le trafic continue de croître notamment avec l'émergence des compagnies *low-cost* sur ces dernières années.

Une année 2023 qui rattrape le niveau du trafic 2019

Pour autant, la crise de la Covid-19 a totalement modifié ce schéma, à cause de l'arrêt quasi total du trafic aérien dans toutes les zones du monde, suivi d'une reprise très dynamique et bien plus forte que la vitesse du PIB sur 2021 ou 2022.

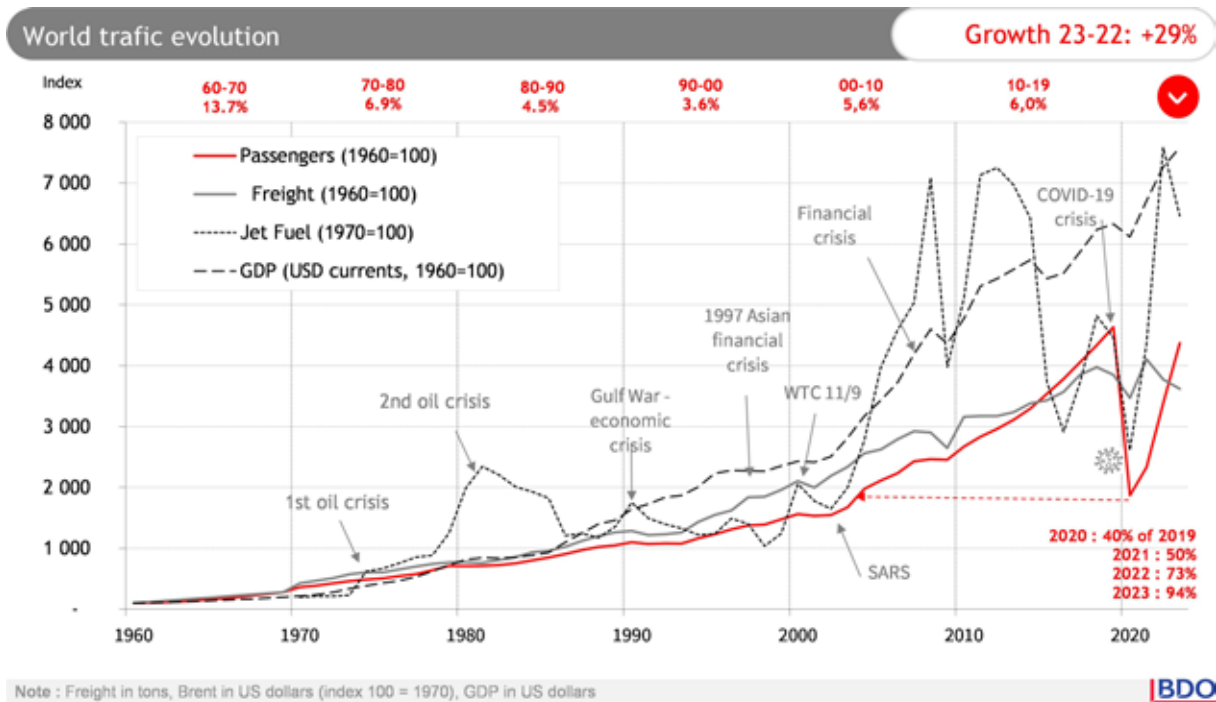


Figure 5 : Évolution de l'historique du trafic mondial aérien 1960-2023 (Source : BDO).

En 2020, le transport aérien commercial subit la plus grosse turbulence de son histoire. Le trafic chute de 60 % en 2020 et ne restaure en 2021 que 50 % de son nominal 2019. L'année 2022 qui s'annonçait bien relancée a été perturbée par la guerre en Ukraine, revenant à 73 % de son trafic d'avant-crise.

En 2023, le nombre de passagers ayant voyagé dans le monde se rapproche du niveau qu'était le sien quatre ans avant la crise de la Covid-19. En 2023, le trafic aérien mondial totalise près de 4,4 milliards de passagers pour 36,7 millions de vols. Entre 2022 et 2023, le trafic mondial a atteint 94 % de son niveau de 2019. Le rattrapage du niveau d'avant-crise est estimé pour courant 2024.

Le marché mondial reste dominé par l'Asie-Pacifique qui représente près de 37 %, suivi de l'Europe et de

l'Amérique du Nord avec respectivement 24 % et 23 % de parts de marché. Le reste du monde se partage les 22 % restants.

Les trois principaux marchés mondiaux n'ont pas retrouvé, en 2023, leur niveau de trafic de 2019. Seuls l'Europe et l'Amérique du Nord ont atteint ce niveau lors du dernier trimestre de l'année. Bien qu'en retard sur 2019, l'Asie redevient en 2023 *leader* du transport aérien en affichant une croissance de 170 % par rapport à l'exercice 2022, lorsque l'Europe et l'Amérique du Nord affichent des croissances respectives égales à 120 % et 111 %.

L'Amérique latine (LATAM), le Moyen-Orient et l'Afrique ont, quant à eux, atteint et / ou dépassé leur niveau de trafic 2019 avec des croissances 2022-2023 respectivement égales à 115 %, 126 % et 121 %.

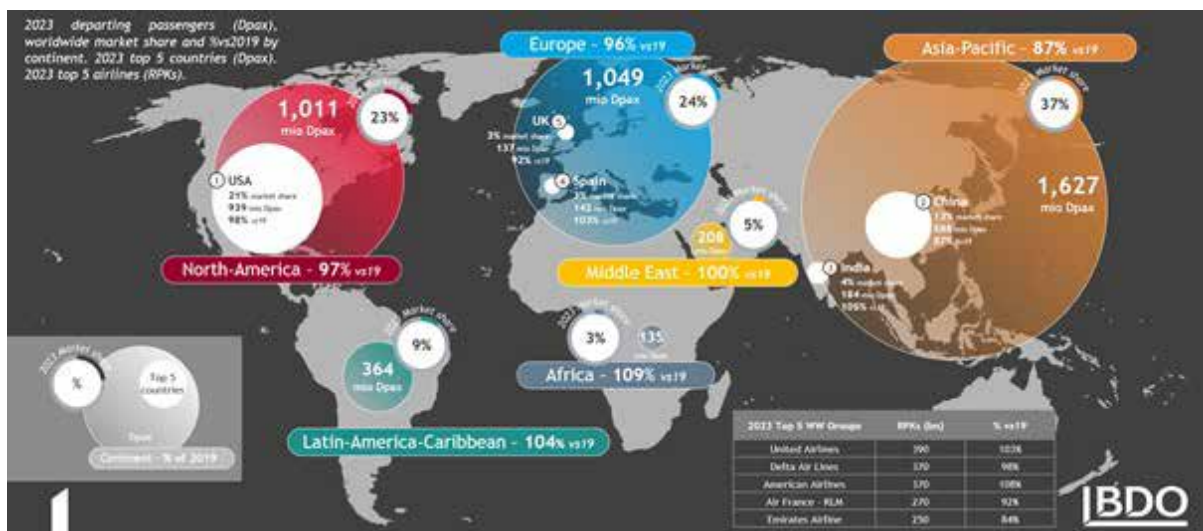


Figure 6 : État du transport commercial aérien international en 2023 par zone géographique, top 5 pays – en parts de marché, en millions de passagers départs et % de 2019 ; top 5 compagnies – en RPK (revenue passager kilomètre) (Source : BDO).

World areas	2019 mio Passengers	cumulative %	Week #			H1	H2	
			Week 1	Week 2	Week 3			
Europe	1 091	23%	29%	39%	80%	93%	99%	96%
Asia	1 597	57%	47%	44%	51%	83%	90%	87%
N. America	1 040	80%	39%	65%	87%	96%	98%	97%
LATAM	364	87%	41%	64%	91%	103%	106%	104%
Middle East	207	92%	38%	40%	80%	99%	102%	100%
CIS	148	95%	68%	89%	86%	97%	93%	95%
Africa	124	98%	36%	63%	89%	108%	109%	109%
Oceania	115	100%	35%	32%	70%	87%	90%	89%
WORLD	4 687		40%	50%	73%	92%	96%	94%

Figure 7 : Évolution des passagers départs par zone géographique - en % de 2019 (Source : BDO).

En 2019, le trafic aérien émettait près d'une gigatonne de CO₂ dans l'atmosphère. En 2023, l'activité n'ayant pas redépassé celle d'avant-crise et les avions dernière génération devenant plus efficaces énergétiquement, le niveau mondial d'émissions de CO₂ reste inférieur à celui de 2019. Cependant, au regard de la croissance annoncée, les émissions de CO₂ liées au trafic aérien devraient approcher la gigatonne en 2024-2025. Les carburants d'aviation durables (SAF) avant tout, puis les technologies avion et moteur, l'optimisation des opérations ou encore les réglementations et mécanismes de marché, sont des leviers nécessaires pour réduire ces émissions et atteindre au plus vite le net zéro (plus ou moins rapidement selon les maturités technologiques, leurs mises à l'échelle et une régulation d'application internationale).

United Airlines Group, Delta Air Lines Group, American Airlines Group restent en 2023 les trois principaux groupements mondiaux de compagnies aériennes avec des revenus passagers kilomètres (RPK) respectivement égaux à 390 Mds, 370 Mds et 370 Mds de passagers kilomètres. Les groupes Air France-KLM et Emirates Airline, en retard vis-à-vis de leurs homologues américains quant à leur reprise, complètent ce top 5 des groupements mondiaux. En 2023, ces derniers concentrent respectivement 19 % et 14 % des RPK¹ et passagers mondiaux.

Depuis la crise de la Covid-19, la concentration mondiale des compagnies aériennes s'est ralentie. En 2019 et en 2023, près de 90 compagnies aériennes, soit 15 % des compagnies aériennes, monopolisent 80 % du trafic aérien mondial (en passagers départs).

La concentration des compagnies aériennes dans le monde est un phénomène qui s'est accéléré depuis les années 1990. Elle se caractérise par une diminution du nombre de compagnies aériennes et une augmentation de la taille des compagnies existantes. Ce phénomène a pour causes, notamment, la libéralisation du transport

¹ RPK : passagers-kilomètres payants : nombre total de kilomètres parcourus par l'ensemble des passagers.

aérien, la mondialisation, ou encore les fusions et acquisitions entre compagnies aériennes, qui ont permis aux grandes compagnies de renforcer leur position sur le marché.

Bien que cette tendance se généralise, des disparités sont observées dans le monde. En 2023, l'Amérique du Nord est le marché le plus concentré du trafic mondial aérien. Les quatre premières compagnies représentent plus de la moitié des RPK du continent. Au Moyen-Orient, Emirates et Qatar Airways en comptent près de 40 % lorsqu'en Asie l'offre en compagnies est nettement moins concentrée. Plus de quinze compagnies ont une part de marché comprise entre 2 % et 7 %. L'Europe se situe entre l'Amérique du Nord et l'Asie ; les sept premières compagnies (de Ryanair à Wizz Air) couvrent plus de la moitié des RPK européens.

En 2023, les compagnies aériennes n'ont pas retrouvé la marge nette qu'était la leur avant la crise sanitaire

En 2023, d'après IATA (International Air Transport Association), le chiffre d'affaires des compagnies aériennes au niveau monde a atteint 896 milliards de dollars, et a dépassé le niveau 2019 de 6,9 %. Ce dernier a cru de 21,7 % de 2022 à 2023, et IATA prévoit une croissance de 7,6 % en 2024 vs 2023 (IATA, 2023).

Le trafic passagers et le cargo ont respectivement rapporté aux compagnies près de 642 Mds et 135 Mds de dollars en 2023, montant supérieur à 2019 bien que les volumes de passagers et de cargo soient respectivement plus faibles qu'en 2019 de 4,8 % et 5,4 %. En 2022 et 2023, la croissance du chiffre d'affaires cargo ralentit, après avoir connu une augmentation de 18,8 % en 2021 (vs 2020, année du début de la crise). Niveau dépenses, celles-ci sont plus importantes en 2023 qu'en 2019, notamment avec l'augmentation des dépenses liées au carburant, qui pesaient 24 % en 2019 et qui pèsent aujourd'hui 32 % des dépenses des compagnies aériennes. La hausse des prix du baril de

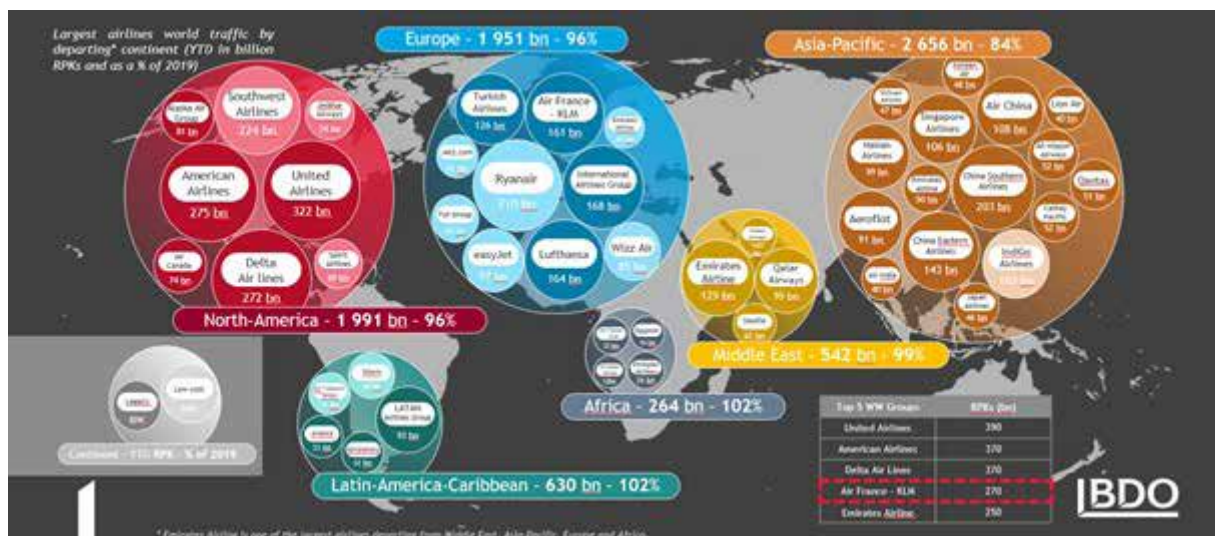


Figure 8 : État des compagnies aériennes en 2023 par zone géographique, top 5 compagnies – en RPK (Source : BDO).

pétrole et du kérosène expliquent ce fort changement. Le reste des dépenses s'est rapproché du niveau pré-crise, mais reste inférieur de près de 3 %.

Finalement, la marge opérationnelle des compagnies aériennes est estimée à 4,5 % en 2023 par IATA contre 5,2 % en 2019.

La marge nette des compagnies aériennes n'a, en 2023, pas été retrouvée. Elle est affichée à 2,6 % contre 3,1 % en 2019, soit une marge respective par passager départ de 5,4 \$ contre 5,8 \$ en 2019.

Les retours sur capitaux investis suivent la même tendance. En 2019, le ROIC des compagnies aériennes mondiales était égal à 5,8 % ; il est descendu à -19,3 % en 2020 pour ne redevenir positif qu'en 2022 et atteindre 4,7 % en 2023.

À l'échelle continentale, seule la marge opérationnelle des compagnies aériennes commerciales de l'Amérique du Nord, de l'Europe et du Moyen-Orient

est positive. Elles portent, au niveau monde, le déficit des compagnies opérant en Asie-Pacifique, en Amérique latine et en Afrique. Toutefois, en 2024, cette marge devrait redevenir positive sur l'ensemble des continents.

Airbus conserve son statut de leader pour la cinquième année consécutive, malgré des délais de production importants

Airbus détrône Boeing pour la cinquième année consécutive, enregistrant 2 094 commandes en 2023 (nettes, après annulations) pour un carnet total de commandes de 6 685 avions au 29 janvier 2024. Boeing, de son côté, présente 1 314 commandes en 2023 et un carnet total de commandes de 4 880 avions. Les deux constructeurs représentent à eux deux près

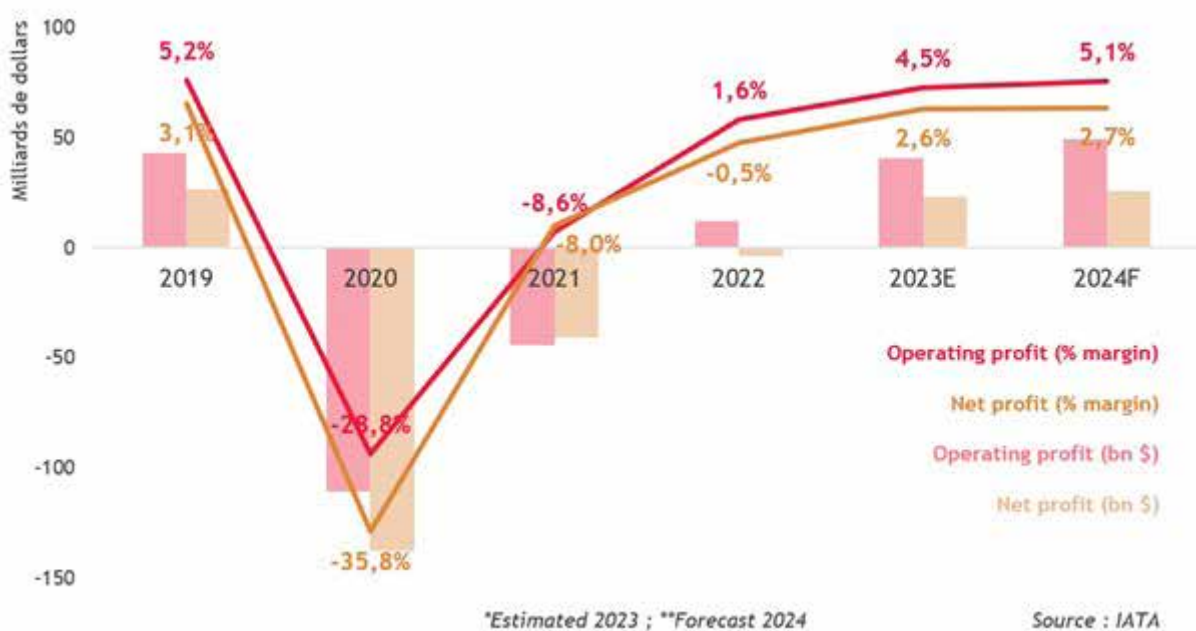


Figure 9 : Marge opérationnelle et nette des compagnies aériennes à l'échelle mondiale (en Mds\$ et % vs chiffre d'affaires) (Source : IATA).

	2022	2023E*	2024F**
Global	1,6%	4,5%	5,1%
North America	6,0%	7,0%	6,7%
Europe	4,0%	6,5%	6,0%
Asia-Pacific	-8,9%	-0,3%	2,8%
Middle East	5,1%	6,1%	6,0%
Latin America	-4,1%	-0,2%	0,5%
Africa	-3,3%	-0,3%	0,2%

*Estimated 2023 ; **Forecast 2024 Source : IATA

Figure 10 : Marge opérationnelle des compagnies aériennes à l'échelle mondiale (en % vs chiffre d'affaires) (Source : IATA).



Figure 11 : Carnets de commandes Airbus et Boeing au 29 janvier 2024 (Source : Constructeurs).

de 91 % des carnets de commandes mondiaux, 53 % pour Airbus et 39 % pour Boeing (Cirium, 2024).

Après la crise de la Covid, les années 2021, 2022 et 2023 ont permis au secteur de la construction aéronautique de se reconstruire. Pour Boeing, l'année 2023 reflète les difficultés de livraison du 787 Dreamliner, dont le calendrier a été décalé après des problèmes sur le fuselage de l'appareil. Le constructeur a également dû faire face à une suspension de vols de 171 avions 737 MAX 9 aux États-Unis, pour inspection après l'incident en vol de l'avion d'Alaska Airlines début janvier 2024. Boeing reste le plus présent au Moyen-Orient, avec 487 avions en commande, une tendance qui se maintient depuis 2020. Le client majeur de Boeing est United Airlines (États-Unis) avec actuellement 501 commandes, suivi par Southwest Airlines (E-U) et Emirates (Émirats arabes unis). En 2023, Boeing a livré 528 avions dont 396 avions type 737 (Boeing, 2024).

Airbus de son côté enregistre une hausse de 11 % de livraisons par rapport à 2022, confirmant sa reprise post-crise. Malgré des chaînes de production très sollicitées en début d'année, le groupe a su suivre un rythme de production performant, livrant plus de 735 avions commerciaux à 87 clients dans le monde, dont 571 avions de la famille des A320. Airbus est le plus présent en Europe, où 213 avions sont actuellement en commande. Les clients majeurs sont IndiGo (Inde), AirAsia (Malaisie) et Wizz Air (Hongrie) avec 1 639 avions en commande pour ces trois compagnies réunies (Airbus, 2024).

Cependant, les délais de livraisons pour chaque constructeur peuvent être longs. À date, il faudrait près de neuf ans à Airbus et Boeing pour assurer la production de leurs carnets de commande respectifs sur un rythme de production similaire à celui de 2023 (Chicheportiche, 2023).

Un trafic aérien qui devrait poursuivre sa croissance malgré les obstacles

En 2024, BDO estime à 4,6 milliards le nombre de passagers transportés, soit une hausse de 5 % par rapport à 2023. Le niveau nominal 2019 ne devrait pas être dépassé en 2024 mais devrait très fortement s'en approcher. BDO estime un dépassement des cinq milliards de passagers embarqués avant 2030.

Avec une augmentation du nombre de vols par passager et du PIB par habitant, le trafic aérien dépassera les huit milliards de passagers départ dans vingt ans. Croissance principalement portée par les marchés non matures, avec en ligne de mire l'Asie-Pacifique suivie du Moyen-Orient, de l'Afrique et de l'Amérique latine.

Ces éléments amènent à une réflexion de fond sur la vocation à long terme du transport aérien. Le paysage aérien se restaure de plus en plus chaque jour au rythme des dynamiques de reprises observées dans chaque pays, des typologies de clientèles et des modèles de compagnies aériennes, en parallèle de nouveaux arbitrages avec la montée en puissance de la visioconférence. La crise sanitaire a accéléré la prise de conscience du caractère impérieux de la transition écologique déjà initiée pré-Covid avec la mouvance du *flight-shaming*. Cela se matérialise avec des actions très concrètes telles que la loi climat résilience, les investissements massifs pour servir les quotas d'incorporation en biocarburants aériens, ou la programmation ambitieuse de l'avion du futur zéro carbone. Tous ces leviers dessinent la manière dont le transport aérien se consommera demain.



Figure 12 : Taux de croissance annuel moyen des aéroports de 2025 à 2040 (Source : BDO).

Bibliographie

CIRIUM (2024), "Fleet statistics", cirium.com.

AIRBUS (2024), "Airbus reports strong 2023 commercial aircraft orders and deliveries in complex operating environment", Airbus Newsroom, airbus.com.

BOEING (2024), "Orders & deliveries", boeing.com.

CHICHEPORTICHE O. (2023), « Un nouveau problème de fabrication affecte les livraisons du Boeing 787 Dreamliner », BFM Business, bfmtv.com.

LE MONDE (2023), « Airbus : la compagnie indienne IndiGo commande 500 A320, record absolu », lemonde.fr.

IATA (2023), "Industry Statistics", Fact Sheet, December 2023.

Décarbonation de l'aérien et nouveau paradigme économique

Par Augustin de ROMANET

Président-directeur général d'Aéroports de Paris (Groupe ADP)

Depuis les années 1970, le secteur du transport aérien a connu une formidable croissance que seule une crise sanitaire d'ampleur mondiale, en 2020, a ralenti. La pandémie n'est cependant pas l'unique facteur de la remise en cause profonde du secteur aujourd'hui : depuis quelques années déjà, l'inquiétude concernant le réchauffement climatique s'est emparée de l'opinion publique, et l'aérien est devenu le bouc-émissaire idéal. Si le jugement est sévère, il a le mérite d'avoir considérablement accéléré l'engagement des acteurs de l'aérien dans la lutte contre le changement climatique. Depuis 2019, les mesures de réduction de son empreinte carbone se sont multipliées : renouvellement des flottes, amélioration des opérations, déploiement de technologies de rupture, recours aux carburants d'aviation durables.... Acteur majeur de ce mouvement profond de transformations, le Groupe ADP a adopté une ambitieuse feuille de route pour répondre à un défi d'ampleur : demeurer un acteur central de la mobilité, mais d'une mobilité raisonnée et surtout décarbonée.

En 2022, le secteur des transports était le seul secteur économique dont les émissions de gaz à effet de serre avaient augmenté en France depuis 1990. La route, bien sûr, est le premier responsable de cette évolution ; les gains technologiques et les changements de motorisation n'ayant pas permis, jusqu'ici, de compenser la hausse des kilomètres parcourus. L'aviation, quoique moins importante en valeur absolue (12 % des émissions de CO₂ du secteur des transports à l'échelle mondiale) a contribué également à ce résultat.

Faut-il en conclure que la restriction des déplacements est la seule solution pour faire baisser les émissions de carbone ?

Pour répondre à cette question, opérons d'abord un retour en arrière sur les constats

En premier lieu, la hausse des émissions en valeur absolue ne reflète pas une absence d'action du secteur. Au contraire, les émissions du transport aérien ont commencé de baisser en kilomètre par siège depuis l'origine. Ainsi, selon l'ATAG (le groupe d'action du transport aérien), entre 1990 et 2018, l'intensité CO₂ (volume d'émissions par unité de productivité) des compagnies aériennes s'est améliorée de 52 %, alors que cette amélioration n'est que de 35 % pour l'ensemble de l'économie. Ces gains ont été permis par des progrès technologiques considérables, apportés par la mise en service de nouveaux appareils, plus légers, plus efficaces. Ils sont le résultat d'intenses efforts de recherche-développement de la part des constructeurs, et d'investissements des compagnies aériennes dans le renouvellement des flottes. Cette dynamique se comprend d'autant mieux que les carburants

représentent le premier poste de charge des compagnies aériennes. Diminuer les consommations est ainsi favorable non seulement pour l'environnement, mais aussi pour la performance économique des acteurs.

En deuxième lieu, le secteur du transport aérien a été marqué par une croissance particulièrement dynamique au cours des dernières décennies. En 1970, l'aviation existait à peine, et – même si cela peut sembler difficile à croire aujourd'hui, où il est presque devenu banal d'évoquer avec ses relations un voyage en avion – il s'agit bien d'un secteur qui était encore émergent il y a peu, et dont le marché n'est arrivé que très récemment à maturité dans les pays développés. En pratique, le principal déterminant de la croissance de la demande de voyage est la progression démographique et la hausse du PIB dans les zones géographiques de provenance des passagers. En 2018, seule 11 % de la population mondiale avait pris l'avion d'après les calculs des chercheurs. L'augmentation des classes moyennes dans les régions émergentes du globe, notamment en Asie, pousse ainsi encore fortement à la hausse la demande de transport, comme en témoignent les récentes commandes d'avions d'Air India et Indigo Airlines (1 000 appareils à elles deux pour la seule année 2023).

En troisième lieu, le secteur, qui s'inscrit en dehors du cadre multilatéral des COP des Nations unies, (qui fonctionnent sur le principe des contributions nationales volontaires des États membres, et excluent donc les « routes internationales » maritimes et aériennes), a très tôt mis en place un cadre relatif aux émissions de CO₂. Ainsi, l'Organisation de l'aviation civile internationale a adopté dès 2016 le dispositif CORSIA ("Carbon Offsetting and Reduction Scheme for International Aviation"), qui prévoit le principe de croissance neutre en carbone, par la compensation

de toutes les émissions dépassant le niveau de 2019-2020, à compter de cette date. Cet engagement, premier exemple d'un cadre contraignant applicable à un secteur économique donné à l'échelle mondiale, a témoigné d'une réelle exemplarité.

Dans ce contexte, la prise de conscience que les gains d'émission par passager et les politiques en place ne suffiraient pas à offrir indéfiniment au transport aérien une « licence pour croître » a sans doute été trop tardive de la part des acteurs du secteur. D'autant plus que le transport aérien a longtemps bénéficié d'une image très positive, associée au rêve et au progrès. Encore pendant la crise du Covid-19, Air France a, selon certains sondages (Brands & You), été l'une des marques qui avait le plus manqué aux Français.

L'année 2019 a été celle du grand tournant pour le transport aérien

À partir de 2018, l'enjeu de la lutte contre le réchauffement climatique est sorti de la sphère des scientifiques, où il était connu depuis bien longtemps, et des activistes, pour gagner la société civile. Ce mouvement est contemporain de l'action de Greta Thurnberg qui a, dès ses premières prises de parole, montré du doigt le transport aérien. Le choix de ce « bouc émissaire », qui peut paraître arbitraire au regard de l'impact du secteur en valeur absolue (2,1 % des émissions de carbone à l'échelle mondiale), n'est pourtant pas sans raison. À la surprise d'une partie des acteurs du secteur et des observateurs, le transport aérien s'est découvert un triple handicap : encore trop exclusif, intensif en émissions et long à décarboner. Il n'y a pas en effet de solution évidente pour passer à l'avion zéro émission, et le secteur a, de fait, longtemps cru que la dernière goutte de pétrole serait pour lui.

Le tournant de l'opinion publique, particulièrement manifeste à partir de 2019, a été un choc. Il a amené d'autant plus d'inquiétude qu'il s'est manifesté à un moment où est vite venue se surimposer la crise Covid, démontrant la capacité des États à fermer brusquement leurs frontières, et celle des entreprises de service à fonctionner en recourant de manière massive à la visio-conférence.

Deux préoccupations majeures ont donc émergé. La première concerne l'attitude des consommateurs (particuliers et entreprises), et le risque de voir ceux-ci se détourner de l'avion. La seconde, tout autant, voire plus importante, renvoie à l'action des pouvoirs publics. Alors qu'en parallèle de la prise de conscience du changement climatique et de la nécessité de penser en budget carbone s'est accrue celle de la prise en compte des limites planétaires, le monde du transport aérien a commencé à se soucier d'une forme de malthusianisme, qui lui serait imposée par les autorités.

Comment le secteur a-t-il réagi ?

L'ambition en matière de lutte contre le changement climatique dans le transport aérien s'est considérablement accélérée depuis 2019. Alors qu'à cette date, le recours

aux carburants d'aviation durables restait encore largement confidentiel, et que peu d'experts savaient en parler en externe, ces carburants sont devenus, depuis, la première priorité du secteur.

Les acteurs du transport aérien ont construit une feuille de route de décarbonation, visant à atteindre la neutralité carbone en 2050. Cette feuille de route a rendu possible l'adoption, par les gouvernements réunis au sein de l'OACI, de l'engagement aspirationnel de long terme au zéro émission nette de CO₂ dans le transport aérien international, lors de la dernière assemblée générale en 2022.

Cette feuille de route repose sur une hypothèse initiale de poursuite de la croissance du trafic à un taux similaire à l'historique, à laquelle s'ajoute un panier de mesures qui peuvent, en retour, affecter le trafic par la dynamique de l'effet prix sur le billet d'avion. Les leviers mobilisés sont le renouvellement des flottes (à technologie inchangée de 2018), l'amélioration des opérations, le déploiement de technologies de rupture (telles que l'avion à hydrogène) et le recours massif aux carburants d'aviation durables (SAF, de l'anglais *sustainable aviation fuel*).

D'ores et déjà, la démarche se concrétise. La mobilisation des parties prenantes pour l'augmentation du taux de recours aux SAF est manifeste. En Europe, un mandat d'incorporation de SAF (excluant le recours aux SAF dits de « première génération », supposant le recours aux huiles vierges, et donc consommateurs de terres agricoles) a été adopté en 2023. Il prévoit un taux d'incorporation de 6 % en 2030, et 70 % en 2050. Le 6 février 2024, la Commission a émis une proposition visant à réduire les émissions globales de GES de 90 % par rapport à 1990 dès 2040. Il est trop tôt pour apprécier les conséquences de cette proposition, dont les détails ne sont pas connus. Cet objectif fera l'objet de discussion avec le Conseil des ministres européens et avec le Parlement européen. Nous devons nous assurer du réalisme de ces propositions et de leur cohérence avec les accords qui viennent d'être pris. Aux États-Unis, l'« Inflation Reduction Act » de 2022 a mis en place un soutien à la production et à l'achat de SAF, afin de viser un taux d'incorporation supérieur, de 10 % en 2030. Au niveau de l'OACI, enfin, la conférence de haut niveau sur les SAF de novembre 2023 a fixé l'objectif mondial de réaliser une baisse d'émission de 5 % en 2030 grâce à l'usage des SAF.

Ce que démontre la feuille de route sectorielle est donc clair : les outils de la décarbonation sont bien là et sont compatibles avec une croissance du trafic, certes ralentie.

Pour autant, le paradigme économique historique a été totalement transformé. Là où, jusqu'en 2019, les baisses d'émission étaient le résultat d'un calcul économique bien compris, c'est désormais le contraire : les SAF coûtent quatre à six fois plus que le kérosène. Ils affectent la dynamique de trafic, et peuvent amener des distorsions de concurrence et des effets d'évitement, dans un contexte où chaque région du globe n'avance pas au même rythme, et où les grandes compagnies aériennes et les principaux aéroports sont

en concurrence entre eux. Pour aller en Asie depuis Marseille, il est ainsi théoriquement possible de réaliser une correspondance à Paris, en Turquie ou dans un pays du Golfe, par exemple. Or, en fonction du taux d'incorporation de SAF dans chaque lieu, le prix du billet pourra varier considérablement.

Comment recréer un compromis entre valeur économique et engagement climatique ?

La question de l'adaptation du modèle économique aux impératifs de la transition écologique concerne tous les acteurs du secteur.

Le Groupe ADP a présenté en 2022 une réflexion stratégique ambitieuse, dans le cadre de sa feuille de route "Pioneers 2025" : celle de devenir un *hub* de connectivité multimodal, offrant le mode de transport au plus faible impact environnemental pour chaque destination.

Cette ambition suppose d'œuvrer sur un certain nombre de chantiers

Il s'agit, d'abord, d'assurer la disponibilité de l'offre de transport multimodal : développer les mobilités douces et les transports en commun vers les aéroports, agir en faveur de la substitution train-avion. Ainsi, dans l'exemple de trajet évoqué ci-dessus, le passager pourrait faire le choix de se rendre en train de Marseille vers Paris-CDG, pour y prendre un avion vers Pékin, sous réserve que le prix ne soit pas dirimant. Cela impose, bien entendu, de pouvoir acheter un billet combiné fer-air permettant la prise en charge des retards éventuels sur l'une des deux parties du trajet, d'assurer la qualité de la desserte ferroviaire directe de Marseille vers le plus grand aéroport français (durée du trajet, fréquence, et alignement des horaires sur ceux des vols), ou encore d'offrir une facilité et qualité de parcours depuis la gare vers les terminaux, intégrant la contrainte des bagages.

Il s'agit, ensuite, de favoriser la décarbonation des mobilités, terrestres et aériennes, en distribuant l'énergie bas carbone nécessaire à leur propulsion. Pour le gestionnaire d'infrastructures, cela signifie notamment d'électrifier les points de parking avions et les opérations au sol, de fournir des bornes de recharge côté ville et côté pistes, de sécuriser l'approvisionnement en carburants alternatifs, et d'anticiper l'arrivée de l'avion à hydrogène, en prenant les mesures conservatoires pour l'adaptation des installations.

Le Groupe ADP s'est engagé résolument sur cette voie, et les premiers témoignages de succès viennent confirmer l'engagement des équipes. En 2023, le taux de recours aux SAF a triplé à l'aéroport de Paris-Le Bourget ; l'équipement de 100 % des postes de l'aéroport d'Orly en prises PCA (unité d'air préconditionné) pour la climatisation des avions est démarré ; le premier tracteur d'avions pour le roulage (taxibot) a commencé d'être expérimenté à Paris-CDG. En mai 2024, la gare de la ligne 14 de Paris-Orly, première gare mise en service du projet de Grand Paris Express

porté par la SGP (Société des grands projets), et dont le Groupe ADP a assuré la maîtrise d'ouvrage, sera inaugurée.

Mais, comme tous les acteurs du secteur, le Groupe ADP est forcé de s'interroger. Comment financer durablement ces investissements dans la transition, dès lors qu'ils n'amènent pas d'activité supplémentaire, et s'inscrivent dans le contexte d'un marché dont la croissance est de toute manière ralentie par l'impact du coût des SAF ?

Si aucune solution n'apparaît simplement, les pistes de réflexion sont nombreuses

En premier lieu, il paraît essentiel d'impliquer les consommateurs. C'est une vérité pour tous les secteurs économiques : si le coût de la transition n'est pas pris en charge par la puissance publique, il doit l'être par le client. Cela impose de travailler sur deux volets : d'abord, la transparence des prix, qui permet au gestionnaire d'infrastructures de répercuter aux compagnies aériennes le coût de ses investissements dans la décarbonation, et à celles-ci de le transférer ensuite aux passagers ; puis, la sensibilisation des consommateurs, qui doivent comprendre ce pour quoi ils payent lorsqu'ils choisissent une compagnie et un aéroport plutôt que d'autres, et leur rôle d'acteur à part entière de la transition.

En deuxième lieu, la sobriété doit évidemment rester une priorité : l'énergie la moins chère est celle qui n'est pas consommée. Poursuivre l'efficacité énergétique dans les terminaux (dans la continuité du plan de sobriété initié en 2022, qui a permis au Groupe ADP de réduire la consommation de chaud de plus de 30 %) ; limiter les temps de stationnement et de roulage des avions ; et bien entendu, du côté des compagnies et constructeurs, poursuivre le renouvellement des flottes et les efforts de recherche pour l'avion ultrasobriété, sont des axes essentiels. Le Groupe ADP, en tant qu'aménageur d'infrastructures, s'efforce aussi de limiter au plus juste les constructions neuves et de favoriser l'éco-conception, pour réduire ainsi la quantité de carbone incorporée dans les matériaux.

En troisième lieu, les entreprises doivent explorer de nouvelles frontières, trouver de nouveaux relais de croissance. L'investissement dans la production de SAF est évidemment un enjeu pour les acteurs du transport aérien : pour la sécurisation de l'approvisionnement en énergies bas carbone, mais aussi pour éviter la captation par d'autres de 100 % de la valeur créée. C'est par exemple aujourd'hui un champ d'investigation majeur pour le Groupe ADP.

Enfin, il convient de ne pas renoncer au potentiel de l'innovation. Le transport aérien, qui a longtemps cru qu'il aurait droit à la dernière goutte de kérosène, est désormais convaincu qu'il aura toutes les quantités de SAF ou d'hydrogène liquide dont il aura besoin. D'autres solutions émergeront peut-être grâce à l'innovation.

Conclusion

Une transition soutenable, cela veut bien dire consommer moins tout en consommant mieux, pour les clients individuels comme pour les entreprises. C'est aussi ne pas retarder l'investissement, pour couvrir les besoins énergétiques et continuer la recherche-développement. C'est bien à ce prix que la poursuite de la croissance et la décarbonation peuvent rester compatibles pour le transport aérien.

L'action de la direction générale des Entreprises (DGE) en faveur de la filière aéronautique

Par Thomas COURBE

Directeur général des entreprises

Encore en recomposition après la crise provoquée par la pandémie, le secteur aéronautique français fait face à un triple défi de transition écologique, d'innovation et de réduction de ses dépendances. Face à chacun de ces défis, la direction générale des Entreprises (DGE) accompagne le secteur, dans le cadre de la politique de réindustrialisation portée par le plan France Relance et le plan d'investissement France 2030. L'accompagnement déployé à l'occasion de la crise sanitaire a ainsi permis d'initier une dynamique de transformation du secteur, en accélérant la modernisation de l'outil de production, des sous-traitants aux grands donneurs d'ordre. Nous poursuivons notre action auprès de la filière par un soutien à l'innovation, la sécurisation des approvisionnements critiques et la constitution de la chaîne de valeur de l'avion décarboné en France.

Un fleuron français, qui fait face à de nombreux défis industriels

Avec près de 130 000 visiteurs professionnels et 2 500 exposants issus de 48 pays, le succès du Salon du Bourget 2023 a confirmé l'attractivité du secteur aéronautique français. Si cet événement, le plus grand salon aéronautique au monde, rappelle la dimension historique de l'aéronautique en France, la présence de 300 *start-up* témoigne de sa capacité à innover, et les 165 000 visiteurs grand public de l'engouement soutenu pour la filière.

Cette importance historique et industrielle du secteur aéronautique se vérifie dans les chiffres : en 2020, les 4 480 sociétés de la filière aéronautique et spatiale généraient un chiffre d'affaires de 65 Mds€ et employaient 263 000 salariés, soit 7 % de l'emploi industriel¹, avec une forte concentration autour de certains pôles, au premier rang desquels Aerospace Valley en Occitanie et Nouvelle-Aquitaine. Plus important encore, alors que la France enregistre un déficit commercial important, le secteur aérospatial est le premier contributeur net à notre balance commerciale, avec 23,5 Mds€ (2023)².

Au regard de son importance économique et commerciale, de son ancrage territorial, et de ses usages civils et militaires, le secteur aéronautique est à la fois un

fleuron français et un enjeu de souveraineté majeur, confronté à des transformations profondes.

Il fait aujourd'hui face à un double enjeu : répondre à la concurrence internationale et à la demande pour des produits toujours plus accessibles et performants dans le domaine civil comme militaire, et accomplir les immenses efforts nécessaires à la transition écologique du secteur³, en lien avec les objectifs français et européens de décarbonation des mobilités. Et ce défi doit être relevé alors que le secteur sort d'une crise sans précédent en 2020, qui a vu une baisse de 60 % du trafic aérien et une baisse d'activité de 30 % en moyenne pour l'industrie aéronautique, entraînant la suppression à court terme de 8 000 emplois.

Face aux crises, l'importance du soutien public

La crise sanitaire a révélé des fragilités au sein de la filière aéronautique, liées notamment à sa dispersion et à un déficit d'investissement dans l'outil industriel. En premier lieu, le soutien public (prêts garantis par l'État, activité partielle) a permis aux entreprises de faire face aux conséquences directes de la crise et d'éviter des effets d'hystérèse (les savoir-faire ont par exemple été préservés, avec une perte d'effectifs limitée à 7 % en 2020-2021). Au-delà, nous sommes intervenus dans le cadre de France Relance pour moderniser le secteur aéronautique et agir de façon structurelle sur le secteur.

¹ La filière aéronautique et spatiale en France en 2020 - Insee Première – 1882. <https://www.insee.fr/fr/statistiques/5896539>.

² « Chiffres clés ». Gifas, <https://www.gifas.fr/key-figures-page> & <https://www.tresor.economie.gouv.fr/Articles/e101488a-4e05-4914-9f1c-c64f8df93de7/files/5aabe80f-e76b-4050-b860-57ad438f0d35>

³ Le secteur est responsable de 2,6 % des émissions de CO₂ anthropique au niveau mondial.

C'est à ce titre que nous avons mis en œuvre le fonds de modernisation aéronautique, qui consacre 300 M€ à l'accompagnement de 400 projets, portés à 70 % par des TPE / PME. Dans un contexte de chute d'activité, cette aide publique a permis de mobiliser les entreprises autour de projets améliorant la compétitivité coût et hors coût de la filière. Nous avons notamment financé des projets de modernisation de l'outil de production (lignes d'usinage, traitement de surface, achat d'imprimantes 3D, robotisation de lignes de production...), des efforts de numérisation, ou bien la relocalisation en France de certaines productions. Ce plan, mis en place en collaboration étroite avec la filière et les autres acteurs publics concernés (notamment avec les ministères des Transports et des Armées), a permis des investissements répartis sur tout le territoire, dans l'ensemble de la chaîne de valeur aéronautique, avec une forte réactivité grâce notamment à la mobilisation des services économiques de l'État en régions et de la banque publique d'investissement Bpifrance.

À partir de 2022 et de l'invasion russe en Ukraine, des mesures transverses ont bénéficié à l'ensemble des entreprises, au-delà du seul secteur aéronautique, en particulier pour faire face aux hausses des prix de l'énergie et aux difficultés d'approvisionnement qui ont suivi le déclenchement du conflit.

L'État a mis en place dès juillet 2022 un dispositif d'aides financières complet, qu'il a renforcé au fur et à mesure que l'Union européenne adaptait son cadre juridique pour permettre de soutenir les entreprises touchées par la hausse des prix de l'énergie. Deux types d'aides publiques ont été mis en place : des aides transversales destinées à l'ensemble des entreprises (mesures générales) et des aides ciblant les entreprises énérgo-intensives (aide guichet), ayant permis de soutenir les entreprises des secteurs exposés. Ces aides se décomposent en mesure de prix *ex ante* : à titre d'exemple, la baisse de la fiscalité sur l'électricité à son minimum légal européen dès 2022 et reconduite en 2023, qui représente un soutien de 8,4 Mds€ pour les entreprises. Et des mesures de compensation *ex post* à travers le guichet d'aide électricité, qui évolue pour se centrer sur les consommateurs professionnels non éligibles à l'amortisseur et relevant de la catégorie des entreprises de taille intermédiaire (ETI) depuis l'automne 2023. Pour 2024, notre objectif est de concentrer le soutien sur le stock des contrats d'électricité signés au cœur de la crise, à des prix élevés et avec un engagement de longue durée, qui seront encore en vigueur en 2024.

Le cumul de ces mesures, en permettant à de nombreuses entreprises de passer le pic des prix de l'hiver 2022-2023, a permis de prévenir la rupture de maillons de la chaîne de valeur aéronautique, qui auraient le cas échéant pu ralentir l'activité de la filière et de la base industrielle et technologique de défense (BITD).

Les difficultés de trésorerie se sont généralisées dans le secteur après la pandémie. L'augmentation des carnets de commandes des grandes entreprises⁴ et

des sous-traitants et la montée en cadence de production associée entraînent des tensions sur l'ensemble de la chaîne de valeur, notamment du fait de sources d'approvisionnement en matières premières limitées et d'un redémarrage progressif⁵. Cet effet ciseau entraîne une inflation du besoin en fonds de roulement et des difficultés de financement, en particulier pour les sous-traitants dont la trésorerie est moins importante que celle des donneurs d'ordre. Dans ce cadre, nous menons à la fois des actions de sensibilisation auprès du secteur bancaire sur la nécessité de soutenir la filière aéronautique (notamment en mobilisant davantage la médiation du crédit), et participons à la mobilisation des trois fonds d'investissement Aerofund ou le fonds Ace Aero Partners, créé en juillet 2020 et doté de 630 M€ à son ouverture, dont 200 M€ abondés par l'État, puis le fonds Tikehau Aero Partenaires 2, qui lui succède et doit lever 400 M€ début 2024. Ce mode d'intervention, en lien avec Bpifrance, offre le double avantage de catalyser l'investissement privé et d'offrir à l'État un moyen d'intervention sur des activités jugées importantes pour notre souveraineté.

Vers un avion vert : soutenir la transition écologique de la filière

Au-delà des périodes de crise, la DGE s'implique dans les évolutions de la filière aéronautique, au premier rang desquelles la transition écologique et la décarbonation, dans le cadre de la feuille de route "Fit for 55" de la Commission européenne.

Cette implication passe notamment par un soutien à l'effort de recherche et développement du secteur. À ce titre, l'État intervient dans le cadre du Conseil pour la recherche aéronautique civile française (CORAC), géré par la DGAC et financé à hauteur de 800 M€ par le plan d'investissement France 2030, qui s'est vu allouer un budget annuel de 300 M€ sur la période 2024-2027. Ce dernier soutient en particulier les technologies nécessaires à l'introduction de l'avion « ultra frugal » : travaux aérodynamiques, efficacité des moteurs, intégration des carburants durables... Le soutien à l'innovation dans le secteur se justifie par son aspect prioritaire pour décarboner un vecteur essentiel de mobilité, dont la réalisation ne serait autrement pas assurée au vu de l'ampleur et de la durée des investissements nécessaires.

Il s'agit également de favoriser l'émergence d'une chaîne de valeur industrielle pour l'avion durable. C'est le sens du soutien apporté à l'industrialisation des prototypes d'avions bas carbone (hybrides électriques ou hydrogène) et des briques technologiques nécessaires à leur production *via* les dispositifs « Produire en France un avion bas carbone⁶ » 1 (clôturé fin 2022) et 2 (lancé début 2024).

⁵ En septembre 2021, l'Insee estimait encore l'indice de production industrielle aéronautique à - 40 % par rapport à son niveau pré-pandémie.

⁶ <https://www.gouvernement.fr/actualite/france-2030-annonce-des-9-premiers-laureats-de-l-appel-a-projets-produire-en-france-des-aeronefs-bas>

⁴ Celui d'Airbus a dépassé le seuil historique de 8 000 appareils en 2023.

L'État endosse enfin un rôle de coordination du secteur, en inscrivant l'avion décarboné parmi les projets structurants du contrat stratégique de la filière aéronautique 2024-2027⁷, signé en décembre 2023. Cette forme de concertation, en définissant une stratégie et des objectifs communs à l'ensemble de la filière, permet d'orienter les investissements de modernisation des entreprises et de mettre en place des coopérations au sein de la filière entre donneurs d'ordre et sous-traitants.

Outre l'avion décarboné, la réduction de l'empreinte écologique de l'industrie aéronautique s'appuie sur l'ensemble de la chaîne de valeur, de la production à la mise en œuvre des aéronefs. La structuration de la filière hydrogène illustre cette approche : dans le cadre du projet européen PIIEC hydrogène, plus de 3 Mds€ d'aides sont engagés et bénéficient aussi à l'ensemble de la chaîne de valeur aéronautique en soutien de projets de production d'hydrogène et d'équipements pour la mobilité hydrogène (utiles pour la décarbonation des sites de production autant que pour l'avion décarboné lui-même), mais également pour la production de carburants d'aviation durables à base d'hydrogène, sur le modèle de ce que propose Hy2Gen avec son projet Hynovera, qui permettra de produire jusqu'à 16 kt de carburants d'ici 2027, soit près de 10 % de la consommation annuelle de l'aéroport Marseille-Provence, situé à proximité. Ce soutien à la production de carburants durables doit permettre à la filière de répondre aux objectifs d'incorporation fixés par l'accord "ReFuel EU", de 34 % en 2040 et 70 % en 2050.

Pour préserver la souveraineté aéronautique française : agir sur l'ensemble de la chaîne de valeur de l'avion de demain sur notre territoire

Assurer notre souveraineté dans le domaine aéronautique suppose d'abord de maîtriser nos dépendances en matière d'intrants. Après des décennies de « doux commerce », les crises successives de ces dernières années ont illustré le risque que certaines dépendances font peser sur l'ensemble du processus de productions stratégiques, comme pour le titane aéronautique, de plus en plus indispensable à mesure que les appareils s'allègent. En réponse, nous agissons sur trois leviers, pour sécuriser les approvisionnements en métaux critiques : d'abord, par la relocalisation de toutes les étapes du cycle de production qui peuvent l'être, notamment la production de lingots et de pièces forgées. Ensuite, par la diversification des approvisionnements en minerais, grâce notamment au dispositif « métaux critiques » doté de 500 M€ pour accompagner par exemple des projets de minerais pouvant être extraits en France, comme celui d'Imerys pour le lithium⁸.

⁷ <https://www.conseil-national-industrie.gouv.fr/actualites/comites-strategiques-de-filiere/aeronautique/signature-du-contrat-strategique-de-filiere-aeronautique-2024-2027>

⁸ Situé dans l'Allier, ce projet permettra à terme d'extraire la matière première nécessaire à 700 000 batteries de véhicule par an.

Enfin, par l'économie circulaire, avec un soutien aux projets de recyclage, comme ceux visant la production de superalliages recyclés de qualité aéronautique d'Aubert&Duval et Ecotitanium, financés à hauteur de 17 M€.

Pour garantir la compétitivité de notre secteur aéronautique à long terme, nous accompagnons également l'innovation, à travers les soutiens à la R&D évoqués précédemment, en appuyant l'écosystème de *start-up* de l'aéronautique. C'est à ce titre que la mission French Tech accompagne des *start-up* proposant des solutions de mobilité innovantes, qu'il s'agisse de l'avion bas carbone, tels les avions hybrides électriques pour des vols régionaux (AURA Aero et VOLTAERO), ou encore de drones. Le soutien aux acteurs émergents permet aussi de soutenir des projets plus en amont de la chaîne de fabrication intégrant le numérique dans leurs processus. C'est le cas d'ISP System, qui porte un projet d'actionneurs de vol électriques en configuration rotative, ou du développement par JPB System d'une ligne pilote pour la production en France de pièces aéronautiques pour les aéronefs bas carbone grâce au procédé de fabrication additive.

De manière transverse, la DGE agit également sur le développement des compétences industrielles et de l'attractivité des métiers de l'industrie, dont ceux de l'aéronautique. Il s'agit d'un levier majeur dans la mesure où 83 % des PME du secteur déclaraient avoir du mal à recruter en 2023. C'est le sens de l'investissement de 700 M€ engagé pour la saison 2 de l'appel à manifestation d'intérêt sur les compétences, dont la première saison avait déjà soutenu 593 événements d'attractivité et de formation sur les métiers de l'aéronautique. Dans le cadre du projet de loi industrie verte porté par les ministres Bruno Le Maire et Roland Lescure, un objectif de 50 000 ingénieurs supplémentaires d'ici 2027 a également été fixé pour répondre aux besoins de l'industrie.

Notre souveraineté repose enfin sur la protection de nos industries et de nos savoir-faire. La situation cyber au sein de la filière aéronautique est très hétérogène. Les grands donneurs d'ordre ont atteint de très bons niveaux de cybersécurité, mais une partie des plus petites entreprises de la filière éprouvent des difficultés à s'aligner sur ces standards. Le Groupement des industries françaises aéronautiques et spatiales (Gifas) a ainsi engagé un certain nombre d'initiatives à même de répondre à cette problématique, comme le dispositif Boostaerospace avec son volet AirCyber. Dans la continuité de cette action, l'État accompagne les PME et ETI du secteur *via* le dispositif CyberPME, doté de 12,5 M€. Il se fonde sur trois grands principes : une approche de bout en bout prenant en compte la maturité cyber des entreprises ; un recrutement ciblé par secteur des entreprises ; et une articulation forte avec d'autres dispositifs dont AirCyber. La DGE partage également un guide de bonnes pratiques de sécurité économique, dans un souci de sensibilisation des entreprises. En parallèle, elle assure une veille et un contrôle contre les menaces de sécurité économique, notamment les investissements étrangers susceptibles de compromettre les chaînes de valeur essentielles à notre souveraineté.

Conclusion

Le soutien de la DGE à la filière aéronautique mobilise donc un ensemble complet de leviers d'action publique, depuis la réponse aux crises jusqu'à la préparation de l'avion décarboné du futur, en passant par le renforcement de notre autonomie stratégique. Face au tournant que constitue la décarbonation de l'aviation commerciale, l'aéronautique doit porter plus que jamais une ambition de souveraineté industrielle, et la DGE agit pour lui en donner les moyens.

ATR dessine aujourd'hui la connectivité aérienne responsable de demain

Par **Nathalie TARNAUD LAUDE**

Présidente exécutive d'ATR

Avec la mondialisation, l'aviation a pris une place prépondérante dans les activités économiques mondiales. Garante de l'accessibilité des zones les plus reculées, l'aviation régionale contribue à la cohésion territoriale, et ouvre des perspectives de développement économique pour les territoires.

Alors que le changement climatique nous oblige à repenser complètement nos modes de vie, l'avion est souvent lourdement remis en cause pour sa contribution aux émissions de gaz à effet de serre. Qu'en est-il vraiment s'agissant de l'aviation régionale ? Quels sont les défis et perspectives de cette aviation unique en son genre ?

Leader mondial de l'aviation régionale, ATR a adopté une approche à la fois ambitieuse et réaliste pour maintenir une connectivité régionale responsable.

Dans un monde globalisé, la mobilité aérienne joue un rôle vital dans le tissu économique et social mondial. Parallèlement, le changement climatique souligne l'importance croissante d'une connectivité aérienne responsable, et amène l'ensemble de la filière de l'aviation à repenser la façon dont nous nous déplacerons demain.

Aviation plus discrète dans les médias, l'aviation régionale est un segment essentiel de l'aviation du fait de son impact crucial sur le développement des territoires, parce qu'elle est synonyme d'accessibilité. Les compagnies aériennes régionales permettent aux passagers de rejoindre rapidement des destinations éloignées ou difficiles d'accès par d'autres moyens de transport (bateau, route...), facilitant ainsi le développement économique et touristique de ces régions. Cette accessibilité couvre tout le spectre des services dits « essentiels » de désenclavement des territoires. Grâce à l'avion, se soigner et éduquer ses enfants reste possible dans les régions du monde les plus isolées. C'est cela, la réalité de l'aviation régionale !

Mais l'aviation régionale va bien au-delà de l'accessibilité en relevant le défi de la connectivité : elle connecte les régions en desservant les gros *hubs* permettant aussi aux passagers de prendre facilement leurs vols internationaux, et crée des connections de point à point, de région à région, permettant des vols directs, limitant les consommations de kéroène et le temps perdu par les passagers dans ces *hubs*.

L'aviation régionale est souvent un pilier crucial de l'économie locale, offrant des emplois directs et indirects et favorisant le développement des industries connexes telles que le tourisme et le commerce.

L'effet positif de l'aviation régionale sur la cohésion territoriale et le développement économique n'est plus à démontrer. Des études prouvent qu'une augmentation de 10 % des vols régionaux entraîne une augmentation de 6 % du produit intérieur brut local, de 5 % du tourisme et de 8 % des investissements étrangers directs¹.

Constructeur numéro un mondial d'avions régionaux, ATR a construit depuis sa création en 1981 plus de 1 600 turbopropulseurs (avions à hélices) de 48 à 78 places. Les ATR sont actuellement exploités par plus de 200 compagnies aériennes présentes dans 100 pays.

Le succès d'ATR à travers le monde tient à l'avion lui-même – conçu pour être robuste, capable de se poser sur toutes sortes de terrains, peu cher à exploiter pour les compagnies aériennes, et apportant néanmoins le confort aux passagers, la sécurité et les technologies des plus gros avions. L'ATR des années 1980 n'est plus du tout celui d'aujourd'hui, et a bénéficié de constantes évolutions et développements pour rester un avion moderne.

La question pour l'aviation régionale aujourd'hui est de savoir comment répondre aux enjeux climatiques tout en assurant sa mission d'accessibilité et de connectivité.

¹ CHIAMBARETTO P., "The role of air transport in economic development: theoretical perspectives and insights from three country analyses", Montpellier Business School/École polytechnique.



Figure 1 : ATR 72-600 survolant le bassin d'Arcachon (© ATR).

Les défis de la connectivité aérienne régionale

Le transport aérien représentait environ 2 % des émissions mondiales de gaz à effet de serre (GES) et environ 12 % des émissions du secteur du transport en 2018. Forte de ce constat, en 2022, l'Organisation de l'aviation civile internationale (OACI) a adopté ce qui est maintenant appelé « l'objectif ambitieux à long terme » (LTAG), en plus du régime de compensation et de réduction de carbone pour l'aviation internationale (CORSIA, 2019). En tant que membre actif, ATR s'engage pleinement à contribuer à l'objectif zéro émission nette d'ici 2050, «Waypoint 2050» signé en 2021. De façon générale, l'aviation régionale est très présente dans cette dynamique de réduction des émissions de GES, et sera sans doute le premier segment de l'aviation à mettre en service des avions très bas carbone, voire « zéro émission ».

En janvier 2024, la Science-Based Targets initiative (SBTi) a validé les objectifs de réduction des émissions à court terme d'ATR. ATR a fait l'objet d'une évaluation rigoureuse de l'ensemble de ses émissions – scopes 1, 2 et 3 selon la méthodologie du protocole GHG –, afin

de définir des objectifs de réduction fondés sur des données scientifiques. ATR s'est engagé à réduire les émissions absolues de GES liées aux processus opérationnels et à la consommation d'énergie (scope 1 et scope 2) de 50,4 % d'ici 2030, conformément à la trajectoire de 1,5°C définie par l'Accord de Paris sur le climat signé en 2015. Dans le même délai, ATR s'est engagé à réduire de 30 % les émissions absolues de GES générées par notre flotte d'avions en service (scope 3 – utilisation de produits vendus). L'année de référence pour ces deux objectifs est 2018.

Pour atteindre ces objectifs, ATR a investi dans des infrastructures économes en énergie et dans les énergies renouvelables, optimisé ses processus de fabrication et mis en œuvre des pratiques durables tout au long de sa chaîne de valeur. Cependant, les avions en service représentent 94 % des émissions totales d'ATR. Dès lors, les principaux efforts de recherche et de développement se concentrent sur la transition vers des sources d'énergie à faibles émissions pour alimenter nos appareils, ainsi que sur de nouveaux designs, de nouveaux systèmes de propulsion et l'amélioration des matériaux afin d'atteindre les objectifs ambitieux qu'ATR s'est fixés.



Figure 2 : ATR 72-600 – jusqu'à 78 passagers – survolant les Pyrénées (© ATR).

Les initiatives actuelles pour une connectivité aérienne responsable

Les initiatives actuelles d'ATR en matière de décarbonation reposent sur trois axes : les carburants d'aviation durables (SAF), l'hybridation avec l'ATR EVO, et le cycle de vie des avions.

Au vu de leur efficacité énergétique sur les itinéraires courts (250-300 milles nautiques en moyenne, soit 550 km), les turbopropulseurs sont aujourd'hui les avions régionaux qui génèrent le moins d'émissions. Le carburant étant l'un des principaux centres de coûts pour les compagnies aériennes, cette grande efficacité énergétique fait également des turbopropulseurs la solution de transport aérien la plus abordable.

L'observation des derniers projets d'avions ou d'e-VTOL très disruptifs permet de constater que l'aviation se tourne de nouveau massivement vers des propulsions à hélices, très efficaces et sobres. Dès lors, ATR, sur le court terme (2022-2025), a décidé de travailler à l'amélioration continue de ses produits. Grâce à de nouveaux moteurs – les PW127XT –, l'ATR 72-600 émet 45 % de CO₂ de moins par trajet qu'un jet régional de taille similaire, soit 4 400 tonnes de CO₂ de moins par avion et par an². En outre, les ATR ne produisent quasiment pas de traînées de condensation. Avec 69 g

de CO₂ émis par siège et par km, les ATR offrent même une solution plus respectueuse de l'environnement que l'autosolisme. En outre, ils répondent aux normes les plus strictes en matière de bruit extérieur. Les études montrent que si tous les jets régionaux d'Europe étaient remplacés par des turbopropulseurs³, la réduction des émissions de CO₂ serait équivalente à la quantité de CO₂ absorbée par une forêt de 5 000 km², soit approximativement la superficie des Baléares. ATR est un avion déjà très adapté aux enjeux de notre époque, mais pour lequel d'ambitieux plans sont en cours.

100 % SAF d'ici 2025

L'industrie s'accorde à dire que l'utilisation de carburants d'avion durables (SAF) compte parmi les moyens les plus rapides pour réduire considérablement les émissions. Les SAF sont une source d'énergie renouvelable dérivée de matières organiques, de déchets ou de matières premières non fossiles. Le SAF *drop-in* peut être intégré sans difficulté dans les avions et les infrastructures existants, et permet de générer environ 80 % de GES en moins au cours de son cycle de vie par rapport au carburant classique.

Les ATR sont certifiés pour voler avec 50 % de SAF, et notre objectif est d'atteindre 100 % de SAF d'ici 2025. En juin 2022, nous avons effectué le premier vol de l'histoire avec 100 % de SAF dans les deux moteurs d'un avion commercial.

² Sur une base de 2 000 cycles par an et une moyenne de 300 Nm par cycle.

³ Sur tous les itinéraires de moins de 1 000 km.



Figure 4 : ATR 72-600 (© ATR).



Figure 5 : ATR a réalisé le premier vol de l'histoire avec 100 % de carburants d'aviation durables dans les deux moteurs d'un avion commercial (© ATR).

Si la disponibilité et la capacité de production des SAF demeurent aujourd'hui limitées, les initiatives régionales, nationales et internationales pour le développement des SAF vont permettre de faciliter leur accès dans les années à venir. Le SAF *drop-in* présente un avantage majeur : son fort potentiel de réduction des émissions, et ce sans modification de l'ensemble de la flotte et sans mise en place d'une infrastructure spécifique lourde et coûteuse. ATR soutient le développement du mécanisme de différenciation des flux d'achats et des flux physiques (dit "*book and claim*"), lequel constitue un moyen efficace d'intensifier le déploiement des SAF et d'accélérer la décarbonation du secteur. Ce système permet aux compagnies aériennes d'acheter du SAF auprès de sources compétitives dans le monde entier, indépendamment de la proximité géographique. Il dissocie les crédits environnementaux des SAF physiques, réduisant ainsi la nécessité d'un transport mondial et la complexité. Les compagnies aériennes reçoivent des crédits pour la réduction des émissions de CO₂ même si le carburant physique est utilisé par d'autres opérateurs dans les aéroports locaux proches du site de production. Ce mécanisme permet de faire face à l'offre limitée de SAF et à la demande croissante, favorisant ainsi l'adoption rapide du SAF et l'atteinte des objectifs de décarbonation du secteur.

L'ATR EVO : l'avion hybride électrique

L'ATR EVO est la solution à moyen terme pour réduire considérablement les émissions sans pour autant faire

de compromis sur l'accessibilité et la polyvalence des ATR. La plateforme de l'EVO reste l'ATR actuel. La technologie que nous étudions repose sur l'hybridation légère. Le projet consiste à combiner un nouveau moteur thermique performant avec un moteur électrique et des batteries. Cette solution nous permettra d'optimiser la taille du cœur du moteur, tandis que l'utilisation de l'énergie électrique maximisera l'efficacité globale du système de propulsion. Conçu pour réduire de manière significative les émissions de CO₂ (- 20 % par rapport aux avions actuels) et les coûts d'exploitation tout en améliorant les performances de l'avion, l'ATR EVO sera également doté d'une cabine écoconçue. Nous visons une mise en service à l'horizon 2030.



Figure 6 : ATR a lancé une étude de pré-faisabilité pour le développement d'un concept d'avion hybride baptisée ATR EVO (© ATR).



Figure 7 : un ATR en cours d'assemblage sur le site du constructeur, à Toulouse (© ATR).

De la conception au démantèlement

La décarbonation des avions ne comprend pas uniquement les phases de vol, et doit prendre en compte une étude du cycle de vie de nos produits, de la conception au démantèlement, avec une attention particulière portée à la réduction des déchets et à la réutilisation et la recyclabilité des pièces. 85,5 % des pièces des ATR sont aujourd'hui recyclables ou réutilisables, et nous étudions activement de nouvelles conceptions et de nouveaux matériaux pour améliorer encore la recyclabilité de nos appareils.

Les acteurs et perspectives pour l'avenir de la connectivité aérienne responsable

La décarbonation de l'aviation nécessite de relever plusieurs défis : le développement de nouvelles technologies, la production de carburants alternatifs, les évolutions réglementaires, les changements des infrastructures et le financement de toute cette transition de l'aviation vers le zéro émission nette. Toute la chaîne de valeur de l'aviation est actuellement en train de s'organiser au travers de plusieurs initiatives, comme l'alliance industrielle AZEA sous l'égide de la Commission Européenne, de façon à relever ces défis.

Au titre des défis technologiques, l'électrification des avions se heurte aujourd'hui à des obstacles liés à la densité énergétique des batteries et aux contraintes de poids, limitant considérablement la faisabilité de

cette technologie ou en faisant une solution de niche pour les plus petits avions.

Les systèmes de propulsion à l'hydrogène recèlent un grand potentiel de décarbonation, et nous estimons cette technologie très prometteuse à long terme. Aujourd'hui cependant, les caractéristiques spécifiques de l'hydrogène en tant que carburant, en termes de densité et de stockage à l'intérieur de l'avion, ont un impact considérable sur la charge utile de l'appareil, réduisant ainsi la charge utile disponible pour les passagers ou les marchandises. Également, la certification d'avions propulsés par l'hydrogène reste un défi important, de même que le développement des infrastructures, qui prendra du temps dans de nombreuses zones où ATR opère aujourd'hui.

La transition vers des avions zéro émission soulève aussi le défi de la production d'énergie durable en quantité suffisante pour alimenter tous les appareils en service. L'augmentation de la production d'électricité et de SAF pour répondre à la demande de l'industrie aéronautique nécessitera une hausse substantielle de la capacité de production. Des investissements importants dans les infrastructures productrices d'énergie renouvelable seront requis à grand échelle. L'engagement des États, des régions et des grands énergéticiens auprès de l'ensemble de l'industrie aéronautique sera absolument nécessaire dans cette transition.

Les aéroports travaillent d'ores et déjà sur des schémas de mise en place de l'infrastructure nécessaire à la gestion de ces nouvelles technologies. Ils travaillent



Figure 8 : ATR 72-600 (© ATR).

avec les compagnies aériennes et les constructeurs d'avions à préparer la recharge des avions en électricité, hydrogène ou SAF. Ces projets pourraient se concrétiser dans un avenir proche dans des aéroports tels que Londres-Heathrow ou Paris-Charles de Gaulle, mais seront probablement plus complexes à mettre en œuvre dans des aéroports régionaux plus petits assurant des lignes de point à point ou encore la desserte de communautés reculées ou d'îles. Ce sont des problématiques sur lesquelles nous travaillons, et il est intéressant de constater que le SAF est déjà disponible dans beaucoup d'aéroports régionaux.

Enfin, les compagnies aériennes jouent un rôle majeur dans cette transition vers le « net zéro ». Elles adoptent des positions très variables. Nous constatons que dans la plupart des pays développés, les compagnies aériennes ont des politiques de développement durable en place. Néanmoins, la difficulté actuelle pour les compagnies est celle d'appréhender le cadre réglementaire et fiscal qui va sans doute venir s'appliquer à l'aviation de façon beaucoup plus contraignante

pour véritablement pousser vers le net zéro en 2050. Il existe un consensus sur le fait que la simple bonne volonté des acteurs de l'aviation ne suffira pas à assurer cette transition ; toute la question est maintenant de comprendre comment ce cadre réglementaire va évoluer (y compris les taxes, subventions, interdictions de certains vols...). En attendant cette visibilité réglementaire, les compagnies aériennes se tournent vers l'ATR tel qu'il est actuellement pour ses performances opérationnelles et sa frugalité énergétique.

Le défi de la décarbonation est immense, certes, mais représente une occasion unique de réinventer notre industrie et de permettre aux territoires de continuer de prospérer grâce à une aviation régionale responsable. Cette révolution appelle une très grande collaboration de l'ensemble des acteurs de l'aviation et le développement de technologies nouvelles. L'industrie aéronautique aura pour ce faire besoin de femmes et hommes de talent qui pousseront les limites techniques, bien au-delà de ce que nous sommes capables de faire aujourd'hui.

L'aviation générale, laboratoire de la décarbonation du transport aérien

Par Didier KAYAT

Directeur général de Daher

Septième avionneur au monde en aviation générale et d'affaires, Daher, héritier de la légendaire société Morane-Saulnier créée en 1911, est le plus ancien avionneur au monde encore en activité. Fort de cet esprit pionnier, Daher s'inscrit aujourd'hui dans une démarche volontariste, pour décarboner ses propres avions et contribuer de manière significative aux objectifs de décarbonation de ses clients avionneurs et motoristes.

Le secteur aérien s'est fixé l'objectif d'atteindre la neutralité carbone en 2050¹. L'ensemble de la filière aéronautique active dès aujourd'hui tous les leviers possibles pour réduire les émissions de carbone des vols – à court, moyen et plus long termes.

En France, c'est au CORAC (Conseil pour la recherche aéronautique civile) que revient la mission « d'accélérer la recherche et la construction d'un avion neutre à l'horizon 2035 » (Bruno Le Maire²). Ses financements en soutien à la recherche aéronautique civile s'élèvent à 300 millions d'euros par an pour la période 2024-2027.

À la fois avionneur et équipementier aéronautique, Daher participe actuellement à 15 projets CORAC (dont 7 en tant que *leader*). L'approche systémique du CORAC – couvrant les méthodes de développement, de certification et les systèmes de production – a pour but de faire émerger, avant la fin de la prochaine décennie, des briques technologiques et ruptures d'usage qui feront l'aviation plus performante et éco-responsable de demain : propulsion hybride, composites avancés, *process* de production, aérodynamique, recyclage...

Daher a positionné sa plateforme TBM et ses compétences d'avionneur au cœur de cette stratégie d'innovation. La taille réduite du TBM – 6 places, moins de 5 700 kg – et la nouvelle agilité règlementaire de la catégorie de certification associée (CS 23) permettent de positionner cet avion en précurseur et en démonstrateur des technologies de demain. L'agilité d'un bureau d'études d'aviation générale, doté, notamment, d'un centre d'essais en vol, complète la profondeur d'expertise des autres acteurs de la filière.

¹ Les États adoptent l'objectif ambitieux mondial zéro émission nette pour les vols internationaux d'ici 2050 : <https://www.icao.int/Newsroom/Pages/FR/States-adopts-net-zero-2050-aspirational-goal-for-international-flight-operations.aspx>

² Déclaration de M. Bruno Le Maire, ministre de l'Économie et des Finances, sur le plan de soutien à la filière aéronautique, Paris, 09/06/2020, <https://www.vie-publique.fr/discours/275387-bruno-le-maire-09062020-industrie-aeronautique>

Daher a par ailleurs défini une feuille de route ambitieuse – inscrite au cœur de son plan stratégique quinquennal "Take Off 2027" –, pour décarboner l'ensemble de ses activités et produits, à commencer par ses avions TBM et Kodiak. Pour atteindre son objectif de mise sur le marché d'un avion bas carbone à l'horizon 2027, Daher a adopté une démarche incrémentale, multiaxe, construite sur ses deux avions.

Une démarche incrémentale

Aujourd'hui : les carburants d'aviation durables

Dès octobre 2022, le site de Tarbes, où est fabriqué le TBM, s'est équipé d'une cuve de carburants d'aviation durables (CAD ou SAF, *sustainable aviation fuel*). Depuis cette date, Daher utilise ce type de carburant – mélangé à un carburéacteur classique dans une proportion maximale de 40 % – pour les opérations aériennes de son activité d'avionneur : vols d'essais de sortie de chaîne, liaison et formation de ses clients. S'y ajoutent les vols liés à ses activités de maintenance, réparation et modification d'avions et d'hélicoptères civils ou militaires, soit environ 500 h de vol par an au total, pour une consommation de 200 litres de carburant/heure. La réduction des émissions de CO₂ constatée grâce à l'utilisation de SAF est de l'ordre de 30 %.

Daher s'efforce de promouvoir l'utilisation de SAF auprès de ses clients, des propriétaires-pilotes, américains pour la grande majorité (90 %). Compte tenu de la faible disponibilité de ce type de carburant sur le territoire des États-Unis, Daher a obtenu avec l'aide de l'un de ses partenaires qu'une cuve de SAF soit installée en Californie où résident de nombreux propriétaires de TBM. Mais l'utilisation de SAF augmente significativement le coût d'exploitation d'un avion, ce qui constitue pour l'instant un frein supplémentaire à son adoption large.



Figure 1 : Ravitaillement en carburants d'aviation durables du démonstrateur EcoPulse sur le site de Daher à Tarbes (France)
(© Daher/World Fuel).

L'hydrogène en ligne de mire

Parmi les autres carburants éco-responsables envisagés : l'hydrogène, qui a le potentiel de s'imposer comme une solution majeure à l'horizon 2050, avec de premières avancées concrètes sans doute dès l'horizon 2035.

Avec l'objectif d'avancer sur deux axes clés – faire évoluer ses propres avions pour en diminuer l'empreinte carbone, et, à travers la R&D, accompagner et accélérer la montée en maturité technologique de ses partenaires de l'aviation commerciale –, Daher s'est engagé en juin 2022 dans le projet BeautHyfuel aux côtés de Safran, Air Liquide, Turbotech et Elixir Aviation. L'objectif du projet – auquel Daher apporte son expérience en matière de développement, certification, production et maintenance d'aéronefs – est de définir puis de tester au sol une chaîne de propulsion hydrogène dans une gamme de puissance adaptée à l'aviation légère, et d'élaborer une méthodologie pour la certification de l'intégration de cette chaîne propulsive. Le projet BeautHyFuel bénéficie du soutien de l'État français, mis en œuvre par la Direction générale de l'aviation civile (DGAC) dans le cadre du Plan de Relance.

L'évolution vers une aviation propre exploitant l'hydrogène comme carburant impose également à l'industrie d'aborder ce qui est aujourd'hui une problématique majeure : le stockage de l'hydrogène dans les réservoirs d'avions. C'est dans cet esprit que Daher a choisi de participer au projet Nomade, lancé en avril 2022 par l'IRT Jules Verne pour une durée de 36 mois. L'enjeu est de mettre au point des réservoirs capables de fonctionner à des températures cryogéniques (20°K, soit - 250°C). Cela nécessite de travailler notamment sur les matériaux et les technologies d'assemblage et de résoudre la problématique de la perméabilité des réservoirs à une molécule aussi petite que l'hydrogène. Point de départ d'un programme d'ampleur à l'échelle nationale centré sur les enjeux liés au stockage de l'hydrogène liquide embarqué, Nomade réunit un ensemble de partenaires issus des différentes filières industrielles de l'aéronautique, terrestre et navale, parmi lesquels Airbus, Faurecia, Naval Group, Rafaut Group, le CEA et l'École Centrale Nantes.

L'hydrogène est un tout nouveau champ scientifique, avec des problématiques transverses aux différentes branches du transport. Une nouvelle filière se construit, et Daher a l'ambition d'y jouer un rôle moteur.

Amélioration continue de la performance énergétique des avions

Daher travaille par ailleurs de façon continue à l'amélioration de la performance énergétique de ses avions. Chaque nouveau modèle intègre des innovations technologiques qui permettent de réduire sensiblement les émissions de CO₂, tout en améliorant l'efficacité de l'avion.

Dernier né de la gamme TBM, le TBM 960, lancé en avril 2022, bénéficie de la puissance du numérique, qui permet de contrôler électroniquement son turbo-propulseur par le système EPECS™ (*engine and propeller electronic control system*) et de conserver ainsi des performances élevées pour une consommation de carburant modérée. Au réglage de croisière recommandé par Daher (308 kn, soit 570 km/h), la consommation de carburant est de 57 gallons américains par heure (216 l/h), ce qui représente une économie de 10 % par rapport au réglage de croisière maximal, favorisant ainsi une démarche responsable.

Les nouvelles productions d'avions Kodiak 100 série III sont disponibles depuis juillet 2023 avec une hélice composite à cinq pales en option. Par rapport à la version métallique à quatre pales, cette technologie permet de réduire le bruit de 6,6 dB, le poids de 6,5 kg et le roulement au décollage de 6 %. Cette hélice est en outre durable du fait de sa conception, avec un TBO (délai entre révisions) de 4 000 heures/6 ans.

Une approche multiaxe

Illustration de la démarche incrémentale de décarbonation mise en œuvre par Daher pour ses deux gammes d'avions, ces exemples attestent également de l'approche multiaxe adoptée, centrée autour de :

- la propulsion : moteurs thermiques plus performants et plus sobres ; recherche et développement de nouveaux modes de propulsion (hybridation / électrification des avions, hydrogène) ;
- l'allègement : remplacement de pièces métalliques par des pièces en matériaux composites avancés et / ou biosourcés, plus légers et avec une empreinte carbone largement inférieure à celle du métal, notamment le titane ;
- l'aérodynamique : diminution de la traînée des avions pour réduire la consommation de carburant.

Sur l'ensemble de ces sujets, la filière aéronautique est mobilisée pour mettre au point, dans le cadre de projets de R&D d'ampleur, les technologies disruptives qui permettront des avancées significatives en matière de décarbonation.



Figure 2 : Premier vol hybride-électrique du démonstrateur EcoPulse fin novembre 2023 (© Daher).

Développer et tester de nouveaux modes de propulsion : vers un avion hybride-électrique dès 2027

L'un des plus emblématiques est certainement "Ottawan", dont l'objectif est de développer le démonstrateur EcoPulse. Dévoilé au Salon du Bourget 2019, le projet réunit Daher, Airbus et Safran. C'est l'un des projets collaboratifs majeurs en Europe dans le domaine de la décarbonation de l'aviation, soutenu par le CORAC et cofinancé par la DGAC à travers France Relance et NextGeneration EU.

En novembre 2023, un jalon majeur a été franchi avec le premier vol hybride-électrique d'EcoPulse. Ce démonstrateur vise à évaluer les avantages opérationnels de l'intégration d'une propulsion hybride-électrique distribuée, avec un accent particulier sur les émissions de CO₂ et la réduction du niveau sonore. Cette architecture de propulsion disruptive permet à une seule source électrique indépendante d'alimenter plusieurs moteurs répartis dans l'avion.

Basé sur une plateforme d'avion Daher TBM, EcoPulse est équipé de six propulseurs électriques intégrés ou *e-propellers* (fournis par Safran), répartis le long des ailes. Son système de propulsion intègre deux sources d'énergie : un turbogénérateur, c'est-à-dire un générateur électrique entraîné par une turbine à gaz (fourni par Safran), et un pack batterie à haute densité énergétique (fourni par Airbus). Au cœur de cette architecture se trouvent une unité de distribution et de redressement d'énergie (PDRU), chargée de protéger le réseau haute tension et de distribuer l'énergie électrique disponible, ainsi que des harnais d'alimentation haute tension (tous deux fournis par Safran). La batterie conçue par Airbus est dimensionnée pour 800 V CC et peut fournir jusqu'à 350 kilowatts de puissance.

Une fois les essais en vol terminés, les trois partenaires auront démontré la capacité à faire voler un appareil utilisant de l'électricité de très haut voltage, et seront en mesure d'établir le cahier des charges de futurs appareils hybrides qui pourraient être équipés d'une turbine double source, capable d'accepter du kérosène ou des carburants d'aviation durables ainsi que de l'électricité.

Le premier de ces futurs appareils hybrides très bas carbone sera développé à partir d'une plateforme d'avion TBM ou Kodiak et mis en service en 2027. La campagne de vols qui a démarré avec le premier vol hybride-électrique fournira à Daher des données inestimables sur l'efficacité des systèmes embarqués, notamment la propulsion distribuée, les batteries haute tension et la propulsion hybride-électrique. Après avoir beaucoup appris et testé avec l'EcoPulse, l'objectif de Daher est d'être le pionnier d'un avion hybride certifié, robuste et fiable, embarquant à son bord des technologies qui seront utilisées par l'aviation régionale, d'affaires et commerciale.

Allègement : nouveaux matériaux, nouveaux procédés

Outre l'étude de la propulsion hybride-électrique à bord d'un aéronef, EcoPulse permet également de tester des applications de composites avancés sur les avions. EcoPulse utilise ainsi des composites pour les ailerons de l'avion, les mâts moteurs, les carénages Karman et batterie, ainsi que l'entrée d'air, qui ont été réalisés principalement avec un micro-sandwich carbone / liège. L'un des objectifs d'EcoPulse est de permettre de faire évoluer les performances et la faisabilité de l'intégration de ces technologies sur les pièces et composants secondaires des avions



Figure 3 : Les derniers-nés des gammes TBM et Kodiak – Kodiak 900 et TBM 960 – en vol (© Daher).

construits par Daher, tout en développant les compétences de prototypage rapide utilisées dans le milieu de l'aviation.

Hors du cadre d'EcoPulse, Daher consacre une part importante de son budget de R&D au thermoplastique. Ce matériau est particulièrement prometteur dans le monde des aérostructures pour de futures applications sur les avions de série. Il se prête plus facilement à l'automatisation de la production (enjeu de cadences) et il est recyclable, réparable et soudable. Ses propriétés mécaniques permettent d'utiliser moins de matière et, globalement, d'alléger les structures, autant de qualités essentielles pour réduire les émissions de carbone. L'objectif est d'accélérer le développement d'applications réelles à l'avenir au profit de ses clients – aviateurs et motoristes en particulier.

Dans le cadre du CORAC, Daher pilote ainsi le plus grand projet de recherche français actuel sur les thermoplastiques, appelé TRAMPOLINE 2 (TheRmoplAstic coMPosites for hOrizontaL tall plaNE), qui utilise également le soudage par induction au lieu du rivetage, avec un gain de poids de 15 %.

Cet investissement dans la R&D a déjà porté ses fruits dans des composants qui se retrouveront dans les gammes actuelles de produits TBM de l'entreprise.

Après plus de trois ans de travaux de R&D, Daher a réussi à fabriquer des pédales de palonnier en composite thermoplastique haute performance recyclé à partir de chutes de production, pour équiper le TBM. Ces pédales ont été certifiées pour voler sur les TBM

de série. En plus d'être légers, les thermoplastiques ont une faible conduction thermique, ainsi que des propriétés physico-chimiques et mécaniques égales, voire meilleures. Et au-delà des bénéfices environnementaux, le coût de ces pièces est réduit de manière significative par rapport à l'usinage métal.

Grâce au TBM, Daher démontre une nouvelle fois la faisabilité et l'intérêt d'un procédé très innovant, et confirme son rôle moteur au sein de la filière "green" aéronautique. L'accélération des travaux s'est traduite par le lancement en janvier 2022 du projet CORAC « Terra Preta » portant sur le recyclage du composite, qui mobilise les grands acteurs du domaine (Airbus, Safran, Hutchinson, CETIM, AviaComp...) jusqu'en 2025. L'objectif ? Identifier et faire la démonstration sur des pièces de structure de l'avion de plusieurs procédés de revalorisation du composite, et développer un procédé de revalorisation / recyclage sur des matériaux thermoplastiques de dernière génération incluant les méthodes de certification.

Les résultats technico-économiques attendus portent sur la production future de certaines pièces des avions Daher – TBM et Kodiak –, mais aussi de celles de nos clients (Airbus, Safran...). En outre, l'environnement réglementaire mature des avions Daher (CS23) va permettre d'être en position de pointe dans les méthodes de certification.

Par ailleurs, Daher a obtenu les premiers résultats d'un projet de R&D baptisé CARAC TP, réalisé en collaboration avec un ensemble de laboratoires académiques compétents dans les matériaux composites. L'objectif est d'identifier et de caractériser les composites thermoplastiques les mieux adaptés aux applications aéronautiques et de les comparer aux matériaux thermodurcissables. Le projet permet d'étudier les matériaux en profondeur à travers de multiples tests qui dépassent le cadre des programmes de qualification menés dans l'industrie : résistance à l'impact, tenue au feu, vieillissement environnemental (ozone, UV, fluides), impact des procédés de fabrication sur les propriétés physico-chimiques, performances des matériaux, etc.³

Conclusion

À travers les avancées concrètes et rapides en matière de décarbonation de ses propres avions, Daher joue un rôle moteur au sein de la catégorie « aviation générale » qui s'affirme comme un véritable laboratoire de la décarbonation du secteur.

³ "Daher CARAC TP project advances thermoplastic composites certification approach", Ginger Gardiner, Composites World, 26/07/2023, <https://www.compositesworld.com/articles/daher-carac-tp-project-advances-thermoplastic-composites-certification-approach->

La propulsion hybride pour des VTOL : une solution qui associe performance et faibles émissions

Par Jean-Christophe LAMBERT

Co-fondateur et CEO d'Ascendance

Pour atteindre la neutralité carbone d'ici à 2050, avionneurs, grands industriels et *start-up* du secteur de l'aéronautique se mobilisent pour développer l'avion plus durable. Parmi les solutions retenues : le VTOL (*vertical take-off and landing*), un aéronef à décollage et atterrissage vertical qui se positionne en alternative à l'hélicoptère et sur des nouvelles mobilités aériennes régionales. Avec une motorisation hybride électrique, il permet de réduire les émissions de carbone et le bruit, et offre une portée de 400 km. Au-delà de l'usage de cet avion-hélicoptère, c'est un formidable catalyseur technologique pour la décarbonation du secteur.

En 2020, les émissions de CO₂ de l'aviation étaient de 2,5 % au niveau mondial¹, un taux qui peut être considéré comme peu élevé mais qui, rapporté au nombre d'utilisateurs, s'avère important. Des émissions qui devraient croître puisque, selon l'Association internationale des transports aériens, le trafic mondial devrait tripler d'ici à 2050. Aussi, pour enrayer le problème de pollution, le gouvernement français a, en 2020, accéléré son engagement en faveur de la décarbonation du secteur aérien. Une première enveloppe de 435 millions d'euros² a été mise sur la table, et en juin 2023, Emmanuel Macron a annoncé une enveloppe annuelle de 300 M€ d'argent public sur la période 2024-2030 soit un total de 2,1 Md€³. Objectif : produire d'ici à six ans un avion décarboné de petite taille, et ainsi être en mesure de le transposer dès 2035 aux vols moyen-courriers afin d'atteindre la neutralité carbone en 2050. Un engagement soutenu et pris par les acteurs du secteur aérien lors du sommet de l'aviation à Toulouse en février 2022.

Au sein du CORAC (Conseil pour la recherche aéronautique civile), la filière a défini en concertation avec les pouvoirs publics un plan ambitieux et cohérent de décarbonation, reposant sur des carburants non carbonés (H₂ - hydrogène), et, à plus court terme, non fossiles (SAF - *sustainable aviation fuel*) et des

technologies plus économes en énergie (hybridation et électrification, aérodynamique, matériaux, systèmes propulsifs, systèmes de navigation, etc.). Cette nouvelle frugalité énergétique est une condition *sine qua non* au succès de la décarbonation. Les carburants alternatifs seront en effet trop coûteux et produits en trop faibles volumes pour être mis en œuvre – dans des conditions économiquement viables – sur des aéronefs qui auraient des performances énergétiques non améliorées.

Avionneurs, grands industriels, PME et *start-up*, sont désormais tous mobilisés pour développer le premier avion plus durable. Ce sujet fut d'ailleurs l'une des thématiques de la dernière édition du Forum économique mondial de Davos. Car aujourd'hui la question n'est plus de savoir s'il faut décarboner l'aviation, mais quand et comment. L'heure est désormais aux grands choix technologiques. Parmi eux, l'hybride électrique.

L'arrivée des VTOL hybrides électriques : une solution pérenne pour une approche long terme

Entre 2010 et 2020, l'industrie aéronautique a vu arriver de nouveaux aéronefs capables de décoller et d'atterrir verticalement comme un hélicoptère et de voler en croisière comme un avion. Si ce type d'aéronef a déjà été vu en condition de vol dès la fin des années 1980, notamment *via* le V-22 Osprey pour une application militaire et plus récemment *via* le AW-609, il a été démocratisé et rendu plus concret par l'arrivée des technologies électriques.

Ces nouvelles formes d'aéronefs sont positionnées comme des alternatives à l'hélicoptère, sur leurs missions de transport de personnes, de service médical et de logistique, ainsi que sur des nouvelles formes de mobilités aériennes point à point à une échelle

¹ Transports mondiaux : émissions de CO₂ en hausse, Planète Énergie, <https://www.planete-energies.com/fr/media/article/transports-mondiaux-emissions-co2-en-hausse>

² Ministère de la Transition écologique et de la Cohésion des territoires, <https://www.ecologie.gouv.fr/france-2030-435-millions-deuros-en-faveur-decarbonation-laviation>

³ *La Tribune*, « Emmanuel Macron annonce 2,1 milliards d'euros d'investissements pour décarboner la filière aéronautique », <https://www.latribune.fr/entreprises-finance/industrie/aeronautique-defense/emmanuel-macron-annonce-750-millions-euros-d-investissements-pour-decarboner-la-filiere-aeronautique-966289.html>

régionale, inter-cités ou péri-urbaines appelées *advanced air mobility*.

Avec une autonomie de l'ordre de 400 km, une vitesse de croisière supérieure à 200 km/h, une diminution de consommation d'énergie et une réduction d'émissions de carbone, le VTOL hybride électrique permet aujourd'hui d'atteindre un haut niveau de performance, une variété importante d'usages et donc d'économies d'émissions au regard des usages existants.

Pourtant, le tout-électrique fut l'une des options technologiques mises en avant par les institutions et pour laquelle de nombreuses entreprises se sont lancées. Mais après plusieurs essais, cette technologie ne s'est avérée viable que pour des usages de très courte distance, jusqu'à 100 kilomètres maximum. Cela est principalement dû à la différence de densité d'énergie entre une cellule de batterie et celle d'un carburant type fuel et SAF (de l'ordre de 30 à 50 fois supérieure). Malgré le meilleur rendement des systèmes électriques (supérieur à 90 %) et l'évolution des batteries (de l'ordre de 5 % par an), il est difficile, voire impossible, d'envisager à ce jour des avions de grande échelle tout électriques.

Un aéronef hybride à deux niveaux : mix énergétique et avion-hélico pour une meilleure performance et efficacité énergétique

En utilisant une batterie lors de la phase de décollage et des énergies moins polluantes comme les *sustainable aviation fuels* (carburants d'aviation durables issus de la biomasse, d'algues, de déchets agricoles et / ou alimentaires, ou d'hydrogène) pour la croisière, le VTOL hybride électrique permet de gagner jusqu'à 80 % d'émissions de CO₂ comparé à un hélicoptère classique. Ce gain provient pour moitié de l'efficacité de son système hybride et de ses sources d'énergies, tout ou en partie décarbonées, et pour l'autre moitié du gain aérodynamique permis par de nouvelles architectures avion.

En effet, si l'innovation d'une propulsion hybride électrique est une innovation majeure dans l'aviation, elle en amène beaucoup d'autres. Comme la capacité à distribuer électriquement la propulsion à de nombreux moteurs électriques et hélices, ouvrant ainsi de nouvelles architectures et configurations aérodynamiques apportant plus de performance et plus de frugalité énergétique. Cette nouvelle propulsion distribuée permet aussi une ultra-redondance des moteurs et hélices, offrant une sûreté plus accrue. Cette ultra-redondance sera notamment clé dans l'opération de ces nouveaux aéronefs pour des missions de service médical, de surveillance ou de mobilité.

L'enjeu du bruit est majeur, et est sujet à de nombreuses recherches. L'objectif de ces nouveaux VTOL est de diviser par quatre les émissions sonores (passage d'une moyenne de 96 dB à 80 dB(A) au décollage et de 80 dB à 62 dB(A) en croisière). Pour cela, les constructeurs misent sur l'usage de la motorisation

électrique lors des phases de décollage et d'atterrissage vertical couplé aux effets de masquage acoustique et des bénéfices apportés par la voilure en croisière.

Un formidable catalyseur technologique et opérationnel dans la course à l'avion plus durable

L'engouement autour des VTOL n'est pas seulement dû au potentiel marché de ces appareils. Il est aussi le fruit d'une course au développement des technologies, des réglementations et des règles d'opérations nécessaires à l'émergence d'une aviation décarbonée. Ces nouveaux appareils sont en effet un concentrateur de technologies, et leur taille leur permet d'intégrer dès à présent des technologies existantes. C'est ainsi que les acteurs ont développé des portefeuilles brevets très importants (plusieurs milliers) allant de nouvelles architectures avion aux composants simples, en passant par la couche système.

L'émergence de ce secteur a aussi permis une structuration réglementaire au niveau européen (EASA) par la SC-VTOL (niveau aéronef) et la SC-E19 (propulsion électrique et hybride-électrique), ainsi qu'au niveau américain via l'application de conditions spéciales personnalisées. Si une harmonisation de ces standards n'a pas encore eu lieu entre les deux autorités certificatrices, nul doute qu'elle interviendra et pose dès à présent un précédent important dans l'usage de ces nouvelles formes de propulsion et de leur intégration dans l'espace aérien.

Enfin, les modes opératoires et les infrastructures se voient bouleversés par ces nouvelles technologies. Que ce soit au niveau des capacités de recharge et d'approvisionnement des nouvelles énergies, des réserves de vol, des nouvelles lois de pilotage ou encore des interfaces homme-machine, les standards et développements menés actuellement seront certainement une base stratégique de réutilisation pour de futurs avions décarbonés.

La décarbonation de l'aviation est souvent présentée comme la nouvelle révolution de l'aéronautique. Conscients de l'importance de prendre le *leadership* sur ce marché promis à un bel avenir économique, les États (principalement européens, américains et chinois), leurs industries, ainsi que leurs écosystèmes respectifs, mettent les bouchées doubles pour atteindre le Graal de l'aviation plus durable.

Les défis de la propulsion aéronautique décarbonée

Par Thibaud NORMAND

Directeur de programme au sein de Safran Nacelles

Et Éric DALBIES

Directeur de la Recherche, de la Technologie et de l'Innovation de Safran

L'engagement du secteur aérien d'atteindre la neutralité carbone d'ici 2050 suppose un effort sans précédent sur l'efficacité énergétique des avions, en complément de l'usage des carburants durables. Ce défi est à l'origine d'un foisonnement d'innovations en cours dans le domaine de la propulsion aéronautique. La propulsion électrique ou hybride, sous des formes variées, va irriguer tous les segments aériens : l'aviation générale sert ainsi de terrain d'expérimentation pour des technologies qui contribueront à réduire la consommation des prochains moteurs d'avions commerciaux. D'un point de vue climatique, l'enjeu principal réside dans la propulsion de la prochaine génération d'avions court-moyen-courriers, succédant à l'Airbus A320neo et au Boeing 737 MAX. Safran et son partenaire GE Aerospace s'y préparent au travers du programme technologique RISE, qui recouvre le développement de nombreuses innovations de rupture et permet d'initier la mobilisation de toute la filière.

Si l'échéance de l'engagement du secteur d'atteindre la neutralité carbone d'ici 2050 peut paraître lointaine, l'ampleur de ce défi impose de poursuivre toutes les pistes d'innovation de rupture, et explique en particulier le foisonnement actuel des initiatives dans le domaine de la propulsion aéronautique.

L'efficacité énergétique, premier levier de toute politique de décarbonation

Dans le secteur aérien comme dans d'autres secteurs, l'efficacité énergétique est le premier levier d'une stratégie de décarbonation, pour réduire la pression sur les ressources, accompagner la transition vers des énergies décarbonées et limiter les coûts de la transition.

L'amélioration technologique des avions, et en particulier de leur propulsion, a généré l'essentiel des gains d'efficacité durant les dernières décennies. Ainsi, grâce au renouvellement des flottes, la consommation de carburant par passager et par kilomètre a-t-elle été réduite de moitié sur les trente dernières années.

L'entrée en service du moteur LEAP de Safran et General Electric, en 2016, illustre les progrès technologiques réalisés sur les moteurs d'avion : apportant 15 % de réduction de consommation par rapport à la génération précédente des CFM56, il a permis le développement d'une nouvelle génération d'avions court-moyen-courriers (A320neo, Boeing 737 MAX), dont l'introduction en flotte s'étendra encore sur la dizaine d'années à venir.

Les progrès technologiques en matière de propulsion, et plus généralement pour améliorer l'efficacité énergétique des avions, seront encore plus cruciaux à l'avenir. En 2023, l'Organisation de l'aviation civile internationale (OACI) a adopté un objectif de neutralité carbone d'ici à 2050. Pour atteindre cet objectif, toutes les variantes possibles des trajectoires de décarbonation du secteur aérien reposent sur l'utilisation massive de carburants aériens durables. Compte tenu des enjeux spécifiques à la biomasse et des quantités majeures d'électricité nécessaire pour produire des électrocarburants¹, ces carburants présenteront un coût élevé, des impacts environnementaux non nuls et une forte concurrence entre secteurs pour accéder à ces énergies décarbonées. Par ailleurs, il n'apparaît pas possible d'atteindre 100 % de carburants durables dans le secteur aérien avant le milieu du siècle, dans la tendance actuelle de croissance du trafic. Réduire la consommation de carburant demeure donc, plus que jamais, la clé de voûte de la décarbonation du secteur, et une ambition accrue est nécessaire : la flotte d'avions de 2050 sera largement constituée d'avions livrés dans la décennie 2030 ; l'enjeu est donc bien de franchir une rupture dans l'efficacité énergétique des avions dès les prochains programmes lancés.

¹ Voir notamment Académie des technologies (2023), « La décarbonation du secteur aérien par la production de carburants durables ».



Ligne de montage du moteur LEAP (crédit : Adrien Daste / Safran).

Enfin, cette exigence de réduire fortement la consommation de carburant demeure essentielle même dans le cas d'une transition vers la propulsion à hydrogène : les enjeux de faible densité volumique de ce carburant renforcent l'intérêt d'une consommation très optimisée, pour favoriser le rayon d'action accessible à ces futurs aéronefs.

L'électrification, une tendance de fond aux applications multiples pour la propulsion aéronautique

L'électrification des systèmes non propulsifs est une tendance de fond qui s'est développée sur les dernières générations d'avions. Elle s'étend désormais à l'actionnement des inverseurs de poussée des nacelles, au freinage, voire au déploiement du train d'atterrissage avant, au système de dégivrage, et sur le Boeing 787 au système d'air conditionné. La substitution de systèmes hydrauliques, pneumatiques ou mécaniques, par des systèmes électriques, peut permettre de réduire la masse des appareils par la suppression de réseaux. Mais elle est aussi un facteur d'optimisation de la propulsion, en réduisant certains prélèvements sur le moteur (air par exemple).

L'essentiel des enjeux de l'électrification se situe toutefois au niveau de la propulsion, avec le développement de moteurs électriques de puissance qui permet d'envisager différents modèles d'hybridation, voire une électrification totale, des aéronefs selon leur taille. Safran a ainsi développé la famille des moteurs ENGINEUS™, de puissance comprise entre 50 kW et 750 kW, dont les premiers modèles devraient être certifiés par l'EASA en 2024.

Compte tenu des enjeux de densité massique des batteries, la propulsion intégralement électrique

demeurera largement limitée à des aéronefs de faible masse : VTOL², comme les projets des sociétés Joby Aviation et Volocopter, et aviation légère. Dans cette dernière catégorie, le développement des avions électriques pour les écoles de pilotage suscite un fort intérêt, comme le montrent les projets de Bye Aerospace aux États-Unis et d'Aura Aero en France.

Dépasser la centaine de kilomètres ou quelques dizaines de passagers nécessite toutefois de s'affranchir des limites des batteries et développer des propulsions hybrides. Cette hybridation prend des formes variées selon les projets : propulsion électrique distribuée comme sur le démonstrateur Ecopulse d'Airbus, Daher et Safran, sur le segment de l'aviation générale ; combinaison de turbogénérateur et d'un moteur électrique de forte puissance (jusqu'à 1 MW), pour le segment des avions régionaux d'une trentaine de passagers ; utilisation de piles à combustible à hydrogène en appoint de batteries, également dans le domaine de l'aviation régionale ; ou encore hybridation d'hélicoptères bimoteurs, afin de permettre la mise en veille d'un moteur en croisière (projet ECOMODE de Safran embarqué dans l'hélicoptère RACER d'Airbus Helicopter).

Le fort investissement observé actuellement dans l'hybridation trouve son explication au-delà des seuls marchés de l'aviation générale ou régionale : les briques technologiques explorées devraient en effet contribuer à l'efficacité accrue des turbines à gaz équipant les avions court-moyen-courriers et long-courriers.

² Vertical take-off and landing.

Vers une propulsion ultrasobrie pour les futurs moyen-courriers – le programme RISE

Pour atteindre l'objectif de neutralité carbone de l'aviation d'ici 2050, la prochaine étape technologique et industrielle clé est l'entrée en service d'une nouvelle génération d'avions court-moyen-courriers à l'horizon 2035, succédant aux programmes remotorisés A320neo et Boeing 737 MAX. Ce segment d'appareils, décliné en plusieurs variantes de capacité, représente en effet de l'ordre de 45 % des émissions de CO₂ du secteur, et une part croissante du trafic avec l'augmentation de capacité et de rayon d'action des appareils (notamment les A321neo, A321LR et XLR, Boeing MAX10).

C'est dans ce contexte que Safran et son partenaire GE Aerospace ont lancé en 2021 le programme RISE, pour *Revolutionary innovation for sustainable engines*. Programme de démonstration technologique, RISE vise à conduire à maturité l'ensemble des briques technologiques innovantes déjà identifiées et qui pourraient contribuer à la prochaine génération de moteurs d'avions court-moyen-courriers, en visant une réduction de consommation de carburant de 20 % au niveau du moteur.

Mobilisant plus de 1 000 ingénieurs chez Safran et GE Aerospace, le programme RISE comprend environ 400 essais et se concrétisera par des essais en vol vers 2026, sur un Boeing 747 de GE et sur un A380 en partenariat avec Airbus.

Certaines des technologies identifiées s'inscrivent dans la continuité des travaux engagés pour le moteur LEAP, comme l'utilisation accrue de matériaux composites (notamment les matériaux composites à matrice céramique), ou le recours à des alliages métalliques résistant à des températures de plus en plus élevées. D'autres concernent les procédés de fabrication, comme la fabrication additive qui permet d'alléger des pièces tout en contribuant à des chaînes d'approvisionnement plus courtes. Trois axes d'innovation illustrent toutefois la spécificité du programme RISE par rapport aux générations précédentes de moteurs.

L'hybridation électrique des turbines à gaz

Au sein du programme RISE, Safran travaille à intégrer une capacité d'hybridation électrique dans des turbines à gaz : l'une des configurations envisagées repose sur l'intégration d'un moteur et d'un générateur électrique sur chacune des lignes d'arbre de la turbine, ouvrant la voie à des échanges de puissance entre corps haute pression et corps basse pression. L'avantage d'une telle configuration est d'améliorer le domaine d'opérabilité du moteur, en couvrant notamment les besoins de certaines phases transitoires de vol : par exemple des besoins électriques pour le dégivrage lors d'une phase de montée, très consommatrice de puissance ; ou encore la gestion des ralentis en phase de descente, où la soufflante est entraînée par la vitesse relative et pourrait transférer de l'énergie pour maintenir une vitesse suffisante de la partie

haute pression du moteur. Ce type d'hybridation électrique, légère et sans stockage d'électricité, permettrait d'optimiser le dimensionnement du moteur pour son fonctionnement en croisière, et ainsi gagner quelques pourcents de consommation.

L'introduction d'un réducteur pour améliorer le taux de dilution

L'un des principaux facteurs de réduction de la consommation de carburant, dans les dernières générations de moteurs, a été l'augmentation du taux de dilution. Ce taux est le ratio entre la quantité d'air qui passe par la soufflante et génère l'essentiel de la poussée, et la quantité d'air qui passe par la chambre de combustion et participe donc de la consommation de carburant. Initialement de 1 (tout l'air entrant passait par la combustion), ce taux s'est progressivement élevé jusqu'à 10 pour le moteur LEAP de CFM.

Atteindre un tel taux de dilution suppose d'augmenter la taille de la soufflante, et dans le même temps de réduire la taille de la partie haute pression en visant des températures de combustion de plus en plus élevées. L'une des difficultés rencontrées est la taille croissante des aubes de soufflante, qui entraîne une hausse de leur masse³ et de la vitesse en bout d'aube.

Pour poursuivre l'augmentation du taux de dilution, il apparaît nécessaire de dissocier le régime de rotation de l'aube de soufflante de celui du reste du moteur, au travers d'une boîte de vitesse. Ce principe, bien connu sur les avions turbopropulsés, a été mis en œuvre pour la première fois à grande échelle sur une turbine à gaz par le motoriste américain Pratt&Whitney, sur le Geared Turbo-Fan introduit en 2013 sur l'Airbus A220. Tous les motoristes mondiaux envisagent un tel système, même si les architectures pourraient varier : Rolls-Royce avec son démonstrateur Ultrafan, et Safran et GE via le programme RISE.

L'architecture disruptive de l'Open Fan

Outre la nécessité d'un réducteur, augmenter la taille de la soufflante conduit à une nacelle plus grande, donc plus lourde et générant une traînée aérodynamique plus élevée. Franchir une rupture sur l'augmentation du taux de dilution suppose donc de repenser le moteur, et se passer de nacelle : c'est le sens de l'architecture non carénée, dite Open Fan, présentée par Safran et GE Aerospace dans le cadre du programme RISE.

Cette architecture reposerait sur des aubes de soufflante surdimensionnées, à calage de pas variable et assurant la fonction d'inverseur de poussée actuellement assurée par la nacelle, ainsi que sur un second étage d'aubes permettant de redresser le flux aérodynamique et réduire le bruit. Outre les défis spécifiques de conception des aubes de soufflante, dont la taille sera très supérieure à celles du LEAP, une telle architecture présente notamment des enjeux en termes de maîtrise des nuisances sonores, ainsi que pour l'intégration des moteurs sur l'avion compte tenu de

³ Le moteur LEAP répond à ce défi en intégrant des aubes en composite carbone tissé en 3D.



Comparaison entre le concept CFM RISE – Open Fan et le moteur LEAP actuel (Crédit : CFM International).



CFM RISE – Open Fan, moteur à architecture non carénée (Crédit : CFM International).



EcoENGINE (démonstrateur 1/5^e de l'Open Fan RISE) dans la soufflerie S1MA de l'ONERA à Modane.

son diamètre doublé par rapport au LEAP. En 2023, Safran et l'ONERA ont engagé une campagne d'essais à haute vitesse dans la soufflerie de Modane, afin de valider les travaux de conception déjà menés sur ces sujets.

Quels enjeux pour la propulsion aéronautique française du futur ?

Face au défi climatique, la prochaine génération de moteurs d'avion devra embarquer un éventail très large de solutions innovantes pour franchir une rupture en termes de consommation de carburant. Pour répondre à un tel défi, de nombreux éléments devront être réunis :

- L'alignement des acteurs au sein de la filière, tant au niveau d'ambition que sur les grandes options technologiques pour l'atteindre. À titre d'exemple, l'intégration de l'Open Fan sur un avion pourrait nécessiter une architecture spécifique de l'avion,

et donc une difficulté pour l'avionneur à proposer plusieurs moteurs aux compagnies aériennes si les autres motoristes ne suivent pas cette voie. Cet inconvénient, pour l'avionneur et les compagnies aériennes, n'est envisageable que si l'architecture Open Fan apporte un gain de consommation décisif, attendu et valorisé par l'ensemble de la filière.

- Le soutien des pouvoirs publics, en France et en Europe, aux travaux de R&T qui précèdent le lancement des futurs programmes. Le soutien des pouvoirs publics français a été réaffirmé mi-2023 à l'occasion du Salon du Bourget.
- L'attractivité de la filière pour recruter, en particulier des ingénieurs : si celle-ci demeure forte à court terme, il s'agit de l'entretenir malgré un contexte actuel de critiques sur l'aviation, mais aussi face à la forte concurrence à venir du secteur nucléaire avec la relance du programme de construction de centrales en France.

- La préparation très en amont des enjeux liés à la certification : les accidents des 737MAX intervenus en 2019 et les difficultés encore récentes de Boeing ont conduit à fortement renforcer les exigences de certification des programmes d'avions commerciaux. Cette phase de certification sera d'autant plus critique que les prochains programmes seront innovants, et elle se prépare donc très en amont, par exemple pour la démonstration de la maîtrise des risques associés au cas de perte d'une aube de soufflante sur l'architecture Open Fan.
- La préparation, anticipée elle aussi, des capacités industrielles et des chaînes d'approvisionnement : l'exigence climatique suppose en effet d'introduire le plus rapidement en flotte un nouveau programme d'avions. Le rythme de montée en cadence industrielle est donc clé – cela a constitué une grande réussite du programme LEAP. Dans un contexte

post-Covid marqué par des évolutions géopolitiques, une relative fragmentation des chaînes d'approvisionnement et la recherche d'une résilience accrue, les enjeux industriels doivent être pensés très en amont par la filière, en lien avec les pouvoirs publics.

Conclusion

Face à l'ampleur du défi climatique, la propulsion aéronautique constitue un levier majeur de décarbonation du secteur aérien. La rapidité de la transition à mener impose de multiplier les innovations qui embarqueront dans les prochains programmes : science des matériaux, électrification, ingénierie système, les domaines scientifiques et techniques mobilisés sont variés, et offrent une opportunité aux ingénieurs de participer concrètement à cette nouvelle aventure de la propulsion aéronautique.

Les hélices de forte puissance : des solutions performantes pour une aviation responsable

Par Jean-François CHANUT

VP/GM, Propeller Systems de Collins Aerospace et président de Ratier-Figeac

Longtemps tapis dans l'ombre de l'aviation à réaction, plus rapide et synonyme de renouveau à la sortie de la Seconde Guerre mondiale, les turbopropulseurs sont en passe de faire leur retour sur le devant de la scène aéronautique, dans un contexte de décarbonation du secteur et plus largement des engagements pris vis-à-vis de l'environnement. Ils ont effectivement de nombreux avantages à faire valoir dans les profils de missions qui leur sont le plus adapté que ce soit dans l'aviation commerciale ou le militaire. L'entité Ratier-Figeac de Collins Aerospace, implantée au cœur du département du Lot, investit depuis des dizaines d'années dans l'amélioration des systèmes hélices de forte puissance, tant sur l'amélioration des appareils existants que sur l'architecture des plateformes du futur. Aérodynamisme, efficacité, confort, fiabilité, réparabilité ou encore recyclabilité, tous les aspects de la vie d'une hélice sont optimisés pour réduire l'impact des systèmes sur l'environnement tout en garantissant aux opérateurs les meilleurs coûts d'opération. En plus de réduire l'impact des équipements qu'elle fabrique, l'entreprise est engagée dans la réduction de son empreinte environnementale locale, via notamment la transformation des infrastructures ou la mobilité douce.



Hélice A400M (© Collins Aerospace).

Alors que dans l'imaginaire populaire, les avions à hélices gardent une connotation un peu «vintage», ces derniers connaissent aujourd'hui un nouvel essor.

Pour beaucoup, ce type d'appareil évoque en effet les débuts de l'aviation, et leur bourdonnement si caractéristique rappelle inévitablement des avions d'un autre temps, comme les Bréguet, Viscount, Douglas DC3 ou Lockheed Constellation.

Pour moi en revanche, ce son est clairement synonyme de futur. Ce futur proche qui verra la prochaine génération d'avions à hélices, sur laquelle nos ingénieurs travaillent déjà conjointement avec nos clients, constructeurs aéronautiques, compagnies aériennes

et forces aériennes, pour développer une aviation plus efficace et plus respectueuse de notre environnement.

La renaissance des avions à hélices

Dans un monde confronté aux réalités du changement climatique, l'industrie aéronautique s'est engagée dans une voie drastique de réduction des émissions de gaz à effet de serre avec pour objectif d'atteindre la neutralité carbone d'ici 2050. Dans cette perspective, en parallèle des travaux de recherche sur les carburants alternatifs, les innovations technologiques sur les trajectoires, l'efficacité ou la masse des appareils, l'avion

régional à hélices occupe une place importante sur le chemin de la décarbonation. Le groupe RTX, dont notre activité d'hélicier Ratier-Figeac fait partie au sein de Collins Aerospace, s'est particulièrement engagé à soutenir cet objectif à l'horizon 2050, en développant des solutions innovantes dans les matériaux, la connectivité, l'électrification et une propulsion optimisée, notamment hybride.

Mais avant d'aller plus loin, il convient tout d'abord d'analyser l'histoire du développement du turbopropulseur, et de déconstruire quelques idées reçues sur l'avion à hélice. Star de l'aviation jusque dans les années 1940, elle a laissé le devant de la scène après la Seconde Guerre mondiale à l'avion à réacteur, plus rapide. L'appareil turbopropulsé était ainsi relégué à des routes moins prestigieuses ou moins visibles, bien que tout autant utiles. Même s'il s'est constamment amélioré en termes de confort et de coûts, d'aucun prédisait sa disparition progressive... avant que les enjeux économiques, liés au prix du kérosène, et écologiques, liés au dérèglement climatique, ne lui redonnent une nouvelle jeunesse. Et on observe qu'il est aujourd'hui omniprésent tant sur les théâtres militaires que dans l'aviation commerciale court-courrier. Les turbopropulseurs ont ainsi su résister, à force d'améliorations progressives, et s'apprêtent à prendre leur revanche d'une façon plus éclatante.

Le turbopropulseur : un avion « écolo-nomique »

Si les turbopropulseurs reviennent depuis quelques temps en grâce chez les exploitants aéronautiques, c'est que ceux-ci présentent des avantages non négligeables comparés aux turboréacteurs de même capacité.

Premièrement, la distance nécessaire au décollage et à l'atterrissage est inférieure à celle requise par les turboréacteurs. Les compagnies ont la possibilité de connecter de plus petits aéroports entre eux, dans des régions moins peuplées et donc de permettre leur développement démographique et économique. De plus, étant moins sensibles aux risques d'ingestions, ces appareils sont également capables d'atterrir sur des pistes non préparées, améliorant de manière significative la logistique et l'accessibilité aux théâtres d'opérations militaires les plus reculés.

Les avions à hélices de génération actuelle consomment entre 30 % et 40 % de kérosène en moins que les avions à réaction de même capacité, émettant d'autant moins de gaz à effet de serre. Déjà en 2019, un ATR 72-600, équipé de nos hélices composites 568F, a réalisé un vol en Suède reliant Halmstad à Stockholm, en quête du « vol parfait » – le vol qui par définition avait pour objectif d'utiliser le moins possible de kérosène et donc d'émettre le moins possible de dioxyde de carbone. Cet appareil était équipé de deux turbopropulseurs Pratt & Whitney Canada PW 127M, alimentés par un carburant incorporant 50 % de biofuel ; au cours de ce vol historique, il a émis 46 % de CO₂ de moins qu'un vol traditionnel.



E-2D Hawkeye (domaine public).

Toujours en 2019, l'US Navy a effectué le plus long vol continu jamais enregistré d'un E-2 Hawkeye (avion radar embarqué sur porte-avions), équipé de deux nouvelles hélices huit pales NP2000 en composites fabriquées dans nos ateliers de Figeac. Le vol de huit heures, rendu possible grâce aux capacités de ravitaillement en vol de l'appareil, a mis en évidence la réduction significative du bruit et des vibrations dans le cockpit engendré par les hélices, permettant aux pilotes d'évoluer dans un environnement moins exigeant. Ce niveau de confort, contribuant à des missions plus longues avec un équipage toujours alerte, est un des avantages du système hélice NP2000.

Par ailleurs, les innovations sur l'hélice NP2000 ont également bénéficié au C-130H Hercules. Un système électronique de contrôle de l'hélice permet là encore de réduire les vibrations et les bruits d'environ 15 dB dans le cockpit. Les pales quant à elles, à l'aérodynamique avancée, augmentent la poussée d'environ 20 % pendant les accélérations à basse vitesse. Cela permet de réduire les distances au décollage et d'améliorer la sécurité de l'équipage. D'autre part, nous avons travaillé à l'amélioration de la maintenance des hélices afin de réduire le temps et les coûts d'entretien de l'ordre de 50 %.



C130 équipé d'hélice NP2000 (© US Air Force).

Les avions à hélices sont également souvent utilisés à des vitesses de croisière plus faibles que celles des jets de capacité équivalente ou supérieure, mais, si cela participe bien sûr à leur frugalité, ce n'est pas une fatalité contrairement à certaines idées reçues. Un A400M équipé de nos hélices vole aujourd'hui jusqu'à 40 000 pieds et à une vitesse maximale de 882 km/h! En d'autres termes, un A400M ne mettrait



Centre d'Excellence Hélice à Figeac (© Collins Aerospace).

que 40 minutes de plus qu'un avion de ligne pour rallier New York depuis Paris !

Forts de notre expérience, nous anticipons les besoins futurs des avions de ligne et prévoyons les futures versions alliant environnement, économie, confort et vitesse.

L'innovation au service de la décarbonation

La feuille de route technologique des hélices de Ratier-Figeac vise à l'amélioration continue et à l'optimisation des systèmes d'hélices non seulement pour diminuer leur impact environnemental, mais également pour offrir un meilleur confort aux équipages ainsi qu'aux passagers et garantir aux exploitants les coûts d'opérations les plus faibles.

Nos ingénieurs continuent de travailler aux avancées technologiques de l'hélice. Raison pour laquelle Collins Aerospace a investi 32 millions d'euros sur notre site de Figeac pour bâtir un nouveau centre d'excellence, qui a été inauguré en 2021 en présence du Premier ministre français. C'est dans ce centre de pointe que la prochaine génération d'hélices sera conçue, fabriquée, testée et certifiée grâce notamment aux nombreux moyens d'essais.

De plus, Ratier-Figeac est investie dans de nombreux programmes de recherche européens. Dans le cadre d'« Horizon Europe Clean Aviation », nous participons aux projets HERA et HE-ART dont le but est de travailler sur la mise en œuvre d'architectures et de systèmes de propulsion d'avion hybride électrique. Dans le cadre du projet HE-ART, nous avons la responsabilité du «*work package*» hélice, qui consiste au développement d'un prototype d'hélice intégrant des nouvelles technologies pour plusieurs de ses modules et qui sera installé sur le démonstrateur de moteur à

propulsion hybride. L'ensemble sera ensuite soumis à une campagne d'essais au sol sur banc moteur.

Nous sommes également très investis dans des programmes de recherche français financés par la DGAC (direction générale de l'Aviation civile).

On citera notamment le projet PARIDES coordonné par l'avionneur ATR concernant, entre autres, l'hybridation de la propulsion et l'optimisation aéroacoustique du système hélice en prenant en compte les contraintes d'installation sur avion pour maximiser son efficacité énergétique tout en en réduisant les émissions sonores.



Hélice ATR à l'assemblage (© Collins Aerospace).

PHAROS est un autre projet français qui concerne, lui, le développement de nouvelles technologies pour les différents modules d'hélices, de nouveaux matériaux métalliques et composites, de nouvelles architectures de contrôle hélice, le développement des méthodes et outils de conception novateurs basés sur la modélisation, la simulation et l'optimisation dans les domaines de l'aéroacoustique, des systèmes de contrôle, des chocs ou encore de la conception mécanique. Ce projet concerne également de nouveaux procédés

de fabrication qui seront indispensables pour pouvoir assurer les montées en cadence à venir sur ce marché, notamment mais pas uniquement pour ce qui concerne la fabrication composite pour laquelle l'automatisation demeure un réel défi. D'autres travaux visent quant à eux à effectuer de la maintenance prédictive en surveillant et analysant, *via* des données analytiques, l'état de la pale ou de l'hélice en opération, afin de pouvoir établir un diagnostic préventif des besoins de maintenance et optimiser ainsi les opérations.

Il y a bien sûr une complète cohérence entre les différents projets. PHAROS s'attachant par exemple au développement des nouvelles technologies de modules et composants. Des projets comme PARIDES ou HE-ART se concentrant eux sur l'optimisation de l'intégration du système hélice avec l'avion et la motorisation hybride de propulsion. La démonstration de la maturité des nouvelles technologies hélices au niveau ensemble propulsif et avion passera d'ailleurs par une phase d'essais en vol à l'horizon 2026-2028.

Plus largement mais toujours au sein de RTX, Collins Aerospace et Pratt & Whitney travaillent également à un programme de démonstrateur de vol hybride électrique. En juin 2023, les équipes de recherche ont réalisé avec succès le premier test de puissance du moteur électrique de 1 mégawatt (MW), développé par Collins, associé à un moteur thermique, développé par Pratt & Whitney, et à une hélice fournie par Ratier-Figeac. Ce système de propulsion hybride électrique vise à démontrer une amélioration de 30 % du rendement énergétique et une réduction des émissions de CO₂ par rapport aux turbopropulseurs régionaux les plus modernes aujourd'hui.

En parallèle de la recherche et à propos des nouveaux développements, Ratier-Figeac a récemment été sélectionnée par l'entreprise Deutsche Aircraft pour fournir l'hélice de leur avion D328eco™. Il s'agit pour nous d'adapter une hélice existante au cahier des charges spécifique de cet avion. Son entrée en service est planifiée pour fin 2026. Le D328eco contribuera à la décarbonation de l'aviation à court terme de par son aptitude à fonctionner avec des carburants alternatifs de type SAF et de par sa capacité à remplacer des avions plus anciens ou de type jet de taille similaire.

Nous pourrions encore citer parmi les projets en cours la modification d'une hélice existante pour la société Universal Hydrogen pour l'adapter à leur concept innovant de pack de propulsion électrique pouvant être installé sur des avions en service, dans le cadre de rétrofits.

Qu'il s'agisse de modifications incrémentales d'appareils existants ou de sujets de recherche pour les plateformes du futur, Ratier-Figeac est moteur dans l'innovation. Ces futures hélices devraient bénéficier, tout en réduisant davantage leur empreinte sonore et les vibrations qu'elles génèrent, d'une efficacité aérodynamique augmentée, synonyme de réduction d'émissions de CO₂, d'une haute fiabilité et d'une maintenance optimisée garantissant aux

opérateurs la disponibilité de l'avion et une réduction des coûts d'opération.

Un engagement fort pour l'environnement

Au niveau industriel, nous investissons également fortement pour améliorer nos processus et notre impact environnemental sur l'ensemble du cycle de vie de nos produits. Les exigences environnementales sont considérées dès les premières phases de conception. Cette analyse est utile, entre autres, dans le choix des matériaux qui doivent permettre de tenir les exigences techniques pendant la conception, la fabrication, la vie opérationnelle, la maintenance et le recyclage des équipements en fin de vie. À titre d'exemple, des travaux sur les thermoplastiques recyclables sont menés pour de potentielles applications sur les hélices ou certains composants du système.

La certification ISO14001 que Ratier-Figeac a obtenue est d'ailleurs une reconnaissance des actions mises en place pour le management environnemental.

La responsabilité environnementale de l'entreprise passe également par la décarbonation du site de production. Là encore, de nombreux investissements ont été réalisés ces dernières années. De l'isolation thermique des infrastructures au plan de mobilité douce proposé aux employés, de la gestion des déchets au développement des circuits courts pour la cantine de l'entreprise, ce sont quelques-unes des actions qui ont permis à Ratier-Figeac sur la dernière décennie de considérablement réduire son empreinte environnementale : réduction de la consommation de gaz de 57 % ainsi que de la consommation d'eau de 42 % alors que l'activité a connu une hausse de 54 % sur la même période !



Hélice A400M (© Collins Aerospace).

En conclusion

Notre entreprise Ratier-Figeac, forte de ses 120 ans d'expérience et grâce à ses employés motivés et performants, est un des fers de lance de l'aviation responsable, en France et au sein de Collins Aerospace. Parce que nous sommes implantés dans une nature lotoise verdoyante et accueillante ; parce que nos

collaborateurs sont soucieux de notre empreinte environnementale industrielle ; parce que nos clients aviateurs mettent au point des avions toujours plus performants et économes ; parce que le développement économique, social et culturel des territoires est un facteur de progrès et de paix dans toutes les régions du monde ; parce que les passagers exigent des déplacements responsables, confortables et bon marché.

Pour toutes ces raisons convaincantes, nous sommes totalement engagés vers le développement d'hélices

de nouvelle génération en collaboration étroite avec notre groupe, avec la filière aéronautique et au sein de notre communauté locale.

Les avions à hélices sont définitivement une solution d'avenir ; Ratier-Figeac possède la vision, l'expertise et l'énergie pour continuer à innover et améliorer, permettant ainsi à l'hélice de redevenir le futur de l'aviation commerciale et militaire.

La filière industrielle aéronautique et spatiale en route vers une aviation décarbonée

Par **Frédéric PARISOT**,
Délégué Général du GIFAS

Si le transport aérien n'est responsable que d'environ 2,5 % des émissions de CO₂ d'origine humaine, le sujet doit néanmoins être traité pour que le transport aérien reste accessible au plus grand nombre, en toute sécurité. Les industriels de l'aéronautique, fédérés par le GIFAS, sont engagés dans la voie de la réduction de cet impact environnemental pour atteindre la neutralité carbone en 2050. Les acteurs du secteur, industriels, compagnies aériennes et aéroports, ont décidé de relever ensemble le défi de la décarbonation, en étant le premier secteur à avoir pris au niveau mondial des engagements précis et ambitieux en ce sens. La décarbonation constitue ainsi une nouvelle révolution dans l'histoire de l'aviation, et s'appuie sur différents leviers complémentaires dans le temps, détaillés ici. C'est la capacité d'innovation du secteur qui permettra à l'aviation de se décarboner et d'être un moyen de transport sûr, accessible à tous, et durable.

Le réchauffement climatique est au cœur des débats sociétaux depuis de nombreuses années, dans le monde et tout particulièrement en Europe, et notamment en France. En effet, depuis plusieurs décennies, les rapports successifs du GIEC (Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat) indiquent et confirment toujours plus que les activités humaines sont responsables du réchauffement du climat terrestre. Ils en ont analysé les effets, et ont consolidé différents scénarios d'évolution des températures. Il est donc indéniable que tous les États, tous les secteurs économiques, doivent aujourd'hui collectivement relever ce défi majeur qu'est la lutte contre le réchauffement de notre planète. Cette ambition est de fait mondiale et doit être partagée par tous les secteurs économiques. Et il n'y a pas de petits efforts.

Pourquoi mentionner les « petits efforts » ? Parce que le transport aérien n'est en réalité responsable que d'environ 2,5 % des émissions de CO₂ d'origine humaine. Cette donnée est fondamentale et souvent mal connue du grand public. Elle est même fréquemment exagérée pour faire porter au secteur aérien une responsabilité plus grande qu'elle ne l'est en réalité.

C'est donc un petit pourcentage, mais le sujet doit néanmoins être traité si l'on souhaite que l'aviation continue de permettre aux générations actuelles et futures d'interagir elles-aussi avec le monde et de se déplacer grâce à un transport aérien accessible au plus grand nombre et en toute sécurité. Il est donc fondamental pour la filière de réduire son impact environnemental, et celle-ci est complètement engagée dans cette voie.

Dans cet esprit, le secteur s'est ainsi fixé l'objectif ambitieux d'atteindre la neutralité carbone en 2050, objectif pour lequel l'ensemble des 183 États de l'OACI

(Organisation de l'aviation civile internationale) se sont engagés en octobre 2022. C'est un accord majeur car il engage l'ensemble des pays, reflétant la prise de conscience du secteur.

Le transport aérien est, en effet, passé, en quelques décennies, du temps des pionniers et des voyages d'exception à celui d'un monde ouvert, connectant les hommes et les territoires, permettant les échanges entre les peuples, les régions enclavées ou insulaires, soutenant le développement des économies.

Les progrès considérables obtenus en termes de sécurité – priorité absolue –, l'efficacité et le coût du transport aérien l'ont généralisé à l'échelle internationale, et ouvert à un public de plus en plus large.

Les acteurs du domaine, industriels de l'aéronautique – fédérés en France par le GIFAS, le Groupement des industries françaises aéronautiques et spatiales –, compagnies aériennes et aéroports ont décidé de relever ensemble le défi de la décarbonation, permettant de poursuivre l'aventure et d'offrir les mêmes opportunités de voyage aux générations futures, tout en se situant à la pointe d'un mouvement mondial de réduction de l'empreinte environnementale de nos sociétés.

L'effort de décarbonation, malgré le fait de mettre tout en œuvre dès que possible, ne peut se faire que sur le temps long au regard des enjeux technologiques, et s'incarne dans l'objectif d'une aviation neutre en carbone en 2050.

De nombreux pays, parmi lesquels ceux de l'Union européenne ou les États-Unis, définissent aujourd'hui leur stratégie afin d'atteindre cet objectif, et des feuilles de route propres à toutes les régions du monde sont

en cours d'élaboration, tenant compte des contextes historiques, économiques et géographiques qui leur sont propres.

Le secteur aéronautique est le premier à avoir pris au niveau mondial des engagements précis et ambitieux en matière d'environnement.

En France, le secteur du transport aérien a, en effet, été le premier secteur au niveau national en février 2023 à remettre au gouvernement sa feuille de route de décarbonation, au titre de l'article 301 de la loi climat et résilience, présentée par l'ensemble des acteurs de l'aérien, à la suite de leur travail coordonné par le GIFAS.

Sur la base de ces travaux scientifiques, cette feuille de route démontre que ces objectifs sont réalistes, crédibles, et à portée de main, en activant plusieurs leviers dont la conception et le déploiement d'avions de nouvelle génération, plus économes sur le plan énergétique et moins bruyants, et un usage massif de nouveaux carburants décarbonés ou faiblement carbonés.

L'industrie aéronautique, grâce au soutien de l'État, mobilise toutes ses forces pour parvenir à temps à une aviation décarbonée. Les travaux du CORAC, le Conseil pour la recherche aéronautique civile, copiloté par la DGAC et le GIFAS, sont en ce sens déterminants.

Cette décarbonation constitue une nouvelle révolution dans l'histoire de l'aviation. Elle n'est, en effet, rien de moins que la quatrième révolution du transport aérien. Il a tout d'abord fallu démontrer que le vol « des objets plus lourds que l'air » était possible. La deuxième révolution a fait passer l'aviation d'une activité réservée à quelques pionniers à un réel moyen de transport en travaillant sur la sécurité des vols. Après les développements technologiques de l'aviation pendant la Seconde Guerre mondiale, l'émergence des jets commerciaux et leurs améliorations ont pu faire du transport aérien un moyen de transport démocratisé et accessible au plus grand nombre, sa troisième révolution.

Cette quatrième révolution, en cours, permettra aux générations futures de continuer à voler, de façon décarbonée.

L'atteinte de cet objectif de décarbonation s'appuie sur différents leviers qui s'additionnent et sont complémentaires dans les horizons de temps.

Le premier levier est le renouvellement des flottes

Il s'agit de favoriser le remplacement des avions les plus anciens par les avions les plus récents. L'intensité carbone d'émission des avions de la gamme Airbus, mesurée en quantité de CO₂ émis par kilomètre et par passager, a diminué de 20 % entre 2015 et aujourd'hui. Seulement 20 % de la flotte actuellement en exploitation est constituée d'avions de dernière génération. Ce levier est très puissant et disponible immédiatement. Ceci s'applique aussi aux avions d'affaires.

Le deuxième levier est de poursuivre l'innovation vers toujours plus de performance et d'efficacité pour le développement d'appareils dits « ultrafrugaux »

Ils intégreront des moteurs à l'efficacité exacerbée, via l'augmentation de leur taux de dilution, avec des moteurs plus larges (dits "Ultra High Bypass Ratio"), voire sans carénage (dits "Open Rotor"), et par l'intégration d'un degré d'hybridation électrique. Ils embarqueront une avionique et des systèmes plus électrifiés alliant basse consommation et performance, et une connectivité toujours améliorée, permettant, entre autres, de mieux gérer les trajectoires en vol pour optimiser l'empreinte environnementale des trajectoires minimisant la consommation et les impacts climatiques non CO₂. Ils s'appuieront enfin sur des nouveaux concepts d'architecture avion pour atteindre des performances aérodynamiques optimisées.

Le troisième levier est l'utilisation d'une gamme élargie de carburants

En premier lieu, les carburants d'aviation durables (CAD) permettent une utilisation sans modification majeure des avions actuels. D'une composition chimique très proche du kérosène actuel, leur impact climatique est très réduit. Ce levier est disponible à court terme. C'est pour cela qu'il faut accélérer la mise à disposition de ces carburants, nécessitant un engagement des énergéticiens.

Nos avions sont prêts ! Ils peuvent dès aujourd'hui incorporer 50 % de CAD et très bientôt 100 %.

L'État français a, à la demande du secteur du transport aérien, créé en février 2023 un groupe de travail visant à accélérer l'émergence de la filière industrielle de production de carburants alternatifs durables. Un plan ambitieux de développement a ainsi été lancé. Dans le cadre de France 2030, sur les 420 millions d'euros consacrés à la filière des technologies industrielles, 200 millions sont de ce fait consacrés aux carburants durables et à l'aéronautique.

À l'extérieur de nos frontières, les choses bougent également. L'Union européenne s'est fixé l'objectif d'incorporation de CAD de 6 % en 2020, 20 % en 2035, et 70 % de carburants durables en 2050. Il faut également mentionner le résultat ambitieux obtenu à la conférence de l'OACI CAAF3, qui s'est tenue en novembre 2023 à Dubaï en amont de la COP 28, pour l'émergence des carburants d'aviation durables, et qui fixe d'incorporer 5 % de CAD d'ici 2030. C'est un signal fort envoyé aux investisseurs sur la nécessité de donner la priorité aux investissements dans ces nouveaux carburants.

Encore une fois, dans ce défi de la décarbonation, il y a urgence à ce que les énergéticiens se mobilisent. L'ensemble du secteur du transport aérien est déjà mobilisé. L'émergence de la filière des CAD est par ailleurs une formidable opportunité de renforcer l'indépendance énergétique de notre pays.

En second lieu, la contribution de l'hydrogène est majeure. D'abord comme précurseur nécessaire à la fabrication des carburants d'aviation durables, dits de synthèse, qui ne s'appuient pas sur de la biomasse mais sont synthétisés directement en partant d'hydrogène et de CO₂ captés de l'atmosphère. Mais également comme vecteur directement utilisé, étant de ce fait l'autre carburant envisageable, utilisable dans les piles à combustible dans des architectures électriques – dédiées aux petits appareils – ou en combustion directe.

Pour atteindre les densités massique et volumique d'énergie et de puissance nécessaires, l'hydrogène devra être stocké dans des conditions de très basse température, dite cryogénique, connues dans le spatial, et dans des réservoirs qui resteront volumineux. Ainsi, l'architecture complète des avions doit être repensée, et l'ensemble des briques technologiques doit être validé pour une utilisation de l'hydrogène.

L'enjeu est l'émergence d'une industrie de production d'hydrogène décarboné, qui doit s'engager dès aujourd'hui pour atteindre les coûts de production acceptables et les volumes nécessaires.

Les premiers avions à propulsion à hydrogène pourraient être opérationnels au milieu de la prochaine décennie. Pour faire voler un avion à hydrogène à cette date, il est notamment nécessaire d'avoir une infrastructure, un écosystème d'hydrogène vert – dans les pays qui feront voler ces avions – qui fonctionne. Cela n'existe pas aujourd'hui.

Nous ambitionnons de faire monter progressivement la part de l'aviation hydrogène sur les cibles d'utilisation appropriées, au sein d'une aviation essentiellement conventionnelle avec des CAD pour la plupart des avions.

Cette feuille de route est ambitieuse mais réaliste. Elle permettra, grâce aux efforts de recherche et aux évolutions technologiques envisagées, ainsi qu'en fonction des niveaux de disponibilité des carburants d'aviation durables dans les prochaines années, d'éliminer entre 80 % et 90% des émissions directes de CO₂ du transport aérien français à l'horizon 2050.

La filière aéronautique et spatiale s'engage, et ce de manière inclusive, pour mettre en œuvre sa feuille de route de décarbonation. Des grands maîtres d'œuvre

aux PME et start-up, en s'appuyant sur les travaux du CORAC, la filière se prépare aux conditions technologiques du lancement d'un programme pour le futur successeur de l'A320 à partir de la fin de cette décennie. C'est un travail d'innovations de rupture (risque partagé), et collaboratif (cohésion de filière, contribution et préparation des acteurs de la filière). C'est un objectif ambitieux, d'autant plus en période d'augmentation des cadences de production, reflet de la croissance retrouvée du trafic aérien mondial.

Dans cet esprit, et avec la crise de la Covid, le GIFAS a structuré sa supply chain aéronautique pour la rendre résiliente, souveraine, cyber résistante, réduisant son empreinte environnementale et disposant de la meilleure performance industrielle la rendant compétitive dans un marché mondial. En effet, le GIFAS s'emploie à minimiser les risques pour cette chaîne, qui est très fragmentée, avec beaucoup de petites entreprises, donc potentiellement vulnérables ou qui n'ont pas toujours la taille critique pour faire les investissements en recherche et développement, en automatisation, en décarbonation, numérisation, notamment en phase de montées en cadence.

Conclusion

Alors, la chaîne d'approvisionnement aéronautique française aura-t-elle la capacité de faire face aux enjeux de montées en cadence ? Dans les crises, la filière s'est toujours montrée solide et a su mettre en œuvre sa solidarité, des grands donneurs d'ordre aux plus petites PME. Nous l'avons démontré pendant la crise de la Covid, et l'avons toujours prouvé par la suite.

Aujourd'hui, le contrat de filière signé fin 2023, comme l'identification des risques opérés au sein de la filière, nous permet d'être raisonnablement optimistes quant à la capacité de rebond de la supply chain.

De même, la supply chain aéronautique française aura-t-elle la capacité de faire face aux enjeux de décarbonation du transport aérien ?

C'est la capacité d'innovation du secteur qui permettra à l'aviation de se décarboner et de continuer à jouer son rôle sociétal unique : relier, rapprocher les peuples, connecter les territoires et les cultures, et permettre la prospérité et la croissance dont nos sociétés auront inévitablement besoin pour financer la transition énergétique.

La décarbonation, cette quatrième révolution, fera de l'aviation un moyen de transport sûr, accessible à tous, et durable.

Aerospace Valley et la mobilité aérienne légère décarbonée

Par **Philippe LAGARDE**

Chargé de mission Mobilité aérienne légère et décarbonée au sein du pôle de compétitivité d'Aerospace Valley

En matière d'aviation décarbonée, Aerospace Valley a pris le pari que le développement de technologies à l'échelle de l'aviation légère, régie par la certification CS23, sera plus rapide avec des entrées en service dans les prochaines années, et servira donc de tremplin à l'aviation commerciale (CS25) décarbonée, dont les premières réalisations n'apparaîtront que lors de la prochaine décennie.

La grande majorité des avions actuellement en service ont été produits dans les années 1970 ; la flotte est donc vieillissante, et la question se pose de son renouvellement. Rendre l'aviation légère plus écoresponsable et mieux acceptée par les citoyens, c'est aussi ouvrir la voie à de nouveaux usages. Cela est d'autant plus vrai que les coûts d'exploitation visés par les fabricants sont drastiquement diminués (d'un facteur 4) par l'introduction de nouvelles technologies. Ainsi, le remplacement de la flotte existante et le défi de la formation des futurs pilotes montrent l'existence d'un marché significatif pour peu que les nouveaux appareils soient climatiquement vertueux. Par ailleurs, de nouveaux marchés sont envisageables grâce à la forte densité européenne d'aérodromes et d'aéroports, qui permet de nouveaux usages pour du transport de passagers ou de fret, ainsi que le désenclavement de certains territoires.

Plusieurs technologies liées à la propulsion concourent à la décarbonation de l'aviation légère : électrique, hybride électrique, pile à combustible... Elles sont complémentaires, et beaucoup de paramètres interviennent quant à leur choix. Le développement de réponses adaptées aux petits terrains d'aviation générale est un prérequis au succès de l'aviation légère. Là aussi, Aerospace Valley a son rôle à jouer par la mise en relation et la fédération de tout l'écosystème !

Notification : cet article a fait l'objet d'une première publication pour La Revue de l'électronique et de l'électricité (REE). Il est publié ici avec son aimable autorisation et celle des auteurs au regard de son intérêt et de la cohérence avec l'ensemble du numéro.

Introduction

Aerospace Valley est le premier pôle de compétitivité européen de la filière aérospatiale, au service des secteurs stratégiques de l'aéronautique, du spatial et des drones, pour les régions Occitanie, Pyrénées-Méditerranée et Nouvelle-Aquitaine.

Au-delà de ses secteurs stratégiques, l'organisation d'Aerospace Valley comprend cinq « écosystèmes d'excellence », qui permettent une animation plus « technologique » de l'écosystème. Ces cinq « écosystèmes d'excellence » sont : Systèmes Embarqués et Communicants ; Structures, Matériaux et Procédés ; Propulsion et Énergie embarquée ; Économie des Données et Intelligence Artificielle ; Solutions pour l'Usine du futur – Aerospace Valley est le moteur d'une communauté solidaire, compétitive et attractive visant à favoriser l'innovation au service de la croissance.

Classé dans le trio de tête des pôles de compétitivité mondiaux pour la performance de ses projets coopératifs de R&T (dont 619 ont été financés à ce jour), Aerospace Valley a pour mission d'animer un réseau

dynamique de renommée internationale, composé de 860 membres (entreprises, laboratoires de recherche, établissements de formation, universités et grandes écoles, collectivités, structures de développement économique), dont plus de 600 PME.

Aerospace Valley a lancé l'initiative MAELE fin 2020 (Mobilité Aérienne Légère et Environnementalement responsable), qui rassemble une communauté d'acteurs régionaux innovants dans le domaine de la mobilité aérienne légère et décarbonée.

Avec cette initiative, l'ambition d'Aerospace Valley est multiple ; dynamiser l'émergence des technologies en rupture, développer les compétences et positionner les acteurs des territoires comme pionniers de la transition écologique des filières aérospatiales, pour enfin contribuer à assurer la croissance et sécuriser le futur de nos filières régionales. Ainsi, plusieurs actions sont proposées :

- des appels à manifestation d'intérêt permettent d'initier des consortiums d'acteurs qui présentent des dossiers de projets innovants sur la thématique MAELE ;

- des événements comme la semaine de l'aviation légère réalisée en septembre 2021, ou les journées MAELE organisées à Bordeaux et Toulouse en 2022, ou encore les "Green Aérodays" organisés sur l'aéroport de Pau en décembre 2023 et qui abordent le marché, les technologies, et permettent des rencontres B2B et de l'écosystème (avionneurs, équipementiers, gestionnaires d'aéroport, énergéticiens, financeurs) ;
- des challenges entre écoles afin de faire émerger des projets innovants et développer l'entrepreneuriat.

En matière d'aviation décarbonée, Aerospace Valley a pris le pari que le développement de technologies à l'échelle de l'aviation légère, régie par la certification CS23, sera plus rapide avec des entrées en service dans les prochaines années, et servira donc de tremplin à l'aviation commerciale (CS25) décarbonée, dont les premières réalisations n'apparaîtront que lors de la prochaine décennie.

L'enjeu climatique, une priorité pour l'aérien

La pandémie de Covid-19 a montré que quelques mois de confinement quasi planétaire n'étaient pas suffisants pour contrer des décennies de pollution. En ce qui concerne l'aviation, il faut savoir que grâce à des évolutions technologiques continues, les émissions de CO₂ par passager ont diminué de 80 % au cours des soixante-dix dernières années. En conséquence, les experts s'accordent sur un impact du transport aérien dans son ensemble équivalent à 2 % à 3 % des émissions globales de CO₂. Bien qu'ayant une idée très vague, voire erronée, de la contribution du transport aérien aux émissions de CO₂, une majorité

de la population occidentale est convaincue du caractère polluant de l'aérien, et estime que le secteur ne fait pas assez d'efforts pour réduire son impact environnemental.

Dans ce contexte, les organisations internationales gouvernant l'aéronautique ont accéléré la transformation technologique de la filière, et l'objectif « pré-Covid », qui était de stabiliser les émissions de CO₂ au niveau atteint en 2020, a été complètement revu. Lors du Sommet de l'aviation consacré à la décarbonation du transport aérien qui s'est tenu les 3 et 4 février 2022 à Toulouse, la Commission européenne, les vingt-sept États de l'Union européenne, et les dix États de la Conférence européenne de l'aviation se sont engagés sur un objectif de neutralité carbone du transport aérien d'ici à 2050.

Pour la France, c'est un enjeu stratégique d'indépendance en matière de transport et de défense avec également un impact socio-économique, car les activités aéronautiques représentent plus de 1,1 million d'emplois directs et indirects en France, et 4,3 % du PIB national.

Émissions du transport aérien

Chaque segment du transport aérien n'a pas le même poids sur les émissions de CO₂ comme le montre la Figure 1. La moitié des émissions proviennent des vols long-courriers, qui ne représentent pourtant selon Eurocontrol que 6 % du trafic global. À l'opposé de l'échelle, les 31 % des vols de moins de 500 km n'avaient qu'une part de 4 % des émissions de CO₂ (24 % de vols avec 3,8 % des émissions en 2019). Ce n'est pas pour autant que ces derniers seront négligés ; chaque segment doit contribuer à l'objectif de neutralité carbone.

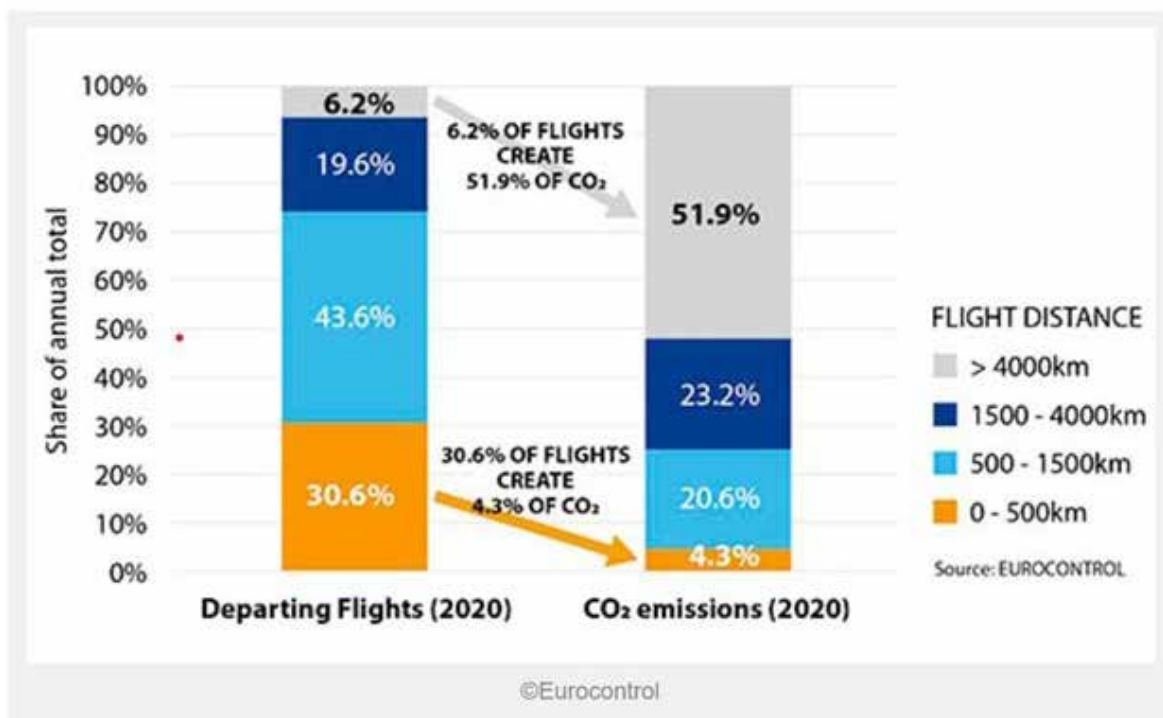
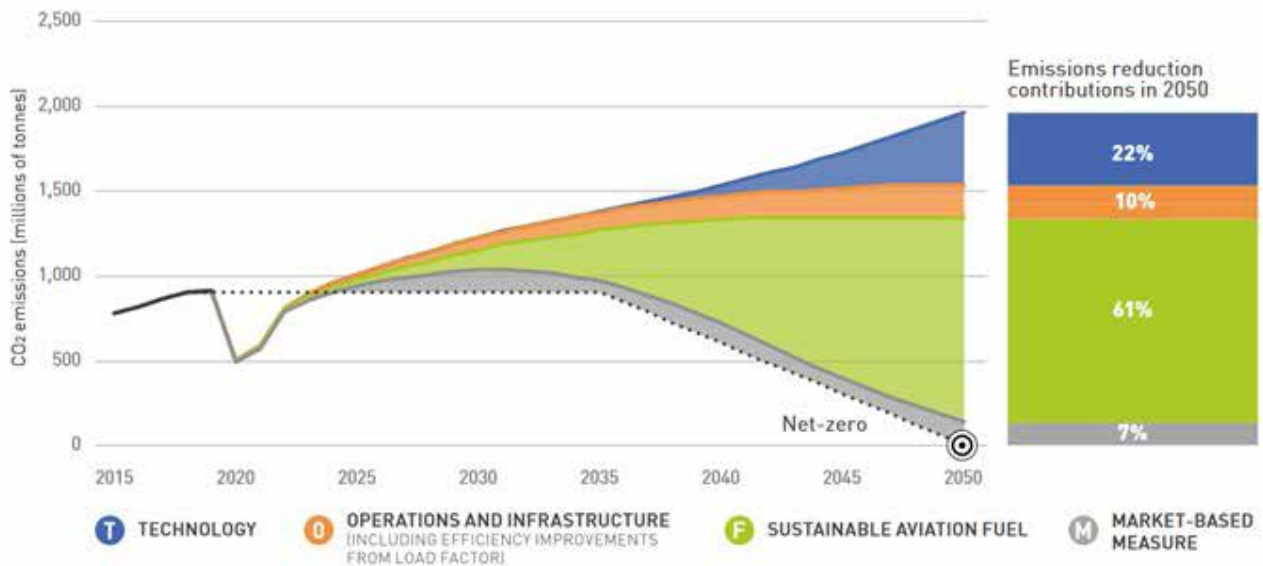


Figure 1 : Proportion des émissions de CO₂ en fonction des segments de vol (© Eurocontrol).



Comparison with industry -50% long-term goal set in 2009

In order to meet the industry long-term goal of -50% by 2050 compared to 2005 levels, Technology would contribute 26% of emissions reductions. Operations and infrastructure improvements 12%. A back-cast to meet the goal would require 320 Mt (400 billion litres) with a 100% emissions reduction factor by 2050 (62% of emissions reductions), or a mix of SAF and offsets in the form of carbon removals.

Figure 2 : Contribueurs à la neutralité carbone (Source : ATAG Waypoint 2050).

Les initiatives en faveur de la décarbonation aéronautique

L'industrie aéronautique relève le défi climatique en en faisant sa priorité absolue. Le challenge est immense puisqu'il s'agit de développer, dans la décennie, des technologies en rupture alors que les performances et la sécurité de nos avions actuels sont le résultat d'évolution continue pendant plus de quatre-vingts ans.

La Figure 2 montre la part attendue des contributeurs à la neutralité carbone. Il faudra donc des progrès technologiques (aérodynamique, fuselage allégé, propulsion innovante...), des avancées sur le plan opérationnel comme l'optimisation des trajectoires, l'uniformisation du trafic aérien au niveau européen, mais c'est surtout l'adoption de carburants alternatifs durables (*sustainable aviation fuel* ou SAF) tels que les biocarburants ou le dihydrogène, qui permettra d'atteindre la cible. Pour ces derniers, au-delà de la mise en place des filières de production et d'acheminement, des technologies embarquées pour le stockage, l'injection et la combustion des moteurs devront aussi être développées.

La trajectoire de décarbonation implique un effort financier sans précédent. Conscients de l'effort à réaliser à court terme, les pouvoirs publics, régionaux, nationaux ou européens multiplient les appels à projets dans ce domaine.

L'une des actions principales du pôle Aerospace Valley est de décrypter les différentes initiatives et accompagner les entreprises membres du Pôle au

montage de projets, en proposant le guichet de financement adapté.

Au niveau européen, Horizon Europe est le 9^e programme-cadre de l'Union européenne pour la recherche et l'innovation. Il a pris effet le 1^{er} janvier 2021, pour la période allant de 2021 à 2027. On citera, notamment, le second appel à projets thématique de l'EIC Accélérateur 2022, qui porte sur les technologies contribuant à l'atteinte de l'objectif "Fit for 55", c'est-à-dire la réduction des émissions de gaz à effet de serre de 55 % au moins en 2030 par rapport à 1990, avec une thématique sur les solutions de mobilité zéro émission.

Le partenariat européen Clean Aviation pour une aviation propre a été lancé le 30 novembre 2021. Il s'agit du partenariat public-privé de la Commission européenne pour une aviation climatiquement neutre. Il représente le programme de recherche et d'innovation le plus ambitieux au monde pour un secteur de l'aviation durable qui contribue au "Green Deal" de l'UE et à la stratégie industrielle de l'UE.

Toujours au niveau européen, le programme SESAR constitue le volet technologique de la construction du « ciel unique européen » ; il a pour objectif de moderniser le système de gestion du trafic aérien (ATM) européen, en développant de nouveaux concepts opérationnels dans un environnement technologique de nouvelle génération aux standards harmonisés.

Au niveau de l'État français, le CORAC (Conseil d'orientation pour la recherche aéronautique civile) a défini les feuilles de route des technologies à mettre en œuvre au niveau national pour remplir l'objectif de

zéro carbone en 2050. À partir de ces feuilles de route, plusieurs plans sont mis en œuvre :

- un premier plan, d'une durée de trois ans, est né courant 2020 pendant la crise sanitaire liée au Covid-19. Ce plan de soutien concerne la chaîne d'approvisionnement mais aussi la décarbonation du trafic aérien ;
- ce premier plan est poursuivi par un second plan, le plan d'investissement France 2030.

Bpifrance a lancé en 2022 plusieurs appels à projets « Produire en France des aéronefs bas carbone » et « première usine », dont sept des neuf lauréats de la première édition sont membres d'Aerospace Valley. Une seconde édition est planifiée en 2024.

Coté carburants, on peut citer aussi l'appel à projets « Développement d'une filière de production française de carburants aéronautiques durables ». Il s'inscrit dans le cadre du 4^e Programme d'investissements d'avenir (PIA4) et de la stratégie nationale « Produits biosourcés et biotechnologies industrielles – Carburants durables », financé aussi par France Relance.

Opéré par l'ADEME, Elyse Energy, membre du pôle et pilote d'un consortium d'industriels a été lauréat pour le projet bioTjet.

Sur le plan régional, Aerospace Valley opère par des appels à manifestation d'intérêt qui permettent d'initier des consortiums d'acteurs des territoires néo-aquitain et Occitanie proposant des dossiers de projets innovants sur la thématique MAELE (aviation légère), pour être ensuite présentés aux deux régions en vue d'éventuelles subventions.

Le marché de l'aviation légère, l'opportunité de nouveaux marchés

Une flotte vieillissante à remplacer

En France, l'aviation légère se pratique à partir de 340 aérodromes ouverts à la circulation aérienne publique, auxquels il convient d'ajouter 240 aérodromes agréés à usage restreint et 390 aérodromes à usage privé. Il existe par ailleurs 120 aéroports commerciaux. De fait, le réseau d'aérodromes est extrêmement développé sur le territoire national, et proche des zones urbaines.

En parallèle, fin 2018, on comptait une flotte de 5 750 avions légers, 1 675 planeurs, 15 797 ULM selon la DGAC (source GAMA - General Aviation Manufacturers Association), et un peu plus de 28 000 pilotes privés. L'ensemble représente environ 3 millions de mouvements d'aéronefs. Ce domaine vient d'atteindre un tournant, la moyenne d'âge de la flotte approchant aujourd'hui les 46 ans. En effet, la grande majorité des appareils actuellement en service ont été produits dans les années 1970, avant la crise de *product liability* ayant stoppé la production d'avions légers pendant quasiment quinze ans. Les écoles, vivant depuis des décennies sur ces avions d'occasion robustes mais pas immortels, vont bientôt se retrouver en difficulté car privées de leur moyen d'enseigner, faute

de production entre les années 1980 et 1995. D'après les chiffres de la GAMA, un volume de 100 000 avions arrivera en fin de vie au cours de la prochaine décennie. Qui alors pour les remplacer ?

À ce jour, les constructeurs historiques comme Cessna ou Piper se sont désintéressés de leur avions monomoteurs à piston (C172 & PA28) sans pour autant les remplacer. Cirrus Aircraft s'est positionné sur le très haut de gamme des propriétaires privés, et les constructeurs d'Europe centrale se sont orientés vers l'aviation non certifiée. Mais on voit que les choses commencent à évoluer avec l'annonce très récente du rachat de l'avionneur slovaque Pipistrel par Textron, la maison mère de Cessna et de Bell Aviation.

Le défi de la formation de pilotes

Une récente étude menée par le cabinet nord-américain Oliver Wyman alerte sur la pénurie de pilotes qui devrait toucher la reprise du secteur aérien de l'après Covid-19. L'aviation commerciale pourrait manquer de 60 000 pilotes en 2029. La crise sanitaire a mis un frein brutal aux recrutements tout en réduisant ou suspendant de manière indéfinie les programmes de cadets. Les banques sont désormais plus frileuses à octroyer des prêts pour une formation menant à une carrière qui semble désormais moins stable et lucrative qu'auparavant.

Un marché pour de nouveaux aéronefs vertueux

Rendre l'aviation légère plus écoresponsable et mieux acceptée par les citoyens, c'est aussi ouvrir la voie à de nouveaux usages. Cela est d'autant plus vrai que les coûts d'exploitation visés par les fabricants sont drastiquement diminués (d'un facteur 4) par l'introduction de nouvelles technologies. Ainsi, le remplacement de la flotte existante et le défi de la formation des futurs pilotes montrent l'existence d'un marché significatif pour peu que les nouveaux appareils soient climatiquement vertueux. Par ailleurs, de nouveaux marchés sont envisageables grâce à la forte densité européenne d'aérodromes et d'aéroports, qui permet de nouveaux usages tels que les liaisons entre les petites villes *via* des lignes régulières ou à la demande, pour du transport de passagers ou de fret, ainsi que le désenclavement de certains territoires.

La flexibilité est la clé de voûte pour le déploiement de ces nouveaux modèles économiques, avec le développement de services à la demande à partir des aérodromes.

De jeunes entreprises comme la toulousaine AuraAéro, la rochelaise Elixir Aircraft, ou la rochefortaise VoltAero, ou encore des *start-up* comme Beyond Aero ou Flight Ascendance Technologies, ont bien compris l'enjeu de ces nouveaux marchés, et développent de nouveaux aéronefs. Ce développement se fait en utilisant tout un écosystème dédié à l'aéronautique en partie aidé par des subventions régionales, nationales pour le développement de ces technologies en rupture. Le passage à la commercialisation nécessitera encore beaucoup d'argent, et le challenge sera alors de trouver des investisseurs !



Figure 3 : Elixir Aircraft a été pionnier en certifiant son avion de quatrième génération selon le règlement EASA CS-23 amendement 5, premier pas vers une solution complètement décarbonée (© Elixir Aircraft).

Nouvelles propulsions envisagées pour l'aviation légère décarbonée

Le segment aviation légère nécessite des puissances totales de quelques dizaines de kW à 1 MW pour la partie haute de la CS23 « avion à 19 places », et des durées de vol relativement faibles (maximum de trois heures).

Ces caractéristiques autorisent le développement de solutions innovantes basées sur la propulsion électrique, inenvisageable pour des applications plus contraignantes en autonomie ou en charge payante.

La propulsion électrique ou hybride électrique

Dans une application aérospatiale, la masse est clé. Aujourd'hui, toutes les solutions décarbonées envisagées sont plus lourdes que les solutions conventionnelles utilisant des motorisations thermiques brûlant de l'énergie fossile.

Les solutions de nouvelles propulsions électriques sont architecturées autour d'un ou de plusieurs moteurs électriques entraînant une ou plusieurs hélices, dont

l'électronique de puissance est alimentée soit par une source énergétique, batterie ou pile à combustible, soit par un système hybride (par exemple source thermique combinée à une batterie).

Trouver le bon compromis entre charge utile, autonomie et coûts est dimensionnant afin de définir le ratio d'hybridation, c'est-à-dire la répartition de puissance entre énergie thermique et énergie électrique stockée dans les batteries.

La caractéristique de l'aéronautique est un besoin de puissance important en phase de décollage et de montée, dimensionnant les composants du système propulsif. Les cellules des batteries seront choisies dans ce sens ; les piles à combustibles qui n'ont pas de dynamique seront couplées aussi à une batterie (ou super capacité) dans cet objectif, mais offrant une meilleure autonomie et une capacité de recharge rapide. Enfin, les propulsions hybrides seront destinées au segment de puissance moyen et haut, le moteur thermique restant la source principale et l'électrique réduisant les nuisances au sol ou près du sol. Le carburant conventionnel sera progressivement remplacé par des carburants issus de la biomasse.



Figure 4 : L'avion de démonstration Cassio de VoltAero valide la configuration du groupe motopropulseur de Cassio (motorisation hybride thermique-électrique), et dé-risque sa viabilité en vue d'obtenir la certification de navigabilité. Il a déjà parcouru 10 000 km (© VoltAero).

Les perspectives sur les batteries

La technologie actuelle des batteries présente des densités d'énergie trop faibles pour les gros avions, mais leur utilisation pour l'aviation légère est possible. Pour des avions totalement électriques, elles présentent aujourd'hui une autonomie proche d'une heure et 150 km de rayon d'action. Mais une fois décomptés les réserves requises par les autorités de certification et les effets de vieillissement, le temps de vol « utile » n'est plus que de trente minutes, encore trop peu pour la majorité des usages de ce segment.

Il faut être prudent par rapport aux effets d'annonce de densités de puissance significativement élevées à court terme, premièrement parce que bien souvent ces densités sont obtenues à très faible échelle, et donc difficilement transposables à de plus grandes. Par ailleurs, d'autres facteurs entrent aussi en compte, comme la capacité de décharge et recharge, le vieillissement, le besoin de fonctionnement à température élevée...

La technologie Li-ion liquide, que tout le monde emploie aujourd'hui, perdurera au moins jusqu'en 2030 ; sa densité d'énergie massique est passée de 90 à 250 Wh/kg. Cependant, son inconvénient majeur est sa réactivité et son inflammabilité due en partie à l'électrolyte liquide. Les autorités imposent des mécanismes de protection supplémentaires pénalisant fortement la masse. D'où l'intérêt du Li-ion gélifié et du Li-ion tout solide (*solid state*), qui devraient offrir une bien plus grande sécurité d'utilisation. Leur densité d'énergie massique n'excédera sans doute pas les 300 Wh/kg, mais ils pourraient constituer un compromis intéressant entre performance et sécurité.

De leur côté, le Li-ion *solid state* et le Lithium métal, envisagés au-delà de la décennie, devraient afficher des densités d'énergie massique respectives meilleures que 400 Wh/kg.

Les progrès des batteries embarquées sont lents, et leur développement nécessite des investissements très importants que seul le marché automobile par ses volumes peut assumer.

Les perspectives sur les piles à combustible

La densité de puissance des piles à combustible, générant de l'énergie en « brûlant » de l'hydrogène, est au moins trois fois celle des batteries, et offre donc un avantage indéniable sur le temps de recharge. Le temps de remplissage en hydrogène est, de plus, proche de celui des carburants conventionnels. Plusieurs technologies de piles à combustible existent : parmi les plus connues, on citera les piles avec membrane à échange de proton basse température (PEM-LT), et son pendant à haute température (PEM-HT), proposant des densités de puissance de 1 kW/kg aujourd'hui, jusqu'à 3 kW/kg à horizon 2030. La PEM-LT est la plus mature technologiquement, mais elle est très pénalisante au-delà des puissances supérieures à 10 kW car elle nécessite un refroidissement important, d'où un usage réservé aux faibles puissances (< 50 kW). La PEM-HT est moins mature, mais elle offre l'avantage de fonctionner avec un hydrogène moins pur que la PEM-LT. Cependant, comme pour les batteries, le cœur de

la pile ne peut pas fonctionner sans des servitudes (stockage H₂ gazeux 350 bars, 700 bars ou cryogénique, échangeur thermique...) qui pénalisent finalement la densité de puissance du système complet.

La motorisation thermique reste toujours d'actualité

Conservé les moteurs thermiques existants a un sens même si le rendement d'un moteur thermique est inférieur à une pile à combustible (30 % *versus* 50 %). Son avantage est de ne pas casser les architectures d'avion existantes et d'autoriser un rétrofit de la motorisation. Les aéroclubs ne pourront, par exemple, pas financièrement renouveler toute leur flotte en même temps ! Le carburant d'origine fossile pourrait donc avantageusement être remplacé par des biocarburants ou de l'hydrogène décarboné. Plusieurs adaptations seront nécessaires notamment au niveau de l'injection, et pour l'hydrogène, l'adaptation à une combustion beaucoup plus exothermique. La distribution entre le réservoir et le moteur devra être renforcée par rapport aux risques de fuites et d'explosion supérieurs à celui d'un carburant classique. La fiabilité du moteur restera à démontrer, car ces carburants alternatifs ne comportent pas d'aromatiques qui permettent la lubrification et la non-dégradation des joints d'étanchéité en élastomère.

Enfin, le stockage de l'hydrogène reste une problématique, car la densité d'énergie gravimétrique de l'hydrogène est trois fois supérieure à celle du kérosène, mais sa masse volumique est très faible (71 kg/m³ sous forme liquide, quatorze fois moins dense que l'eau !) ; et son énergie volumique est 3,7 fois plus faible que celle du kérosène. L'hydrogène sera « certes trois fois plus léger que le kérosène, mais presque quatre fois plus volumineux », nécessitant donc des réservoirs plus difficiles à loger dans une architecture d'avion classique.

En conclusion sur la propulsion

Plusieurs technologies liées à la propulsion concourent à la décarbonation de l'aviation légère ; elles sont complémentaires, et beaucoup de paramètres interviennent quant à leur choix. Aucune technologie n'est encore mature mais un premier pas a été réalisé avec la première certification de l'avion électrique Velis Electro du fabricant Slovène Pipistrel, ou celle de l'Elixir, destinés principalement à la formation initiale des pilotes.

Ces avancées, ou celles de VoltAero, d'Aura Aero ou de Flight Ascendance Technologies, illustrent bien le caractère de « laboratoire d'essais » que constitue l'aviation légère en matière de décarbonation. Ces avions sont d'ores et déjà en vol, et testent à leurs limites les nouvelles technologies propres. Reste une problématique économique : ces nouvelles propulsions et surtout les carburants alternatifs durables sont pour le moment de cinq à dix fois plus chers que les carburants conventionnels, d'où la recherche de massification des usages (hydrogène), la création de filières biocarburants et potentiellement des aides financières.

Les infrastructures aéroportuaires doivent aussi s'adapter

L'émergence des technologies embarquées doit être accompagnée au niveau des infrastructures aéroportuaires pour assurer le déploiement de systèmes de transport aérien opérationnels. En effet, il est aussi nécessaire de démontrer que l'avion électrique peut opérer de manière sûre et efficace depuis les aérodromes, et de mettre en place la logistique et les équipements dont il a besoin pour ses opérations au sol.

En ce qui concerne les batteries, il existe plusieurs solutions techniques pour assurer leur rechargement au sol. Premièrement, il est possible d'installer des chargeurs fixes au niveau des postes avions. Si l'avion est connecté au chargeur au début des opérations d'assistance au sol, les batteries peuvent se recharger pendant le temps de rotation. La fourniture de ce type d'équipement et de service n'est pas inconnue des aéroports, avec notamment l'alimentation 400 Hz des avions au poste. Afin de permettre le chargement des batteries en des temps compatibles avec les besoins opérationnels des exploitants d'aéronefs, la puissance électrique fournie par ces chargeurs devrait être comprise entre plusieurs centaines de kW et quelques MW. Les chargeurs mobiles, avec un système de batteries de forte capacité ou de piles à combustible montées sur un camion ou une remorque, sont une alternative possible aux chargeurs fixes. Enfin, une troisième option est le *battery swapping*, consistant au remplacement au poste des batteries vides par des éléments préalablement rechargés. Cette solution est

séduisante, car elle peut théoriquement réduire l'impact du *process* de chargement des batteries sur la disponibilité des avions. Néanmoins, les autorités de certification doivent définir les conditions nécessaires pour que le remplacement puisse être réalisé comme une simple opération d'assistance en escale. Au niveau de l'aéroport, cela implique aussi la présence d'un inventaire de batteries compatibles, rechargées et prêtes à l'emploi.

Concernant les avions à hydrogène, ils nécessiteront la mise en place de filières adaptées. À court terme, l'utilisation de chaînes logistiques existantes (livraison par camions-citernes spéciaux) ou le développement de nouvelles chaînes (livraison de *containers* ou *pods* prêts au chargement dans l'avion) devraient pouvoir répondre aux besoins limités des premiers utilisateurs aéronautiques. Au-delà, les aéroports pourraient bénéficier du développement d'une économie hydrogène, justifiant la création de chaînes logistiques livrant ce gaz en grandes quantités à nombre d'autres utilisateurs – dont les avions turbopropulseurs et turboréacteurs à hydrogène, qui pourraient émerger au-delà de 2035.

Le premier défi est d'ordre réglementaire et sécuritaire. Introduire une molécule d'hydrogène dans un domaine ultra normé, ultra réglementé, comme celui de l'aéroportuaire est un sujet délicat. Il y a ensuite un défi opérationnel : l'hydrogène liquide se conserve à -253°C , ce qui nécessite des précautions particulières.

Le développement de réponses adaptées aux petits terrains d'aviation générale est un prérequis au succès de l'aviation légère. Là aussi, Aerospace Valley a son rôle à jouer par la mise en relation et la fédération de tout l'écosystème !



Figure 5 : Les énergéticiens commencent à développer des offres clés en main de *hubs* énergétiques à destination des aérodromes. C'est par exemple le cas de l'offre FLHY d'ENGIE Green qui associe production photovoltaïque et recharge électrique/avitaillement hydrogène (© ENGIE Green).

Airbus pionnier d'une aviation durable, pour un monde ouvert et respectueux de l'environnement

Par Alain DE ZOTTI

Responsable du Centre d'Architecture et d'Intégration d'Airbus

Et André BOURDAIS

Senior vice-président, directeur du Département d'Ingénierie de Fabrication d'Airbus Commercial, Airbus

Être une source d'inspiration est profondément ancré dans l'ADN d'Airbus, et aujourd'hui notre objectif est d'être le pionnier de l'aérospatiale durable, pour un monde sûr et solidaire. Depuis plus de cinquante ans, nous valorisons l'innovation pour réduire l'empreinte environnementale de nos produits et de nos activités. Un effort considérable a été fait pour promouvoir le renouvellement des flottes au sein des compagnies aériennes vers des avions de nouvelle génération plus performants, économes en carburant et respectueux de l'environnement.

Nous nous attachons à développer et porter à maturité les technologies nécessaires à la décarbonation, notamment avec des évolutions en matière thermopropulsive des moteurs, ou plus révolutionnaire comme l'utilisation de l'hydrogène ; des essais en vol seront bientôt effectués sur l'un de nos avions d'essai. Un autre levier important est l'utilisation grandissante des carburants d'aviation durables pour atteindre les objectifs de réduction des émissions carbone du transport aérien d'ici à 2030. Un partenariat stratégique a d'ailleurs été récemment signé entre Airbus et TotalEnergies afin d'accélérer leur déploiement ; ce carburant fourni par TotalEnergies devrait permettre de réduire jusqu'à 90 % les émissions de CO₂ sur l'ensemble du cycle de vie, en comparaison de leur équivalent fossile.

Enfin, « être pionnier dans l'aéronautique durable » signifie, pour nous, assumer notre responsabilité en tant que *leader* reconnu de notre industrie, pour créer une valeur à long terme pour nos parties prenantes et pour la société. Notre ambition comprend des engagements forts pour réduire nos impacts environnementaux et notre empreinte écologique, en adoptant une perspective de cycle de vie. Cette responsabilité environnementale commence dès la phase de conception, se poursuit durant le processus de fabrication et après la livraison, ainsi que dans le quotidien de chaque salarié, dans nos opérations industrielles et celle de notre chaîne d'approvisionnement.

Toutes ces évolutions technologiques majeures et cette transformation de notre entreprise font d'Airbus un acteur majeur dans la société, avec des défis passionnants et stimulants à relever.

Le préambule de la Convention de Chicago déclare en 1944 que « l'aviation civile internationale peut grandement aider à créer et à préserver entre les nations et les peuples du monde l'amitié et la compréhension ». Chez Airbus, nous croyons en cet apport positif de l'aviation dans nos sociétés, et sommes déterminés à permettre aux générations actuelles et futures de continuer à en bénéficier. Ceci suppose, entre autres, de trouver des solutions qui permettront de réduire l'impact de l'aviation sur le changement climatique. Le transport aérien est responsable de 2,5 % des émissions anthropiques de CO₂. Lorsque l'on considère dans le bilan radiatif les effets dits « non CO₂ », la contribution de l'aviation augmente à 3,5 %.

Étant donné la concentration, mais aussi la bonne organisation mondiale de ce secteur, ses chercheurs et ingénieurs ont une opportunité rare d'agir à l'échelle de la planète. Ils ont pour cela différents moyens d'action qui s'additionnent.

Le premier est le renouvellement des flottes, qui consiste à tirer bénéfice de la recherche, des développements et investissements industriels des années passées. Ce levier est puissant, car seulement 20 % des flottes mondiales sont aujourd'hui constituées d'avions de dernière génération. La production actuelle d'Airbus a par exemple une intensité carbone de 63 gCO₂eq/passager/km. Ce chiffre, qui prend en compte l'émission des appareils lors de

leur utilisation et le taux de remplissage moyen, s'est amélioré de 20 % entre 2015 et 2022.

Le deuxième moyen d'action est de poursuivre sans discontinuer la quête de performance et de sobriété qui est la marque de notre industrie, en continuant à investir dans des programmes de recherche qui permettront de réaliser un autre saut d'efficacité dans le milieu de la prochaine décennie. Les leviers théoriques sont connus. Sur les avions subsoniques, la traînée d'onde est désormais négligeable. La traînée induite par la portance sera réduite par l'augmentation de l'envergure. La masse de la voilure sera minimisée grâce à un contrôle actif des charges et du flottement par des systèmes de commande de vol fiables et ultra rapides. Une évolution des règles de certification dans ce domaine sera nécessaire. La traînée de frottement pourra être minimisée par le contrôle de la laminarité et l'introduction de manipulateurs de couche limite turbulente au sein de la peinture. Ces deux technologies ont été démontrées en vol, et leur incorporation *in fine* dans un produit dépendra du contexte opérationnel du produit final.

L'efficacité thermopropulsive des moteurs continuera de s'améliorer *via* l'augmentation du taux de dilution, rendue possible par la généralisation de configuration où un réducteur entraîne une soufflante carénée ou non. Dans les deux cas, l'intégration aérodynamique avec le porteur nécessitera une cocréation des formes aérodynamiques entre l'avionneur et le motoriste. Le taux de compression et la température de la chambre

de combustion n'augmenteront que modérément. Les échanges d'énergies pourront être optimisés *via* un réseau électrique à forte puissance connectant les différents éléments du moteur et de l'avion. Cette hybridation électrique tirera bénéfice de l'introduction de batteries à électrolyte solide dont la technologie fait l'objet de recherche considérable, en particulier dans le secteur automobile. Bien qu'assurant des fonctions toujours plus complexes nécessaires à la sécurité et l'efficacité du vol, les systèmes avioniques et électriques verront leur masse réduite grâce à l'intégration au sein d'une même plateforme multifonctions. Les échanges de données numériques rendus possible par les technologies de connectivité permettront à l'optimisation des trajectoires de passer d'une échelle mono-avion à une échelle multi-flotte.

Une fois réduites les incertitudes scientifiques et choisi un critère d'optimisation, ces techniques pourront être aussi utilisées pour minimiser les traînées de condensation. Ces composants s'intégreront de façon synergétique dans une configuration optimisée « tube et voilure » classique avec moteur sous voilure, ou combinant voilure laminaire et propulsion arrière, voire aile volante. Afin de réduire au plus vite les incertitudes liées à ces nouvelles techniques, mais aussi pour former une nouvelle génération d'ingénieurs, Airbus s'est engagé dans une démarche de démonstrateurs dont quelques exemples sont illustrés par deux images de cet article.



A380 Démonstrateur CFM Open Fan (© Airbus 2022).



Vol transatlantique "Projet fello'fly" – 2021 (© Airbus 2021).

Le troisième moyen d'action est de reconsidérer le carburant utilisé. Après un parcours exhaustif des différentes solutions envisageables, les deux candidats restant en lice pour l'aviation commerciale sont les carburants d'aviation durables (CAD – ou SAF en anglais) et l'hydrogène stocké essentiellement sous forme liquide à température cryogénique. Lors de leur combustion, les CAD produisent la même quantité de CO_2 qu'un carburant classique, mais ce CO_2 a été capturé précédemment dans l'atmosphère de façon naturelle ou artificielle (capture du carbone). On estime que les carburants durables d'aviation à base de biomasse peuvent ainsi permettre aujourd'hui de réduire les émissions de gaz à effet de serre jusqu'à 80 % tout au long de leur cycle de vie. Dans l'avenir, en partant de CO_2 capturé artificiellement dans l'atmosphère et d'hydrogène décarboné, ce chiffre pourra se rapprocher de 100 %. Du point de vue de l'avion, il existe à l'heure actuelle sept filières de production de ces carburants dont il a été démontré que le mélange à du carburant « classique » dans une proportion de 50 %, au plus, permettait de maintenir les propriétés du carburant classique.

Cette limite est en fait essentiellement établie pour maintenir dans le carburant final un taux d'hydrocarbures aromatiques suffisant, quelle que soit l'origine du carburant classique utilisé dans le mélange. Cette limite de 50 % pourrait donc être relevée en introduisant des aromatiques de synthèse dans le carburant synthétique. C'est l'objet d'une évolution de

la norme ASTM (organisme régissant la sécurité et la performance des carburants d'aviation).

Avec ce carburant miscible, les avions actuels seront donc compatibles « 100 % CAD ». On cherchera ensuite à réduire ces aromatiques de synthèse, pour minimiser les coûts de production, et réduire les émissions de particules non volatiles. Mais comme ces molécules aromatiques influent aussi sur la température d'auto-inflammation du carburant, il faudra trouver des solutions techniques ou réglementaires pour garantir les mêmes marges de sécurité qu'aujourd'hui. Le tout fera l'objet d'une nouvelle norme ASTM dans la décennie.

Les avions « 100 % CAD » produits dans les prochaines années seront donc compatibles avec l'objectif net zéro émission de CO_2 en 2050. Les émissions résiduelles de CO_2 liées à l'utilisation de 100 % de CAD étant faibles, elles pourront être compensées par des mesures externes, comme la captation de CO_2 dans l'air qui est également étudiée par Airbus.

Si la production mondiale de CAD reste à ce jour très modeste, l'année 2023 a vu un triplement de cette production, représentant cependant encore un peu moins de 1 % du total de la consommation mondiale de kérosène. Le contexte réglementaire se met en place rapidement en particulier en Europe ("Re-Fuel EU") ou aux États-Unis avec l'obligation de mandats croissants de production de CAD (Europe) ou de subvention à leur incorporation (États-Unis), qui devrait permettre d'approcher au niveau mondial de l'ordre de 5 à 10 % de CAD à l'horizon 2030.

L'hydrogène est l'autre carburant envisageable. Celui-ci pourra être consommé dans une pile à combustible, alimentant un système de propulsion électrique. La taille de l'avion sera alors limitée par les puissances électriques qui peuvent être mises en jeu, de l'ordre d'un multiple du mégawatt. L'hydrogène pourra aussi être brûlé au sein de la chambre de combustion d'un moteur « classique », sans limitation de puissance, mais au prix d'émissions résiduelles d'oxydes d'azote, que l'on minimisera en optimisant les chambres de combustion en tirant parti des excellentes propriétés de combustion de l'hydrogène. Dans les deux cas, l'eau remplace le CO₂ comme produit essentiel de l'extraction d'énergie du carburant. L'effet sur les traînées de condensation reste à étudier de façon expérimentale. Afin d'atteindre la densité massique et volumique compatible avec les besoins d'un aéronef, l'hydrogène doit être stocké sous forme liquide à très basse température, environ 20 kelvins. La taille, la géométrie et la masse du réservoir cryogénique rendent l'avion à hydrogène moins efficace énergétiquement que son homologue à carburant classique, mais la production de la simple molécule de dihydrogène nécessite moins d'énergie que celle des plus complexes molécules d'hydrocarbures synthétiques. Les besoins énergétiques de la chaîne complète "well-to-wake" (production énergie finale au sol + énergie nécessaire à la mission en vol) entre les électrocarburants synthétiques et le dihydrogène cryogénique sont donc, *in fine*, similaires pour des missions courtes régionales. En s'appuyant sur les connaissances acquises en particulier dans le domaine spatial, Airbus a démontré que, même avec

les incertitudes sur les performances des différents composants, il était possible de « boucler » – au sens des masses et de la performance – un avion de transport commercial de taille ou de rayon d'action variable. Il reste cependant à démontrer la faisabilité des technologies dans un contexte aéronautique civil. C'est l'objet des programmes de recherche en cours.

Comme pour les carburants durables, le développement de tout un écosystème de production, y compris ses sources d'énergie décarbonée primaire, est nécessaire. Airbus est aussi présent dans ce domaine. Pour les CAD, il s'agit de pousser les investissements *via* des mesures réglementaires, incitatives, ou des financements. Airbus a ainsi notamment décidé de créer un « fonds CAD » ("SAF fund") pour permettre avec d'autres partenaires de lever des fonds pour la création d'unités de production. Airbus veut stimuler aussi l'innovation dans ce domaine avec le développement de nouveaux processus de fabrication des CAD : "alcohol-to-jet", "Fischer-Tropsch", "power-to-liquid", etc., permettant d'utiliser des ressources plus larges et d'aller au-delà des quantités potentiellement limitées de matières premières provenant de la biomasse. Pour l'hydrogène décarboné, Airbus travaille avec certains aéroports comme Paris-Charles de Gaulle et Lyon-Saint Exupéry en France, à la création de « hubs à hydrogène », qui dans un premier temps vont alimenter des transports terrestres fonctionnant à l'hydrogène (voitures, bus ou camions), pour pouvoir ensuite mettre à disposition de nos avions ZEROe cet hydrogène sous forme liquide.



Tanker CAD (carburant d'aviation durable) - Fuel Jet A1 (© Neste 2022).

Le quatrième moyen d'action est de réduire l'impact environnemental lié aux activités industrielles d'Airbus. Chez Airbus, l'approche de la responsabilité environnementale commence dès la phase de conception de ses avions, mais ne s'arrête pas là. Pendant le processus de fabrication, après la livraison et même à la fin de vie de l'avion, Airbus continue à rechercher des moyens de réduire son empreinte environnementale mondiale.

En particulier, Airbus s'engage à réduire ses émissions de gaz à effet de serre liées à ses opérations classées scope 1 et 2 – qu'est-ce que cela signifie ? Pour mieux analyser leur impact sur le changement climatique, les entreprises mesurent leurs émissions selon trois catégories, ou scope 1, 2 et 3. Airbus en a fait de même.

Le scope 1 désigne, alors, tous les gaz à effet de serre émis directement par les opérations industrielles d'Airbus, comme le combustible fossile brûlé lors des essais en vol. Airbus a déjà réduit ces émissions en utilisant du carburant d'aviation durable CAD ou SAF – que nous venons de mentionner. Par exemple, Airbus alimente avec du CAD sa flotte de Beluga depuis 2019 et ses opérations d'essais en vol depuis 2022. Airbus continue à réduire progressivement ses émissions en utilisant également des carburants renouvelables dans ses opérations logistiques, notamment dans le transport routier et maritime. Par exemple encore, d'ici à 2030, la flotte maritime transatlantique d'Airbus – trois navires rouliers spécialement commandés pour transporter des assemblages d'avions entre l'Europe et la chaîne d'assemblage finale de Mobile, en Alabama – fonctionnera avec un mélange de diesel maritime, d'e-méthanol et de propulsion éolienne, qui permettra de réduire de 50 % les émissions de CO₂ par rapport à 2023.

Le scope 2 comprend les émissions indirectes provenant de l'achat d'électricité, de vapeur, de chauffage et de refroidissement. Airbus a déjà réduit ces

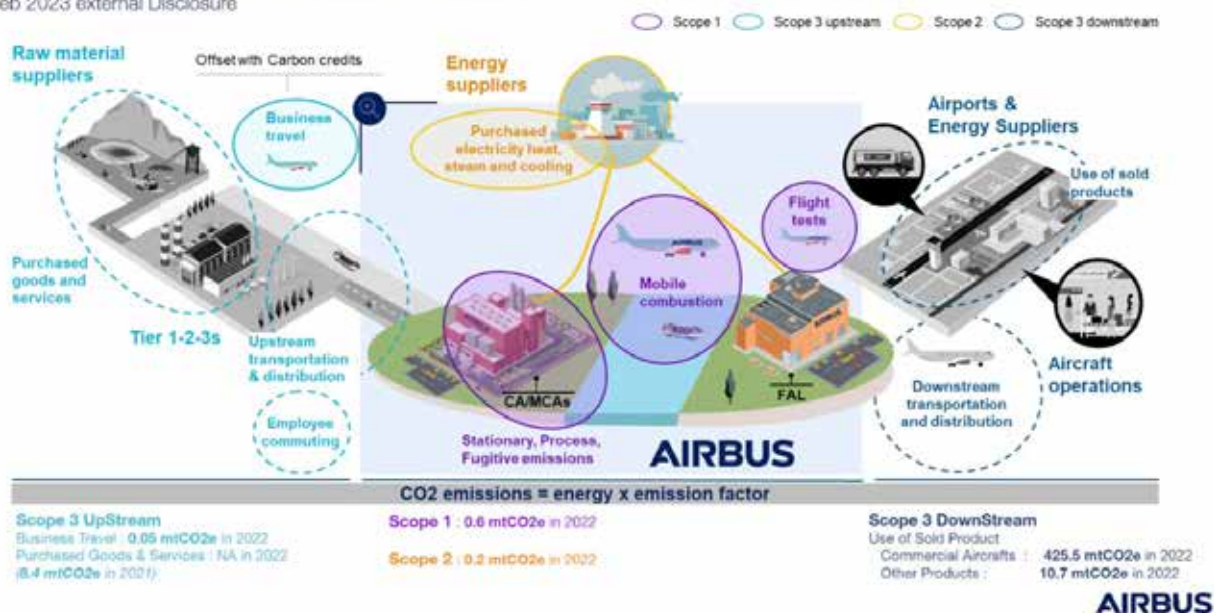
émissions indirectes en améliorant son efficacité énergétique, en utilisant notamment des éclairages LED dans ses bureaux et ses hangars, et en installant des panneaux solaires sur certains de ses bâtiments. Airbus continuera à les réduire en utilisant au moins 90 % d'électricité renouvelable et bas carbone sur tous ses sites européens d'ici à 2030, et en modernisant ses systèmes de chauffage avec des énergies décarbonées telles que le biogaz et la biomasse.

Enfin le scope 3 regroupe toutes les autres émissions générées par notre chaîne de valeur, notre filière d'approvisionnement et enfin nos produits en service, qu'Airbus traite avec les moyens d'action décrits précédemment – l'avancée du renouvellement des flottes, la poursuite sans discontinuer de la quête de performance et de sobriété des produits Airbus et la reconsidération du carburant utilisé. Le scope 3 représente environ 98 % de nos émissions qui sont les plus difficiles à maîtriser. Airbus s'engage à les réduire, en soutenant la feuille de route pour la décarbonation du secteur aéronautique et spatial définie par l'ATAG et l'IATA, et afin d'atteindre, comme nous l'avons déjà mentionné, zéro émission nette d'ici à 2050.

Pour agir, Airbus s'est en effet fixé des objectifs à moyen terme basés sur des données scientifiques. Airbus s'engage à réduire (par rapport à la référence 2015) de 63 % les émissions industrielles et, pour le scope 3 USP (*use of sold product i.e.* les émissions de CO₂ des scopes 1 et 2 d'ici à 2030, à neutraliser les émissions résiduelles, et le CO₂ des avions en opération) à réduire l'intensité des émissions en carbone (exprimée en CO₂/RPK) de 46 % d'ici à 2035. Ces objectifs ont été validés par l'organisme indépendant SBTi (Science-Based Target initiative), une des références en matière de validation des objectifs climatiques. Dans cette optique, Airbus joue un rôle de premier plan dans la mise en place d'un écosystème favorable aux énergies nouvelles.

AIRBUS 2022 CO₂eq Footprint according to the GHG protocol

Feb 2023 external Disclosure



GHG protocol (© Airbus).

Cette volonté d'Airbus de réduire ses émissions industrielles s'inscrit dans un programme plus large – c'est le Programme High5+. Ce programme couvre non seulement la réduction des émissions de scope 1, 2 et 3 dans ses volets « CO₂ » et « Énergie », mais intègre aussi trois autres dimensions : la réduction de production de déchets et matières premières, de prélèvements de l'eau, et enfin d'émissions de COV (composés organiques volatils) et atmosphériques. High5+ repose sur un ensemble d'objectifs ambitieux de réduction absolue par rapport aux niveaux de 2015, qui profitent à l'environnement tout en restant judicieux sur le plan commercial. Pour les déchets, l'objectif d'Airbus est de détourner 100 % des déchets de la mise en décharge et de l'incinération sans valorisation énergétique, et de réduire la quantité de déchets produits de 20 %. Sur les émissions atmosphériques, l'objectif est de respecter la réglementation avec une augmentation de 0 % de ces émissions d'ici 2030. Et enfin pour l'eau, l'objectif d'Airbus est de développer de solides programmes d'entretien et de réhabilitation pour réduire l'eau potable (achetée) de 50 %, sans augmentation du prélèvement d'eau au global.

Enfin, chez Airbus aujourd'hui, ce sont plus de 85 % de ses 130 000 collaborateurs dans le monde avec plus de 100 nationalités différentes et 180 sites de production à travers 35 pays qui travaillent sous la norme ISO 14001, qui définit des critères forts de gestion de la responsabilité environnementale. Airbus se concentre sur l'intégration de normes élevées dans l'ensemble de ses opérations afin de favoriser une chaîne d'approvisionnement responsable. Cela implique de travailler à une gestion des ressources naturelles et humaines

à chaque étape du processus de production. Environ 8 000 fournisseurs directs et 18 000 indirects de plus de 100 pays fournissent des pièces, composants, systèmes et services à Airbus.

Pour atténuer l'empreinte environnementale au sein de sa chaîne d'approvisionnement, Airbus exige de ses fournisseurs qu'ils respectent les mêmes normes de responsabilité environnementale et sociale que celles que l'entreprise s'est fixées. Ces normes sont clairement décrites dans le code de conduite Airbus qu'elle leur soumet. Par exemple, Airbus travaille en étroite collaboration avec ses fournisseurs pour sélectionner des matériaux provenant de sources éthiques et responsables, avec un impact moindre sur l'environnement.

C'est donc bien à une transformation globale de l'ensemble de l'écosystème aéronautique à laquelle nous travaillons. Notre objectif est de permettre à nos avions commerciaux et militaires, ainsi qu'aux hélicoptères de voler avec 100 % de CAD d'ici à 2030. Nous avons également pour ambition de développer le premier avion commercial à hydrogène au monde d'ici 2035. Ce ne sont que quelques exemples de nos engagements et des mesures que nous souhaitons mettre en place dans les mois, années et décennies à venir.

Un défi difficile, mais tellement motivant pour tous les acteurs de l'industrie aéronautique impliqués dans la conception, la production et l'opération des avions. Un défi pour permettre aux nouvelles générations de voler dans le respect de l'environnement et de continuer ainsi à bénéficier de cette ouverture sur le monde, que seul l'avion permet.



Programme High5+ (© Airbus).

CORAC : Conseil pour la recherche aéronautique civile

Par Pierre MOSCHETTI

Sous-directeur de la Construction aéronautique de la direction générale de l'Aviation civile (DGAC)

La filière aéronautique civile française est reconnue mondialement pour son excellence technologique et industrielle. Cependant, elle fait face à des défis majeurs, notamment la réduction de son empreinte environnementale et de sa dépendance aux combustibles fossiles.

C'est pour répondre à ces défis qu'a été créé en 2008 le modèle original du CORAC, organe de concertation État-industrie dédié à la mise en place du programme national de recherche de la filière, maintes fois imité depuis, en France dans d'autres secteurs industriels (espace, automobile, etc.) mais également à l'étranger. Sa force est celle d'un collectif efficace et créatif, en capacité d'entraîner toute une filière dans une démarche continue et concertée d'innovation.

Le CORAC rassemble toutes les parties prenantes, institutionnels et industriels du transport aérien et de la construction aéronautique, pour les orientations majeures de la filière en matière d'innovation, de décarbonation et de soutien public.

Le CORAC et sa genèse

Répondant à la nécessité d'orienter la France vers la transition écologique exprimée dans le cadre du Grenelle de l'environnement, et à une demande forte de la filière aéronautique d'entretenir avec le plus haut niveau de l'État un dialogue stratégique structuré sur la préparation de son avenir, le Conseil pour la recherche aéronautique civile (CORAC) est mis en place dès juillet 2008.

À cette époque, l'idée d'une instance publique-privée de concertation permanente sur l'avenir d'un secteur industriel est plutôt novatrice. Elle vient pourtant donner corps à un partenariat entre l'État et son industrie aéronautique qui est presque aussi ancien que celle-ci et remonte au début des années 1970, puisque c'est au Salon du Bourget 1969 qu'est décidé entre la France et la République Fédérale d'Allemagne le partenariat pour le lancement du programme A300, qui sera l'acte politique fondateur de la constitution d'Airbus, bien avant que cette entreprise constitue le plus formidable exemple d'intégration et de réussite industrielles que l'Europe ait connu.

Quelques années après cet acte fondateur, en 1974, le partenariat entre Snecma et General Electric, également stratégique pour amener le motoriste national sur la voie de l'aviation commerciale, débute. Enfin, la direction générale de l'Aviation civile crée en 1976 une direction des programmes qui assume depuis lors la mise en œuvre de la politique nationale de soutien à la recherche et au développement des programmes aéronautiques. Tous les programmes nationaux d'avions commerciaux, de moteurs, d'hélicoptères ou d'avions d'affaires, qui sont devenus les *best-sellers* et assurent encore aujourd'hui la

prospérité économique du secteur et sa contribution à notre balance commerciale et à nos emplois, ont bénéficié de ses soutiens.

L'installation du CORAC vient donc en 2008 renforcer et redonner un sens nouveau à ce partenariat, celui de la nécessaire transition écologique, et celui du constat d'une filière dont la complétude et la diversité sont aussi une force indéniable : au-delà de nos grands intégrateurs, de très nombreux équipementiers et manufacturiers se sont affirmés non comme de simples sous-traitants façonniers, mais disposant d'une véritable politique produit, compétitive sur le marché mondial ; et sans renier l'intégration verticale qui fait sa force, la filière doit donc être traitée dans toute la diversité de ses enjeux.

La logique du CORAC a essaimé depuis dans de nombreux autres secteurs, espace, automobile, ferroviaire, naval, nucléaire... accompagnant souvent la mise en place de politiques sectorielles de soutien à l'innovation, dans le cadre des Programmes d'Investissement d'Avenir successifs, puis du Plan France 2030.

Le CORAC réunit donc, sous la présidence du ministre en charge des Transports, les grands intégrateurs de la filière aéronautique civile (Airbus, Safran, Thales, Dassault Aviation), les représentants des équipementiers et PME aéronautiques *via* leurs représentants au sein du syndicat professionnel – le GIFAS –, le monde académique (ONERA, CNRS), les opérateurs de transport aérien (FNAM, Air France), les opérateurs aéroportuaires (UAF, ADP), et les services de la navigation aérienne (DGAC / DSNA) ainsi que l'ensemble des ministères compétents (Transports / DGAC, Défense

/ DGA, Industrie / DGE et Recherche / DGRI) et le secrétariat général pour l'Investissement.

Contrairement à ce qui est parfois entendu, le CORAC n'est ni une instance exécutive ni un organe de programmation de soutiens publics, mais avant tout un outil de dialogue stratégique entre l'État et la filière, alimenté par des échanges techniques soutenus entre les acteurs de la filière et les administrations, sous l'égide d'un comité de pilotage se réunissant mensuellement, sous la présidence d'une personnalité de la filière, dont le mandat est de deux ans. Sa principale mission est de mettre en cohérence, de prioriser et de synchroniser les efforts de recherche et d'innovation de la filière, à travers notamment l'élaboration et l'actualisation d'une feuille de route partagée, qui définit les grandes cibles technologiques à atteindre en fonction des objectifs et échéances des futurs programmes d'aéronefs portés par les grands intégrateurs.

Cette très forte structuration permet ensuite à la DGAC, qui n'est pas en première ligne pour l'élaboration de la feuille de route (elle appartient d'abord à la filière), de jouer son rôle d'instructeur et d'opérateur des soutiens de manière plus éclairée, avec le souci de préserver la cohésion et l'intérêt général de la filière, tout en appliquant bien évidemment les orientations fixées par le gouvernement et discutées avec les représentants de l'industrie au sein du CORAC.

Par ailleurs, l'association des autres administrations compétentes aux travaux du CORAC – la DGA au titre des actions duales civiles-militaires, la DGE et le SGPI au titre de la participation de la filière aéronautique à des actions transverses, et la DGRI au titre des liens avec la recherche publique française et les programmes de recherche européens – garantit l'inter-ministérielle du processus et la cohérence de l'action de soutien de la DGAC avec les actions en faveur de la filière menées dans d'autres cadres.

Une feuille de route complète, cohérente et consensuelle pour la décarbonation de l'aviation civile

En pleine cohérence avec les engagements pris au niveau international, tant au niveau de l'industrie que des États réunis dans l'Organisation de l'aviation civile internationale (OACI), notre filière aéronautique soutient résolument un objectif de neutralité carbone du transport aérien mondial en 2050, et se mobilise fortement aux côtés de l'État et au sein du CORAC, pour faire émerger une nouvelle génération d'aéronefs capables de décarboner l'aviation mondiale. La position de la France à ce niveau est déterminante, car son industrie, la plus complète en Europe, joue un rôle de *leader* au niveau continental, l'Europe se partageant à parts comparables avec les États-Unis le marché mondial des avions de ligne, et disposant de ce fait d'un pouvoir d'orientation considérable sur les trajectoires mondiales de décarbonation de l'aviation.

Au niveau national, le 14 février 2023, le secteur de l'aviation a été le premier secteur à remettre

officiellement au gouvernement une proposition de feuille de route de décarbonation, dans le cadre des travaux préparatoires à la 3^e stratégie nationale Bas Carbone. Ce travail d'ampleur, co-piloté en 2022 par la DGAC et le GIFAS, a mobilisé l'ensemble de la filière aéronautique *via* le CORAC. Cette feuille de route présente les actions à mettre en œuvre pour atteindre les objectifs de réduction des émissions de CO₂ fixés. Ce travail montre que les objectifs nationaux sont à la fois crédibles et réalistes, mais aussi que les orientations et les leviers d'action présentés par le secteur dans le cadre du CORAC (conception et déploiement de nouveaux avions décarbonés, plus économes en énergie et plus silencieux à l'horizon 2035) sont parfaitement cohérents avec ces objectifs, aux côtés des autres leviers de décarbonation, qui sont le renouvellement des flottes pour introduire des appareils plus sobres, l'optimisation des trajectoires, et l'introduction massive de carburants alternatifs au kérosène d'origine fossile, tels que les agrocarburants ou les e-carburants.

La feuille de route du CORAC a donc pour ambition de présenter l'ensemble des développements technologiques à réaliser pour préparer les futures générations d'aéronefs décarbonés, qui devront poursuivre le succès commercial de leurs prédécesseurs sur le marché mondial, tout en fixant de nouveaux standards internationaux ambitieux de sobriété pour l'aviation de demain, ambition permise par une position de *leader* à l'échelle globale de nos grands acteurs nationaux et européens. La volonté d'Airbus de développer pour 2035 un avion fonctionnant à l'hydrogène et totalement zéro émission, et la volonté de Safran de développer avec CFM le moteur Rise, formule révolutionnaire non carénée de turboréacteur, apportant des réductions de consommation inédites, sont des exemples emblématiques de l'ambition de rupture de nos grands acteurs qui font preuve, et c'est à saluer, d'une audace qui n'a pas d'équivalent ailleurs.

La force de la feuille de route du CORAC se résume aisément en trois mots : complétude, cohérence, consensus.

Complétude

La France dispose, avec les États-Unis, de la seule filière aéronautique complète, en ce sens qu'elle est présente, dans des positions allant de *leader* à numéro trois mondial, dans tous les segments de produits, au niveau des aéronefs (avions de ligne avec Airbus, régionaux avec ATR, *business jets* avec Dassault Aviation, hélicoptères avec Airbus Helicopters, aviation générale avec Daher), comme au niveau des équipements majeurs (moteurs, trains d'atterrissage, systèmes électriques et électroniques, aménagements de cabine, etc., avec Safran, avionique avec Air Traffic Control, cybersécurité avec Thales, systèmes d'air avec Liebherr Aerospace), et compte plus de 100 ETI et PME clés dans le domaine des pièces métalliques et composites, des composants de systèmes... Cette complétude de la filière se retrouve dans la complétude de la feuille de route du CORAC, qui aborde l'avenir de chacune de ces familles de produits, par application

lorsque c'est pertinent, ou de manière transverse lorsque c'est préférable. La feuille de route n'est donc pas bâtie de manière *ad hoc*, pour répondre au coup par coup à des propositions d'actions financées par l'État. Elle s'inscrit dans un temps long, est dépositaire d'une vision globale, donc il est possible chaque année d'en mesurer les écarts de réalisation par rapport à la trajectoire, et de proposer des actions correctives aux décideurs.

Cohérence

On l'a dit, la France a une filière technologiquement presque aussi complète que les États-Unis, mais dispose de moyens de soutien qui sont cinq à dix fois inférieurs à l'État fédéral, en tentant de valoriser approximativement des synergies entre domaine civil et militaire. Même à l'échelle européenne, plus pertinente, un écart de deux à trois au moins demeure avec les États-Unis. Or, dans l'aéronautique, comme dans les industries les plus lourdes, les investissements nécessaires pour se maintenir au meilleur niveau sont particulièrement massifs, et la capacité à mobiliser des moyens humains et financiers que d'autres filières jugeraient considérables est ici une condition obligatoire de maintien dans la course globale. Comme ces moyens ne nous seront jamais accessibles au même niveau que nos concurrents américains, il nous faut être mieux organisés et plus efficaces. Aucun industriel français, grand comme petit, ne peut soutenir une recherche tous azimuts explorant tous les futurs possibles pour toutes les évolutions de gamme possibles ; il s'y épuiserait à coup sûr. Nos grands intégrateurs, architectes de premier niveau de la feuille de route, fixent sur le plan temporel et techniquement des grands rendez-vous d'intégration de technologies sur des démonstrateurs représentatifs et cohérents avec le calendrier de dérisquage et les dates de lancement de leurs futurs programmes. Ils apportent donc aux travaux direction et cohérence, à des fins de focalisation et de synergies de toute une filière, petits acteurs inclus, et évitent ainsi la dispersion des efforts.

Consensus

L'organisation pyramidale de la filière française, avec peu de recouvrements de compétences, et un faible nombre de situations de concurrence frontale, ainsi que sa cohésion et sa pratique aboutie du dialogue interne, conduites au sein du syndicat de filière, le GIFAS, rend, en pratique, l'élaboration de cette feuille de route à la fois constructive et consensuelle. Au travers du CORAC, malgré la multiplicité des intérêts et agendas, l'établissement de priorités d'actions est donc en pratique plus aisé que l'on ne pourrait le penser. Ce consensus est bien évidemment renforcé par les engagements et trajectoires de décarbonation pris par la filière au niveau national ou international, qui fixent un cadre très structurant aux débats.

Une association large de la filière pour la compétitivité et l'efficacité industrielles, conditions nécessaires à la décarbonation

On l'a dit plus haut, la filière est forte de sa complétude, et d'un tissu d'équipementiers et de sous-traitants performants et compétitifs, qui ont su accompagner la prise de parts de marché de nos avionneurs par leur pertinence technologique et leur excellence industrielle. Les effets de la crise Covid sont maintenant derrière nous : celle-ci a finalement été traversée sans trop de dégâts grâce aux mesures de soutien mises en place par l'État, mais au prix toutefois de bilans financiers dégradés qui rognent les capacités d'emprunt. Cependant, la phase de remontée en cadence initiée en 2022, avec une augmentation brutale du coût des facteurs due à l'inflation et aux tensions sur l'énergie et les matières premières (titane, composants électroniques), pèse lourdement sur les entreprises de la filière, notamment les plus fragiles.

Malgré ces difficultés de court terme, la filière doit se préparer dès maintenant à des transformations technologiques et industrielles radicales : digitalisation étendue, production robotisée, nouveaux processus de production, cybersécurisation, etc. L'enjeu étant d'éviter un décrochage compétitif qui amènerait à des pertes de parts industrielles pour la sous-traitance nationale sur les futurs programmes. Un recours plus étendu à des nouveaux entrants (*start-up*, PME-ETI hors filière) est également à construire dans certains domaines technologiques où il n'y a pas de fournisseurs aéronautiques, comme le stockage d'hydrogène.

Le CORAC prend en compte cet accompagnement des petits acteurs au travers de CORAC-PME, une instance animée par la DGAC et le GIFAS, qui a pour mandat de proposer un point d'entrée unique aux entreprises, d'expliquer la feuille de route à celles-ci, de les aider dans le montage de leurs projets ou à se faire accompagner par un intégrateur, avec le souci permanent que chaque euro investi par une PME recourant à CORAC-PME le soit à bon escient, avec les meilleures chances de retour sur investissement. Aujourd'hui, grâce aux efforts collectifs, la DGAC compte près de 250 PME actives, dans son portefeuille de projets soutenus.

Conclusion

Fort de ses quinze ans d'existence, le CORAC est essentiel pour la transition de l'aéronautique française vers la décarbonation, et le maintien de son excellence industrielle. Il favorise la collaboration entre les acteurs de l'industrie, de la recherche et du gouvernement, permettant une utilisation efficace des ressources et une concentration des efforts sur les priorités stratégiques. En structurant l'innovation de filière dans toutes ses dimensions et en favorisant la coopération internationale, le CORAC stimule le développement de technologies décarbonées, et contribue à écrire le futur de l'industrie aéronautique française sur la scène mondiale.

La décarbonation de l'aviation passe par la recherche !

Par Bruno SAINJON,

Président, directeur-général de l'ONERA

L'Office national d'études et de recherches aérospatiales (ONERA), comme l'ensemble de la filière aéronautique, n'a pas attendu ces dernières années pour travailler à réduire l'impact environnemental de l'aviation. Depuis les années 1960, le gain d'efficacité des avions au fil des décennies est estimé à 80 %. Acteur central de la recherche aéronautique, spatiale et de défense, l'ONERA sous tutelle du ministère des Armées, est aussi l'expert étatique auprès d'organismes officiels comme la DGAC (direction générale de l'Aviation civile), notamment sur le sujet de la décarbonation, et impliqué dans de nombreux projets européens dans le cadre de «Clean Aviation» (Horizon Europe).

L'ONERA est au cœur de la filière aéronautique française, européenne et internationale, partenaire des principaux industriels, au premier rang desquels figurent Airbus, Dassault, Safran ou encore Thales. Il dispose de moyens d'essais uniques au monde, indispensables au développement de la décarbonation de l'aviation.

La décarbonation de l'aviation : une priorité revendiquée en France comme à l'international

Le plan de relance aéronautique lancé en juin 2020 par le gouvernement français a apporté à la filière aéronautique des moyens indispensables à la préparation de l'aviation verte à l'horizon 2035. Coordiné avec le GIFAS (Groupement des industries françaises aéronautiques et spatiales) et l'ensemble des industriels du secteur (CORAC – Conseil pour la recherche aéronautique civile –, piloté par la DGAC), ce plan de 1,5 milliard d'euros au bénéfice de la R&T a aussi vocation à préserver les emplois, les compétences et l'avantage compétitif de la France dans ce domaine.

Il constitue pour l'ONERA, déjà engagé sur le sujet de la décarbonation, un formidable accélérateur pour des projets de recherche essentiels pour la maturation de technologies, en soutien à la filière aéronautique. France Relance a été relayé par France 2030, et l'octroi d'une enveloppe annuelle de 300 millions d'euros, dès 2024, a fait l'objet d'une annonce lors du dernier Salon du Bourget de juin 2023.

Décarboner l'aviation est un défi, un véritable virage pour le secteur aéronautique français et international. Cet objectif implique de repenser l'avion et de développer de nouvelles technologies en matière de propulsion, d'architecture, de nouveaux matériaux, de carburants ou encore de combustibles. Un but aussi ambitieux ne sera atteint que par un très fort investissement dans la recherche scientifique, une approche interdisciplinaire et une prise en compte de tous les éléments de la filière aéronautique. Les décideurs politiques et les industriels l'ont parfaitement compris. L'Office

national d'études et de recherches aérospatiales (ONERA), acteur central de la recherche aéronautique, y joue un rôle majeur, comme en attestent ses attributions dans le plan de relance du gouvernement, le haut niveau des commandes de la DGAC vers l'ONERA, les nombreux projets européens gagnés par des équipes incluant des ingénieurs de l'ONERA ou encore le fort soutien des régions.

L'ONERA est très investi dans le CORAC, un organe de concertation État-industrie créé en 2008 et présidé par le ministre des Transports, qui oriente l'ensemble de la filière dans la durée, avec une feuille de route et un calendrier jalonné d'objectifs à atteindre pour gagner le pari d'une aviation verte en 2050.

Les trajectoires de décarbonation de la filière ont d'ailleurs été mises au point, évaluées et crédibilisées grâce à un outil développé par l'ONERA, puis mis à disposition de la communauté scientifique et industrielle.

Membre fondateur de l'EREA, qui réunit les organismes de recherche européens, l'ONERA vient d'intégrer l'«Alliance for Zero-Emission Aviation», un programme de la Commission européenne pour la décarbonation de l'aviation, qui mise sur l'électrique et l'hydrogène, en lieu et place du kérozène, comme source d'énergie.

L'ONERA est également un membre très actif de l'IFAR, le réseau international des instituts de recherche en aéronautique, qui comprend vingt-sept membres répartis sur les cinq continents, dont des organismes aussi prestigieux que la NASA ou la JAXA (l'agence d'exploration aérospatiale japonaise). Mes collègues m'ont nommé à l'unanimité fin 2021 vice-président de l'IFAR, et je viens d'en prendre la présidence pour deux ans. C'est une forte marque de reconnaissance du haut niveau des équipes de l'ONERA, et des résultats

qu'elles obtiennent, par les acteurs mondiaux de la communauté aéronautique, tous engagés dans la décarbonation.

L'implication de l'État et de l'Europe avec des budgets consacrés à la décarbonation du transport aérien a permis de fédérer et de structurer la filière aéronautique autour de feuilles de route technologiques ambitieuses, afin de répondre au défi de 2050 d'une aviation « climatiquement neutre ».

La recherche de l'ONERA au cœur des enjeux de décarbonation

Grâce à ses scientifiques, son expertise, ses compétences, ses moyens d'essais uniques au monde, l'ONERA est l'organisme de recherche de référence pour imaginer le futur de l'aérospatial à travers des ruptures technologiques, au service de la défense et du domaine civil.

L'ONERA dispose d'installations de recherche et de moyens expérimentaux uniques tels que ses célèbres souffleries sises à Modane-Avrieux et au Fauga-Mauzac, combinés à des moyens de simulation et de modélisation. Les trois domaines théorie, expérimentation et modélisation se complètent et permettent à l'ONERA de réaliser des recherches couvrant une large gamme de niveau de maturité technologique, allant parfois jusqu'au démonstrateur opérationnel en intégrant une approche système.

Avec ses moyens d'essais et ses grandes souffleries, l'ONERA dispose de moyens hors normes pour réaliser les futurs essais liés à la décarbonation de l'aviation. Performants et en constante évolution, ils permettent à l'ONERA et à ses partenaires de mieux anticiper les ruptures technologiques. La récente et ambitieuse campagne d'essais en partenariat avec Safran Aircraft Engine sur un Open Fan en est la démonstration éclatante.

Financer de telles installations industrielles, indispensables pour toujours garder une longueur d'avance, reste un défi en soi. Défi que nous relevons grâce notamment à un prêt accordé pour les grandes souffleries par la banque européenne d'investissement, et aux financements de la DGA et de la DGAC.

L'ONERA dispose également de nombreuses autres ressources et de moyens d'essais qui contribuent à la recherche sur les technologies décarbonées. Je pense plus particulièrement au banc d'essais pour la combustion dans les futurs foyers aéronautiques, ou encore à nos super calculateurs qui sont régulièrement remis à niveau afin de permettre à l'ONERA de rester dans la course internationale aux calculs haute performance.

En février 2022, nous avons inauguré notre laboratoire des technologies quantiques, QTech, suivi en novembre 2023 de notre laboratoire d'intelligence artificielle baptisé AILab. Laboratoire transverse, sans mur, AILab va fédérer l'ensemble des activités IA (intelligence artificielle) de l'ONERA, soit plus d'une centaine de scientifiques, afin d'optimiser ses recherches et sa contribution au bénéfice des programmes aéronautiques, espace et défense.

Ces deux laboratoires ont vocation à renforcer les échanges tant internes qu'externes dans des domaines dans lesquels l'ONERA a récemment livré deux systèmes opérationnels. L'ONERA a développé pour le compte de la direction des services de la navigation aérienne de la DGAC un logiciel, SINAPS, d'aide à la décision des contrôleurs aériens, qui équipera quatre des cinq centres de contrôle situés sur le territoire national. L'ONERA vient par ailleurs de livrer à la Marine française le premier des quatre gravimètres quantiques qui équiperont ses navires et feront probablement d'elle la première armée au monde équipée de systèmes opérationnels quantiques de deuxième génération.

Nous avons également noué de fructueuses collaborations avec des partenaires académiques ou industriels, y compris à l'étranger comme le Centre de recherche virtuel ONERA-DLR pour l'intelligence artificielle appliquée à l'ingénierie aérospatiale.



Gulliver Flight Onera

Décarboner l'aviation implique de repenser le système de transport aérien

La décarbonation est au cœur de notre feuille de route qui reflète la vision de la stratégie scientifique et technologique de l'ONERA. La dernière mise à jour, en 2023, acte le renforcement de nos ambitions afin de réduire l'empreinte environnementale de l'aviation.

Cet objectif se décline en trois thèmes de recherche : motorisation plus efficace à émissions réduite ; cellule avion et intégration motrice innovantes ; et enfin impact environnemental et climatique.

Depuis sa création, l'ONERA poursuit des recherches sur un ensemble de technologies pour une optimisation toujours plus poussée de l'avion. Il s'agit aujourd'hui de :

- Continuer à améliorer l'aérodynamique des avions par le développement d'outils de simulation numérique, ainsi que par l'optimisation des formes (profils, augmentation de l'allongement des voilures, laminarité), ou encore le contrôle des écoulements.
- Alléger les structures par l'amélioration des alliages métalliques, l'introduction toujours plus poussée des composites, ou l'amélioration des méthodes et outils de dimensionnement qui ont permis une réduction des marges de conception.
- Optimiser l'avionique pour fournir au pilote les informations les plus pertinentes, nécessaires à la conduite du vol.
- Comprendre et réduire les effets dits « non CO₂ » de l'aviation, avec en particulier l'impact des traînées de condensation sur le climat. Le but ultime de ces recherches, soutenues par la DGAC, est de développer des trajectoires vertes permettant de minimiser à la fois les émissions de CO₂ (gaz à effet de serre) et le forçage radiatif engendré par ces traînées.

Les scientifiques de l'ONERA ont aussi une priorité : étudier des concepts nouveaux et disruptifs, pour éclairer le secteur sur ce que pourraient être les futurs avions civils, qui permettront d'atteindre la neutralité carbone. Pour réaliser un gain de consommation, l'avion de demain adoptera vraisemblablement un nouveau design. L'ONERA est compétent pour l'imaginer (plusieurs options existent), puis pour le tester en souffleries, puisqu'il y a une vie avant le premier vol. Dans ces recherches, l'ONERA accompagne avionneurs et motoristes dans la montée en maturité et en fiabilité de technologies clés, parmi lesquelles :

- les ailes de grand allongement, qui permettront une réduction de la traînée aérodynamique, à condition de bien maîtriser le comportement aéroélastique de ces structures ;
- les motorisations à fort taux de dilution de type Open Fan afin d'augmenter le rendement aéropulsif du moteur ;

- l'utilisation de carburants très bas carbone comme les carburants de synthèse durables (*e-fuels*) ou encore de combustibles tels que l'hydrogène.

Nous avons successivement dévoilé lors des derniers Salons du Bourget un concept d'avion à propulsion distribuée avec le concept DRAGON en 2019, puis d'aile volante à hydrogène en 2021, enfin, en 2023, nous avons présenté un "*concept-plane*". Baptisé GULLHYVER, cet aéronef, véritable concentré de recherche, dispose d'ailes haubanées de grand allongement et d'un moteur de type Open Fan, alimenté à l'hydrogène sur un fuselage portant plus large que ceux des aéronefs actuels.

L'ONERA pilote également le projet européen IMOTHEP, qui explore le potentiel de la propulsion hybride électrique pour réduire les émissions de CO₂ de l'aviation commerciale. Le projet implique vingt-sept partenaires européens (dont Airbus, Safran, Leonardo, GE Avio et les partenaires de l'EREA...) ainsi que deux canadiens (le CNRC et l'Université de Toronto). Il a réalisé l'étude intégrée de différentes configurations d'avions régionaux et court / moyen-courriers en relation étroite avec la conception de leur chaîne de propulsion hybride et ses composants. Les résultats ont été présentés en novembre 2023 lors d'un *workshop*, organisé conjointement avec le partenariat Clean Aviation ; *workshop* qui réunissait l'ensemble des projets européens sur la propulsion hybride.

Plus récemment encore, l'ONERA a donné, le 1^{er} janvier 2024, le coup d'envoi du projet AWATAR dont la mission est de développer des briques technologiques clés pour un concept d'aile prometteur. AWATAR réunit des partenaires industriels dont Airbus, Dassault Aviation et Collins Aerospace, quatre établissements de recherche (ONERA, DLR, NLR et ETW) ainsi que deux partenaires universitaires (TU Delft et l'Université de Montpellier). Objectif : proposer un avion de type court et moyen-courrier intégrant un moteur de type Open Fan capable de transporter 250 passagers sur un rayon d'action allant jusqu'à 2 000 nm. Avec à la clé une réduction de l'ordre de 18 % de consommation de carburants !

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

Nos objectifs sont ambitieux. Certains seront atteints, d'autres peut-être pas, mais le risque est inhérent à la recherche. Le succès passe par là. Les défis sont immenses, mais les ambitions de l'ONERA le sont tout autant.

Les carburants d'aviation durables (CAD), levier incontournable pour la décarbonation du secteur aérien

Par Florence DELPRAT-JANNAUD, Jean-Philippe HÉRAUD
et Julie LHOMME-MAUBLANC
IFP Énergies nouvelles (IFPEN)

Les carburants d'aviation durables (CAD) sont un levier incontournable pour la décarbonation du transport aérien, qu'il s'agisse de biocarburants durables produits à partir de résidus et déchets n'entrant pas en conflit avec un usage alimentaire, ou d'électro-carburants produits à partir de CO₂ et d'H₂. Ils présentent non seulement une opportunité pour réduire les émissions de CO₂ et accroître la souveraineté énergétique, mais ils offrent aussi de nouveaux débouchés aux filières agricoles et sylvicoles en valorisant des déchets. Si les filières de production des CAD sont aujourd'hui en déploiement, il reste des défis à relever pour atteindre les cibles fixées par la réglementation. Avec une industrie aéronautique *leader* mondial, des technologies de production de carburants bas carbone développées par des acteurs français et des ressources lignocellulosiques en grande quantité, la France dispose de nombreux atouts pour être un acteur de référence des CAD.

Le transport aérien représente 10 % des émissions mondiales de gaz à effet de serre (GES) du secteur des transports, soit 2 % des émissions mondiales de GES (IEA, 2023). En France, ces émissions représentent 5,3 % des émissions de GES totales en 2019 (ADEME, 2022). L'utilisation des carburants d'aviation durables (CAD) constitue, en complément de la sobriété, de l'optimisation des opérations en vol et au sol, et du renouvellement des appareils, le principal levier pour décarboner le secteur aérien. Elle devrait permettre de réduire jusqu'à 90 % les émissions de CO₂ par rapport au kérosène fossile sur le cycle de vie, de leur production jusqu'à leur combustion (ADEME, 2022).

Les carburants d'aviation durables – ou *sustainable aviation fuels* (SAF) – désignent des carburants renouvelables ou dérivés de déchets, qui répondent à des critères de durabilité définis par l'Organisation de l'aviation civile internationale (OACI) tels que la réduction des émissions de gaz à effet de serre, l'utilisation raisonnée de l'eau, de produits chimiques, la préservation de la qualité de l'air...

Les États membres de l'OACI ont fixé en octobre 2022 l'objectif ambitieux de réduire à zéro les émissions nettes de CO₂ d'ici à 2050¹. Dans le monde, les réglementations se mettent progressivement en place :

- au niveau européen, les objectifs d'incorporation fixés par le règlement "ReFuelEU Aviation" visent l'intégration de 2 % de CAD en 2025, 6 % en 2030, pour aller jusqu'à 70 % en 2050 ;

- en France, dès 2022, un mandat d'incorporation avait été imposé à hauteur de 1 % ;
- les États-Unis se sont fixés en 2022 un objectif de 100 % SAF pour les vols domestiques à horizon 2050 ;
- le Japon a un objectif d'incorporation de 10 % de CAD à horizon 2030.

Si aujourd'hui seules quelques centaines de kilotonnes de CAD ont été commercialisées auprès des compagnies aériennes, leur production devrait croître significativement dans les prochaines années du fait du cadre réglementaire incitatif. À horizon 2030, l'Association du transport aérien international (IATA) estime ainsi la capacité de production mondiale à 24 Mt². Cette accélération se traduit par :

- Une dynamique de certification de filières de production de CAD. En février 2024, onze procédés de conversion sont certifiés par l'ASTM (organisme de certification, anciennement American Society for Testing and Material), avec sept autres en cours d'évaluation.
- Un engagement des compagnies aériennes qui dépasse les réglementations d'incorporation. À titre d'exemple, le groupe Air France-KLM envisage d'incorporer au moins 10 % de CAD dès 2030³.

² <https://www.iata.org/contentassets/8d19e716636a47c184e7221c77563c93/energy-and-new-fuels-infrastructure-net-zero-roadmap.pdf>

³ <https://www.airfranceklm.com/fr/newsroom/air-france-klm-reaffirme-ses-engagements-en-matiere-de-decarbonation-du-transport-aerien>

¹ <https://www.icao.int/environmental-protection/pages/SAF.aspx>

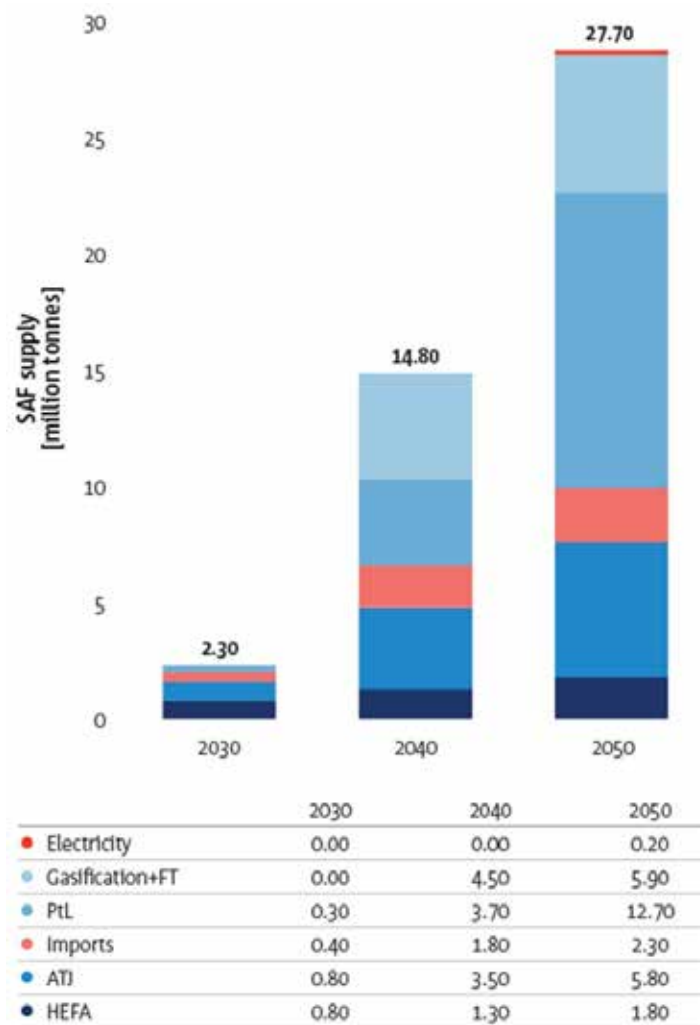


Figure 1 : Production de biocarburants estimée selon EASA (<https://www.easa.europa.eu/eco/eaer/topics/sustainable-aviation-fuels/current-landscape-future-saf-industry#production-capacity-and-demand-2020-to-2030>)

- Le développement d'unités de production de biocarburants : 85 projets sont annoncés en Europe dont 34 nouveaux projets en 2023⁴.

Des technologies de production prêtes à être déployées

À partir d'huiles de cuisson usagées ou de graisses animales (HVO ou HEFA)

La filière HVO (*hydrotreated vegetable oil* - huile végétale hydrotraitée) ou HEFA (*hydroprocessed esters and fatty acids*) est la filière de production la plus mature. Ce sera la principale filière de production de CAD d'ici 2030. Des unités industrielles sont aujourd'hui en opération à partir de ressources oléagineuses de première génération (soja, palme, colza), mais pour la production de CAD, elles devront utiliser des ressources de type huiles de cuisson usagées ou graisses animales, ressources dont le gisement est limité. Sur l'ensemble

de leur cycle de vie, les carburants ainsi produits permettent une réduction de 85 % des émissions de gaz à effet de serre (GES) par rapport à leur équivalent fossile (Directive sur les énergies renouvelables dite RED III⁵). L'EASA (Agence européenne de la sécurité aérienne) estime le niveau de production annuelle de CAD selon cette filière à 1,3 Mt en 2040⁶ (voir la Figure 1).

La technologie repose sur deux étapes principales (voir la Figure 2) :

- l'étape d'hydrotraitement, qui vise à hydrogéner les oléfines et convertir des oxygénés ;
- l'étape d'hydroisomérisation, qui permet d'ajuster les propriétés à froid du kérosène par isomérisation des normales paraffines en iso paraffines.

Le rendement matière de ce procédé est d'environ 80 % (Stark *et al.*, 2016).

⁴ <https://www.icao.int/environmental-protection/GFAAF/Pages/Production-Facilities.aspx>

⁵ <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/FR/TXT/PDF/?uri=CELEX:32018L2001>

⁶ <https://www.easa.europa.eu/eco/eaer/topics/sustainable-aviation-fuels/current-landscape-future-saf-industry#production-capacity-and-demand-2020-to-2030>

En France, TotalEnergies opère une première unité HVO sur le site de la Mède (Bouches-du-Rhône)⁷. Cette unité utilise le procédé Vegan® développé par IFPEN, et produit environ 500 kt par an de carburants. TotalEnergies a par ailleurs annoncé la reconversion de sa raffinerie de Grandpuits (Seine-et-Marne)⁸ et l'implantation d'une usine HVO d'une capacité de 400 kt par an de carburants.

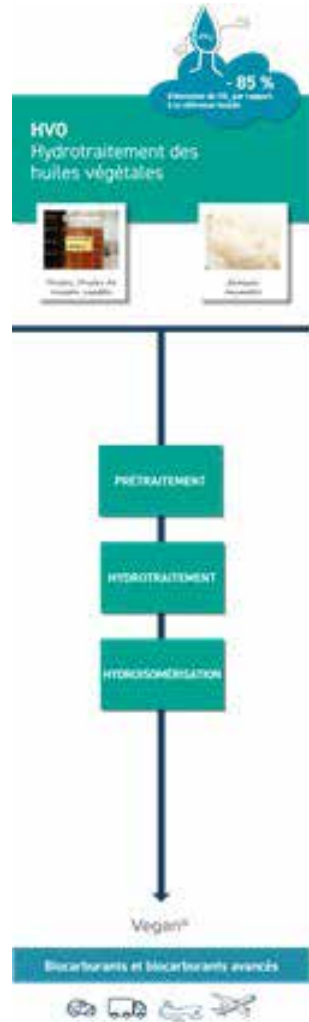


Figure 2 : Schéma de production de biocarburants par la technologie HVO ou HEFA (Source : IFPEN).

À partir de biomasse lignocellulosique, par la voie thermochimique (BTL ou eBTL)

À partir de 2030, les biocarburants seront également produits à partir de biomasse lignocellulosique (résidus agricoles ou sylvicoles), par la voie BTL (*biomass-to-liquids*) ou conversion thermochimique de la biomasse) ou e-BTL (*e-biomass-to-liquids*).

⁷ <https://totalenergies.com/fr/expertise-energies/projets/bioenergies/la-mede-un-site-tourne-vers-avenir>

⁸ <https://grandpuits.totalenergies.fr/le-projet/trois-nouvelles-activites/projet-biojet-smr/le-fonctionnement-de-lunite-biojet-smr>

Ce procédé (voir la Figure 3) consiste en :

- un prétraitement de la biomasse par torréfaction ou pyrolyse ;
- une gazéification pour convertir la biomasse en gaz de synthèse, mélange de monoxyde de carbone (CO) et d'hydrogène (H₂) ;
- une purification du gaz de synthèse pour éliminer les impuretés résiduelles provenant de la biomasse, et capter le dioxyde de carbone ;
- une synthèse Fischer-Tropsch, qui permet de produire les carburants de synthèse à partir de CO et d'H₂ ;
- une étape finale de raffinage pour éliminer les oléfines et les oxygénés, puis craquer et isomériser les paraffines pour obtenir un kérosène répondant à la spécification ASTM D7566.



Figure 3 : Schéma de production de biocarburants par voie BTL ou e-BTL (Source : IFPEN).

Le rendement matière de ce procédé est d'environ 20 % pour la voie BTL et 40 % pour la voie e-BTL (Bournay *et al.*, 2016).

En France, le projet BioTJet porté par Elyse Energy vise à construire et opérer une unité industrielle française de production de e-biokérosène avancé par voie

thermochimique, à partir d'un large spectre de biomasses lignocellulosiques locales. Ce projet, soutenu par l'ADEME, repose sur la combinaison du procédé BioTfuel®, développé à IFPEN avec Avril, Axens, le CEA, TotalEnergies et ThyssenKrupp Uhde, avec l'injection d'hydrogène obtenu par électrolyse de l'eau. L'ajout d'hydrogène permet en effet de maximiser l'usage du carbone biogénique, et donc la quantité de kérosène obtenu. Implantée sur le bassin de Lacq, cette usine devrait fournir 75 kt par an de CAD à horizon 2028.

À partir de CO₂ et d'électricité bas carbone (électro-carburants ou e-fuels)

Les premiers électro-carburants (*e-fuels*) seront également produits à partir de 2030. Ils sont fabriqués à partir d'hydrogène bas carbone produit par électrolyse de l'eau et de CO₂, et cette voie est soutenue par l'initiative européenne "ReFuelEU Aviation", qui introduit dès 2030 un sous-mandat d'incorporation spécifique aux électrocarburants de 1,2 % et de 35 % en 2050.

Les différentes étapes de production d'électro-carburants (voir la Figure 4) consistent en :

- un captage du CO₂ fossile ou biogénique ;
- une conversion du CO₂ capté en CO par le procédé de Reverse Water Gas Shift au moyen d'un apport d'hydrogène bas carbone obtenu par électrolyse de l'eau ;
- une synthèse Fischer-Tropsch et de raffinage similaire à la voie BTL.

Le rendement matière de ce procédé est d'environ 30 %⁹.

En Europe, cinq projets industriels sont en phase d'étude d'ingénierie parmi lesquels le projet Take Kair, situé en Pays de la Loire et réunissant EDF, Holcim, IFPEN et Axens.

À partir de biomasse lignocellulosique, par la voie biochimique

Une quatrième voie, la voie Ethanol-To-Jet, consiste à produire des CAD à partir d'éthanol ou d'éthanol avancé en Europe (issu de biomasse lignocellulosique), en biokérosène.

Le procédé (voir la Figure 5) consiste en :

- une étape de production d'éthanol avancé à partir de biomasse lignocellulosique : après une phase de prétraitement, les sucres présents dans la biomasse sont extraits par l'action d'enzymes, puis sous l'effet de levures fermentées en éthanol ;
- cet éthanol est ensuite déshydraté en éthylène ;
- l'éthylène est ensuite recombinaison par oligomérisation pour obtenir la longueur de chaîne carbonée compatible avec l'application kérosène ;

⁹ <https://www.ifpenouvelles.fr/article/tout-savoir-les-carburants-synthese-e-fuels>

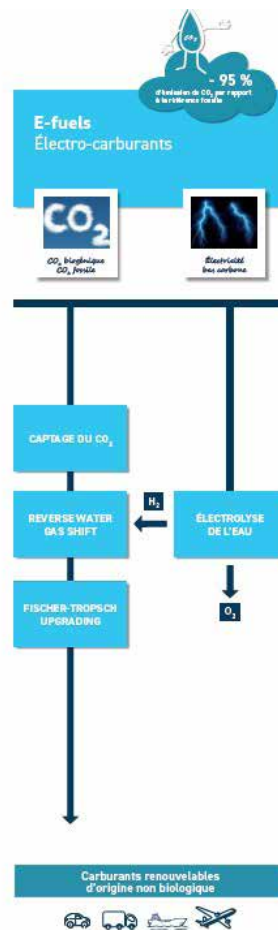


Figure 4 : Schéma de production des électro-carburants ou *e-fuels* (Source : IFPEN).

- une dernière étape d'hydrogénation permet d'ajuster la qualité du produit pour satisfaire la spécification de l'ASTM D7566.

Le rendement matière de ce procédé est d'environ 15 %.

Un projet industriel français d'unité de production d'éthanol avancé basé sur la technologie FuturoL®, développée dans le cadre d'un projet collaboratif ayant réuni onze partenaires de la recherche, de l'industrie et de la finance, est en phase d'étude d'ingénierie.

L'avantage des carburants produits par ces différentes technologies est qu'ils peuvent être mélangés directement avec le kérosène fossile : ils sont dits "drop-in". Leur composition chimique, proche de celle du kérosène fossile, permet de les incorporer sans risquer de détériorer les performances des turboréacteurs, mettre en question la sécurité des vols, ou nécessiter une modification des réseaux de transport, de stockage et de distribution. Ces carburants répondent à la spécification ASTM D7566, qui limite aujourd'hui leur taux d'incorporation avec le kérosène fossile à 50 %¹⁰. Des travaux de recherche sont en cours afin de pouvoir augmenter le taux d'incorporation des CAD jusqu'à 100 %.

¹⁰ Le kérosène fossile contient des composés aromatiques qui assurent des propriétés liées à l'auto-inflammation, à la lubrification ou au gonflement des joints polymères permettant l'étanchéité des circuits hydrauliques. C'est une contrainte à respecter.

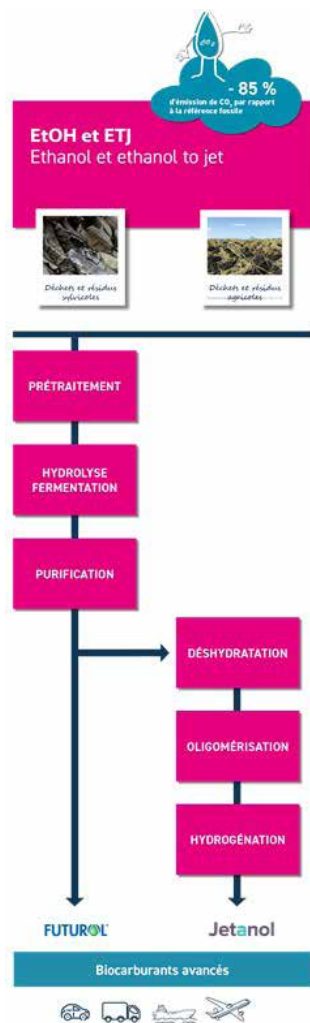


Figure 5 : Schéma de production de l'Ethanol-To-Jet (Source : IFPEN).

Les bioraffineries, des unités multiproduits intégrées à l'écosystème local

Le développement de tous ces projets est conduit en concertation avec les territoires, du fait des multiples enjeux locaux : proximité avec la ressource, développement de filières de bioéconomie prenant en compte les évolutions des pratiques agricoles et sylvicoles, impact du changement climatique sur les cultures et les écosystèmes. Les filières d'approvisionnement en biomasse doivent s'organiser, se structurer et se déployer. L'implantation des unités industrielles permettra également de redynamiser l'activité et l'emploi local (direct et indirect).

Ces unités industrielles constitueront de véritables *hubs* énergétiques fournissant différents produits pour différents usages :

- du biogaz pour l'industrie ou les particuliers par réinjection dans le réseau actuel ;
- du CO₂, pouvant être valorisé en électro-carburants ou dans l'industrie alimentaire ;

- de la lignine comme source d'énergie ;
- du naphta pour la chimie verte et la production de polymères ou pour le secteur du transport terrestre ;
- du gazole pour les secteurs du transport terrestre et maritime.

Des enjeux de R&I et de mesure de l'impact environnemental des CAD

Quel que soit leur niveau de maturité, ces différentes filières nécessitent des efforts de recherche et innovation pour répondre aux enjeux de demain :

- diversifier les charges utilisées avec la transformation de ressources toujours plus variées telles que les déchets ménagers ou le CO₂ atmosphérique ;
- diminuer les coûts des unités industrielles via une meilleure intégration des procédés et le développement de nouvelles technologies de rupture ;
- réduire la consommation d'utilités ;
- améliorer les rendements matières pour mieux valoriser la ressource ;
- optimiser les rendements vers les produits d'intérêts, notamment le kérosène.

Afin de mesurer la contribution positive des CAD à la décarbonation du secteur aérien et plus largement à la réduction de son impact environnemental, il est indispensable de réaliser des analyses de cycle de vie multi-étapes (tout au long du processus de fabrication du carburant) et multicritères (émissions de gaz à effet de serre, consommation d'eau, impact sur les sols, polluants, etc.). Ces analyses permettent non seulement d'évaluer mais aussi de comparer les solutions technologiques entre elles dans un contexte donné, et en considérant leur bénéfice environnemental global. La réglementation européenne impose des critères de durabilité aux producteurs de biocarburants et de e-carburants, avec notamment un seuil minimum de réduction des émissions de CO₂ tout au long de la chaîne :

- une réduction au minimum de 65 % pour les nouvelles unités de production de biocarburants avancés ;
- une réduction au minimum de 70 % pour les e-carburants par rapport à la référence fossile.

D'autres critères de durabilité sont aussi à respecter : ils concernent le changement d'usage des sols, l'effet sur la biodiversité, la préservation du stock de carbone...

L'impact potentiel sur la ressource en eau doit également être pris en compte. La consommation d'eau doit être minimisée tout au long de la chaîne. De ce point de vue, les biocarburants de seconde génération produits à partir de déchets et résidus présentent un avantage certain, la ressource ne nécessitant pas d'apport en eau supplémentaire.

Références

ADEME (2022), « Élaboration de scénarios de transition écologique du secteur aérien », rapport, septembre.

IEA (2023), "Net zero roadmap a global pathway to keep the 1.5°C goal in reach", update.

STARK L. *et al.* (2016), "Production of Hydroprocessed Esters and Fatty Acids (HEFA) – Optimisation of process yield", OGST, 71(1), janvier-février, <https://ogst.ifpenergiesnouvelles.fr/articles/ogst/pdf/2016/01/ogst120241.pdf>

BOURNAY L. *et al.* (2016), « Production de biokérosène et de biogazole par la voie thermochimique », *Techniques de l'Ingénieur*, mai, <https://www.techniques-ingenieur.fr/base-documentaire/innovation-th10/innovations-en-energie-et-environnement-42503210/production-de-biokerosene-et-de-biogazole-par-la-voie-thermochimique-in303/>

Les défis de l'électrification

Par Thomas DELSOL,

Responsable du programme FILAE, IRT Saint Exupéry

Lionel BOURGEOIS,

Directeur Technologique, IRT Saint Exupéry

Denis DESCHEEMAEKER,

Directeur général, IRT Saint Exupéry

Et Magali VAISSIERE,

Présidente, IRT Saint Exupéry

Dans une déclaration de l'Air Transport Action Group (ATAG) publiée en 2022, l'industrie aéronautique s'est engagée à ce que « les émissions nettes de carbone des vols de l'aviation civile internationale soient nulles d'ici 2050, grâce à l'accélération des mesures d'amélioration de l'efficacité, de la transition énergétique et des innovations dans l'ensemble du secteur et en partenariat avec les gouvernements du monde entier ». Le projet emblématique de R&T FILAE « FILière Aéronautique Électrique », porté par les instituts de recherche technologique (IRT) français, s'inscrit dans cette dynamique de décarbonation en s'attaquant aux verrous technologiques clés de l'électrification de l'aviation.

Introduction

Alors que la question du réchauffement climatique est au cœur des débats sociétaux, la réduction des émissions de gaz à effet de serre est devenue en quelques années un enjeu majeur au niveau international pour les industriels des filières de la mobilité.

Après le "dieselgate" (l'affaire Volkswagen), le secteur de l'automobile a été le premier à réagir, en entamant une transition énergétique autour des véhicules à propulsion électrique. Bien qu'initiée depuis de nombreuses années, cette transition vers des sources d'énergie plus vertes requiert toujours la levée de nombreux verrous technologiques.

L'industrie aéronautique a aussi une part de responsabilité en ce qui concerne le réchauffement climatique. Bien que sa contribution soit faible par rapport à d'autres industries (< 3 % des dégagements de CO₂, loin derrière les services Internet, par exemple), l'aviation civile est pointée du doigt, car visible et identifiable par le grand public.

En regard de ces enjeux, l'IRT Saint Exupéry, institut de recherche technologique pour l'aéronautique, le spatial et les systèmes embarqués, aux côtés de l'ONERA, le CEA Tech et l'ISAE-SUPAERO, a initié une réflexion pour identifier les besoins en recherche pour une aviation décarbonée, traduite en

un programme d'ambition baptisé FILAE pour FILière de l'Aéronautique Électrique. Considérant la perméabilité de l'utilisation des technologies dans les différentes filières automobile, ferroviaire, navale, FILAE s'inscrit dans une réflexion plus large avec une volonté de créer des synergies avec l'ensemble des filières de la mobilité.

État de l'art

Avec le concours d'experts du secteur de l'aéronautique (Airbus, Safran, l'ONERA, ISAE-SUPAERO...), l'IRT Saint Exupéry a fait un état des lieux des différents leviers à actionner pour contribuer à décarboner l'aviation avec leurs impacts sur les émissions CO₂ et non CO₂, sur l'emport et les rayons d'action, les opérations et infrastructures, et le coût pour les passagers. Ce travail est résumé dans la Figure 1 ci-après.

Trois types de source d'énergie se détachent, nécessitant une approche souverainiste du fait des enjeux économiques et des tensions prévisibles liées à leur futur approvisionnement :

- Les biocarburants et les électrocarburants sont des technologies qui sont actuellement en développement, avec des taux actuels maximums d'utilisation autorisés de 50 % et des perspectives pour passer à 100 % sur le moyen terme. Par contre,

7 leviers pour réduire les émissions CO₂ & non CO₂

Emissions = Fonction (Source d'énergie [1], Performance énergétique [2-6], Trafic aérien [7])

Leviers	Impacts	Emissions CO ₂ & non CO ₂	Emport & rayon d'action	Aéronef & aéroport	Coût passagers
1. Source d'énergie	Batteries*		< 20 places	Recharge / A+E	Source d'énergie plus chère
	H ₂ - PAC*	de -60% à -100%	< 120 places	H2 liquide / A+E	
	H ₂ - Combustion*			H2 liquide	
	Hybridation*			Mix énergétique	
	Electrocarburants*				
	Biocarburants	de -30% à -60%			
2. Trajectoire de vol	Eviter zones sursaturées en glace, ...			Impact négligeable	
3. Propulsion	Architecture, thermodynamique		Pas de limitation		Performance énergétique améliorée
	BLI, hybridation électrique				
4. Aérodynamisme	Aile volante	de 0% à -30%		Rupture technologique	
	Winglets, ailes laminaires				
5. Masse	Composites, process fabrication			Impact négligeable	
6. Systèmes	e-Taxi, avion plus électrique				
7. Trafic aérien	Réduction	Proportionnel à la réduction du trafic aérien			

* périmètre de l'avion uniquement, en considérant l'électricité produite 100% à partir d'énergie décarbonée

Figure 1 : Liste des différents leviers pouvant être actionnés pour le développement d'un avion décarboné (Référentiel ISAE-SUPAERO aviation-climat - Scott Delbecq, Jérôme Fontane, Nicolas Gourdain, Hugo Mugnier, Thomas Planès et Florian Simatos, septembre 2021).

la question de la disponibilité des matières premières reste à résoudre pour alimenter à la fois l'ensemble de la flotte aéronautique et les autres secteurs de la mobilité.

- Les technologies de batteries actuelles ne permettent pas de faire voler de gros porteurs en raison de leur densité de puissance encore trop faible. Hybridées avec une autre source, comme les SAF (*sustainable aviation fuels* : biocarburants ou électrocarburants), elles peuvent néanmoins contribuer à décarboner les avions. Une bonne gestion de l'hybridation prenant en compte les différentes phases de vol et les puissances associées permettra d'optimiser l'autonomie des aéronefs (cf. la Figure 2 ci-après).
- Enfin, l'hydrogène peut être, à plus long terme, une source d'énergie alternative intéressante. Les problématiques de stockage d'hydrogène (volume de l'hydrogène, stockage cryogénique à - 253°C), de masse et de performance des piles à combustible seront des obstacles préalables à franchir.

Des travaux de recherche sont également menés sur la propulsion, qui est un vecteur central de la décarbonation. Ainsi, le concept de propulsion distribuée, étudié par l'ONERA, permettrait une diminution des pertes d'énergie liées aux frottements, un décollage et un atterrissage sur de plus courtes distances, une participation des moteurs au pilotage de l'avion, ou bien encore une amélioration de la sécurité du vol. Le développement de nouveaux moteurs, tels que l'Open Rotor de Safran, permet également d'envisager des économies de carburants par passager kilomètre de l'ordre de 10 % à 20 %.

D'autres améliorations comme l'optimisation de l'aérodynamisme permettraient aussi de faire baisser la consommation des aéronefs de 10 % à 25 %, selon le type d'amélioration considéré (*winglet*, aile volante hybride).

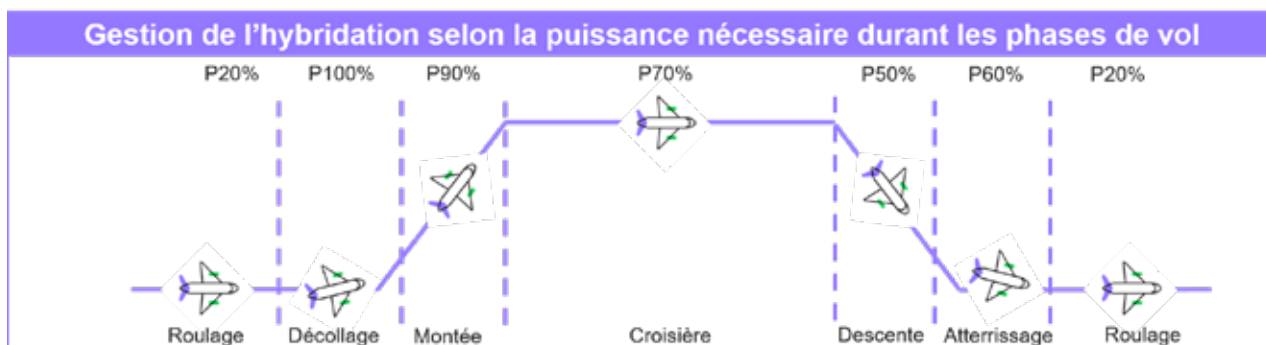


Figure 2 : Gestion de l'hybridation selon la puissance nécessaire durant les phases de vol (Px % : pourcentage de puissance mise en œuvre instantanément par rapport à la puissance maximale).



Figure 3 : (a) Propulsion distribuée (ONERA) ; (b) Moteur Open Rotor développé par Safran / (c) Winglet / (d) Aile volante hybride.

De plus, la réduction de la masse des aéronefs est un autre levier à actionner pour réduire la consommation, avec notamment :

- Une plus grande utilisation des matériaux composites – l'A350 utilise déjà plus de 50 % de matériaux composites. Mieux comprendre et modéliser le comportement des composites permettrait un déploiement encore plus massif, en intégrant leur recyclabilité.
- Le développement des procédés de fabrication additive, qui permettrait de concevoir et produire des pièces très complexes aux géométries inenvisageables jusque-là, entraînant une diminution du recours aux matériaux métalliques (nickel, titane et aluminium), et une réduction très significative de la matière engagée.
- La diminution de la masse des systèmes embarqués : printed electronics¹, ...

Le choix de la source d'énergie va également fortement affecter les architectures et les systèmes avions, sachant qu'ils peuvent représenter entre 5 % et 10 % de la consommation totale de carburants.

Parmi les autres leviers qu'il conviendra d'actionner pour permettre l'avion décarboné de demain, citons :

- l'intelligence artificielle explicable et embarquable (qualifiable, certifiable) ;
- des outils d'optimisation certifiés ;
- la logistique pour permettre la recharge des batteries ou l'approvisionnement en carburants (SAF, hydrogène) ;
- l'adaptation des infrastructures aéroportuaires aux nouvelles formes d'avions et aux sources d'énergie à approvisionner ;
- la prise en compte de l'impact des nouvelles technologies sur la maintenance ;
- la prise en compte du bruit dans les développements à venir ;
- le développement de moyens d'essais multi-contraintes.

Enfin, une optimisation des trajectoires de vol permettrait notamment d'éviter les zones sursaturées en glace, et réduire ainsi les traînées de condensation responsables du forçage radiatif (cf. le programme européen SESAR – European Sky Air Traffic Management Research).

¹ <https://www.irt-saintexupery.com/printed-electrics/>

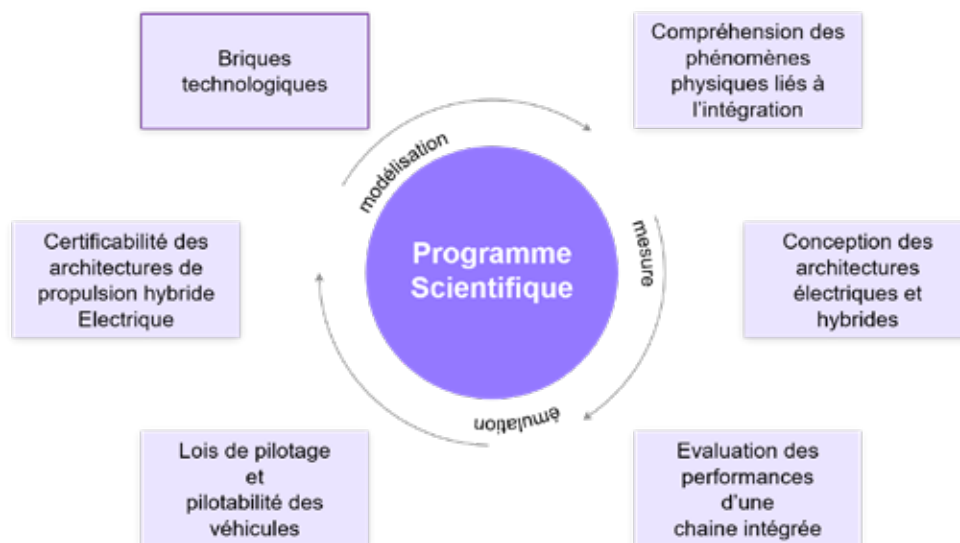


Figure 4 : Programme scientifique issu des travaux conjoints ONERA, ISAE-SUPAERO, IRT SAINT EXUPERY.

Genèse du programme FILAE

En 2020, tandis que le secteur aéronautique connaissait une crise sans précédent liée à la pandémie de Covid-19, l'IRT Saint Exupéry, l'ISAE-SUPAERO et l'ONERA ont initié une réflexion commune, avec pour objectif de proposer un programme ambitieux permettant d'accélérer la transition vers l'avion du futur et de permettre à la France de conserver son statut de pionnière en matière de développement d'aéronefs. Ces réflexions ont abouti au lancement de la démarche FILAE (Filière de l'Aéronautique Électrique) à laquelle ont adhéré des acteurs incontournables du paysage de la recherche française, comme le CEA, le LAPLACE et le LAAS.

La première tâche a consisté à définir trois piliers sur lesquels s'agrégerait l'écosystème académique et industriel :

- les véhicules et chaînes de propulsion hybride électrique ;
- les sources et stockages électrochimiques ;
- l'autonomie, les data et la communication.

Ces trois piliers sont communs à l'ensemble des usages de l'aéronautique de demain : avion de vol électrique, VTOL (*vertical take-off and landing*) électrique, 10 places hybride, 19 places hybride, dirigeable charge lourde hybride, régional hybride, *new short range* hybride, etc.

Une étape importante de cette initiative a été franchie en 2021 avec la mise en place d'un programme scientifique ayant reçu l'aval des membres industriels du CORAC. Ce programme scientifique est composé de six volets, comme décrit *infra*.

Principaux objectifs du programme FILAE

Trois objectifs principaux sont couverts dans le cadre de FILAE.

Compétitivité :

- contribuer à structurer une filière française et européenne en électronique de puissance (SIC/GAN) compatible avec l'environnement aéronautique ;
- développer les activités de R&T en support de la gamme d'avions CS23 ;
- développer des briques technologiques clés pour une chaîne électrique propulsive.

Ressourcement :

- contribuer à la création d'une EUR (école universitaire de recherche) sur la mobilité électrique pour l'automobile et l'aéronautique ;
- contribuer à la mise en place de Mastères spécialisés ;
- contribuer à la mise en place de modules de formation pour les industriels ;

- amplifier l'écosystème de recherche avec le lancement de 30 thèses de doctorat, 30 à 50 post-doctorats, et 50 stages et alternances.

Coopération :

- positionner l'IRT Saint Exupéry comme un opérateur capable d'activer les synergies entre le secteur aéronautique et d'autres secteurs (électronique, automobile, ferroviaire, etc.), entre acteurs publics et privés, avec le soutien d'autres IRT / ITE de France : Railenium (pour le rail), Vedecom (pour l'automobile), SuperGrid (pour les fortes tensions), Nanoelec (pour l'électronique de puissance).

Principaux verrous adressés

Une étape importante de la démarche FILAE a consisté à lister l'ensemble des leviers à actionner, du plus haut niveau au plus bas, afin de rechercher les verrous technologiques et méthodologiques concernant l'avion électrique du futur. Le programme FILAE a ainsi été décomposé en trois thématiques dont les principaux verrous sont décrits ci-après.

Électronique de puissance embarquée à base de composants à grand gap :

- absence de modèles de fiabilité des composants à grand gap et des assemblages ;
- absence de standards de tests adaptés ;
- environnement normatif global insuffisant ;
- technologies d'assemblage dense non matures ;
- difficulté à optimiser l'utilisation de ces composants au maximum de leur capacité (thermique, fréquence, tension et décharges...) ;
- volume de l'aéronautique ne permettant pas une solution dédiée.

Densification des systèmes électriques :

- phénomènes physiques associés à la haute tension (décharges partielles, arcs électriques) mal maîtrisés ;
- repousser les limites des systèmes d'isolation électrique ;
- masse et volume des filtres trop élevés ;
- système de refroidissement à cœur complexe ;
- systèmes de coupure haute tension trop lourds et trop volumineux ;
- problème CEM lié à l'utilisation de composants à grand gap ;
- machines électriques (moteurs, générateurs) trop lourdes ;
- marché des aimants à base de terres rares incertain ;
- batteries et piles à combustible actuelles trop lourdes et volumineuses.

Durée de vie des systèmes électriques :

- méconnaissance des physiques de défaillance ;
- méconnaissance des marqueurs de vieillissement ;
- limite des systèmes de détection associés ;
- absence des modèles de vieillissement.

Planification

Issus du programme scientifique FILAE co-construit avec les partenaires, 12 projets multi-filières seront lancés entre 2023 et 2030 pour un montant global de 60 M€.

Deux projets de ce programme ambitieux ont déjà démarré en 2023 : SiCRET+ dont l'un des objectifs est l'établissement de recommandations pour une conception robuste de modules SiC adaptée aux profils de missions des utilisateurs finaux ; et GRINHELEC, qui vise à développer des matériaux isolants pour les câbles destinés à la propulsion électrique plus respectueux de l'environnement.

Conclusions

Les résultats des activités de R&T dans le cadre de FILAE devraient avoir plusieurs impacts :

- impacts scientifiques : compréhension des phénomènes physiques en environnement aéronautique, levée de verrous à la densification des systèmes électriques et augmentation de leur durée de vie, développement de méthodes et outils d'aide à la conception ;
- impacts environnementaux et sociétaux : contribution à la maturation de solutions de propulsion à émissions réduites, contribution à la structuration d'un pôle de recherche d'ampleur nationale sur les architectures de propulsion électrique, contribution à la conversion des métiers vers l'électrique ;
- impacts économiques : soutien à la filière par la maîtrise des défis scientifiques et l'accompagnement des industriels, soutien aux PME et TPE du domaine, renforcement de la supply chain, maîtrise des coûts des solutions développées en utilisant les synergies multi-filières, formation dans des domaines nouveaux aux frontières de plusieurs disciplines, rayonnement national et international.

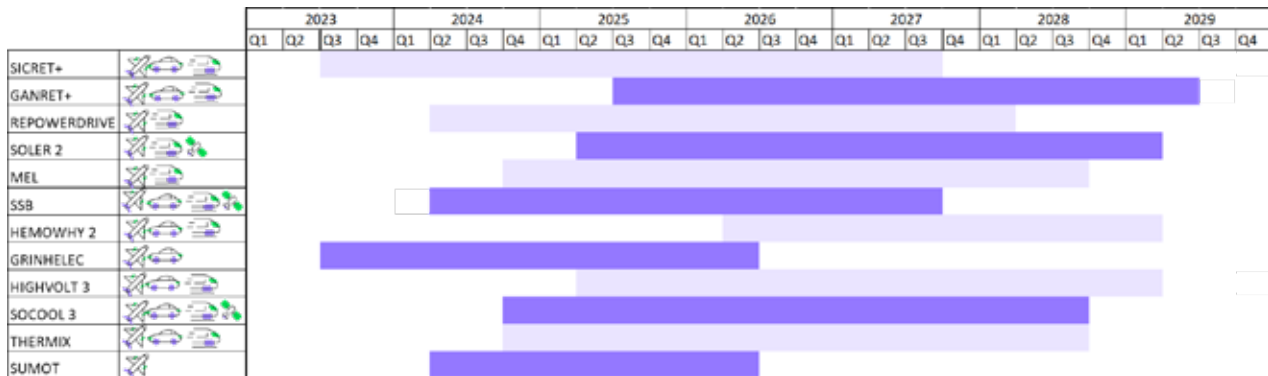


Figure 5 : Planification du programme FILAE.

L'avion à hydrogène ZEROe : défis technologiques et impacts sur l'écosystème

Par Karine GUÉGAN,

Vice-présidente écosystème ZEROe - Airbus

L'aviation, symbole de mobilité et de rapprochement, doit réinventer son futur, pour répondre aux exigences de neutralité carbone d'ici 2050.

L'hydrogène se présente comme une solution d'avenir pour la décarbonation de nombreuses industries. Cependant, son adoption dans l'aéronautique nécessitera des avancées majeures, de la production et distribution à grande échelle d'hydrogène vert, alimentées par les énergies renouvelables, à la conception de réservoirs cryogéniques sécurisés, en passant par l'adaptation des équipements et infrastructures aéroportuaires.

Airbus se positionne en champion de cette transition, collaborant avec des partenaires, *leaders* mondiaux dans leur domaine respectif, pour concrétiser son ambition. Les concepts novateurs de l'avion à hydrogène ZEROe, propulsé par des piles à combustible ou des moteurs à combustion d'hydrogène, promettent une réduction significative des émissions de CO₂.

L'objectif est clair : transformer l'industrie aéronautique, pour un avenir plus durable, sûr et uni.

En un peu plus d'un siècle, l'aviation a donné la possibilité au plus grand nombre d'explorer de nouveaux pays, de retrouver ses amis et ses proches n'importe où sur la Terre, comme de s'émerveiller de voir notre planète à plus de 10 000 mètres d'altitude. De manière sûre, rapide et à un prix de plus en plus abordable.

Cependant, la croissance du transport aérien a un impact environnemental, et l'industrie aéronautique représente aujourd'hui entre 2 % et 3 % des émissions mondiales de CO₂ produites par l'homme. Face au défi du changement climatique, les États membres de l'Organisation de l'aviation civile internationale sont parvenus à un accord pour atteindre la neutralité carbone en 2050 dans l'aviation civile mondiale, et respecter l'Accord de Paris. L'ensemble des acteurs de l'aéronautique est aujourd'hui focalisé sur cet objectif.

Chez Airbus, nous sommes engagés à mener la décarbonation du secteur aérospatial et à activer tous les leviers possibles déjà à notre portée, technologiques et opérationnels, afin de réduire les émissions de CO₂ de nos avions et de nos hélicoptères : amélioration des moteurs, allègement des structures, nouvelles architectures plus aérodynamiques, optimisation des trajectoires des aéronefs en vol et au sol, etc.

Malgré ces améliorations incrémentales, les technologies existantes ne nous permettront pas de réduire suffisamment les émissions pour une neutralité carbone en 2050. C'est pourquoi nous investissons aussi dans des solutions de rupture technologique telles que l'électrification ou l'hybridation thermique-électrique,

l'avion à hydrogène, et dans de nouvelles énergies plus décarbonées comme l'hydrogène et évidemment les carburants d'aviation durables (biocarburants et carburants de synthèse) que nos avions actuels acceptent à hauteur de 50 % aujourd'hui et jusqu'à 100 % avant la fin de cette décennie.

L'importance de l'hydrogène pour la décarbonation du transport aérien

L'annonce par Airbus du projet d'avion ZEROe en 2020 a rappelé tout l'intérêt du potentiel de l'hydrogène dans l'aéronautique. L'hydrogène est l'élément le plus abondant sur Terre. C'est l'un des deux éléments constitutifs de l'eau, et il est donc présent en grande quantité dans les océans, les cours d'eau, les lacs et l'atmosphère.

Contrairement à ce que l'on pourrait croire, l'hydrogène n'est pas une source d'énergie en soi, mais un vecteur qui contient l'énergie issue d'une autre source. Cela en fait une solution idéale pour transporter de l'énergie en vue d'une multitude d'applications.

Les usages de l'hydrogène ne sont pas si nouveaux. Plus de 90 millions de tonnes d'hydrogène sont produites chaque année dans le monde, la principale source d'extraction étant le gaz naturel (c'est ce que l'on appelle l'hydrogène « gris »). Lorsqu'elle est extraite à l'aide de combustibles fossiles, la production d'hydrogène est responsable d'environ 900 millions



Vol en formation d'avions à hydrogène ZEROe (© Airbus 2023)

de tonnes d'émissions de CO₂ par an. Cependant, les électrolyseurs, alimentés par de l'électricité produite à partir d'énergies renouvelables, offrent une alternative de production d'hydrogène à faible taux d'émission. Ce processus, qui donne naissance à l'hydrogène « vert », représente actuellement environ 0,1 % de la production mondiale d'hydrogène. De nombreux nouveaux projets d'hydrogène « vert » sont actuellement à l'étude ou en construction.

La production mondiale d'électricité éolienne a plus que doublé, et la production mondiale d'électricité solaire a quintuplé entre 2015 et 2022¹. L'Agence internationale de l'énergie (AIE) prévoit par ailleurs que la croissance rapide du marché des énergies renouvelables, en particulier du solaire et de l'éolien, au cours de la prochaine décennie, augmentera de manière exponentielle la disponibilité de l'électricité renouvelable, faisant ainsi baisser son coût. La demande d'électrolyseurs capables de produire de l'hydrogène vert augmente déjà rapidement, avec une capacité d'électrolyse prévue de 40 GW dans l'UE d'ici à 2030. La disponibilité accrue de l'hydrogène vert pourrait contribuer à réduire son coût de 30 % d'ici à 2030 et de 50 % d'ici à 2050².

¹ IEA (2023), "Global Hydrogen Review 2023", IEA, Paris, <https://www.iea.org/reports/global-hydrogen-review-2023>, Licence: CC BY 4.0

² WEO23 & IEA (2023), "World Energy Outlook 2023", IEA, Paris, <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2023>, Licence: CC BY 4.0 (report); CC BY NC SA 4.0 (Annex A)

L'hydrogène renouvelable constitue une solution de décarbonation pour plusieurs secteurs de l'activité économique tels que l'industrie lourde, l'énergie, la chimie et les mobilités terrestre, maritime et aérienne. L'industrie aéronautique ne fait, en effet, pas exception, et nous estimons que l'hydrogène vert pourrait réduire jusqu'à 50 % les émissions de CO₂ de l'aviation à horizon de 2050. La demande d'énergie renouvelable de l'aviation pourrait représenter 5 % à 10 % de la demande totale d'énergie renouvelable d'ici 2050³; ces besoins doivent donc être pris en compte dans la planification des énergies renouvelables.

La disponibilité et le coût de l'hydrogène liquide pour ravitailler les avions constituent un défi majeur pour le transport aérien. Airbus collabore déjà avec de nombreux aéroports, énergéticiens et compagnies aériennes pour étudier les conditions de succès de déploiement des chaînes d'approvisionnement d'hydrogène, infrastructures nécessaires à l'hydrogène sur les principaux continents. Il s'agit notamment d'étudier l'ensemble des leviers possibles pour décarboner les équipements et moyens de transport au sol utilisés dans les aéroports (GPU, camions de transport, bus de passagers, tracteurs d'avions, ...) et à leurs abords, en servant les besoins en hydrogène liés à la mobilité ou aux bassins industriels connexes. Il est également important de positionner dès aujourd'hui les aéroports, futures plateformes d'énergie, sur les

³ MISSION POSSIBLE PARTNERSHIP AVIATION (2022), "Making net-zero aviation possible", <https://missionpossiblepartnership.org/wp-content/uploads/2023/01/Making-Net-Zero-Aviation-possible.pdf>



Illustration Opération de ravitaillement d'un avion à hydrogène ZEROe dans un aéroport (© Airbus 2024)

grands réseaux de distribution de gaz existants (principalement Europe, Amérique du Nord) qui préparent l'adaptation des canalisations de distribution de gaz pour distribuer l'hydrogène gazeux.

Nous travaillons en partenariat avec des constructeurs de technologies hydrogène, producteurs et distributeurs d'hydrogène du monde entier, des aéroports et des compagnies aériennes, afin non seulement d'ouvrir la voie vers une disponibilité de l'hydrogène dès l'entrée en service du premier avion commercial à hydrogène d'Airbus en 2035, mais aussi de développer les premiers usages d'hydrogène gazeux dans les aéroports (stations hydrogène, chariots élévateurs, bus, utilitaires, camions, systèmes de chauffage, etc.). Nous avons ainsi signé des accords de coopération avec Aéroports de Paris et Vinci Airports en France, ainsi qu'avec leurs équivalents en Europe (Allemagne, Espagne, Pays-Bas, Italie, Suède, Norvège, Royaume-Uni), en Asie Pacifique (Corée du Sud, Japon, Singapour, Nouvelle-Zélande).

Outre ces partenariats bilatéraux ou multipartites, nous sommes membre actif d'un grand nombre d'organisations internationales, telles que Hydrogen Council, Hydrogen Europe, les alliances européennes Clean H2 et AZEA, ou d'organisations nationales telles que France Hydrogène, JetZero au Royaume-Uni, ou German Wasserstoff Rat. Nos efforts individuels ne pourront suffire à transformer notre industrie, et il est important que nous fassions partie de tous ces groupements pour mieux comprendre le contexte global et influencer l'orientation et les stratégies dans notre écosystème.

Des exigences strictes pour le stockage de l'hydrogène

L'avion à hydrogène, avec un hydrogène produit à partir de sources d'énergie renouvelables, est l'une des technologies les plus prometteuses pour réduire l'impact de l'aviation sur le climat. Il pourrait fournir trois fois plus d'énergie par unité de masse que des carburants aériens classiques, et 100 fois plus que des batteries lithium-ion.

Cependant, le stockage de l'hydrogène dans un avion soulève plusieurs défis. L'hydrogène peut fournir plus d'énergie en masse que le kérosène, mais moins d'énergie en volume. À la pression atmosphérique normale et à la température ambiante, il faudrait quelque 3 000 litres d'hydrogène gazeux pour obtenir la même quantité d'énergie qu'un litre de kérosène.

Il est évident que cette solution n'est pas envisageable pour l'aviation. Une alternative pourrait consister à porter la pression de l'hydrogène à 700 bars - une approche utilisée dans le secteur automobile. Dans l'exemple que nous citons, cela permettrait de réduire les 3 000 litres à seulement six.

Cette alternative peut constituer une avancée majeure, mais la masse et le volume sont essentiels pour les avions. Pour progresser davantage, nous pouvons abaisser la température à -253 °C , un stade où l'hydrogène passe alors de l'état gazeux à l'état liquide, ce qui augmente davantage sa densité énergétique. Pour revenir à notre exemple, quatre litres d'hydrogène liquide équivalraient à un litre de carburant d'aviation standard.

Le maintien d'une température aussi basse nécessite des réservoirs de stockage très spécifiques, déjà utilisés dans le secteur spatial. La participation d'Airbus au programme Ariane a permis d'acquérir des connaissances sur l'installation et les tests de systèmes cryogéniques, la gestion des ballonnements de carburant, ou sur la conception du réservoir lui-même.

Une étape importante a été la démonstration de faisabilité d'un système de conditionnement de l'hydrogène adapté à l'alimentation d'un moteur à turbine d'avion en mai 2023. Étant donné que l'hydrogène doit être stocké à une température de - 253 °C, il doit être « conditionné » pour atteindre une température et une pression acceptables pour la combustion dans le moteur de l'avion. Ce projet mené par ArianeGroup, une co-entreprise entre Airbus et Safran, a été rendu possible par la réutilisation d'équipements conçus pour des applications spatiales.

Cependant, s'il existe certaines synergies entre les lanceurs spatiaux et l'aviation, il convient de garder en tête les différences en matière d'usages, notamment en termes de fiabilité et de sécurité : les réservoirs de stockage d'hydrogène pour avions commerciaux devront supporter quelque 20 000 décollages et atterrissages, et nécessitent le maintien de l'hydrogène à l'état liquide pendant une durée de vol nettement supérieure à un lanceur.

En outre, il est impératif d'atteindre des objectifs de sécurité identiques ou supérieurs à ceux des avions civils existants. D'importantes mesures de sécurité sont aujourd'hui prises en compte dans la conception et l'exploitation des avions actuels au kérosène. Les solutions techniques et opérationnelles permettant d'atteindre le même niveau de sécurité avec l'hydrogène seront différentes, mais l'objectif est extrêmement clair, et nous pensons qu'il est à notre portée.

C'est tout l'objectif des travaux que nous menons dans nos centres de recherche dédiés à la conception et fabrication de réservoirs cryogéniques, en matériaux métalliques et composites, à Nantes, en France, mais aussi à Brême et Stade, dans le Nord de l'Allemagne, ou à Getafe, près de Madrid, en Espagne.

Avancement des études de l'avion à hydrogène d'Airbus

L'hydrogène ayant une densité énergétique volumétrique plus faible que les carburateurs actuels, l'aspect visuel des futurs avions devra être modifié afin de s'adapter aux solutions de stockage de l'hydrogène, qui seront plus volumineuses que les réservoirs existants.

Il y a quatre ans, Airbus dévoilait plusieurs concepts d'avions de prochaine génération, désignés collectivement sous l'appellation "ZEROe", permettant de définir le premier avion commercial à hydrogène au monde dont la mise en service aurait lieu à l'horizon 2035. Ces concepts nous permettent d'étudier plusieurs configurations aérodynamiques et diverses

architectures des systèmes de propulsion, avec un point commun : tous fonctionnent à l'hydrogène liquide.

Trois de ces concepts sont équipés de moteurs à combustion d'hydrogène entraînant des turbines à gaz, à l'instar des turbo-réacteurs et des turbopropulseurs actuels fonctionnant au kérosène – mais sans les émissions de CO₂ que ces derniers génèrent. Un quatrième concept prend la forme d'un avion de transport régional, à voilure haute et doté d'hélices fixées aux nacelles moteurs. D'un aspect extérieur semblable aux turbopropulseurs, ces nacelles contiennent en réalité des piles à combustible à hydrogène qui génèrent de l'électricité par réaction électrochimique pour alimenter des moteurs électriques entraînant les hélices.

L'énorme potentiel des piles à combustible à hydrogène a conduit à retenir cette technologie clé, parmi d'autres, pour une exploration plus poussée sur nos démonstrateurs d'avions à hydrogène, malgré un défi de taille. Bien que déjà présentes sur le marché, les piles à combustible à hydrogène actuelles ne disposent pas de l'énergie nécessaire pour propulser un avion tout en conservant un poids acceptable. Nous avons donc créé Aerostack, une co-entreprise avec ElingKlinger, une entreprise ayant plus de vingt ans d'expérience en tant que fournisseur de piles à combustible et de composants de l'industrie automobile, afin de développer des piles adaptées au système de propulsion électrique d'un avion ZEROe.

Nous avons ainsi pu développer notre propre concept de moteur à pile à combustible à hydrogène, qui a été mis à l'épreuve l'an dernier dans notre centre d'essais près de Munich, en Allemagne, dans la plus grande installation de ce type en Europe. Au cours de six mois d'essais au sol, nos équipes d'experts ont pu tester le bon fonctionnement de cet "iron pod" à pleine puissance, à savoir 1,2 mégawatt (MW). Il s'agit de l'essai à piles à combustible le plus puissant jamais réalisé dans le monde de l'aviation à ce jour, et c'est pour nous une excellente plate-forme d'apprentissage.

Nous sommes les seuls à avoir su créer une telle « chaîne » d'énergie, en couplant plusieurs piles à combustible pour atteindre la puissance nécessaire à une utilisation dans l'aviation civile. Mieux encore, cet essai a été réalisé en utilisant plusieurs canaux d'alimentation couplés sur une seule hélice, ce qui nous a permis de tirer des enseignements pour la conception de notre futur avion à hydrogène, pour sa fabrication ainsi que sa certification.

Ce succès est le reflet d'un véritable travail d'équipe, impliquant les équipes d'Airbus à travers toute l'Europe, rendu possible grâce au soutien financier des pays fondateurs d'Airbus, dont la France et l'Allemagne, mais aussi de programmes européens tels que Clean Aviation et Clean Hydrogen.

En route vers les démonstrations en vol

Moins de trois ans après avoir présenté un concept d'avion entièrement propulsé par des piles à combustible à hydrogène, Airbus a respecté son calendrier initial et réalisé des progrès incroyables. La mise sous tension d'un système à pile à combustible à 1,2 mégawatt représente une étape essentielle vers notre objectif de mise en service d'un avion à hydrogène à l'horizon 2035.

Nous continuons nos études de faisabilité et nos essais en laboratoire en vue de réaliser un démonstrateur entièrement opérationnel pour des essais en vol d'ici 2026. Les essais se poursuivent actuellement sur cette première version d'iron pod. Une fois ces essais terminés, la prochaine étape consistera à optimiser la taille, la masse et les qualifications du système de propulsion pour respecter les spécifications de vol. Les qualifications concernent notamment les réactions aux vibrations, à l'humidité et à l'altitude. Une fois ces optimisations et essais terminés, le système de propulsion à pile à combustible sera installé sur un A380 d'essai d'Airbus

spécialement adapté, afin d'être soumis à des tests au sol avant l'étape cruciale du premier vol.

Parallèlement, nous préparons un démonstrateur de moteur à combustion d'hydrogène avec la co-entreprise CFM International de GE et Safran. L'objectif est de mettre au point un système totalement intégré et apte au vol, en utilisant aussi notre A380 d'essai comme banc d'essai volant.

La route est donc encore longue avant d'assister au premier vol d'un avion à hydrogène dans le ciel de Toulouse et ailleurs, et les défis technologiques, industriels et liés à l'écosystème sont nombreux. C'est comme si nous roulions sur la piste de décollage et que la trajectoire de vol se précisait au fur et à mesure. Mais nous sommes portés par cette ambition collective de transformer le rêve d'un vol à faible émission carbone en réalité pour les générations à venir. Et notre enthousiasme est sans limite lorsque nous voyons le potentiel incroyable de l'hydrogène pour l'industrie aéronautique, et les progrès que nous avons déjà réalisés en quelques années.

C'est la raison d'être d'Airbus : être les pionniers d'une industrie aéronautique et spatiale durable, pour un monde sûr et uni.



Démonstrateur en vol A380 de moteur à pile à combustible hydrogène (© Airbus 2022)

L'hybridation électrique au service de la décarbonation de l'aviation

Par Régine SUTRA-ORUS, Dr Christophe VIGUIER, Dr Pierre-Alain LAMBERT, Dr Stéphane AZZOPARDI, Dr Thierry LEBEY et Dr Bertrand REVOL

Safran Tech

L'industrie du transport aérien est résolument engagée dans une trajectoire de décarbonation qui la mènera à la neutralité carbone en 2050. Depuis l'avènement de la propulsion à réaction, l'accroissement d'efficacité énergétique des avions de transport a été considérable, et pour une large partie portée par les technologies des systèmes propulsifs. Les technologies de propulsion thermique comportent encore une marge de progression, mais désormais celles-ci doivent être complétées d'une action renforcée sur tous les autres leviers à disposition : introduction de concepts disruptifs réduisant encore la consommation par le recours, notamment, à l'électrification ; optimisation des opérations en vol ; recours à des carburants substitutifs aux hydrocarbures fossiles. L'action de Safran s'étend à tous ces axes en simultanément, mais nous développerons dans cet article quelques challenges auxquels faire face dans le cadre d'une plus grande électrification, en particulier l'hybridation électrique des moteurs.

L'industrie du transport aérien est résolument engagée dans une trajectoire de décarbonation de ses produits et de ses opérations qui doit la mener, selon les objectifs de l'ATAG¹, à la neutralité carbone en 2050.

¹ Air Transport Action Group.

Depuis l'avènement de la propulsion à réaction, l'accroissement d'efficacité énergétique des avions de transport a été considérable, et pour une large partie portée par les technologies des systèmes propulsifs : augmentation des rendements thermiques et aérodynamiques ; allègement des structures par le recours aux matériaux composites.

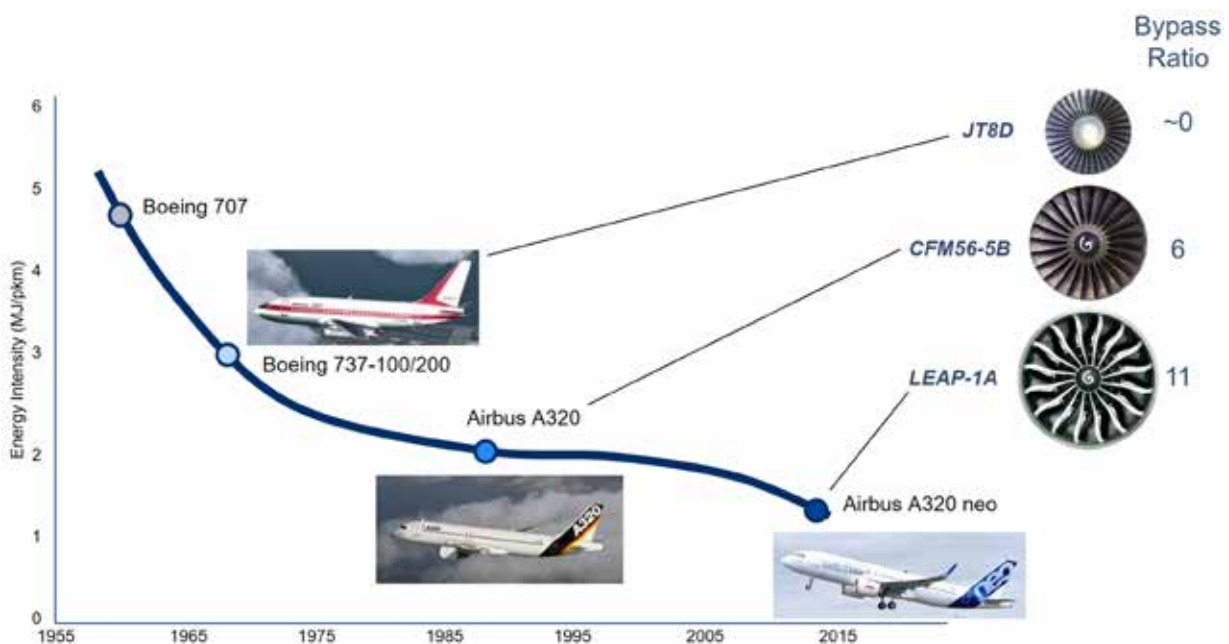
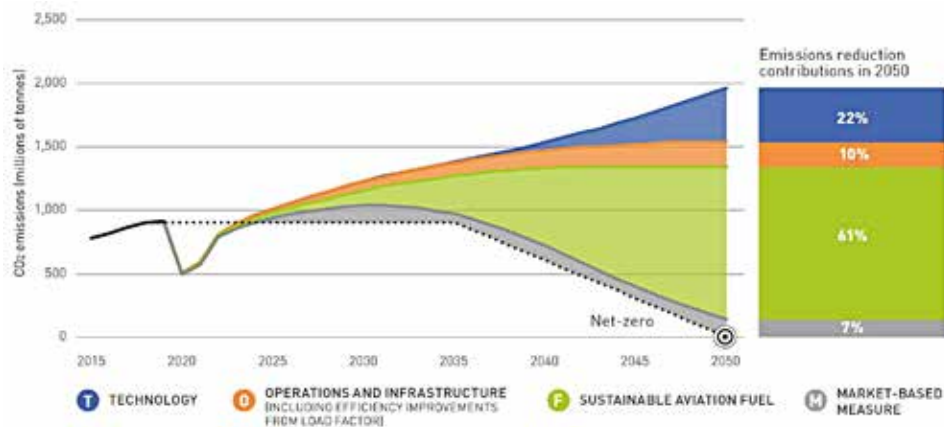


Figure 1 : L'intensité énergétique des avions de transport a été divisée par cinq en soixante ans, et 70 % de cette amélioration est due à la propulsion (© Safran).



Les technologies de propulsion thermique comportent encore une marge de progression, mais désormais celles-ci doivent être complétées d'une action renforcée sur tous les autres leviers à disposition pour être au rendez-vous des enjeux de 2050 : introduction de concepts disruptifs réduisant encore la consommation par le recours, notamment, à l'électrification ; optimisation des opérations en vol ; recours à des carburants substitutifs aux hydrocarbures fossiles.

L'action de Safran s'étend à tous ces axes en simultanément :

- Anticipation des concepts en rupture envisageables : voilure haute à fort allongement ; propulsion distribuée ; moteurs enterrés.

- Carburants alternatifs au kérosène (SAF²), *via* des partenariats avec l'industrie et un travail avec les autorités pour favoriser l'émergence de filières de carburants d'aviation durables, et des études d'impact d'une variété de biocarburants et carburants synthétiques sur les matériels, l'opération et les émissions moteur.
- Exploration des architectures, fonctions et technologies de propulsion hydrogène, que ce soit par combustion dans des moteurs thermiques ou *via* pile à combustible, cette dernière étant moins mature

² Sustainable aviation fuels d'origine biomasse ou synthétique par capture de carbone.



Figure 3 : Exemples de concepts d'avions de transport en rupture (© Safran).



Figure 4 : Avec son banc BEARCAT fortement instrumenté, Safran Tech est en mesure d'étudier finement l'impact de différents carburants substitutifs sur le comportement d'un moteur réel (© Safran).

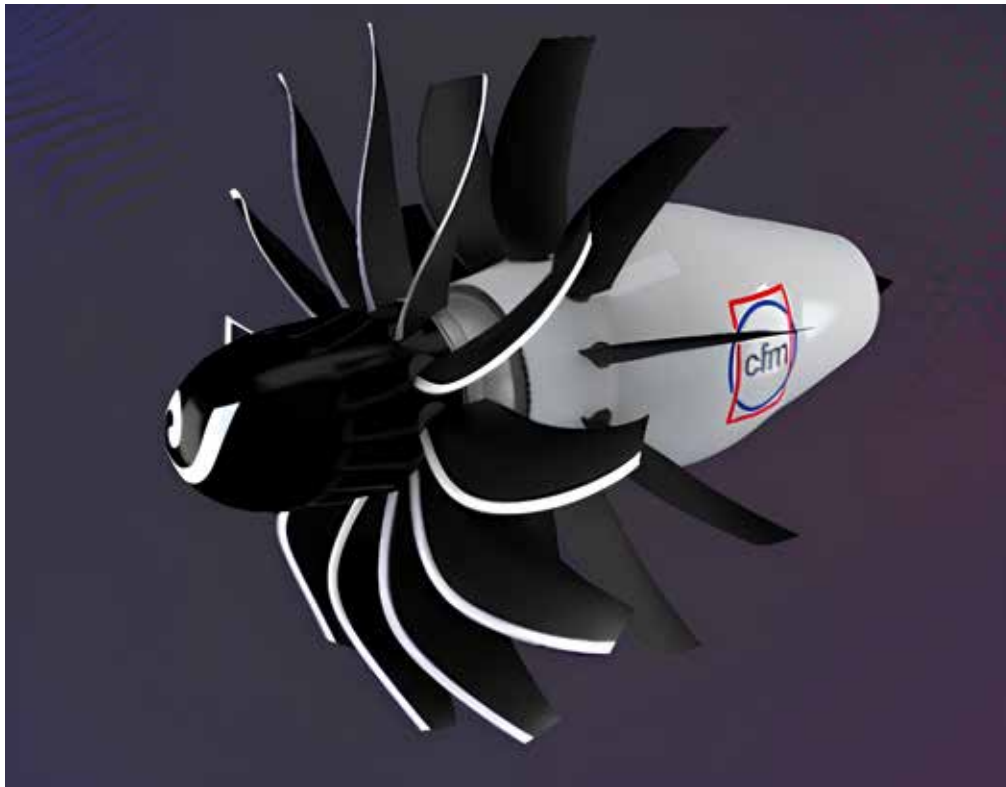


Figure 5 : Le démonstrateur RISE de CFM, financé par Clean Aviation préfigure la prochaine génération de turbofans à hélice ouverte et très forte efficacité, visant des gains d'émissions de 20 % (© Safran).



Figure 6 : Avec son programme MATCH, Safran a élaboré et validé expérimentalement les principes d'hybridation électrique d'un turbofan à double corps et double flux (© Safran).

mais intéressante pour lever les limitations associées à la masse des batteries pour la propulsion électrique ou hybride.

- Tous ces travaux ne dispensent pas de travailler encore à l'efficacité énergétique de la propulsion, au travers d'architectures en rupture de type Open Fan permettant un saut de rendement propulsif et la poursuite de l'accroissement des températures de cycle afin d'améliorer encore le rendement, ce qui se traduit aussi par une plus grande compacité. Le
- recours à la fabrication additive autorise la conception d'échangeurs très performants pour le management thermique de ces moteurs très chauds.
- L'hybridation électrique du turbofan permet d'assister son opération dans toutes les phases de vol, et de maximiser les synergies avec la tendance à l'électrification des fonctions non propulsives.
- Le concept de roulage électrique au sol permet un meilleur rendement que l'utilisation des moteurs au ralenti.

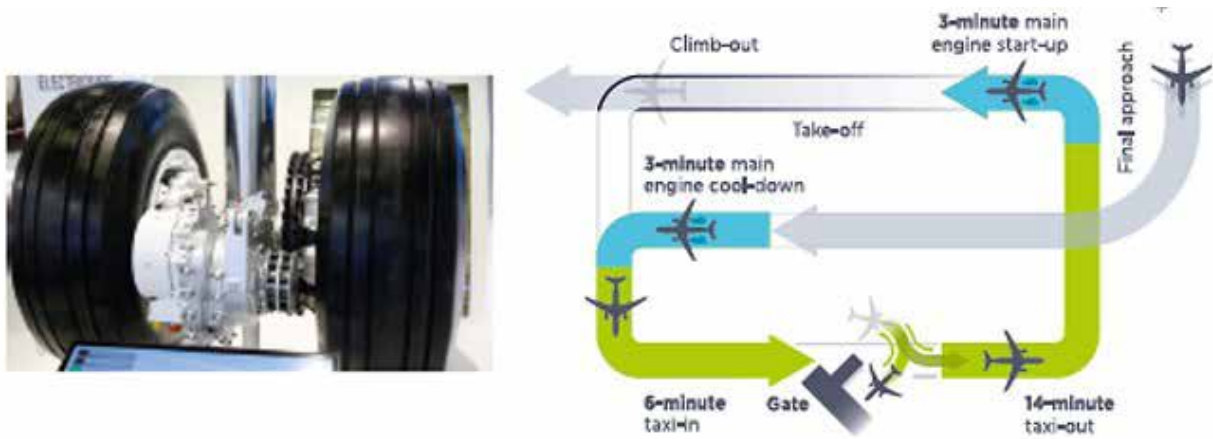


Figure 7 : Grâce à des moteurs électriques intégrés dans les roues et alimentés par l'APU, les émissions en roulage au sol dans l'aéroport peuvent être réduites de 60 % pour le CO₂ et de 50 % pour les NOx (© Safran).

Dans ce qui suit, nous nous focaliserons sur les axes hybridation et « avion plus électrique ».

L'augmentation de la puissance électrique nécessaire pour alimenter les différentes charges des avions dits « plus électriques » ou à propulsion électrique ou hybride impose soit d'augmenter les niveaux de tension usuels de l'aéronautique afin de limiter les courants, soit d'envisager la mise en œuvre de technologies supraconductrices. Le centre de recherche de Safran travaille sur ces deux axes.

Premier axe de recherche

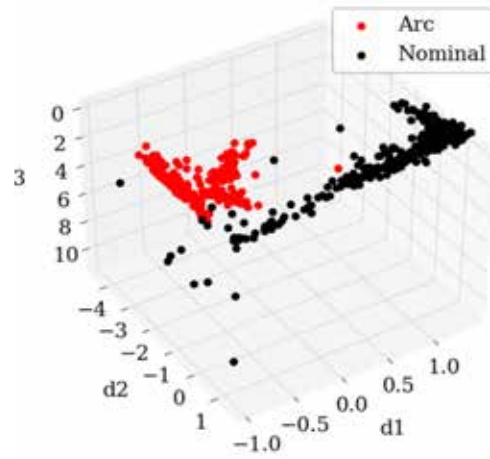
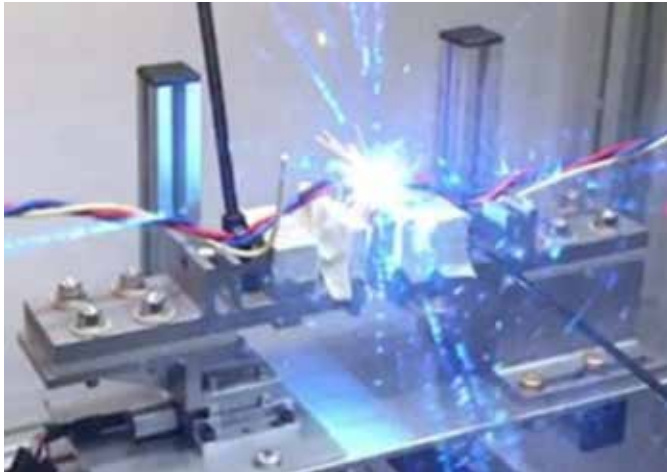
Des tensions comprises entre 540 VDC et 1 000 VDC sont envisagées en fonction des architectures propulsives ou non propulsives qui seront retenues par les avionneurs. Ces niveaux de tension font apparaître des phénomènes physiques tels que les décharges partielles (DP), dans des systèmes qui en étaient exempts jusqu'ici, et dont les caractéristiques, comme leur seuil d'apparition, vont être aggravées par rapport aux applications terrestres par la variation de pression avec l'altitude.

Ces décharges dégradent progressivement les isolants jusqu'à la rupture et le court-circuit du système dans lequel elles se produisent. Leur signature électrique, d'amplitude très faible (quelques mV), est très difficile à identifier.

Afin de proposer des technologies électriques robustes et fiables mais compatibles des contraintes propres à l'aéronautique (en termes de masse et de volume) Safran Tech développe différents modèles et outils permettant la prédiction des contraintes aux bornes des systèmes électriques et l'identification des points faibles potentiels. Le but est ici de les corriger dès la phase de design. Cette approche consiste aussi à proposer des matériaux plus résistants et à quantifier les marges. Les systèmes réalisés suivant cette méthodologie sont ainsi définis « exempts de décharges partielles par design » (ou "PD-free"). Mais, encore faut-il le vérifier ! C'est sur ce second aspect que porte une autre partie des travaux. Citons par exemple l'utilisation de capteurs enfouis dans le bobinage des machines électriques permettant *via* des filtrages et des traitements numériques la détermination des seuils d'apparition des décharges partielles, vérifiant ainsi nos designs. Enfin, une approche reposant sur



Figure 8 : Exemple de tests de décharges partielles sur une machine 500 kW réalisés chez Safran (© Safran).



Figures 9 et 10 : Reconnaissance par IA d'un arc électrique produit par séparation d'électrodes (© Safran).

la reconnaissance des DP en service (utilisant par exemple de l'IA) et la détermination de la durée de vie sous DP des matériaux permet la construction d'une approche de maintenance prédictive des systèmes électriques.

Safran Tech travaille également sur un autre type de décharge : les arcs électriques, qu'ils se produisent au sein des éléments de coupure (contacteurs) ou en cas de défaut.

Dans le premier cas, il s'agit de développer des outils de modélisation et de simulation de type magnétohydrodynamique (MHD), capables d'aider au dimensionnement optimisé des composants susceptibles de fonctionner dans des environnements sévères (basse pression, vibrations, très forts courants, etc.).

Dans le second cas, il s'agit de développer, sur la base d'acquisition d'observables physiques simples (courant, tension...), des algorithmes utilisant des techniques de l'intelligence artificielle (par exemple le machine learning) permettant une détection fiable et robuste de ce type de défauts.

Deuxième axe de recherche

Le deuxième axe de recherche se focalise sur le développement de machines électriques supraconductrices pour des applications propulsives de forte puissance. En effet, les définitions des futures configurations avions pouvant embarquer de l'hydrogène sont aussi propices à l'introduction de telles technologies, la source de froid étant déjà présente. La technologie supraconductrice autorise des fonctionnements à forte densité de courant (ratio courant sur surface d'un conducteur). Les matériaux supraconducteurs ont la propriété de posséder une résistivité nulle à des températures cryogéniques ($< -200^{\circ}\text{C}$), limitant très fortement les pertes par effet joule et autorisant donc l'utilisation de densité de courant 100 à 1 000 fois plus importante que des technologies de fils en cuivre conventionnelles. D'autres matériaux massifs supraconducteurs ont la caractéristique de dévier les lignes de champ magnétique, là où des aimants classiques

les canalisent. Ces deux types de matériaux supraconducteurs ont fait l'objet d'investigations dans notre département, avec l'étude et la réalisation de deux machines électriques à inducteur supraconducteur et modulation de flux pour des puissances de 50 kW et 500 kW.

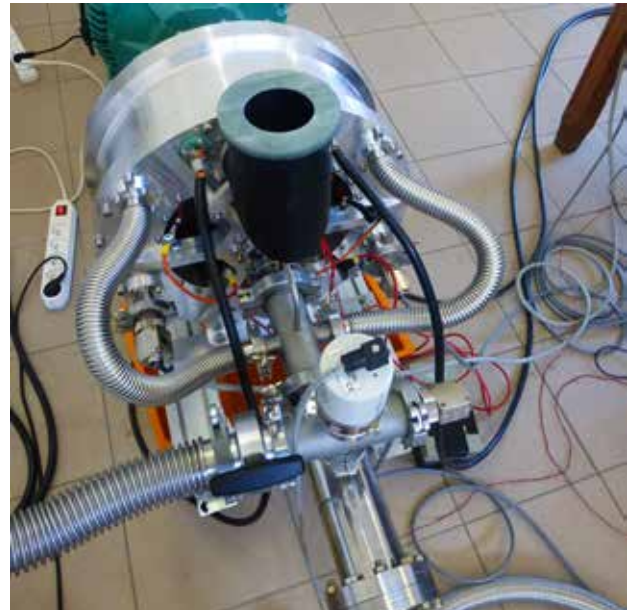
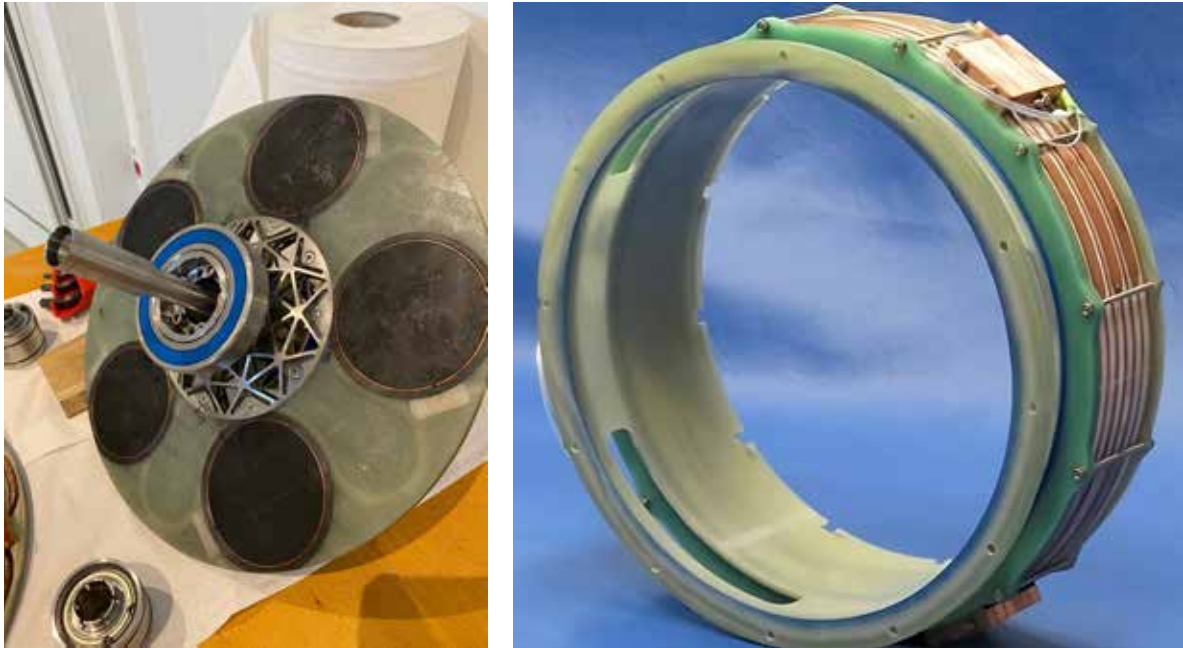


Figure 11 : Machine 50 kW partiellement supraconductrice (© Safran).

Autres approches

- Outre l'émergence de ces technologies non conventionnelles, des efforts sont également à apporter sur les topologies « classiques » de machines électriques, afin de rendre toujours plus performants ces équipements sur des réseaux haute tension. Par exemple, des travaux sont menés sur la réalisation d'aimants possédant une orientation magnétique prédéfinie par optimisation. Ces travaux vont du matériau aux procédés de fabrication, en passant par la méthodologie d'orientation du champ magnétique.

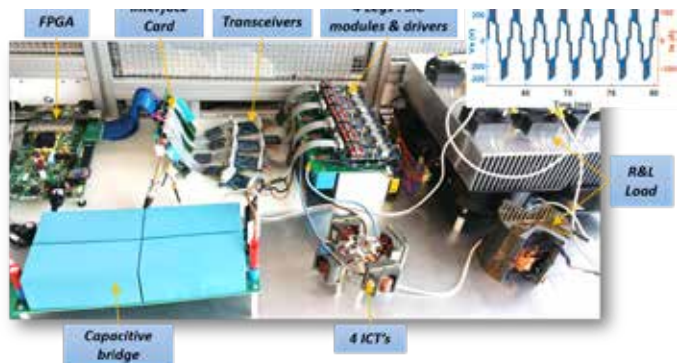


Figures 12 et 13 : Rotor et bobinage supraconducteur 50 kW (© Safran).

Un deuxième exemple est l'architecture de refroidissement par l'utilisation de conducteurs creux ayant le double rôle de transporter des courants et du fluide et pouvant s'appuyer sur des technologies de fabrication additive. Ces machines électriques sont pilotées par des convertisseurs à base d'électronique de puissance.

- Les matériaux tels que le carbure de silicium (SiC) et le nitrure de gallium (GaN) utilisés dans les composants à semi-conducteur de puissance apportent une rupture technologique indéniable dans les électroniques de puissance du XXI^e siècle. En effet, classés comme semi-conducteurs à large bande interdite (wide band gap en anglais), ces nouveaux dispositifs permettent d'atteindre des performances surpassant l'état de l'art du matériau silicium. Utilisés comme interrupteurs pour aiguiller l'énergie dans un convertisseur de puissance,

ils présentent un meilleur comportement en température (basse ou haute), une tenue à des champs électriques plus élevés (SiC), une rapidité de fonctionnement accrue (commutation entre les états passant et bloqué). Afin de répondre aux besoins de l'électrification des avions (fonctions propulsives et non propulsives), nous mettons en œuvre ces nouveaux composants à semi-conducteur de puissance en nous focalisant sur des solutions de packaging de puissance optimisés électriquement et thermo-mécaniquement ; sur des circuits de commandes rapprochés permettant de faire le suivi de l'évolution de paramètres électriques liés au vieillissement du composant à semi-conducteur et d'en compenser certaines dérives ; et sur des topologies de convertisseurs de puissance à rendement élevé, à haute disponibilité et à forte intégration, utilisant ces composants de manière optimale.



Figures 14 et 15 : Vue interne d'un module de puissance 1,2 kV SiC MOSFET et phase 18 kW d'un onduleur SiC multiniveau entrelacé couplé (© Safran).

- En contrepartie de leurs avantages importants, ces nouveaux composants entraînent des contraintes supplémentaires liés à la compatibilité électromagnétique (CEM). La CEM est garante du bon fonctionnement des équipements électriques dans leur environnement en s'assurant qu'ils ne se perturbent pas entre eux. Bien que les niveaux d'émissions conduites fixés par la norme DO-160G (norme de référence dans l'aéronautique civile) soient probablement révisables pour les nouvelles architectures de réseaux électriques, les besoins de filtrage restent indispensables. La diminution constante des temps de commutation, et donc l'augmentation des gradients de tension et de courant (dv/dt et di/dt), bénéfiques à la réduction des pertes de commutation, représentent un problème inhérent à la pollution électromagnétique. Des filtres haute fréquence spécifiques destinés à réduire les émissions conduites ont un impact direct sur le volume et la masse des convertisseurs. La diminution de cette masse uniquement dédiée à du filtrage est un axe contributeur à la réduction de la consommation de carburants. Statistiquement, on établit que 30 % à 40 % de la masse et du volume d'un convertisseur sont réservés aux éléments de filtrage réalisés à l'aide de composants conventionnels (inductances, condensateurs...). Ces éléments passifs doivent être dimensionnés pour résister aux limites électriques (courant ou tension) imposées par la puissance de la structure, tout en limitant leur impact sur la masse.

L'augmentation des fréquences de commutation et les forts gradients de courant et de tension produits par la commutation de composants à base de SiC ou de GaN intensifient le spectre des perturbations sur la gamme spectrale prévue par les normes en émission (par exemple DO160G section 21). Ce passage aux hautes fréquences, typiquement dans les zones où les gabarits normatifs imposent les niveaux les plus bas, augmente naturellement les besoins d'atténuation des filtres. Les briques filtrantes doivent avoir des plages de fonctionnement étendues en fréquence où le comportement des matériaux devient critique. Le besoin d'une densité de puissance toujours plus élevée repousse plus loin encore les limites de l'intégration des composants. Les dispositifs conventionnels (par exemple : convertisseur + câbles + machines) sont remplacés par des équipements plus compacts dans lesquels les convertisseurs sont intégrés aux machines électriques (appelées "smart-machines"). Le convertisseur, la machine et le système de refroidissement sont placés dans la même enveloppe. Il en résulte des couplages capacitifs et inductifs directs entre les différents constituants. Avec l'augmentation des gradients de tension et de courant, les sources d'interférences des convertisseurs génèrent des niveaux de perturbations encore plus néfastes pour les charges et d'autant plus contraignants pour les filtres. Une nouvelle répartition des cellules filtrantes peut être nécessaire, comme celle illustrée à la Figure 16.

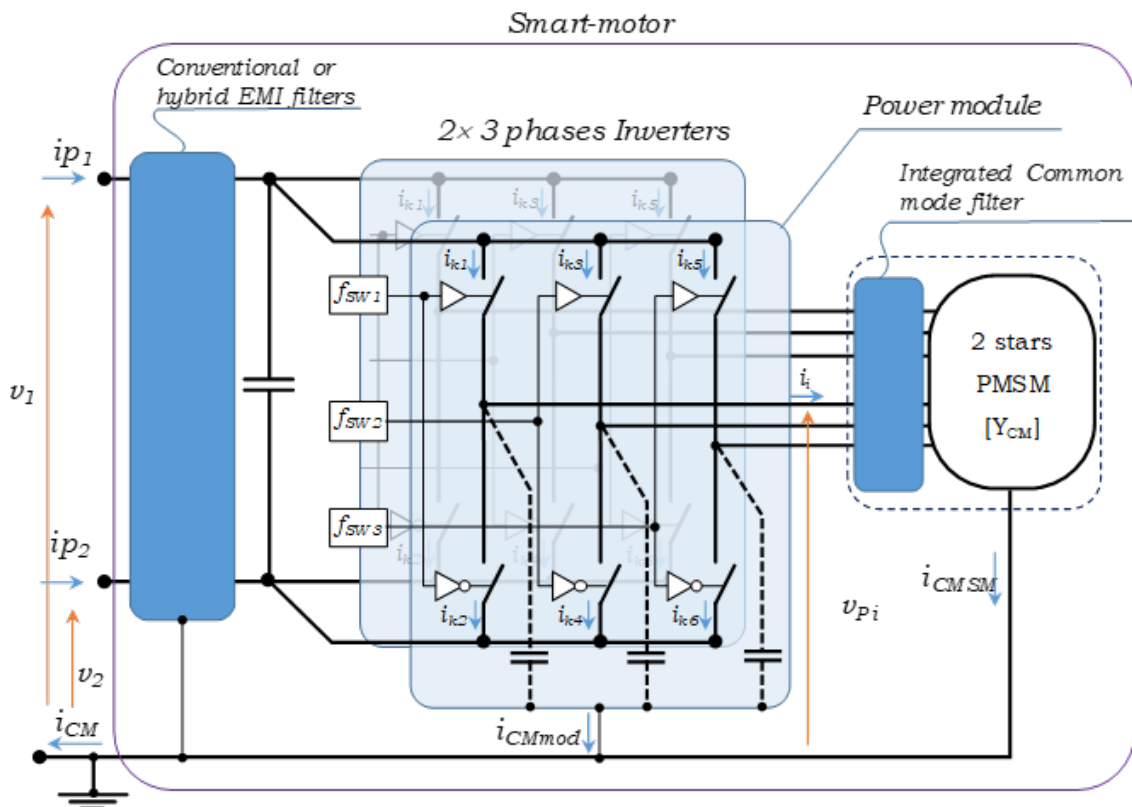


Figure 16 : Exemple de topologie d'un "smart-motor" avec filtres distribués (© Safran).

De tels agencements sont également conçus pour assurer un degré élevé de fiabilité, en offrant une certaine redondance (par exemple, double stator et onduleur). Les étages de filtrage doivent contribuer à améliorer la fiabilité de fonctionnement tout en s'inscrivant dans cette tendance tournée vers l'intégration. Les éléments inductifs (par exemple inductances de mode commun) restent la partie la plus délicate à dimensionner et à intégrer du fait de leur volume important. Pour s'assurer un dimensionnement optimal qui réponde aux exigences normatives, Safran Tech travaille sur la modélisation haute fréquence des chaînes de puissance validée par tests afin de prédéterminer

toutes les interactions électromagnétiques entre les équipements de puissance, pour proposer des contre-mesures efficaces à moindre coût de masse et de volume.

Dans cet article, nous développons l'axe hybridation électrique, mais plus de 75 % du programme de recherche de Safran est consacré à la décarbonation, en ignorant aucune piste. L'optimisation des technologies s'appuie sur une recherche poussée dans le domaine des matériaux ainsi que sur les nouvelles méthodes et outils développées par le centre de recherche, en s'appuyant, entre autres, sur de l'intelligence artificielle.

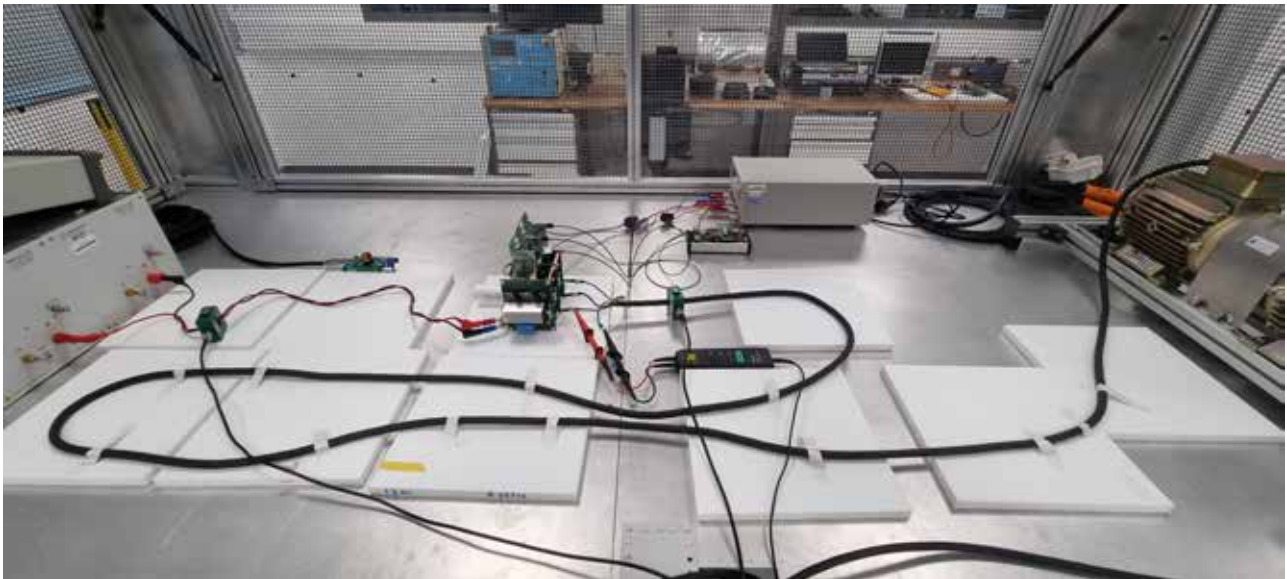


Figure 17 : Banc d'essais et de validation des modèles (© Safran).

Réduire la consommation énergétique des avions

Par Alain CASSIER

Membre honoraire de l'Académie de l'Air et de l'Espace

Comme tous les secteurs de l'économie, le transport aérien doit faire face aux défis de la réduction des émissions de gaz à effet de serre.

Dans ce cadre, il doit absolument trouver les moyens de limiter sa consommation d'énergie ; et pour éviter que celle-ci ne soit obtenue qu'au travers d'une limitation du trafic, il n'a d'autre choix que d'augmenter son efficacité en termes d'énergie par passager et par kilomètre parcouru. Cette amélioration de l'efficacité énergétique peut être recherchée au niveau de l'utilisation des avions (optimisation des routes, du remplissage des avions, de la gestion du trafic), mais surtout au niveau de l'efficacité énergétique de l'avion lui-même (c'est-à-dire en réduisant l'énergie qu'il consomme pour voler).

Les principaux programmes de recherche en cours actuellement portant sur la réduction de consommation des avions en Europe et aux États-Unis sont "Clean Aviation", porté par la Commission européenne, "Transonic Truss Braced Wing" soutenu par la Nasa, et "Jetzero Z5 BWB" par l'US Air Force. Nous analysons dans cet article les évolutions de la conception de la cellule de l'avion qui pourraient en résulter, et les gains d'efficacité énergétique correspondants.

Le transport aérien face aux défis de la décarbonation

Comme tous les secteurs de l'économie, le transport aérien doit faire face aux défis de la réduction des émissions de gaz à effet de serre. Ces défis sont particulièrement élevés du fait de la croissance prévue du trafic mondial et de sa conséquence sur l'accroissement de sa consommation en énergie, qui demande une réponse rapide et efficace, et de la difficulté d'intégrer dans un avion des systèmes de propulsion décarbonés comme ceux utilisant l'hydrogène ou les batteries électriques comme source d'énergie.

À court et moyen termes, les seules solutions réalistes trouvées pour remplacer le kérosène fossile pour les avions moyen-long-courriers (qui produisent l'essentiel des émissions de CO₂ du transport aérien) font appel aux SAF (*sustainable aircraft fuels*), qui sont des fuels synthétiques fabriqués à partir de la biomasse ou par synthèse à partir de l'hydrogène et du gaz carbonique.

Le problème est que la production des SAF est contrainte, soit par la disponibilité de la biomasse en quantité suffisante, soit par la quantité d'énergie verte requise pour sa fabrication, dont le rendement est de l'ordre de 40 %.

Dans ces conditions, le transport aérien doit absolument trouver les moyens de limiter sa consommation d'énergie ; et pour éviter que celle-ci ne soit obtenue qu'au travers d'une limitation du trafic, il n'a d'autre choix que d'augmenter son efficacité en termes d'énergie par passager et par kilomètre parcouru.

Cette amélioration de l'efficacité énergétique peut être recherchée au niveau de l'utilisation des avions (optimisation des routes, du remplissage des avions, de la gestion du trafic), mais surtout au niveau de l'efficacité énergétique de l'avion lui-même (c'est-à-dire en réduisant l'énergie qu'il consomme pour voler).

Les voies d'amélioration de l'efficacité énergétique des avions

Les données relatives à l'évolution des performances des avions du fait des progrès de la technologie montrent une réduction de la consommation kilométrique par passager (pkt) très importante (division par 4) depuis les années 1950. Cette réduction provient pour moitié des gains sur l'efficacité des moteurs installés (c'est-à-dire incluant l'effet des prélèvements de puissance pour le fonctionnement des systèmes et la traînée des nacelles), et de gains sur l'aérodynamique de la cellule, des réductions de masse de la cellule équipée et de l'amélioration de l'efficacité des systèmes de l'avion.

Ces gains seront beaucoup plus difficiles à réaliser au fur et à mesure de la maturation de la technologie aéronautique, et ils risquent d'être plus coûteux en effort de développement ou en utilisation. Cependant, le renchérissement prévisible de l'énergie utilisable par le transport aérien devrait motiver l'intensification de la recherche de solutions, et permettre l'amélioration de l'efficacité énergétique du transport aérien va se poursuivre, voire s'intensifier.

Compte tenu du cycle de développement des avions et de la maturité technique et industrielle requise pour toute nouvelle solution technologique, les technologies retenues pour les nouveaux avions qui seront introduits en 2030-2035 doivent être en développement aujourd'hui. Les programmes de recherche en cours donnent donc des indications sur les technologies considérées à cet horizon.

Les principaux programmes de recherche en cours actuellement portant sur la réduction de consommation en Europe et aux États-Unis sont "Clean Aviation" porté par la Commission européenne (CE), "Transonic Truss Braced Wing" soutenu par la NASA, et "Jetzero Z5 BWB" par l'US Air Force. Nous allons analyser dans la suite de l'article les gains qui pourraient en résulter.

Mais en premier, il est nécessaire de présenter les différents facteurs qui déterminent la consommation d'un avion. Il s'agit de :

- l'efficacité du système de propulsion ;
- de la traînée à portance nulle de l'avion complet, principalement due à la friction de l'air sur la cellule ;
- de la traînée induite par la portance équilibrant le poids de l'avion.

Pour réduire la consommation de carburants, il faut donc agir sur ces trois facteurs. Dans les lignes qui suivent, on traitera uniquement des solutions relatives à la conception de la cellule de l'avion, incluant l'intégration du système de propulsion mais excluant celles relatives à la conception de ce système.

Les nouvelles configurations

Parmi les solutions pour réduire la consommation de carburants, celles relatives à la configuration générale de l'avion sont les plus visibles, et présentent un potentiel d'amélioration de l'efficacité énergétique important.

La configuration qui s'est imposée au cours du temps pour tous les avions de transport civils est celle du fuselage tubulaire, qui sert de compartiment pour la charge marchande (passagers et fret), et de l'aile, qui contient les réservoirs de carburants et assure la portance (configuration *tube and wing* en anglais : TAW). Cette solution s'avère efficace, car la cabine a la même architecture que celle des autres moyens de transport, et plaît aux passagers qui restent proches des hublots ; la masse du carburant logé dans l'aile est équilibrée directement par la portance aérodynamique ; et cette configuration permet de séparer les fonctions du fuselage et de l'aile. De plus, elle est efficace pour assurer le contrôle du vol, avec un couplage faible des gouvernes latérales (disposées en extrémité de voilure) et longitudinales disposées à l'arrière du fuselage sur les empennages.

Deux évolutions possibles de cette configuration font l'objet de programmes de recherche aux États-Unis et en Europe, et sont analysées ci-après.

Aile volante

Dans la configuration traditionnelle TAW, le fuselage a un impact négatif sur l'efficacité aérodynamique, car il ne porte pas ou peu et il traîne. Dans la configuration aile volante (ou BWB : *blended wing body*), il n'y a pas de fuselage et la cabine est intégrée dans l'aile, ce qui conduit à une réduction de surface mouillée – d'autant plus qu'il n'y a pas d'empennage horizontal –, et ainsi à une réduction de la traînée de frottement.

La répartition de portance en envergure est plus uniforme et plus proche de la répartition théorique optimale elliptique, et ceci réduit la traînée induite par la portance.

Au total, les calculs théoriques prédisent un gain de l'ordre de 30 % sur la finesse maximale par rapport à la configuration TAW. Ce chiffre dépend évidemment de la définition détaillée des configurations TAW et BWB comparées.

L'idée de l'aile volante n'est pas nouvelle, mais n'a pas débouché sur des réalisations opérationnelles pour l'instant. Les raisons sont liées aux difficultés et risques à surmonter, dont les principaux sont :

- de nombreux sièges de la cabine sont éloignés des hublots, qui, de plus, offrent une vue d'intérêt limité car ils regardent à la verticale, soit vers le haut soit vers le bas ;
- le positionnement et le dimensionnement des issues est plus compliqué ;
- il y a une pénalité en masse du fait de la section non circulaire de la cabine pressurisée ;
- le dimensionnement de la partie centrale de l'avion sera complexe du fait des contraintes bidirectionnelles générées par la portance distribuée en envergure et la masse des passagers répartie longitudinalement ;
- le pilotage et la stabilité de l'axe longitudinal de l'avion sont délicats à assurer du fait de l'absence de stabilisateur horizontal ;
- la compatibilité avec les installations aéroportuaires doit être assurée ; or celles-ci sont optimisées pour la configuration TAW.



Figure 1 : Vue d'artiste de la configuration BWB de JetZero (Source : US Air Force).

La proposition de la *start-up* californienne JetZero (associée à Northrop Grumman) faite à l'US Air force vise à démontrer la faisabilité de dériver une version ravitailleur militaire d'un avion de transport civil. Le choix du contractant JetZero associé à Grumman vient d'être

fait avec un objectif de mise en vol d'un démonstrateur de ce ravitailleur à l'échelle 12,5 % en 2027. Jetzero prétend avoir trouvé des solutions aux problèmes cités plus haut, et pouvoir obtenir un gain d'efficacité de l'ordre de 50 % (qui semble surestimé) par rapport aux avions de la génération actuelle monocouloir. Leur objectif est de mettre en service une version de transport de passagers pouvant transporter 250 passagers sur 5 000 miles nautiques (environ 9 300 km) d'ici la fin des années 2030.

Cette configuration BWB présente en outre l'avantage de disposer de volumes importants, qui pourraient servir à l'installation de réservoirs d'hydrogène pour une future version utilisant l'hydrogène comme carburant : l'hydrogène nécessite en effet des volumes de réservoirs beaucoup plus importants que le kérosène.

Il est clair que les délais de développement et de certification d'une configuration aussi novatrice et l'atteinte des objectifs d'efficacité énergétique sont très incertains, d'autant plus que le financement de la version de transport de passagers ne semble pas assuré. Mais l'adossement à un programme militaire est une solution qui peut crédibiliser le projet et en réduire les risques, en particulier financiers.

Augmentation de l'envergure

La traînée relative à la portance (égale au poids de l'avion) représente près de la moitié de la traînée totale de l'avion en vol de croisière. Cette traînée est inversement proportionnelle au carré de l'envergure ; il y a donc intérêt à augmenter l'envergure pour réduire la puissance nécessaire au vol, et donc réduire la consommation d'énergie.

Mais augmenter l'envergure a des inconvénients : ceci augmente les efforts dans l'aile qui devient plus difficile à dimensionner en résistance et en stabilité aéroélastique, avec répercussion sur la masse, et pose le problème de compatibilité avec les aéroports.



Figure 2 : Extrémité d'aile repliable B777X (Source : Boeing).

En effet, augmenter l'envergure tout en maintenant la surface de l'aile constante pour ne pas augmenter la traînée de frottement conduit à une réduction de la section de l'aile et corrélativement de la résistance et de la rigidité : les déformations sous les efforts de

portance augmentent, jusqu'à poser des problèmes de stabilité aéroélastique à grande vitesse. Une part importante des aéroports ont des taxiways limitant l'envergure à 65 m (taxiway code E) : c'est cette limitation qui a conduit Boeing à installer des extrémités d'aile repliables sur le B777X au prix d'une masse et d'une complexité supplémentaires. Les avions plus petits, en particulier les monocouloirs, ont une marge plus importante par rapport à cette limite, et l'augmentation de leur envergure est donc plus envisageable.

L'objectif du programme "Transonic Truss Braced Wing" (projet Boeing X66) est d'évaluer l'intérêt d'un doublement de l'envergure par rapport aux avions actuels.



Figure 3 : Vue d'artiste projet X66 de Boeing (Source : Boeing/NASA).

Pour réduire les efforts d'aile et faciliter son dimensionnement aéroélastique, des haubans contribuant à la portance aérodynamique sont installés comme indiqué sur la représentation ci-dessus ; les extrémités d'aile sont repliables. Cette solution permettrait de réduire la consommation en croisière de 15 % selon Boeing.

Le programme de recherche européen "Clean Aviation" comprend également une partie dédiée aux ailes de grand allongement, avec un objectif de gain de consommation de 10 % à 13 % pour une solution de motorisation UltraFan (Turbofan à grand taux de dilution, donc Fan de très grand diamètre) et jusqu'à 17 % pour une solution Open Rotor (ces chiffres incluent les gains provenant de la motorisation). Ce programme permettra de réduire la marge d'incertitude importante sur les gains réalisables.

Aérodynamique des composants et intégration propulsive

Une part importante de l'amélioration de l'efficacité aérodynamique peut provenir de changements d'architecture avion comme expliqué au paragraphe précédent. Des solutions relatives à l'aérodynamique des composants de l'avion sont cependant possibles avec des gains plus modestes. Une de ces solutions faisant partie du programme "Clean Sky" consiste à essayer de conserver un écoulement le plus possible laminaire à la surface de l'aile et des empennages et dérive de l'avion, de manière à minimiser le coefficient de traînée de frottement de l'air.

Ceci peut être obtenu de deux façons : de façon passive en jouant sur la géométrie des composants – pour éviter les re-compressions trop rapides, génératrices de décollements et de turbulences –, et sur leur état de surface. Des gains de l'ordre de 1,5 % de traînée globale ont pu être démontrés sur un A340 avec aile laminaire ; mais le problème actuellement non résolu est de maintenir la qualité d'état de surface en opération, ce qui nécessite des qualités de revêtement anti-adhérent et des dispositifs de nettoyage des salissures, en particulier celles dues à l'écrasement d'insectes.

La deuxième façon est active et fait appel à l'aspiration de la couche limite avant qu'elle ne devienne turbulente, et est plutôt envisagée pour les fuselages ; il faut dans ce cas accepter une pénalité en masse, coût et consommation d'énergie du dispositif d'aspiration. Une solution consiste à installer les moteurs à l'arrière du fuselage, où ils aspirent tout ou partie de l'écoulement de surface du fuselage (couche limite). Dans ce cas, il y a malgré tout une pénalité de performance pour les moteurs, qui aspirent un écoulement ralenti et turbulent affectant les performances du compresseur du moteur.

On peut également chercher à réduire la surface mouillée de l'avion sans remettre en cause son architecture : c'est l'objectif de l'Innovative Empennage Project inclus dans le programme "Clean Sky", concernant une géométrie d'empennage compacte.

L'intégration de la propulsion a un impact important sur l'efficacité aérodynamique de l'avion. En fait, les performances de la motorisation installée sont toujours inférieures à celle de la motorisation isolée, en raison de l'effet des interactions avec la cellule et les prélèvements de puissance nécessaires au fonctionnement des systèmes de l'avion.

L'intégration de la motorisation est d'abord un problème de choix d'architecture avec deux solutions possibles : moteur sous l'aile ou à l'arrière du fuselage. Le choix de solution doit prendre en compte l'effet de l'interaction aérodynamique entre le moteur et la cellule de l'avion, principalement la voilure dont l'écoulement est perturbé par celui du moteur, mais fait intervenir d'autres paramètres que celui de l'efficacité aérodynamique, tels que bruit au sol et en cabine, et la protection contre l'éclatement turbine et l'éjection de parties de pales dans le cas d'un Open Rotor. L'augmentation de la taille du moteur en complique l'intégration, notamment dans le cas d'une installation sous l'aile où l'obtention d'un jeu suffisant entre le moteur et le sol peut conduire à augmenter la longueur du train d'atterrissage et / ou à modifier la forme de l'aile.

Des travaux d'installation sont menés avec Airbus dans le cadre de "CleanSky2", afin de définir le meilleur couple moteur-avion. Il s'ensuivra une phase de démonstration pour une entrée en service envisagée après 2030. Des études ont également été lancées avec les autorités de certification pour faire évoluer la réglementation des architectures de moteur non carénées.



Figure 4 : Étude d'installation du moteur Open Fan
(Source : CFM International).

Masse et autres facteurs

La masse de la structure et des systèmes de l'avion joue un rôle important dans l'énergie nécessaire pour le vol, au travers de la traînée induite par la portance, qui représente près de la moitié de la traînée totale. Cet effet est augmenté par le phénomène dit « effet boule de neige » qui correspond au fait que lorsque l'on ajoute de la masse à un avion, celui-ci doit être redimensionné (par exemple la surface de la voilure doit être accrue pour augmenter sa portance), ce qui induit une masse supplémentaire : il y a donc un effet multiplicateur sur l'augmentation de la masse totale, qui va de 2 pour les court-courriers à 4 ou 5 pour les long-courriers (l'écart provient de la différence de masse de carburant).

Des gains de masse doivent donc être recherchés au niveau de la structure et des systèmes.

Pour la structure, on peut jouer sur les caractéristiques en résistance des matériaux et sur la réduction des efforts. Cependant, les performances des matériaux ont beaucoup progressé dans le passé, et le potentiel d'amélioration supplémentaire est limité à quelques pourcents. La part du programme "Clean Aviation" dédiée à la structure concerne plutôt des concepts structuraux plus efficaces (empennages arrière compacts par exemple), l'intégration structure cabine et systèmes et les nouveaux procédés de fabrication permettant des gains de masse et de coûts (composites thermoplastiques soudés).

La réduction des efforts de dimensionnement offre un potentiel de gains *via* la réduction des marges qui pourrait s'envisager du fait d'une meilleure connaissance des charges de vol, en particulier grâce aux systèmes de surveillance type HUMS (*health and usage monitoring systems*). Ceci nécessitera un changement des règles de certification des avions, et ne semble pas pouvoir être mis en pratique à court terme. La réduction des efforts peut également être obtenue par des lois de commandes de vols atténuant les charges dues aux turbulences et optimisant la répartition des charges de manœuvre : ces solutions sont déjà en pratique sur la dernière génération d'avions, mais leur effet pourrait être renforcé.

Pour les systèmes, on doit rechercher simultanément des réductions de masse et des réductions d'énergie consommée, et le bilan des gains doit être fait en liaison avec le système propulsif qui est le seul système (en

dehors de l'APU, *auxiliary power unit*) à générer de l'énergie à bord. La tendance actuelle est de remplacer les systèmes fonctionnant à l'énergie hydraulique et à l'énergie pneumatique (système de pressurisation et de conditionnement d'air) par des solutions utilisant l'énergie électrique. Les gains de telles solutions ne peuvent être évalués que sur la base d'un projet complet comprenant le système propulsif et les autres systèmes de l'avion. En effet, le résultat obtenu dépend des compromis qui sont faits entre des répercussions positives et négatives. Par exemple, le remplacement du système de conditionnement d'air cabine utilisant de l'air prélevé sur le compresseur des moteurs par une solution utilisant l'énergie électrique a un effet positif très important sur le rendement des moteurs, mais il est partiellement compensé par la masse et la consommation d'énergie des systèmes électriques qu'il faut installer en remplacement.

Conclusion

Les progrès de la technologie aéronautique ont permis une division par 4 de la consommation d'énergie des avions pour le transport d'un passager par kilomètre parcouru au cours des soixante-dix dernières années. La tenue des objectifs de réduction des émissions de gaz à effet de serre impose que cette réduction de consommation se poursuive, même si les gains deviennent de plus en plus difficiles à obtenir au fur et à mesure de la maturation de la technologie.

Les gains qui peuvent être obtenus par des modifications de l'architecture des avions et de leur voilure sont les plus importants, mais sont ceux qui sont les plus risqués financièrement et techniquement, en raison de l'importance des travaux de développement nécessaires et des incertitudes concernant l'atteinte des objectifs de performance et opérationnels.

Les améliorations en cours de développement dans le cadre des programmes de recherche en aéronautique européens et américains devraient permettre d'obtenir une amélioration de l'efficacité énergétique des avions de transport de passagers de l'ordre de 30 % de la nouvelle génération d'avions à la fin des années 2030.

« Cybersécuriser » l'aviation, un enjeu essentiel

Par Yannick ASSOUD

Directrice générale adjointe du Groupe Thales

Nous vivons dans un monde de plus en plus connecté, et l'aviation ne fait pas exception. Que ce soit dans le cockpit, dans la cabine ou au sol, la connectivité apporte une toute nouvelle dimension à la sécurité des vols, à l'efficacité opérationnelle des compagnies aériennes, ainsi qu'au confort et au plaisir des passagers. Cependant, ces nouvelles capacités s'accompagnent de préoccupations critiques en matière de cybersécurité, qui doivent être intégrées au cœur de la conception des nouveaux produits et systèmes, et tout au long de leur cycle de vie opérationnel. Dans cet article, Yannick Assouad, EVP Avionique du Groupe Thales, détaille ces enjeux de cybersécurité associés à l'essor du numérique dans l'aviation, présente le cadre réglementaire en devenir, et souligne l'importance capitale pour les acteurs du secteur aéronautique de livrer des équipements qui sont "cybersecure by design".

La cybersécurité est désormais un enjeu qui nous concerne tous, dans nos sphères personnelles comme professionnelles. Nous sommes aujourd'hui conscients des risques bien concrets associés au monde virtuel qui alimente notre quotidien par le biais d'applications et de systèmes connectés : des comptes réseaux sociaux piratés, des coordonnées bancaires usurpées, des données personnelles volées... mais il ne suffit pas d'avoir connaissance de ces dangers ; il faut prévenir, se protéger, adopter les bonnes pratiques, et savoir comment réagir en cas de faille, voire contrecarrer les attaques. Le secteur de l'aéronautique dans son acception la plus large, et à une échelle toute autre, doit également faire face à ces menaces.

C'était l'objet du rapport de référence sur la cybersécurité dans l'aviation, publié en 2019 par l'Atlantic Council et soutenu par Thales : l'industrie aéronautique récolte les fruits de la numérisation des quinze dernières années, mais cette évolution engendre aussi de nouveaux risques, notamment des vulnérabilités sociales et techniques qui n'avaient jamais été prises en compte auparavant. Comme le mentionne également le rapport, « toute perturbation peut rapidement avoir des répercussions internationales, causer d'importants préjudices financiers et de réputation, et potentiellement compromettre la sécurité ».

Dans cet écosystème de l'aviation, où les différents acteurs sont tous très interdépendants et de plus en plus interconnectés, la cybersécurité implique non seulement la protection des informations sous forme de données numériques, mais aussi les réseaux, sites web, services, ordinateurs et portails associés, qui partagent et permettent l'accès aux données.

L'ère de l'aviation connectée

Évoquons ici l'impact du numérique dans l'aviation, à savoir un des principaux leviers du renouveau du secteur à la suite de la crise liée à la pandémie, aux côtés des efforts engagés en matière de réduction de l'impact climatique du transport aérien.

Au sol, les opérations de l'ensemble de la chaîne aéronautique nécessitant le recours au numérique sont de plus en plus nombreuses. Dans les aéroports, tous les services sont connectés pour faciliter l'expérience des passagers et réduire la charge de travail des opérations aériennes. Les centres d'exploitation des compagnies aériennes sont de plus en plus numérisés, qu'il s'agisse des systèmes de gestion des équipages, des systèmes d'exploitation des vols ou des systèmes de gestion des passagers. Les centres de maintenance des avions sont devenus de véritables nœuds logiciels, les mises à jour des systèmes et des contenus circulant en permanence. Enfin, la gestion du trafic aérien dépend de capacités de communication, de navigation et de surveillance en temps réel, qui sont de plus en plus connectées.

Au-dessus de nos têtes, les avions sont devenus des pôles de communication et de données mobiles, qui devraient générer 98 millions de téraoctets de données d'ici 2026, selon le rapport de référence "MRO Big Data" de la firme Oliver Wyman (2016). Pour être plus efficaces, les systèmes du cockpit sont de plus en plus connectés à des sources du monde ouvert. Par exemple, afin d'optimiser les profils et les trajectoires de vol, les systèmes de gestion de vol de nouvelle génération de l'avion capitalisent sur les données météorologiques et de trafic en temps réel. De plus, au lieu de s'appuyer sur des supports papier et des dossiers à l'ancienne, les pilotes utilisent



Figure 1 : Les principaux risques de cyberattaques (Source : Thales).

désormais des bagages de vol électroniques (ou *electronic flight bags*), qui fournissent une multitude de ressources et d'applications utiles, connectées et mises à jour en permanence pour optimiser les opérations.

Enfin, côté cabine, les systèmes de divertissement et de connectivité à bord offrent aux passagers non seulement un moyen de s'occuper, mais également une large gamme de services qui peuvent être personnalisés par les compagnies aériennes en fonction du profil du passager, de la destination et du type de voyage, ainsi que des capacités de connectivité et de communication qui permettent au passager de se sentir aussi bien dans les airs qu'au sol !

Un cadre réglementaire en devenir

Les autorités aéronautiques, notamment l'ICAO (l'Organisation de l'aviation civile internationale), l'EASA (l'Agence européenne de la sécurité aérienne) ou la FAA (Federal Aviation Administration, américaine), pilotent la normalisation des règles de cybersécurité pour le domaine aérien, sur la base des conclusions de groupes de travail composés d'opérateurs et d'industriels. Ces avancées permettent la mise en place d'un cadre global pour les systèmes de gestion de la sécurité de l'information.

Au sein de l'ICAO, les travaux effectués donnent lieu à des normes et à l'identification de meilleures pratiques, à l'élaboration de procédures et de documents d'orientation (*guidance materials*), à des cellules de veille pour s'assurer que le cadre du droit aérien international soit adapté pour faire face aux cyberattaques contre l'aviation civile, à des exercices de sensibilisation aux différentes instances de l'aéronautique civile aux enjeux de la cybersécurité, ou encore au déploiement d'initiatives de renforcement des capacités en matière

de cybersécurité aérienne et de soutien à la mise en œuvre à l'intention des États et de l'ensemble de la communauté aéronautique.

Plus généralement, le secteur dans son ensemble est extrêmement actif dans ce domaine. Par exemple, l'ASD (Aerospace, Security and Defence Industries Association of Europe) dispose elle aussi d'un groupe de travail sur la cybersécurité dont l'objectif est de fournir des documents de synthèse de prise de position (*position papers*) sur les stratégies de cybersécurité dans l'aviation, et des organisations telles que l'EASA et l'EUROCAE (Organisation européenne pour l'équipement de l'aviation civile) coordonnent un certain nombre de comités consultatifs techniques dans des domaines tels que la formalisation d'orientations pour des procédures homogènes de gestion des risques, et l'identification des risques et des menaces pour la sécurité et leur impact sur le domaine aéronautique. Il va sans dire que Thales joue un rôle important dans tous ces développements.

L'atout essentiel du "cybersecure by design"

Pour des acteurs industriels comme Thales, cela signifie qu'il est essentiel de fournir des produits et des systèmes « cyberconçus », "cybersecure by design", c'est-à-dire résistants aux multiples risques réels de cyberattaques : vol de données, brouillage, injection de messages modifiés, signaux compromis (*spoofing*), corruption et actions malveillantes, etc. De fait, notre priorité est de garantir la sécurité et la résilience commerciale de ceux qui utilisent nos systèmes, qu'il s'agisse d'acteurs au sol (gestion du trafic aérien, d'aéroports, des opérations d'une compagnie aérienne) ou dans les airs (à bord des avions).

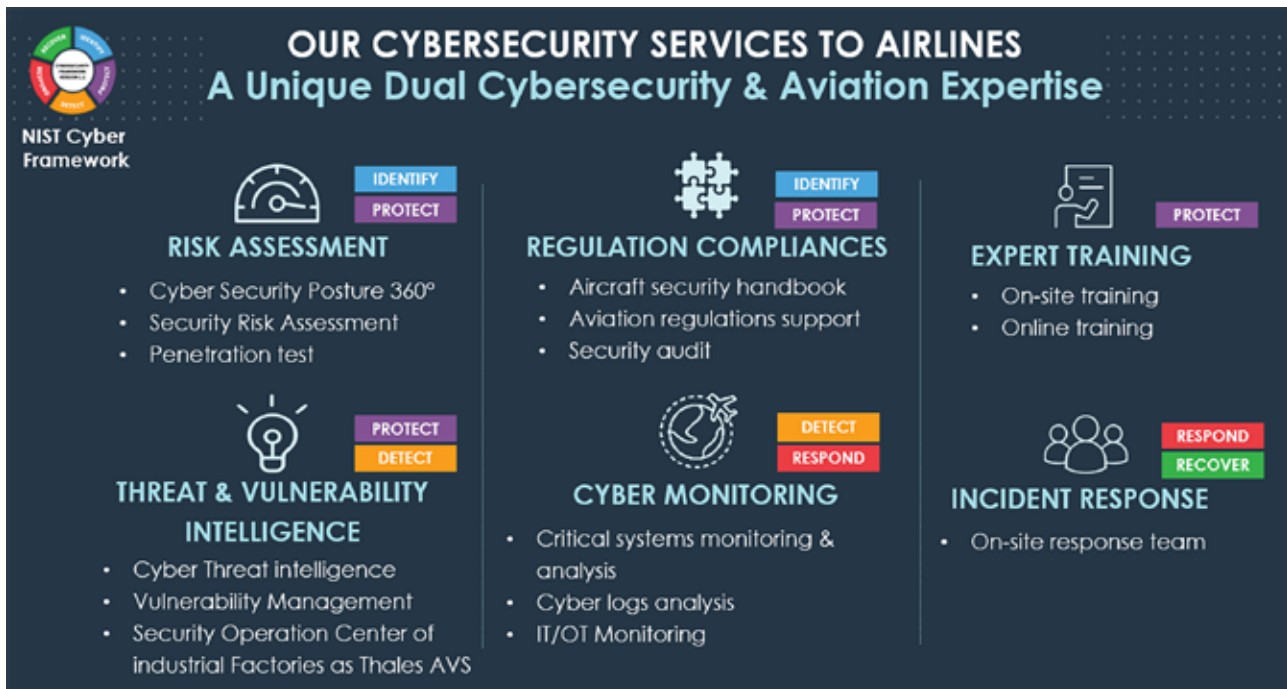


Figure 2 : Les services proposés par Thales (Source : Thales).

Nous avons intégré nativement la cybersécurité dans nos processus d'ingénierie et de fabrication en anticipant la conformité aux normes aéronautiques de cybersécurité telles que ED203-A/D0-256a, et en mettant en œuvre le cadre cybersécurité du NIST (National Institute of Standards and Technology) du ministère américain du Commerce – le cycle Identifier-Protéger-Détecter-Réagir-Prendre – pour nos solutions.

Le fait que Thales fasse partie de la chaîne de confiance de l'aviation signifie également que nous sécurisons nos livraisons de produits contre les modifications malveillantes en apportant des preuves de leur authenticité tout au long de leur cycle de vie, et en travaillant activement pour aider nos fournisseurs à être cyber-résilients.

Un exemple probant est notre produit FlytLINK Aviocast, qui offre des échanges de données en monde ouvert depuis le cockpit *via* une passerelle cybersécurisée, et qui peut être installé sur les flottes actuelles. Avec ce produit, nous sommes pionniers dans le déploiement automatisé des corrections de vulnérabilités cyber sur le terrain, ce qui réduit les coûts de maintenance et renforce la sécurité. Cela illustre la manière dont nous fournissons une protection de bout en bout, du cockpit à la cabine et aux systèmes au sol, créant ainsi une chaîne de données critiques sécurisée pour les opérations de vol.

Un autre cas d'école est la suite avionique de cockpit FlytX. Le matériel (écrans et interfaces homme-machine) comme le logiciel ont été dotés de capacités cybersécurisées dès la conception, que ce soit d'ailleurs pour un usage dans l'univers civil ou militaire. Lorsque nous parlons des principaux atouts de FlytX, nous soulignons des qualités telles que sa compacité, son orientation vers l'équipage, ses capacités de personnalisation et son statut de connexion

permanente et complète. Évidemment, les aspects de cybersécurité concernent principalement cette dimension « connectée », en tant que moyen de s'assurer que ces systèmes robustes ne comportent aucun angle mort, malgré les échanges constants avec des applications et des sources de données du monde ouvert... et c'est dans ce domaine que nous avons pleinement appliqué notre expertise interne en matière de cybersécurité.

Concrètement dans ce cas de figure, les serveurs de connectivité associés authentifient la légitimité des utilisateurs et des demandes, et les données sont filtrées pour être identifiées comme entièrement conformes et correctement formatées. Cette approche cybersécurisée dès la conception signifie que FlytX – ainsi que son « cerveau de navigation », le système de gestion de vol PureFlyt – est déjà totalement aligné sur les règles actuelles et à venir portant sur la cybersécurité de l'aviation.

Dans un contexte de menaces en constante évolution, Thales a aussi mis en place des unités dédiées pour répondre aux incidents de cybersécurité des clients (PSIRT, *product security incident response team*), qui peuvent être complétées par des services de surveillance de la « cybersanté ». Enfin, une offre structurée a également été conçue pour permettre à nos clients compagnies aériennes de faire de la cybersécurité une partie intégrante de leurs opérations. Cela va de l'élaboration d'une stratégie de cybersécurité et de son intégration dans leurs activités quotidiennes à la gestion d'une crise, en passant par l'engagement et la sensibilisation des opérateurs et des pilotes, ainsi que par le suivi permanent des principales menaces, pour une adaptation efficace des investissements en matière de cybersécurité.

Une approche dynamique et proactive

C'est en adoptant ce type d'approche dynamique et proactive au cœur de notre écosystème que nous pourrions collectivement porter l'aviation connectée vers de nouveaux sommets, tout en veillant à ce que les opérations de vol, les systèmes au sol et à bord, et l'expérience des passagers soient cyber-avérés, résilients et sécurisés. Je vous souhaite donc de bons vols en toute sécurité... et en toute cybersécurité !

Bibliographie

COOPER P. (2019), "Aviation cybersecurity: Scoping the challenge", Atlantic Council.

EASA, "Developing cybersecurity regulations in aviation & part-IS", <https://www.easa.europa.eu/community/topics/developing-cybersecurity-regulations-aviation-part>

HOYLAND T., SPAFFORD C. & MEDLAND A. (2016), "MRO Big Data – A lion or a lamb?", Oliver Wyman / Marsh & McLennan Companies, https://cavok.oliverwyman.com/content/dam/oliver-wyman/cavok/files/FINAL_MRO_Survey_2016_web.pdf

IATA, "Compilation of cybersecurity regulations, standards, and guidance applicable to civil aviation", <https://www.iata.org/contentassets/4c51b00fb25e4b60b38376a4935e278b/compilation-of-cyber-regs.pdf>

ICAO, "Aviation cybersecurity", <https://www.icao.int/aviationcybersecurity/Pages/default.aspx>

Jouer collectif pour booster notre compétitivité grâce au numérique, et gagner tous ensemble

Par Pierre FAURE

Président de l'AFNeT

La croissance, la création de richesses et d'emplois est possible dans l'industrie ; il suffit d'avoir la volonté de jouer collectif au sein des Comités stratégiques de filières (CSF), et de lancer des programmes ambitieux permettant d'entraîner l'ensemble des filières dans la révolution numérique.

Dans un monde où l'interconnexion et la collaboration s'imposent comme des leviers essentiels de compétitivité, d'innovation et de souveraineté, la transition numérique est en effet devenue une nécessité vitale pour assurer le développement de notre tissu industriel et sa transition écologique.

En vingt ans, l'industrie Aérospace & Défense a réussi à se positionner en leader mondial dans la numérisation de sa filière, grâce à la plateforme collaborative BoostAeroSpace et aux standards numériques développés avec l'aide de l'AFNeT.

Cet exemple illustre l'urgence et la nécessité d'adopter une démarche collective entre CSF, grands groupes, ETI, PME et pouvoirs publics, pour faire face aux défis contemporains.

Le numérique sécurisé est devenu le système nerveux de l'économie et un facteur-clé de compétitivité, d'innovation, de souveraineté, mais également un facteur-clé pour faciliter la transition écologique et énergétique.

Pour gagner en compétitivité, les entreprises ont commencé par optimiser et numériser leurs processus internes, puis, dans les années 1990, à collaborer avec leurs grands fournisseurs de rang 1.

Or, pour les grandes entreprises industrielles, plus de 80 % de la valeur des produits ou des services est réalisée par les fournisseurs, majoritairement PME. Dans la compétition internationale, où il faut gagner sur les

100 % de la chaîne de la valeur, plus aucune entreprise ne peut gagner seule ; la compétitivité se joue désormais au niveau de l'entreprise étendue.

Il est donc apparu nécessaire de numériser les échanges au-delà des fournisseurs de rang 1 pour faire fonctionner l'entreprise étendue comme une seule entreprise, en augmentant la valeur ajoutée des sous-traitants (en les faisant accéder à des activités de conception et monter dans la chaîne de la valeur), en tirant parti du meilleur de chacun de ses acteurs, et ainsi améliorer la qualité et la vitesse de conception des produits, réduire les coûts d'approvisionnement, et booster les services clients.

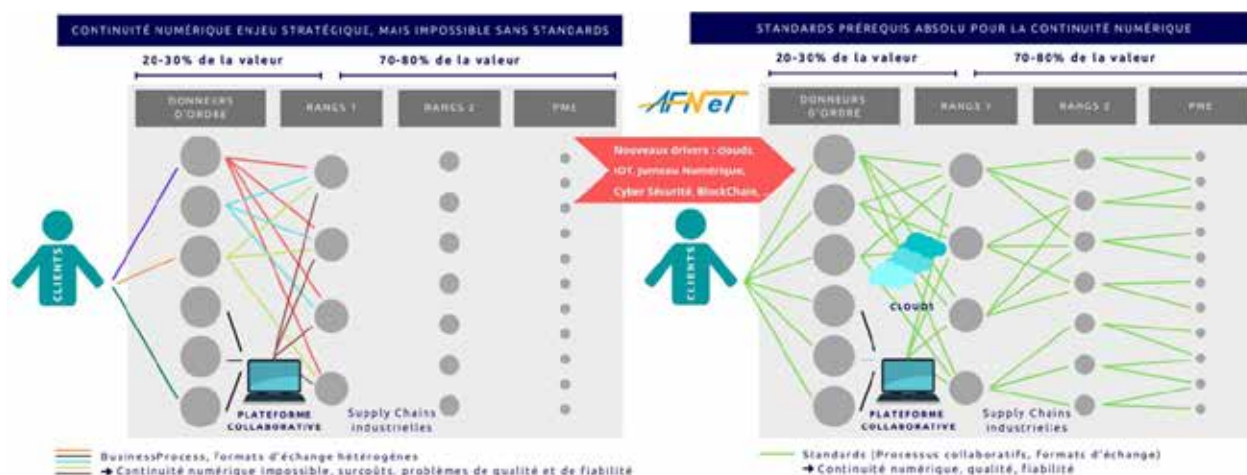


Figure 1 : La continuité numérique (Source : AFNeT).

C'est pour cela que le GIFAS et l'industrie aéronautique ont beaucoup investi depuis 2003, et lancé plusieurs projets complémentaires sur la continuité numérique au sein de la *supply chain*, et notamment sur les standards numériques qui en sont un prérequis absolu, en s'appuyant sur l'AFNeT, son bras armé numérique :

- e-PME : actions d'accompagnement régionales pour faciliter l'accès des PME au numérique ;
- BoostAero : standards logistiques, projet financé par Dassault Aviation, le GIFAS, Safran, Thales et Exostar ;
- SEINE : standards PLM (conception) et prototype de plateforme collaborative PLM ; le projet SEINE, porté par l'AFNeT, impliquant Airbus, Dassault Aviation, EADS, Safran et Thales, a été soutenu financièrement par la DGE dans le cadre du plan d'actions TIC&PME 2010, dont la coordination technique a été assurée par l'AFNeT ;
- BoostAeroSpace : *hub* numérique aéronautique européen, fondé par Airbus, Dassault Aviation, EADS, Safran et Thales ;
- PLM Task Force : standards PLM aéronautiques et automobiles internationaux.

Historique et investissements des travaux de l'aéronautique et des autres filières sur les standards

Cet effort collectif important (plus de 7 M€ en dix-huit ans) sur les standards a permis à l'industrie aéronautique française de faire jeu égal avec les Américains dans le domaine des standards logistiques et PLM, nécessaires pour BoostAeroSpace et les portails ou plateaux virtuels privés.

Le Programme ATLAS (2021-2023, 6 M€ financés par la BPI et les filières industrielles, dont 1,8 M€ par l'aéronautique), a étendu ses travaux à tous les domaines numériques stratégiques (ingénierie système, PLM, industrie du futur, logistique, maintenance, jumeau numérique, *data* & infrastructure, BIM) et à toutes les filières industrielles.

Le numérique « Système nerveux de l'économie », innovation de rupture

Le numérique apporte des innovations de rupture qui remettent en question les modèles économiques. Le plateau virtuel du Falcon 7X ou celui de l'Airbus A350 ont par exemple permis aux bureaux d'études de Dassault Aviation, d'Airbus et de leurs coopérateurs de partager la maquette numérique, et ainsi :

- d'améliorer la qualité en intégrant les contraintes de production et de support dès la conception ;
- de réduire considérablement les coûts et les cycles d'assemblage ;
- d'augmenter les ventes et par là-même les cadences.

Les gains peuvent donc se chiffrer en plusieurs pourcents de croissance ou de réduction des coûts pour les entreprises qui s'y engagent résolument.

Passer à la vitesse supérieure en œuvrant à l'échelle des secteurs industriels européens

Cette démarche d'amélioration et de numérisation des processus se poursuit au niveau des grandes entreprises, mais les solutions mises en place sont généralement spécifiques, ce qui limite les gains pour

- Etape 1 (2003- 2020) : projets financés par l'aéronautique et/ou la DGE

Nom	Années	Objet	Porteur	Financier	Budget
e-PME	2003-2004	Accompagnement PME	AFNeT	AFNeT	200 K€
BoostAero	2005-2020	Standards logistiques	AFNeT	Aéronautique	800 K€ + 100K€/an
SEINE	2006-2007	Standards et prototype AirDesign	AFNeT	DGE	800 K€
BoostAeroSpace	2009-20XX	Hub aéronautique	AFNeT puis BAS	Aéronautique	11 M€ + 2 M€/an
PLM Task Force	2015-2020	Standards PLM	AFNeT	Aéronautique + Auto + DS	500 K€/an

- Etape 2 (2021 – 2023) : projets financés par les filières industrielles et la BPI

ATLAS	2021-2023	Tous standards numériques	AFNeT Services	Filières industrielles et BPI	3 M€ + 3 M€
-------	-----------	---------------------------	----------------	-------------------------------	-------------

- Etape 3 (2022 – 20XX) : projets financés par les filières industrielles, portés par AFNeT Services

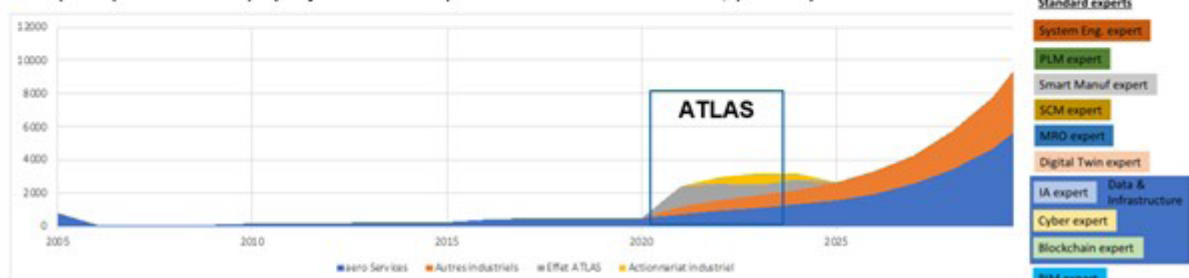


Figure 2 : Projets d'investissements (Source : AFNeT).

les fournisseurs de rang 1, obligés de multiplier les interfaces entre leurs systèmes d'information et ceux de leurs clients.

De plus, les investissements faits par les donneurs d'ordre sont généralement hors de portée des fournisseurs : ceux-ci ne peuvent donc pas faire les mêmes gains de compétitivité dans leurs relations avec leurs propres sous-traitants, souvent des PME, sans ressources informatiques suffisantes.

L'exemple de la filière Aérospatiale & Défense européenne : BoostAeroSpace

Quand BoostAeroSpace a été créée, il existait déjà une société du même type pour les pays anglo-saxons, Exostar, avec une approche similaire sur la *supply chain* et le fait de contribuer à l'amélioration de la collaboration entre les grands donneurs d'ordre et leurs fournisseurs de rang 1.

À l'époque, les grands industriels aéronautiques européens avaient des portails fournisseurs privés, ce qui pénalisait énormément leurs fournisseurs, qui devaient s'interfacer avec des systèmes hétérogènes, et n'avaient pas les moyens de développer leur propre portail fournisseurs.

Confrontée à cet enjeu de compétitivité, la filière Aérospatiale & Défense européenne, sous l'impulsion du GIFAS, d'Airbus, Dassault Aviation, EADS, Safran et Thales, a décidé en 2009 de créer le *hub* numérique aéronautique européen BoostAeroSpace, plateforme collaborative offrant des services de collaboration hautement sécurisés dans le domaine de la conception et des approvisionnements.

Cette plateforme collaborative est utilisée en mode *Software-as-a-Service* (SaaS) par les donneurs d'ordre, mais aussi par les fournisseurs de rang 1, 2, et les PME, permettant d'améliorer la collaboration entre les industriels, des donneurs d'ordre aux fournisseurs de rang n (Tier n).

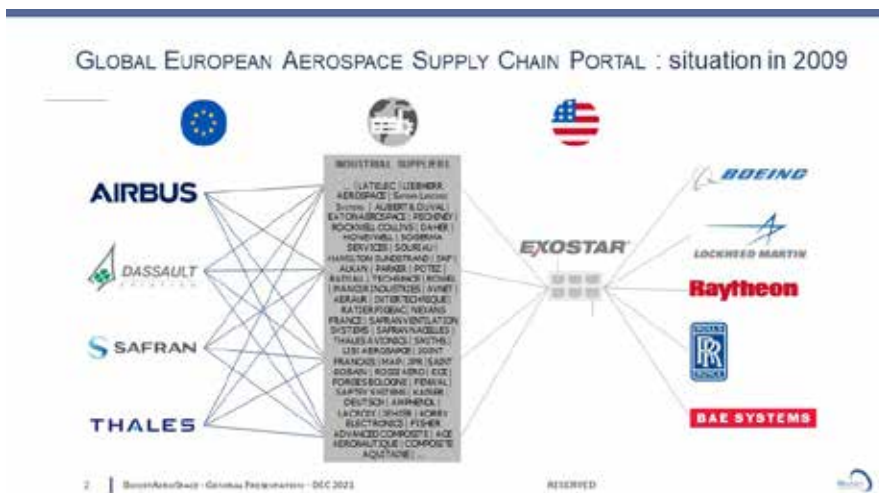


Figure 3 : Portail mondial de la chaîne d'approvisionnement aérospatiale européenne en 2009 (Source : BoostAeroSpace).

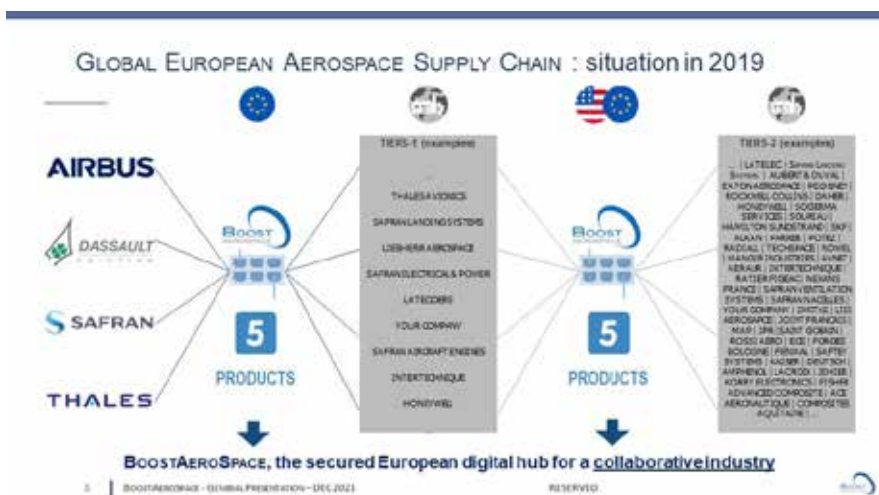


Figure 4 : Portail mondial de la chaîne d'approvisionnement aérospatiale européenne en 2019 (Source : BoostAeroSpace).

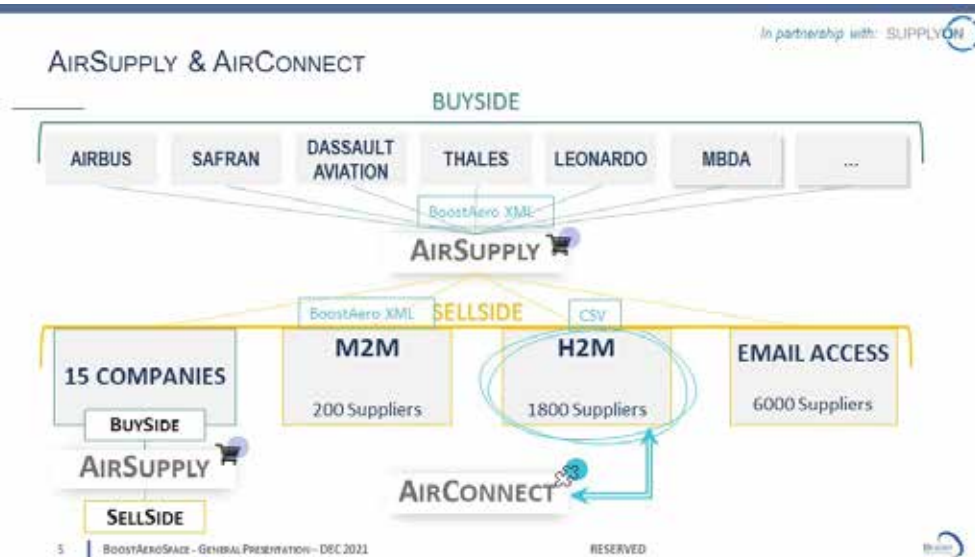


Figure 5 : AirSupply & AirConnect (Source : BoostAeroSpace).

Il comprend notamment un portail fournisseur unique, AirSupply (opéré par la société allemande SupplyOn), reposant sur le standard BoostAero XML développé par l'AFNeT, un plateau virtuel de conception unique, AirDesign, et un portail de collaboration, AirCollab (opérés par Dassault Systèmes). Les fournisseurs peuvent donc utiliser le même portail pour travailler avec leurs clients (en mode "sellside") et leurs fournisseurs (en mode "buyside").

Un service de sécurité, AirCyber, permet d'augmenter le niveau de sécurité de la *supply chain*, condition essentielle de la confiance, de la sécurité des données, des produits et des usines.

En 2021, 20 entreprises (30 en 2023) utilisaient AirSupply en tant que clients avec leurs fournisseurs (en mode automatique M2M, semi-automatique H2M ou *e-mail access*) ; plusieurs milliers d'entreprises (8 000 en 2021, 10 000 en 2023) l'utilisent en tant que fournisseurs M2M, sur plusieurs niveaux de la *supply chain*, assurant ainsi la continuité numérique.

AirDesign, opéré par Dassault Systèmes, est destiné à améliorer la collaboration sécurisée en phase de conception des produits, comme le font les plateaux virtuels privés, mais avec un module commun, comme AirSupply. Avec AirDesign, BoostAeroSpace a mis au point des cas d'utilisation, qui viennent décrire la manière de tirer profit de solutions *cloud*, pour avoir des espaces collaboratifs. Au niveau d'un donneur d'ordre, la plateforme PLM permet d'avoir une connaissance du produit et de gérer sa configuration.

La gouvernance de BoostAeroSpace, qui a été capitale pour la réussite du projet, est assurée par la SAS BoostAeroSpace, dotée d'un "board of directors" (représentant les fondateurs), d'une "security management authority" (RSSI des fondateurs) et d'une équipe permanente, composée d'un président, un directeur général, de trois *product managers*, d'un d'officier de sécurité, d'une responsable communication et d'une secrétaire.

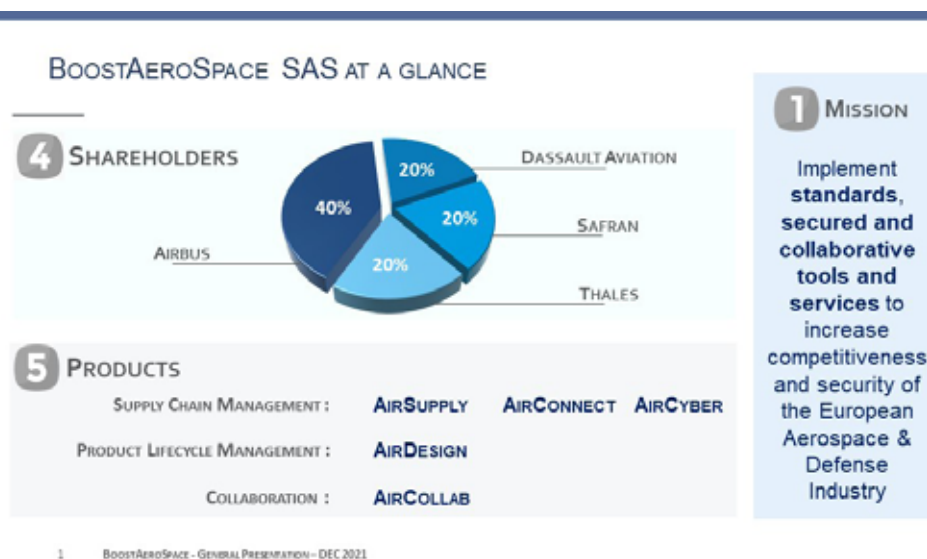


Figure 6 : BoostAeroSpace SAS (Source : BoostAeroSpace).



Figure 7 : Retombées économiques d'AirSupply
(Source : <https://boostaerospace.com/airsupply>, octobre 2023).

BoostAeroSpace est fondée sur le modèle économique suivant :

- coûts non récurrents (NRC = *non recurring costs*) financés par les fondateurs (40 % Airbus, 20 % Dassault Aviation, Safran et Thales) ;
- coûts récurrents AirSupply (RC = *recurring costs*, mode *Software-as-a-Service*) :
 - côté *buyside* : financement par les clients, 100 K€ à 4 M€,
 - côté *sellside* : financement par les fournisseurs, 420 €/an/client.
- coûts récurrents AirDesign et AirCollab (RC, mode *Software-as-a-Service*) :
 - les industriels doivent acquérir des licences de connexion à la plateforme 3DEXPERIENCE on the cloud de Dassault Systèmes.

Avantage majeur de BoostAeroSpace : ces services de collaboration sont conçus par et pour les industriels de la filière. Pour compléter le succès de la démarche, des actions régionales d'accompagnement et d'aide aux PME ont été mises en place, pour fournir aux PME un support de proximité.

Les *business cases* réalisés auprès des industriels utilisant AirSupply montrent des gains quantitatifs significatifs :

- réduction des cycles de collaboration et de la traçabilité ;
- amélioration de la qualité, de la disponibilité des pièces ;

- réduction des stocks ;
- réduction des tâches administratives, suppression des erreurs de saisie.

En complément, AirSupply apporte les gains essentiels suivants :

- La continuité numérique des donneurs d'ordre aux fournisseurs de rang n, grâce au déploiement d'AirSupply auprès de la quasi-totalité des fournisseurs de rang 1 des donneurs d'ordre (Airbus, Dassault Aviation...), et sur plusieurs niveaux de la supply chain, grâce à l'utilisation d'AirSupply par les fournisseurs de rang 1 ou 2 avec leurs propres fournisseurs.
- Les industriels clients ont en effet la possibilité de disposer d'un portail fournisseurs sans avoir à le spécifier, le développer, le déployer et le maintenir, ce qui coûterait beaucoup plus cher qu'utiliser AirSupply. Les fournisseurs réduisent aussi leurs coûts grâce à AirSupply.
- Le déploiement auprès des fournisseurs (et leur support) est assuré par SupplyOn, l'industriel client n'a à s'interfacer qu'avec AirSupply.
- Le déploiement auprès de fournisseurs utilisant déjà AirSupply avec d'autres clients est extrêmement facile.
- Le passage des fournisseurs en mode automatique M2M est beaucoup plus facile et rapide : à titre d'exemple, Dassault Aviation avait 3 fournisseurs connectés en M2M à son portail fournisseurs privé ; il en a 60 depuis le remplacement de ce portail par AirSupply, car ses fournisseurs communs avec Airbus étaient déjà connectés en M2M avec Airbus.

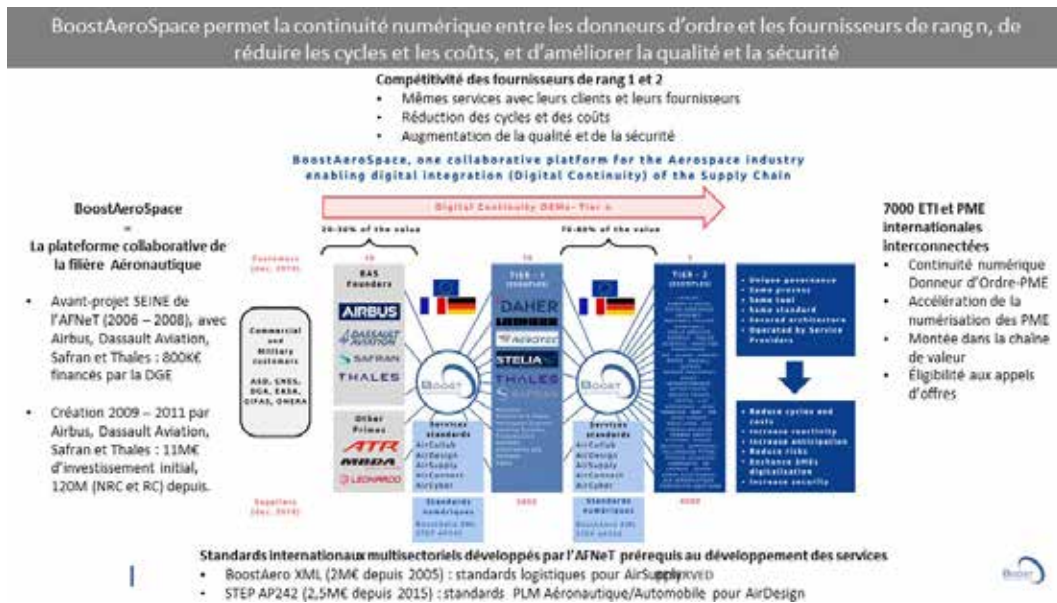


Figure 8 : Les avantages de BoostAeroSpace (Source : BoostAeroSpace).

Conclusion : standards et plateformes collaboratives sont vitaux pour la continuité numérique et la compétitivité

Dans les *supply chains* industrielles, les standards sont des prérequis absolus pour la continuité numérique, car eux seuls permettent de numériser les échanges entre les donneurs d'ordre et leurs milliers de fournisseurs, dont les systèmes sont hétérogènes (e.g. dans l'aéronautique française, on trouve plus de trente ERP différents selon une étude GIFAS-AFNeT).

Les plateformes collaboratives de type BoostAeroSpace permettent d'étendre la standardisation au niveau des services de collaboration entre clients et fournisseurs, de remplacer, notamment, les portails fournisseurs privés des clients par un portail fournisseurs commun comme AirSupply, réduire les cycles, améliorer la qualité et la sécurité.

Dans le cadre de BoostAeroSpace, le coût initial de développement (hors coûts internes des industriels) n'a été que de 11 M€, entièrement financé par les industriels aéronautiques ; le coût total (NRC et RC) depuis l'ouverture des services en 2011 est de l'ordre de 120 M€.

En ce qui concerne les standards, le coût de développement a été de 2 M€ pour le standard logistique BoostAero XML depuis 2005, et de 2,5 M€ pour le standard PLM STEP AP 242 depuis 2015, financés par les industriels aéronautiques.

Le seul financement public (dans le cadre du plan d'action TIC&PME de la DGE) a été le financement de 800 K€ pour les frais de sous-traitance du projet SEINE, destiné à finaliser les standards et développer un prototype de plateforme collaborative PLM, qui est devenu le service AirDesign de BoostAeroSpace.

Ce projet SEINE, qui faisait suite aux projets e-PME et BoostAero de l'AFNeT, a donc servi d'amorçage à BoostAeroSpace, qui a été ensuite entièrement financée par les industriels aéronautiques, ce qui est un modèle vertueux.

Dans les années suivant l'ouverture de BoostAeroSpace, le GIFAS a lancé le Programme Performances Industrielles pour aider les PME à améliorer leur gestion de production et tirer pleinement partie d'AirSupply, dans le cadre d'actions collectives régionales financées par les industriels et les pouvoirs publics (DREETS, conseils régionaux).

Conditions de succès pour les autres filières

Dans les autres filières, cet exemple peut être suivi ; il suffit que les grandes entreprises de ces cercles de confiance, réunis dans les Comités stratégiques de filières (CSF) ou les fédérations professionnelles, aient la volonté de lancer les opérations, fixent des objectifs ambitieux, privilégient les intérêts stratégiques communs, jouent collectif.

L'implication des dirigeants des entreprises est un facteur-clé de succès : à titre d'exemple, j'ai planché une dizaine de fois devant le Bureau du GIFAS, composé des PDG de la filière, notamment Louis Gallois et Fabrice Brégier (EADS et Airbus), Charles Edelstenne (Dassault Aviation), Jean-Paul Herteman (Safran) et Jean-Bernard Levy (Thales), avec l'aide d'Henri Martre, ancien PDG de l'Aérospatiale, président d'honneur du GIFAS et président du comité de pilotage de BoostAeroSpace.

Ce qui a été possible pour la filière Aerospace & Défense peut en effet être mis en œuvre dans les secteurs d'activité industriels majeurs, notamment ceux partageant des problématiques similaires : importance

stratégique (enjeux de souveraineté dans certains cas), domaine d'excellence de la France, activité commerciale internationale, cycles longs, sécurité.

De plus, l'industrie Aérospace & Défense est un « tiers de confiance », prouvant qu'il est possible de mettre en place une solution hautement sécurisée.

Les investissements sont faibles par rapport aux enjeux industriels et sociaux ; le résultat peut être obtenu en moins de trois ans, en s'inspirant des meilleures pratiques.

Il est en effet urgent et vital d'unir nos forces pour créer un sursaut national, et mettre en place les actions nécessaires pour faire enfin redécoller l'industrie française, grâce au numérique.

Le soutien des pouvoirs publics dans la phase d'amorçage est primordial, comme il l'a été pour le projet SEINE et le Programme ATLAS, ainsi que la coordination des CSF par France Industrie, et le soutien par des associations professionnelles œuvrant pour le numérique comme facteur de compétitivité de l'industrie, si possible multisectorielles comme l'AFNeT.

Nouveaux enjeux : Transition écologique et énergétique, réindustrialisation, économie de la data

Les nouveaux défis auxquels sont confrontées les filières industrielles sont, d'une part, la transition écologique et énergétique et la réindustrialisation, auxquelles le numérique apporte une contribution essentielle, comme l'a montré le Colloque Boost-Industrie 2023 de l'AFNeT au Medef.

L'autre défi concerne l'économie de la donnée, dans laquelle s'engagent de nombreuses filières industrielles dans le cadre de l'initiative européenne Gaia-X, notamment l'industrie automobile avec Catena-X, l'industrie agroalimentaire avec AgDataHub, et la nouvelle initiative aéronautique et défense appelée à prendre la suite de BoostAeroSpace, NextEra.

Comme lors de ces vingt dernières années qu'elle a consacrées à l'accélération de la transformation numérique des filières industrielles, l'AFNeT est prête à y jouer un rôle majeur, en tant que *think tank*, et en tant que *do tank*.



Figure 9 : Les services d'AFNeT en tant que *think tank* et *do tank* (Source : AFNeT).

Bibliographie

Site AFNeT :

- Actes des Colloques Boost-Industrie
- Actes des Cercles Numériques des Industries Stratégiques (CNIS)
- ATLAS

Site BoostAeroSpace

Apport et utilisation de l'IA dans le domaine de l'aéronautique

Par Pascal TEA et Guillaume SOULÉ

Palantir Technologies

L'industrie de l'aviation exploite les données depuis longtemps, mais ce n'est que grâce à un paysage de données régulé et à l'utilisation d'un modèle sémantique de données (par exemple l'ontologie) que les opérations peuvent être optimisées et que l'IA peut être pleinement exploitée. L'IA a été utilisée pour des applications avancées, telles que la maintenance prédictive, l'analyse des problèmes de qualité et l'expérience client personnalisée, entre autres, mais n'a été une réussite qu'en ayant une organisation robuste sous-jacente de la donnée utilisée. Les *large language models* (LLM) en IA transforment déjà l'industrie des compagnies aériennes, mais à l'avenir cette révolution doit prendre en compte de manière native les risques autour de la sécurité et de la précision de ces outils.

Introduction

Les données pour l'aéronautique, un environnement régulé mais disparaté

Les données sont essentielles dans l'aviation moderne, permettant l'innovation, améliorant la sécurité et augmentant l'efficacité opérationnelle. L'industrie génère quotidiennement d'énormes quantités de données, allant des indicateurs de performance des avions à la gestion du trafic aérien. L'exploitation et l'analyse de ces données débloquent des informations et favorisent l'amélioration dans divers domaines. Les progrès en IA et en apprentissage automatique permettent aux parties prenantes de développer des modèles de maintenance prédictive et d'améliorer les processus de prise de décision. En analysant les historiques de maintenance, les algorithmes d'IA identifient des modèles et anticipent les défaillances d'équipement, favorisant des mesures proactives pour minimiser les perturbations. L'analyse des données aide à réduire la consommation de carburants, bénéficiant aux économies de coûts et à la durabilité environnementale. Cependant, le succès nécessite des données utilisables à la fois du point de vue de l'utilisateur et du régulateur.

La nécessaire régulation des données dans l'aviation

Bien que l'utilisation des données apporte des avantages, elle soulève des préoccupations concernant la confidentialité, la sécurité et la propriété des dites données. Avec des informations sensibles sur les passagers et des données opérationnelles, des réglementations et des protocoles appropriés sont essentiels pour une gestion et une protection responsable des données. Les organismes de réglementation, tels que l'OACI, l'EASA et la FAA, mettent en place

des règles autour de considérations clés comme la collecte, le stockage, le partage et les droits d'utilisation des données. Il est primordial d'équilibrer l'accès aux données pour l'innovation et la protection de la vie privée. Des réglementations claires sur la propriété des données, le consentement et la transparence sont nécessaires pour établir la confiance parmi les passagers, les opérateurs et les parties prenantes de l'écosystème de l'aviation. Cela est encore plus important avec l'actuel "Data Act" et le futur "AI Act", qui ajouteront davantage de réglementation et serviront de lignes directrices pour les fournisseurs de logiciels offrant des capacités de données et d'IA. Les autorités de l'aviation doivent établir des cadres et des normes robustes de gouvernance des données, pour favoriser la confiance et la responsabilité.

La collaboration entre les parties prenantes de l'industrie de l'aviation, y compris les compagnies aériennes, les aéroports, les régulateurs et les fournisseurs de technologie, est essentielle pour une gouvernance et un traitement harmonisé des données. Cet effort renforce la sécurité des données et favorise l'innovation responsable tout en abordant les risques de mauvaise utilisation des données. Un exemple parfait est Skywise, lancée par Airbus sur la base de technologies fournies par Palantir Technologies. Skywise est une plateforme d'analyse de données aéronautiques conçue pour analyser d'énormes quantités de données générées par les systèmes et les opérations d'avions, garantissant un contrôle précis et fin de l'accès aux données.

En trouvant le bon équilibre, l'industrie de l'aviation doit utiliser les avantages procurés par l'utilisation des données tout en atténuant leurs risques. Cependant, des données de bonne qualité sont une condition préalable à une IA efficace dans l'aérospatiale : "*garbage in, garbage out*".

De l'importance d'avoir une donnée organisée et unifiée

La jeune industrie de l'aviation s'est rapidement transformée, s'adaptant à un environnement complexe et rapide de fusions, de consolidations et de partenariats mondiaux. L'irruption des données a considérablement augmenté la vitesse à laquelle les informations pouvaient être utilisées, avec des impacts majeurs.

Quelques exemples d'applications utiles de la donnée en aéronautique

Airbus, l'exemple de l'A350¹

Pour planter le décor, un A350 est composé de millions de pièces et assemblé par des centaines d'équipes, réparties dans quatre pays et plus de huit usines. Les données qui pilotent la production – les calendriers de production, les horaires de travail, les livraisons de pièces, les ordres de travail, les problèmes de qualité, etc. – sont également réparties entre les équipes et les pays. Les systèmes informatiques existants doivent être mis en relation avec des systèmes plus récents, des données non structurées ou même avec des notes de décision manuelles des utilisateurs. La taille des données se situe dans le domaine des pétaoctets (unité de données numériques qui équivaut à un million de gigaoctet de données) et d'une complexité impossible à gérer par un esprit humain seul.

En conséquence, les données sont nécessaires pour aider l'humain à répondre aux questions clés : quel travail reste-t-il, à un moment donné, sur un avion donné ? Et comment prioriser ce travail sans bloquer le travail d'une autre équipe ?

Dans le contexte des premières séries d'A350 produites, Airbus et Palantir ont travaillé à créer certains outils pour mieux guider la planification et aider au dépannage pour tous ceux qui travaillent sur la production de l'A350. Une meilleure compréhension du processus global et une meilleure collaboration

entre les équipes ont finalement accéléré la livraison des A350 de 33 % au cours des premières années, à la suite de l'entrée en production de ce nouveau programme.

Lilium²

Lilium s'est fixé pour objectif de débloquer l'avenir d'une mobilité aérienne rapide, abordable et durable avec un écosystème de données complet construit autour de leurs jets électriques à décollage et atterrissage verticaux. Étant une nouvelle entreprise, ils ont centré leur stratégie sur une approche axée sur les données, en utilisant Palantir Foundry, pour diffuser des téraoctets de données brutes de capteurs, puis transformées en une base de données unifiées de capteurs sur laquelle l'ontologie s'appuie pour alimenter la maintenance prédictive, la modélisation de la durée de vie des batteries, l'accélération de l'examen de la préparation au vol et la gestion rapide des défauts.

Lilium a transformé les données en informations six fois plus rapidement qu'auparavant, permettant à leurs ingénieurs de se concentrer sur l'action et l'innovation.

Skywise écosystème³

La plateforme Skywise d'Airbus (construite sur les services et les technologies de Palantir) relie les données de vol, d'ingénierie et d'exploitation de l'industrie de l'aviation dans un écosystème sécurisé, couvrant plus de 11 000 avions en service dont plus de la moitié de la flotte en service d'Airbus.

La plateforme gère de multiples intégrations, des transactions synchrones et un énorme volume de données (à l'échelle du pétaoctet). Par exemple, elle gère les données de séries temporelles provenant de nombreux capteurs par avion, chacun fournissant 20 à 100 points de données par seconde, soit environ 1 000 000 de points de données par vol, et ce pour des milliers par jour. Airbus propose désormais un changement d'échelle et la transformation d'une industrie tout entière grâce à Skywise.

¹ <https://www.palantir.com/impact/airbus/>

² <https://www.palantir.com/offerings/automotive-mobility/>

³ <https://www.palantir.com/impact/airbus/>

At Airbus, Palantir delivered an effective solution at speed, producing business results in a matter of months. Following the initial A350 use case, the partnership rapidly expanded to adjacent problem spaces, such as aircraft maintenance. Palantir's support program helped drive user adoption across the organization and equip Airbus teams to build new capabilities on top of Foundry. In the following years, the partnership grew to include industry partners through a platform called Skywise.

	YEAR	USER COUNT	ACHIEVEMENTS
PHASE 01	2015	50	Palantir and Airbus began their partnership, increasing production of the A350 aircraft by 33%.
PHASE 02	2016	500	The data asset Palantir and Airbus started to build enabled us to tackle more than 20 adjacent use cases across supply chain, scheduling, and finance.
PHASE 03	2017	4,000	Palantir and Airbus partnered to extend the platform beyond the walls of Airbus to connect the entire industry. Skywise is an open data platform that aims to eliminate inefficiencies throughout the value chain.
PHASE 04	2020	18,000+	Today there are more than 100 airlines onboarded to the Skywise platform. Independent third-party analysis estimates that the Skywise platform creates a revenue opportunity.

Figure 1 : Évolution de Skywise au cours du temps (© 2024 Palantir Technologies Inc.).

Skywise aide les compagnies aériennes à améliorer la disponibilité de leurs avions, optimiser l'exploitation des flottes et réduire les coûts. De même, la plateforme permet à Airbus d'optimiser certains processus industriels et d'accompagner la montée en cadence de production.

Les paysages de données et d'IT sont souvent complexes, coûteux et rigides

La nature fragmentée des systèmes informatiques de l'aviation, la complexité du *enterprise resource planning* ou ERP (planification des ressources d'entreprise) et des nouveaux systèmes de données (capteurs, temps réel) posent des défis significatifs. Les ERP existants ont été mal utilisés, devenant coûteux et rigides. D'autre part, les nouveaux systèmes de données génèrent des données pour l'optimisation des opérations ou la diffusion d'informations en temps réel pour des applications encore plus influentes.

L'intégration de systèmes disparates et de sources de données est essentielle pour permettre aux compagnies aériennes et aux exploitants d'aéroports de prendre des décisions éclairées et d'optimiser les opérations. La standardisation des formats de données, l'intégration des systèmes et la promotion de la collaboration exploitent le plein potentiel des données et de la technologie pour améliorer l'efficacité, la sécurité et l'expérience passager.

Skywise d'Airbus a été développée pour intégrer et analyser les données provenant de multiples sources, permettant une compréhension globale et des capacités de maintenance prédictive. Le but de ce travail est de consolider les données fragmentées, d'améliorer la collaboration, et d'améliorer l'ensemble des opérations des avions et des compagnies aériennes. Cela a été rendu possible grâce à l'ontologie Skywise, qui a abstrait les spécificités de myriades de systèmes différents en usage au sein de toutes les compagnies aériennes en une seule manière commune de modéliser l'aviation.

Un moyen de contrôler et d'utiliser correctement les données : l'ontologie⁴

Au lieu d'avoir de nombreuses sources de données et tables de données, les entreprises devraient investir dans une représentation unique des données de leur entreprise. Cela permet de réconcilier toutes les sources de données, tous les formats, pour tous les types d'utilisateurs, afin de s'assurer d'une définition unique des données de l'entreprise (et des permissions associées), et se concrétise par la création d'un modèle sémantique de données.

Chez Palantir, cette approche porte un nom : l'ontologie. Ce terme sera utilisé dans le reste du texte pour y faire référence.

L'ontologie est conçue pour représenter les décisions dans une entreprise, et non simplement les données. L'objectif principal de chaque organisation est de prendre les meilleures décisions possibles, souvent en temps réel, tout en faisant face à des conditions internes et externes en constante évolution. L'entreprise moderne a besoin d'une architecture logicielle centrée sur la décision. La valeur de l'ontologie repose sur ces trois éléments constitutifs de toute décision :

- les données, ou l'information utilisée pour prendre une décision ;
- la logique, ou le processus d'évaluation d'une décision ;
- l'action, ou l'exécution de la décision.

L'ontologie intègre ces trois éléments dans une base évolutive, dynamique et collaborative qui reflète les conditions et ambitions en constante évolution de l'organisation au fur et à mesure qu'elles évoluent en temps réel. D'autres éléments clés concernent les capacités de construction de scénarios ; l'extensibilité

⁴ <https://www.linkedin.com/pulse/connecting-ai-decisions-palantir-ontology-palantir-technologies-twdq>



At a fundamental level, every decision is comprised of data (the information used to make a decision), logic (the process of evaluating a decision), and action (the execution of the decision).

Figure 2 : Éléments constitutifs de l'ontologie (© 2024 Palantir Technologies Inc.).

(grâce à un kit de développement logiciel, le SDK de l'ontologie – pour *software development kit*) ; les différentes façons de connecter des modèles d'IA génératifs commerciaux et *open-source* à des sous-ensembles sécurisés de données, de logique et d'action ; et les méthodes pour étendre le travail d'équipe humain-IA à l'ensemble de l'entreprise.

Sans données correctes et une ontologie appropriée, les entreprises ne peuvent pas obtenir des résultats à grande échelle et fort impact. La qualité des données, la cohérence, les permissions intégrées et la sécurité sont essentielles pour la nouvelle révolution de l'IA.

L'impact de l'IA pour l'aéronautique : une révolution constante

Historique de l'impact de l'IA dans le domaine aéronautique

Avec la révolution de l'IA en cours, en particulier autour des *large language models* (LLM), il convient de noter que l'aviation explore depuis longtemps des applications concrètes de l'IA qui façonnent l'industrie. Comme mentionné, l'IA seule ne peut pas accomplir de miracles sans des données appropriées et des paradigmes organisationnels. Par exemple, dans le partenariat Airbus & Palantir, l'accent a été mis sur la création d'une base solide de données, de produits de données et d'une ontologie pour alimenter les applications et les approches de l'IA.

Certaines des applications d'IA avec le plus d'impact et d'utilité ont été :

- Maintenance prédictive pour les compagnies aériennes : l'IA analyse les données des capteurs des avions pour prévoir et prévenir les problèmes de maintenance, améliorant la disponibilité, réduisant les coûts et renforçant la sécurité.
- Problèmes de qualité récurrents dans les environnements de production : l'analyse automatisée des problèmes de qualité sur les chaînes de production pour réduire l'effet sur le temps de cycle global. Des solutions ont été fournies pour trier et regrouper automatiquement les problèmes de non-qualité, offrant des recommandations pour les éliminer en tirant parti des connaissances métiers des travailleurs et des capacités d'IA de la plateforme.
- Formation et simulation : IA dans les simulateurs de vol pour créer des scénarios de formation réalistes pour les pilotes et les contrôleurs de la circulation aérienne.

En résumé, le succès de la première révolution de l'IA a été permis par la combinaison de données robustes, de connaissances métiers humaines et de capacités d'IA uniques, accélérant et changeant la manière dont les avions sont produits et entretenus. Elle repose fortement sur la qualité et la profondeur des données sous-jacentes pour former des modèles dans le but visé, soulevant les défis de garantir la confidentialité des données et l'éthique.

En fin de compte, l'ontologie permet à chaque organisation de connecter l'IA directement à leurs opérations principales et de contrôler précisément comment et quand les recommandations, les augmentations et les automatisations basées sur l'IA peuvent être utilisées dans des contextes de première ligne. Ceci est possible de manière unique lorsque l'ontologie est centrée sur la décision, et non simplement sur les données ; elle rassemble les éléments constitutifs de la prise de décision – données, logique et action – au sein d'un seul système logiciel.

Les nouvelles données peuvent être rapidement intégrées dans une représentation sémantique particulièrement précise ; les nouveaux algorithmes et la logique métier peuvent être facilement mis à la disposition des utilisateurs humains et de l'IA ; et l'intégration d'actions robustes est réalisée grâce à des connexions en temps réel avec l'ensemble des systèmes opérationnels. L'ontologie de chaque organisation est un puits en temps réel sur les conditions changeantes, les ambitions et les décisions prises par les équipes – garantissant que l'IA soit toujours ancrée dans la réalité de l'entreprise.

Cela a été l'état du monde jusqu'au début de 2023. Puis est arrivée la révolution des LLM, avec la capacité de transformer et d'accélérer encore davantage ces changements.

La révolution des *large language model* (LLM) et ses risques

Les LLM sont des technologies d'IA générant un langage semblable à celui des humains et répondant à des questions complexes, révolutionnant la compréhension du langage et améliorant les *chatbots* et les assistants virtuels. Les LLM personnalisent les expériences utilisateurs en analysant de vastes données et images, en transformant le traitement du langage naturel, en améliorant les expériences utilisateurs, en accélérant la recherche et en automatisant la création de contenu.

Dans l'industrie aérospatiale, les LLM offrent de nombreux avantages par rapport à l'apprentissage automatique traditionnel, notamment le fait qu'ils peuvent être utilisés immédiatement « sortis de la boîte » et affinés si nécessaire. Les principaux domaines d'application sont les suivants :

- inspection de la qualité : analyse de documents manuscrits ou complexes détaillant les problèmes de qualité dans la production ou la maintenance ;
- maintenance et dépannage des avions : les LLM analysent les données de maintenance, prédisent les besoins, identifient les défauts et soutiennent la prise de décision des techniciens ;
- formation et soutien des pilotes : simulation de scénarios, génération de matériel de formation interactif, réponse aux questions et guidage de tâches complexes pour une formation efficace des pilotes ;

- conformité réglementaire : compréhension des réglementations complexes de l'aviation et aide à l'adhésion, la sécurité, la documentation et la déclaration.

Cependant, ces avantages des LLM s'accompagnent également de risques qui doivent être abordés concernant la précision des modèles, la propagation des erreurs, les risques de cybersécurité, la mauvaise utilisation et l'abus du LLM, ou le manque de transparence des modèles. Ceci est inhérent aux modèles d'IA, et exacerbé avec les LLM en raison de la soi-disant compréhension du langage humain que le modèle pourrait avoir. Cela signifie également qu'une grande variété de LLM coexisteront et seront utilisés indistinctement, comme des produits de base, sans toujours avoir la possibilité de les comparer de manière précise et juste.

La bonne utilisation de ces technologies viendra de la manière de contrôler les LLM et de traiter correctement leurs risques pour tirer pleinement parti de l'IA générative dans un contexte réel en utilisant des données opérationnelles, comme ce que Palantir propose avec Palantir AIP. Palantir propose de s'appuyer sur une approche centrée autour de l'ontologie qui permet de capitaliser sur les investissements existant autour des données, de la sécurité et des connaissances métiers. En effet, quand des LLM sont déployés sur une base de données soigneusement gouvernée dans l'ontologie, il est possible de mettre en place des contrôles particuliers, garantissant que le LLM ne récupère que des informations précises et pertinentes, et n'est capable d'exécuter que des actions appropriées sous la direction d'un expert formé à ces sujets. Ceci est nécessaire pour donner aux LLM un rôle central dans le processus de prise de décision.

Les LLM révolutionneront l'industrie et notre façon de travailler, mais ils devraient tirer parti des bonnes données, des bonnes réglementations et des bons accès. Cela libère la valeur des LLM pour être entraînés et utilisés avec les données correctes et dans le bon contexte de l'aviation, avec également la possibilité d'avoir l'humain dans la boucle pour corriger et examiner les LLM.

Conclusion : L'IA ne peut être efficace, utile et sûre qu'avec une ontologie et la possibilité de la tester en production

En conclusion, les technologies basées sur les données recèlent un grand potentiel pour l'aviation, mais leur mise en œuvre réussie nécessite un cadre réglementaire robuste, une organisation des données compétente et une gouvernance habilitée avec des capacités technologiques appropriées. L'IA n'est pas magique et ne peut fonctionner qu'une fois que les autres briques (données, sécurité, gouvernance) ont été déployées à grande échelle, et le choix ainsi que le contrôle final doivent être donnés aux utilisateurs.

L'IA n'est réelle que lorsqu'elle est construite et expérimentée sur le terrain, comme le fait actuellement

Palantir avec certains acteurs de l'aéronautique. Afin d'éviter de se lancer dans de longues initiatives de R&D et des projets IT coûteux, les entreprises et les institutions peuvent tester l'IA directement sur le terrain avec des cas d'utilisation opérationnels.

L'IA n'est réelle que lorsque l'on capitalise sur les données pertinentes et les connaissances métiers régies par une ontologie, car cela permet de développer réellement des modèles d'IA robustes. Sans une ontologie, le risque est fort de multiplier les démonstrateurs intéressants mais coûteux, qui ne passent pas à l'échelle et finissent par n'avoir aucun impact.

L'IA n'est réelle que lorsque vous lui faites confiance pour soutenir vos décisions commerciales ou stratégiques. Vous devriez investir (ou travailler avec des partenaires de confiance) pour construire une approche sécurisée et centrée autour de la validation humaine, pour favoriser l'impact de votre IA.

Adapter la formation et la recherche aux besoins de la filière aéronautique, dans un contexte global de transition écologique

Par **Olivier LESBRE**

Directeur de l'Institut supérieur de l'aéronautique et de l'espace (ISAE-SUPAERO)

L'article traite de l'adaptation de la formation et de la recherche aux besoins de la filière aéronautique, dans un contexte de transition écologique. Il met en lumière le rôle de l'ISAE-SUPAERO et du Groupe ISAE dans la formation d'ingénieurs capables de contribuer à la décarbonation de l'aviation. L'accent est mis sur la nécessité de développer des compétences en ingénierie durable et sur l'importance de l'innovation technologique, pour répondre aux défis environnementaux. Des projets spécifiques comme le drone Mermoz et des initiatives de recherche visant la décarbonation du secteur sont également discutés.

Les ingénieurs ont un rôle majeur à jouer pour rendre durable notre société, en s'appuyant sur toutes les ressources des sciences et des technologies. Les entreprises françaises sont à la pointe mondiale pour l'aéronautique et l'espace : c'est donc dans ce domaine que nos ingénieurs peuvent avoir un impact maximal, en mesurant toujours plus précisément l'état de notre planète depuis l'espace, et, surtout, en inventant le transport aérien décarboné et en le déployant dans le monde entier. L'ISAE-SUPAERO, *leader* mondial de la formation supérieure à l'ingénierie aérospatiale, et l'ensemble des écoles du Groupe ISAE, forment chaque année plus de 2 000 jeunes dans ce sens.

Notre monde fait face à de vastes défis environnementaux, complexes et mêlant des dimensions scientifiques et sociales. La décarbonation du secteur aéronautique fait partie de ces défis. Le transport aérien émet un quarantième du CO₂ lié aux activités humaines et sa part dans ces émissions est croissante. Sa décarbonation est donc nécessaire pour que les générations futures puissent bénéficier, comme les nôtres, de transports rapides et économiques à longue distance et de l'impact majeur qui en découle, tant sur la mobilité des personnes et des biens, que sur la paix et la prospérité mondiale.

La filière a besoin de compétences et d'expertise pour décarboner l'aviation

Les acteurs du transport aérien ont pris pleinement conscience de cet enjeu et ont considérablement progressé dans leur approche du sujet. Depuis cinq ans, ils ont fait émerger entre eux un consensus

croissant sur les actions à mener pour décarboner l'aviation, avec deux axes principaux et complémentaires : basculer vers des carburants durables, et accélérer l'amélioration de l'efficacité énergétique des avions. Et ils ont convergé en 2022 au sein de l'OACI sur l'objectif d'une aviation « net-zéro » en 2050.

Ce défi va mobiliser des milliers d'ingénieurs pour développer des aéronefs inédits, toujours aussi fiables et compétitifs, mais beaucoup plus efficaces, en s'appuyant sur les dernières avancées scientifiques et jouant sur l'ensemble des ressorts de la technologie. Des milliers d'autres ingénieurs et techniciens seront également chargés de déployer les infrastructures nécessaires à la production des carburants durables et à leur distribution sur l'ensemble des aéroports.

En à peine plus de cent ans, les ingénieurs aéronautiques n'ont cessé d'étonner leurs contemporains en relevant successivement trois défis majeurs : ils ont d'abord inventé l'aviation, puis ils l'ont sécurisée (au point d'en faire le moyen de transport le plus sûr au km parcouru), avant de la démocratiser. Le challenge de la nouvelle génération est aujourd'hui de la décarboner. Les pistes existent ; les initiatives sont lancées ; et si la dynamique se poursuit, il n'y a guère de doute qu'elle aboutisse aux échéances visées.

Mais la plupart de ces ingénieurs restent encore à former : les écoles d'ingénieurs tournées vers le domaine aérospatial ont donc une responsabilité claire, celle de leur donner les compétences nécessaires pour relever ce défi. Cette responsabilité est encore renforcée en France par le *leadership* mondial d'Airbus, avec pour conséquence une opportunité exceptionnelle donnée à nos ingénieurs, celle de



Figure 1 : Photo du campus d'ISAE-SUPAERO (© Olivier Panier des Touches).

mener la transition mondiale du secteur, mais aussi le risque majeur de voir ce *leadership* remis en cause s'ils ne sont pas capables de faire les bons choix.

Fondé en 1909, l'ISAE-SUPAERO a été la première école au monde à proposer une formation d'ingénieur consacrée à l'aéronautique. Situé depuis 1968 à Toulouse, au cœur de l'écosystème aérospatial européen, c'est aujourd'hui un institut d'excellence mondiale pour l'enseignement supérieur à l'ingénierie aérospatiale. Sa mission est clairement inscrite dans sa raison d'être : « former autour des enjeux aérospatiaux des ingénieurs de haut niveau scientifique, humanistes, innovants et capables de maîtriser la complexité des défis du monde de demain ».

Avec l'ISAE-ENSMA, l'ISAE-SupMéca, l'École de l'air et de l'espace, l'ENAC et l'ESTACA, l'ISAE-SUPAERO a formé le Groupe ISAE, qui réunit les principales écoles d'ingénieurs françaises dédiées au domaine aéronautique et spatial. Chaque année, ces six écoles forment plus de la moitié des jeunes ingénieurs embauchés par le secteur.

Choisir la filière aéronautique et une formation au sein du Groupe ISAE, c'est se donner la capacité d'avoir un impact majeur sur la décarbonation mondiale, en étant à la pointe de la décarbonation de l'aviation

Cela fait plus de dix ans que l'ISAE-SUPAERO a commencé à aborder spécifiquement ce sujet dans ses programmes de formation, avec le mécénat d'Airbus. C'est ainsi qu'ont été créés en 2014 un certificat

d'ingénierie environnementale, mais aussi, pour sensibiliser nos élèves à la question du réchauffement, la « Fresque du climat », qui s'est largement répandue depuis. Aujourd'hui, nos étudiants sont formés aux enjeux climatiques dans les tronc communs des formations d'ingénieur et de master, et un travail de fond est mené pour intégrer la problématique de la décarbonation à l'ensemble des enseignements. Notre institut accueille également de multiples conférences visant à croiser les regards, favoriser une vision interdisciplinaire, et encourager la maturation de nos étudiants sur ces sujets. Avec l'appui du GIFAS, cette démarche a été généralisée à l'ensemble des écoles du Groupe ISAE depuis 2020.



Figure 2 : Photos d'étudiants en classe (© Olivier Panier des Touches).

Du côté de la recherche, l'ISAE-SUPAERO s'est également pleinement emparé du sujet avec, en 2021, la publication du « Référentiel aviation et climat »¹ (voir

¹ https://www.isae-supaero.fr/projets/Referentiel_ISAE-SUPAERO_Mai2022_V1.1/HTML/index.html

la Figure 3 ci-dessous). Ce document de référence, accessible à tous sur Internet, fait la synthèse des éléments scientifiques utiles à la compréhension des enjeux sur l'aviation et le climat.



Figure 3 : Couverture du « Référentiel aviation et climat » (© ISAE-SUPAERO).

Actuellement, près d'un quart² des sujets de recherche internes et collaboratifs de l'institut visent directement la décarbonation ou sont en lien avec la transition vers l'aérospatial durable. L'un de ces projets emblématiques est le drone Mermoz, mené avec des étudiants (voir la Figure 4). Ce démonstrateur de drone léger de très longue portée vole sans aucune émission de CO₂.

² 22 % en 2023, donnée ISAE-SUPAERO.



Figure 4 : Photo du drone Mermoz (© ISAE-SUPAERO).

Il a effectué son premier vol début 2023 avec de l'hydrogène gazeux, et son objectif est une traversée de l'Atlantique.

Par ailleurs, l'ISAE-SUPAERO a pour ambition de développer l'esprit d'innovation et de soutenir la création d'entreprises innovantes par les membres de sa communauté, étudiants et enseignants-chercheurs en particulier. Plusieurs projets portent sur la décarbonation du secteur aérien comme Viraj H2, l'une des *start-up* hébergées à l'InnovSpace, l'incubateur de l'ISAE-SUPAERO. Fondée par un élève du cursus ingénieur, qui a pu bénéficier des infrastructures de recherche de l'institut, elle développe un groupe motopropulseur hybridant pile à combustible et turbopropulseur avec récupération de chaleur et de vapeur. Grâce à la bourse d'un million d'euros de la fondation Lopez-Loreta, qu'elle a remportée en décembre 2023, la *start-up* Viraj H2 sera en mesure de passer du prototype basse puissance à une phase de recherche et développement structurée au sein de trois laboratoires partenaires.



Figure 5 : Campus d'Innovspace (© Olivier Panier des Touches).

Les actions de l'écosystème ISAE pour la décarbonation de la filière aéronautique

D'autres projets emblématiques de recherche sur l'aviation décarbonée sont actuellement en cours dans l'ensemble du Groupe ISAE. Parmi ceux-ci, citons Euroglider, un projet de planeur biplace de formation et d'entraînement autonome à propulsion électrique, auquel les étudiants des écoles du groupe ont contribué, jusqu'à faire voler un planeur banc d'essai à Salon-de-Provence ; RAPACE, un drone militaire à pile à hydrogène, projet porté par l'EAE ; ou encore le développement à l'ESTIA, école partenaire du groupe, de TURBOLAB, une plateforme d'essais partagée entre industrie, recherche et enseignement, visant à concevoir et à valider des systèmes de propulsion aéronautiques innovants, bas carbone et haute performance, en partenariat avec la société AKIRA Technologies.

Avec ses collègues académiques du site toulousain, l'ISAE-SUPAERO est également à l'initiative de la création de l'Institute for Sustainable Aviation³ (ISA).

³ <https://isa-toulouse.com/>

Cet institut de recherche a pour objectif d'aborder la transition vers l'aviation décarbonée dans toute sa complexité, en mettant en œuvre une recherche interdisciplinaire mobilisant ingénieurs, économistes, juristes et climatologues.

Au sein de l'ISA, des enseignants-chercheurs de l'ISAE-SUPAERO ont modélisé un outil de simulation et d'évaluation de trajectoires climatiques de l'aviation. Destiné à l'ensemble des parties prenantes du secteur aérien, AeroMAPS⁴ permet d'évaluer finement les impacts environnementaux de scénarios de transition de l'aviation. Au-delà de ses usages premiers en recherche et en formation, cet outil peut être utile aux décideurs institutionnels ou industriels de l'écosystème aéronautique, et contribuer au débat public sur la place de l'aviation dans notre société.

⁴ <https://aeromaps.isae-supaero.fr>

Conclusion

L'histoire de l'aéronautique est celle d'une industrie pionnière qui a réalisé l'un des plus anciens rêves de l'humanité en relevant successivement des défis techniques et industriels que beaucoup croyaient impossibles. Son défi actuel est celui de la transition écologique. L'ISAE-SUPAERO et l'ensemble des écoles du Groupe ISAE évoluent depuis dix ans avec l'objectif de former les ingénieurs qui seront capables de relever ce nouveau défi, pour que les prochaines générations aient toujours accès au transport aérien et que la France, fidèle à son histoire, reste à la pointe mondiale du domaine aéronautique !



Figure 6 : Capture d'écran d'AeroMAPS.

L'aéronautique face à son urgence : booster les synergies pour que les acteurs s'imposent une vision commune et partagée

Par Francis MASSÉ

Président de MDN Consultants

La filière du transport aérien doit muter face aux évolutions de son environnement : les transitions présentées par l'écologie avec le changement climatique, l'énergie, la géopolitique, les évolutions économiques et sociales, sociétales et politiques, la révolution numérique et l'IA. Les réponses sont en termes de transformation de l'ensemble des parties prenantes de cet écosystème complexe, et si possible en harmonie.

La formation professionnelle inédite « Université du transport aérien - UTA », au format pédagogique spécifique appelé Logotique, vise à favoriser ces transformations, innovations et ruptures technologiques, en misant sur les ressources humaines.

UTA rassemble des hauts potentiels de chacune des parties prenantes de la filière (avionneurs, motoristes, supply chain aéronautique, assistance en escale, compagnies aériennes, aéroports et administrations publiques compétentes). Pour fédérer, créer une vision unique et partagée sur un diagnostic commun des réalités, enrichir les compétences de chacun et construire un avenir commun au service de la société, dans le cadre d'un partenariat public-privé.

La filière de la construction aéronautique est l'un des principaux secteurs en France contribuant positivement à notre balance commerciale. Quant au transport aérien, il représente avec le secteur maritime, la banque et les assurances, l'un des puissants vecteurs du commerce international. Derrière ces entreprises dynamiques, de toute taille, qui participent de métiers

différents, se révèle un *affectio societatis* commun, la passion de l'avion !

Mais face aux urgences et aux nouveaux défis à relever, cette passion est insuffisante si la cohérence opérationnelle comme la cohésion interne de cette filière, de cet écosystème complexe (cf. Figure 1), ne sont pas stimulées autrement.



Figure 1 : Cartographie des parties prenantes de l'écosystème (Source : Auteur).

7

Un secteur en mutation accélérée, au service d'une aéromobilité indispensable

Or, le transport aérien et la construction aéronautique font face à trois risques systémiques vitaux : celui de ne pas trouver de solution rapide à la décarbonation ; celui de n'être pas en soi une solution pour la société désirable de demain ; et celui, plus immédiat, en termes d'image notamment, de ne pas se mettre en situation de répondre à ces deux questions.

Le premier risque est globalement bien cerné par les acteurs et décideurs du secteur : l'avion vert doit au plus vite sortir des usines et doit être exploité au mieux par les compagnies aériennes, les aéroports et l'activité touristique, selon des critères RSE imparables. L'enjeu est alors d'abord de mobiliser l'effort de recherche et d'innovation tous azimuts vers des pistes de solutions concrètes. Hydrogène, avion électrique, hybride, solaire, les approches en descente continue dans le contrôle de la navigation aérienne, le SAF¹, la captation du carbone, sont autant de pistes de solutions qui demandent encore du temps et des investissements importants, mais qui parviendront à terme à réussir la décarbonation de l'aviation et à faire du transport aérien le mode de transport le moins polluant.

Le deuxième risque est plus diffus mais bien réel. Tout un pan de la société, et de la jeunesse en particulier, s'oppose à l'hypermobilité, à une société du gaspillage et aux inégalités, aux pollutions, ainsi qu'aux « riches », ou du moins à l'image malheureusement parfois réaliste qu'ils s'en font. Ils souhaitent aussi une société plus lente (*slow*), s'opposant à l'accélération des rythmes de production, de consommation de la vie quotidienne en général telle que la décrit remarquablement Harmut Rosa². Si bien que sur ce dernier point, l'immobilisation de la vie sociale pendant la pandémie de la Covid-19 a donné des arguments aux adversaires du transport aérien. En effet, le ralentissement de l'activité économique dû au confinement pendant le printemps 2020 a provoqué une forte diminution des émissions de polluants atmosphériques et de la mortalité associée³. Si on y ajoute les « déclinistes » et autres « collapsologues » qui rejettent tout progrès technique, on s'aperçoit que l'avion est le réceptacle souvent efficace et emblématique de leurs contestations et de leurs peurs. Il serait imprudent d'être indifférent, voire dédaigneux à l'égard de ces mouvements d'idées ; car forcément toute la classe politique s'en empare et ne peut faire autrement. Certes, ces idées à l'endroit de l'avion sont minoritaires et très européenocentrées. En effet, l'aéromobilité est une nécessité absolue pour nombre d'activités économiques et sociales, en particulier aux Amériques,

en Afrique ou en Asie⁴. Qu'importe ! Elles agissent en posant des questions de fond sur la société de demain.

Le troisième risque est par conséquent de ne voir ni ces évolutions de l'opinion, ni l'enjeu écologique ; et à supposer qu'ils soient vus et compris, de ne pas penser l'organisation nouvelle qui les maîtrisera.

Cette organisation nouvelle, cette gouvernance profondément rénovée, supposent naturellement des investissements économiques et financiers de première importance, des investissements immatériels dans la recherche scientifique et technique, l'éducation et le développement d'une culture scientifique et technique enfin prise au sérieux. Cette gouvernance nécessite également un accompagnement en termes de management qui sache s'appuyer sur un écosystème de connaissances de première main.

Accompagner les transitions en préparant autrement les talents

Dans ce contexte, la direction générale de l'Aviation civile (DGAC) et l'École Nationale de l'Aviation Civile (ENAC), avec l'appui et la coopération de toute la filière, ont su développer un dispositif de formation inédit qui permet effectivement de contribuer à diffuser cette nouvelle culture dont l'écosystème du transport aérien a besoin pour progresser et relever les défis. Ce nouveau concept pédagogique, je l'ai nommé Logotique : Λόγος, *logos*, la parole, le verbe, la parole qui circule⁵.

Ainsi en 2017, l'ENAC a créé en son sein une formation professionnelle nouvelle nommée « Université du transport aérien - UTA », qui réunit en format interentreprises des professionnels issus des différentes parties prenantes de la filière ou écosystème : aviateurs, motoristes, *supply chain* aéronautique, *ground handling*, aéroports, compagnie aérienne, contrôle de la navigation aérienne, régulateurs, administrations et agences publiques comme la DGAC.

L'utilité de la formation UTA avant la crise du transport aérien provoquée par la pandémie de Covid-19 avait déjà été démontrée, mais elle s'est renforcée pendant la crise sanitaire. La mise en cause des modèles d'affaires des différents acteurs de cet écosystème est profonde ; chacun doit se réinventer.

¹ *Sustainable aviation fuel*.

² Harmut Rosa, *Accélération - une critique sociale du temps*, La découverte, 2013.

³ <https://www.santepubliquefrance.fr/determinants-de-sante/pollution-et-sante/air/articles/pollution-atmospherique-evaluations-quantitatives-d-impact-sur-la-sante-eqjs>

⁴ Cf. Jean-Claude Beaujour, « L'aéromobilité au soutien des objectifs de développement durable et solidaire », *Air & Cosmos*.

⁵ Francis Massé, *La Logotique*, L'Harmattan, 2023.

Principales entreprises françaises ayant régulièrement envoyé des stagiaires depuis 2017 :

- ACTEMIUM, Aéroports de Paris (ADP), Aéroports de Auch, Brive, Nice, Pierrefonds, Toulouse, Rodez ;
- compagnies aériennes : Air Austral, Air Caraïbes, Air France, HOP, Transavia, French Bee ;
- construction aéronautique : Airbus, Airbus Atlantique, ATR, Dassault Aviation, DGAC, BEA, GTA, COMALAT, EDEIS, EIFFAGE, Latécoère, Liebherr Aerospace, Sabena Technics, Safran, Thales ;
- administrations et agences internationales : SNIA, STAC, DSNA, EUROCONTROL, etc.

Existant désormais depuis sept ans, cette formation UTA, qui devient totalement européenne en 2024 – "European Air Transport University" –, propose une approche à 360° pour faire connaître le fonctionnement réel de la filière à tous les auditeurs et auditrices pour une vision commune et partagée dans toute l'Europe du transport aérien et de la construction aéronautique, et ce avec le sponsoring de la Commission européenne et le soutien de l'ECAC (Conférence européenne de l'aviation civile) .

Organisée en six modules d'une semaine chacun, cette formation est exigeante mais permet de constituer pour l'avenir des viviers de professionnels possédant un langage commun et une expérience inédite de travail en commun. Cette formation permet non seulement de contribuer à renforcer la cohésion de l'écosystème et sa cohérence opérationnelle, mais encore d'éviter l'entre-soi en s'ouvrant aux différentes attentes de l'environnement (cf. Figure 2).

La pédagogie est inventive et actualisée en permanence en fonction des besoins et des enjeux ; elle est très

participative ; elle insère des visites d'entreprises (*learning expedition*) comportant des débats avec les industriels, et s'ouvre à des échanges étroits : avec des universitaires, des chercheurs, des journalistes, des lobbyistes, des ONG, des syndicalistes et naturellement des professionnels. Plusieurs stratégies, décideurs, experts et spécialistes de l'ensemble des parties prenantes de la filière du secteur public et du secteur privé, national, européen et international, apportent leurs savoirs et leurs expériences aux auditeurs. Depuis 2017, près de 800 intervenants ont participé au cycle de formation en fonction de leurs métiers, responsabilités et spécialités. L'immense majorité d'entre eux sont des professionnels de la filière du transport aérien et de la construction aéronautique (cf. Encadré p. 140 sur quelques personnalités intervenant à UTA). Une autre catégorie d'intervenants provient du monde de la recherche, de l'université tels des juristes, économistes, géographes prospectivistes, politiques, philosophes, hauts fonctionnaires. UTA fait aussi appel à des consultants, des professionnels des médias, des représentants d'organisations syndicales ou d'ONG.



Figure 2 : Schéma du cycle de formation UTA de l'ENAC en 6 modules (Source : Auteur).

Quelques intervenants de UTA :

Rudy Aernoudt (*Senior economist*, Commission européenne), Pierre Ageron (Géographe), Ludovic Andrevon (CFE CGC), Édouard Arkwright (ADP), Yannick Assouad (Thales), Alain Anziani (Président Bordeaux Métropole) François Bachetta (EasyJet), Jean-Claude Beaujour (Harlay Avocats), David Benito (DGCA – Espagne), Raymond Benjamin (Ancien SG OACI), Mathieu Blondel (Arthur D. Little), Peter Bombay (Commission européenne), Vincent Bamberger (Arthur D. Little), Olivier Chansou (DG ENAC), Jérémy Caussade (Aura Aéro) Damien Cazé (DGAC), Marie de Saint Cheron (Safran), Paul Chiambaretto (Montpellier Business School), Patrick Cipriani (DGAC), Emmanuel Combe (économiste), Filip Cornelis (Commission européenne), Patrick Daher (DAHER), Jean Baptiste Djebbari (Ancien ministre), Philippe Dujaric (GIFAS), Nathalie Errard (Airbus), Olivier de L'Estoile, Patrick Gandil (DGAC), Marc Hamy (Airbus), Gilles Garouste (Dassault), Fabrice Gliszczynski (*La Tribune*), Valérie Guenon (Safran), Marc Houalla (DGAC), Pablo Perez Illana (CINEA), Pascal de Izaguirre (Corsair), Olivier Jankovec (ACI Europe), Nicolas Jeuland (Safran), Alain Juillet (Ancien DGSE), Piotr Kasprzyk (Pansa – Pologne), Sabine Klauke (Airbus), Daniel Krob (CNRS), Robert Lafontan (Airbus), Alain Lamassoure (Ancien ministre, député européen), Dominique Lazarski (UFCNA), Marta Lestau (AESA – Espagne), Sabine Lochman (Ascend-ESG), Marian-Jean Marinescu (Député européen), Antoine Lapert (Cohor), Loïc Michel (European Cockpit Association) Christophe Million Rousseau (Jackson Square Aviation), Christian Morel (Sociologue), Pierre Moscovici (Commissaire européen), Bruno Nouzille (Thales), Laurent Pic (Ambassadeur de France OACI), Nicolas Ravailhe (Avocat), Cesar Ramos (Directeur TDAE – Espagne), Dominique Riquet (Député européen), Anne Rigail (DG Air France), Julien Rossi (Safran), Javier Ruano Contreras (Indra), Michel Saloff Coste (Directeur de la prospective – UCL), Jean-Pierre Sauvage (BAR France), Rafael Schwartzman (IATA), Jean-Cyril Spinetta (Ancien PDG d'Air France-KLM), Daniel Soulez-Larrivière (Avocat), Bruno Stoufflet (Dassault), Lionel de la Sayette (Dassault), Belinda Swain (Rolls-Royce), Nathalie Stubler (Safran), Antoine Toulemont (Aura Aero), Jean-Christophe Tortora (*La Tribune*), Bruno Trévidic (*Les Échos*), Luc Tytgat (EASA), Stéphane Viala (Ascendance Flight Technology, ex. ATR), Marc Rochet (FNAM), Augustin de Romanet (ADP), Alain Rousset (Président Région Nouvelle Aquitaine), Emmanuel Vivet (DGAC), Michel Wachenheim (Président de l'Académie de l'Air et de l'Espace), Marc Wagner (DRH Airbus Allemagne), etc.

Comme l'objectif est de fournir aux auditeurs une vision à 360° de la filière aéronautique et du transport aérien, la plupart des thématiques sont abordées et présentées par les meilleurs spécialistes ou les plus hauts responsables, par exemple :

- La « certification avion » avec Gilles Garouste de Dassault Aviation et Belinda Swain de Rolls Royce.
- « L'image de l'aviation dans les médias » avec Léo Barnier de La Tribune, Gesche Wüpper (AJPAE), Bruno Trévidic (Les Échos), Max Armanet (Président fondateur du Paris Air Forum), Yann Cochenec (Air & Cosmos).
- « La fresque aéro » avec Isabelle Laplace.
- « Le soft power européen » avec Nicolas Ravailhe, avocat.
- « La chaîne de valeur du transport aérien » avec Mathieu Blondel d'Arthur D. Little.
- « La vision de l'avionneur » avec Robert Lafontan (Airbus).
- « Les grands témoins » avec Jean Cyril Spinetta (Air France-KLM), Anne Rigail (Air France), Nathalie Stubler (Transavia), Jean Marian Marinescu (Président Intergroupe air et espace au Parlement européen), Pierre Moscovici (Alors commissaire européen), Filip Cornelis (Directeur aviation à la Commission européenne), Yannick Assouad (Thales Avionique et présidente du CORAC), Olivier Jankovec (ACI Europe), Augustin de Romanet (ADP), Florian Guillermet (AESA), Julie Kitcher (Chief sustainability and Communications - Airbus), Sabine Klauke (Chief technology officer - Airbus), etc.

Enfin, cette formation fournit des apports importants en termes de connaissances, expériences professionnelles, savoir-faire et culture générale (*soft skills*).

En définitive, il nous faut décupler la créativité des écosystèmes et les innovations, pour gagner en

performance et réussir la réindustrialisation de notre pays. Le transport aérien et la construction aéronautique en sont des vecteurs importants.

Mais alors quand faire appel à la Logotique ? (cf. Figure 3 ci-dessous).

- Quand la crise est là ; nous y sommes : les mutations en cours la manifestent et nous sommes bien en présence aujourd'hui d'une crise globale, totale.
- Lorsqu'il faut préparer le futur par la connaissance ; naturellement nous découvrons de jour en jour l'importance vitale des savoirs et des savoir-faire.
- Quand il faut négocier les transitions qui s'imposent aux organisations publiques et privées ; qu'elles soient énergétiques, économiques, écologiques géopolitiques, digitales, sociétales ou autres, ces transitions exigent des transformations internes de nos organisations alors conçues comme des réponses exactement appropriées aux mutations externes de leur environnement.
- ... Et mobiliser les équipes, car ce ne sont pas en fait les organisations qui se transforment mais bien les femmes et les hommes de ces organisations qui prennent conscience de ces transitions, qui évoluent et conçoivent les changements à conduire.
- S'il faut impliquer d'autres écosystèmes, oui ! Et ce sera de plus en plus souvent le cas, car nos filières industrielles interagissent de plus en plus entre elles pour se développer et innover, comme nous avons vu les liens croissants entre le transport aérien et le secteur de l'énergie pour réussir la décarbonation de l'aviation...
- ... Et garantir la survie ! En effet, la rentabilité et le développement de nos entreprises reposent sur l'énergie et les connaissances des scientifiques, des ingénieurs, techniciens, ouvriers et managers de nos entreprises, mobilisés autour de ces transformations.
- Quand la situation exige des solutions nouvelles : une collaboration étroite entre les secteurs public et privé s'impose, ce qui implique une profonde rénovation culturelle des administrations publiques au service de l'économie de la société : simplification, culture scientifique et technique, refondation de la culture managériale, capacités cognitives, qualités relationnelles et aptitudes comportementales des acteurs.

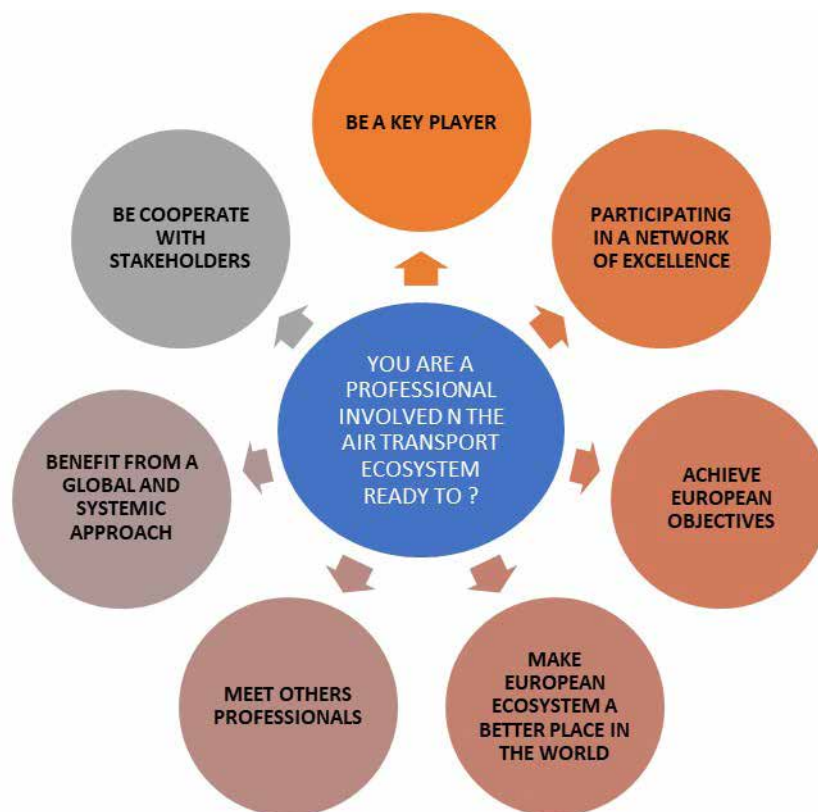


Figure 3 : Modèle type d'une communication vers les entreprises relative à la formation UTA (Source : Auteur).

La Logotique

La Logotique est une forme inédite de cycles de formation participative strictement adaptés aux besoins des cadres, ingénieurs et managers, ainsi que hauts potentiels, travaillant dans une filière économique ou un secteur économique, social ou administratif homogène. L'objectif est de permettre le dialogue au sein d'un même écosystème, afin d'enrichir la compréhension mutuelle entre tous les acteurs et de renforcer sa cohésion et sa capacité à agir collectivement en partenariat et en cohérence opérationnelle. Ces cycles permettent ainsi l'échange et la co-construction entre les diverses parties prenantes d'un secteur concerné. Ils peuvent produire des effets de viviers, générer des affaires, ou favoriser l'innovation et l'apprentissage au bénéfice d'une véritable société de la connaissance et d'un meilleur service rendu à la société.

Bibliographie

ALGAN Y. & CAHUC P. (2007), *La société de défiance - Comment le modèle français s'auto-détruit*, Éditions rue d'ULM.

AUTHIER M. (1996), *Les arbres de connaissances*, La découverte, préface de Michel Serres.

BPI GROUP (2016), « Printemps des universités d'entreprise », livre blanc.

COLLINS J. (2013), *De la performance à l'excellence : devenir une entreprise leader*, Pearson.

CHRISTIAN D. (1997), *L'art de diriger, l'art de peindre*, Ammaréal.

DIAMOND J. (2009), *Effondrement - Comment les sociétés décident de leur disparition ou de leur survie*, Folio Essais.

DUFOURCQ N. (2023), *La désindustrialisation de la France 1995-2015*, Odile Jacob.

DUPUY F. (2013), *Lost in management - La vie quotidienne des entreprises au XXI^e siècle*, Points.

GAUDIN T. (2017), *Où atterrir ? Comment s'atterrir en politique*, La découverte.

GAUTHIER A. (2023), *Le co-leadership évolutionnaire*, HD PrécurSIONS.

GOLDRATT E. (2002), *Le but*, Association française de normalisation.

GRANSTRAND O. & HOLGERSSON M. (2020), *Innovation ecosystem: A conceptual review and new definition*, Technovation.

D'HERBEMONT O. (1996), *La stratégie du projet latéral*, Dunod.

D'HERBEMONT O. (2012), *Booster l'intelligence collective*, Armand Colin.

JARROSSON B. (1994), *Décider ou ne pas décider ? Réflexions sur les processus de la décision*, Maxima.

MASSÉ F. (2011), *Aux frontières du management - Manifeste pour un temps d'exigence*, L'Harmattan.

MASSÉ F. (2020), *Urgences et lenteur*, Fauves éditions, préface Anne Marie Idrac.

MASSÉ F. (2023), *La Logotique*, L'Harmattan, préface de Yannick Assouad et postface de Michel Saloff Coste.

MOREL C. (2014), *Les décisions absurdes*, Folio Essais.

OLDENBURG R. (1999), *The great good place*, Da capo presse.

PELT J.-M. (2011), *La raison du plus faible*, Le livre de poche.

PORTER M. (1999), *L'avantage concurrentiel*, Dunod.

ROSA H. (2013), *Accélération, une critique sociale du temps*, La découverte.

SALOFF COSTE M. (2005), *Le management du troisième millénaire*, Guy Trédaniel éditeur.

SALOFF COSTE M. (2021), *Écosystèmes innovants - Le futur des civilisations et la civilisation du futur*, ISTE éditions.

STAUNE J. (2017), *Notre existence a-t-elle un sens ? Une enquête scientifique et philosophique*, Fayard.

WALDNER J.-B. (1990), *Les nouvelles perspectives de la production*, Dunod.

Quelques définitions

Approche en descente continue

C'est une technique qui permet au pilote de conduire le vol à l'arrivée d'un aéroport en évitant au maximum les phases de vol en paliers et en réduisant ainsi la sollicitation des moteurs, ce qui permet de limiter les nuisances sonores et réaliser des économies de carburants.

Théorème de Gödel

Ce théorème du mathématicien Gödel pose deux points majeurs :

- Tout système d'axiome (dans la théorie des nombres) contient des propositions indécidables (on ne peut savoir si elles sont vraies ou fausses). C'est-à-dire, comme le précisait Thierry Gaudin, il s'agit de propositions que l'on peut accepter ou refuser sans être en contradiction avec la théorie.
- Tout système d'axiomes est soit incomplet soit incohérent, car il ne peut être complet et cohérent.

Ce théorème peut contribuer à faire comprendre les mécanismes fonctionnels et structurels qui sont à l'œuvre, en accentuant le délitement de l'organisation et ainsi aider à en réduire le risque. Il peut en effet aider à mettre en lumière les processus d'ouverture ou d'enfermement des organisations publiques ou privées, et leurs effets vertueux ou négatifs.

La loi de la variété de William Ross Ashby

Elle s'énonce ainsi : « plus un système est varié, plus le système qui le pilote doit l'être aussi ». Varié signifiant ici le degré de complexité, le dénombrement de la quantité de comportements et d'états différents mesurés pour un système donné. S'agissant de la gouvernance, on peut en tirer deux conclusions :

- La croyance à la simplification des organisations qui travaillent dans un environnement de plus en plus complexe est un leurre.
- Cette mauvaise simplification qui ne tient justement pas compte de la complexité aboutit à une complication croissante et, au final, à un surcroît de bureaucratie, voire à une forme de tyrannie managériale.

Théorie de la décision

Cohérence interne > compatibilité avec une structure logique / Cohérence externe > compatibilité et pertinence avec une situation extérieure. Contre les silos ! Source : Bruno Jarrosson (1994), *Décider ou ne pas décider ? Réflexions sur les processus de la décision*, Paris, Maxima.

Écosystème complexe innovant

Un écosystème d'innovation est l'ensemble évolutif d'acteurs d'activités et d'artefacts, ainsi que les institutions et les relations, y compris les relations complémentaires et de substitution, qui sont importantes pour la performance d'un acteur ou d'une population d'acteurs. Un écosystème innovant ne peut innover que s'il s'ouvre à d'autres écosystèmes (par exemple la filière aéronautique se doit d'innover pour se décarboner, et cet objectif vital pour elle et le futur du transport aérien ne peut être atteint que dans sa relation étroite avec la filière de l'énergie).

Écosystème complexe transformant

C'est un écosystème qui s'organise pour être une solution à la société désirable de demain ; c'est donc un écosystème qui accompagne la société actuelle vers son futur.

VICA : volatilité, incertitude, complexité, ambiguïté

Ce concept s'inspire des théories du *leadership* de Warren Bennis et Burt Nanus (1987) :

- Filière au sens économique désigne l'ensemble des activités complémentaires qui concourent d'amont en aval à la réalisation d'un produit fini.
- Filière professionnelle est le regroupement de métiers qui ont des points communs ou des techniques communes.
- Une filière de formation désigne un parcours pluriannuel de formation initiale et continue mettant en jeu une trajectoire type.
- La branche professionnelle regroupe des entreprises d'un même secteur d'activité et relevant d'un même accord ou d'une même convention collective.

Les campus des métiers et qualifications, et leurs apports à l'aéronautique

Par **Christophe MEYRUEY**

Président du Campus des métiers et qualifications Aéronautique et Spatial d'Occitanie

Fédérer, convaincre, entraîner, organiser, voilà en quelques mots clefs la vocation des campus des métiers. Celui que j'ai l'honneur de présider regroupe en Occitanie les entreprises de l'aéronautique et du spatial, deux des moteurs de l'économie française, symboles (parmi d'autres) de l'excellence industrielle de notre pays. Ces deux grandes industries, particulièrement l'aéronautique, sont à la croisée des chemins. Dans un monde tenté par le repli sur soi, elles sont, à des degrés divers, remises en cause. Il est de notre devoir de ne pas laisser cette petite musique insidieuse faire son chemin, et de démontrer au contraire que tout est réuni pour que, technologiquement, ces filières inventent un avenir décarboné. Pour cela, il nous faut expliquer et convaincre jeunes et moins jeunes de les rejoindre, et inventer les formations qui seront demain indispensables. Plus immédiatement, il nous faut aider à assurer la montée en cadence des livraisons d'avions plus propres que ceux des générations précédentes. Ce défi passe par des formations au plus proche des besoins des entreprises petites et grandes de la filière. Quand, pour réussir cela, il faut agréger, entraîner des énergies afin qu'ensemble, elles poussent plus fort, on comprendra que le campus est une vocation pour ceux qui ont le privilège de faire partie de l'aventure.

Fédérer des énergies complémentaires

Un campus, dans l'acception que l'État en a donnée il y aura dix ans en septembre, rassemble, autour d'un lycée porteur, l'écosystème territorial public et privé. Concernant le Campus Aéronautique et Spatial d'Occitanie, ce rôle est joué par le lycée Saint-Exupéry situé à Blagnac. Il fédère autour de lui différents acteurs aux premiers rangs desquels se trouvent Airbus, la Région Occitanie et l'UIMM territoriale. Les mettre en avant, c'est faire part d'une double singularité de ce campus. Son directeur opérationnel est statutairement un collaborateur d'Airbus, et, seconde singularité, sa rémunération est répartie entre ces quatre membres fondateurs, étant entendu que c'est le rectorat et non le lycée qui porte la part de l'Éducation nationale. Ce choix, effectué à la création du campus en 2016, avait pour but d'assurer une coordination sans faille entre les acteurs publics et privés de ce campus et un fonctionnement plus direct et plus efficient avec le donneur d'ordre de la filière, qui imprime la cadence. Pour aller encore plus loin, il a été décidé en 2022 de revoir les statuts afin notamment de rendre la présidence tournante. C'est dans ce cadre que j'exerce mon mandat en tant que représentant de l'UIMM, la prochaine présidence étant dévolue à Airbus puis au lycée. Cette ouverture dans la gouvernance ne s'arrête pas aux fondateurs puisque, à titre d'exemple, le bureau

du campus comprend également le représentant d'une PMI importante de la chaîne d'approvisionnement (Mecachrome), le directeur du lycée Airbus ainsi que le directeur de Pad'Occ, plateforme d'accélération vers l'industrie du futur. L'Université Fédérale Toulouse Midi-Pyrénées et Aerospace Valley font également partie des membres fondateurs, nous offrant ainsi le panel le plus large possible pour prendre des décisions éclairées et partagées par tous.

Acteurs publics et privés de la formation, donneurs d'ordre, sous-traitants acteurs de l'écosystème (branches professionnelles, fédérations, clusters, etc.), pouvoirs publics (Région, État, ...) : autant d'interactions que nous fédérons dans un creuset unique. C'est l'objet du campus, sa vocation et potentiellement sa réussite. Ce que le campus n'est pas : un lieu unique de formation comme les campus à l'américaine. Ce n'est pas sa raison d'être, et le tissu extrêmement dense de centres de formations existant en région, particulièrement à Toulouse, ne s'y prête pas.

Expliquer, convaincre et créer des vocations pour rejoindre le monde de l'aéronautique et du spatial

Jeunes, demandeurs d'emploi, prescripteurs professionnels ou parents, proches, familles..., il faut rappeler l'intérêt et l'appétence de l'avion et du spatial.



Visite du Salon du Bourget 2023 par 50 jeunes d'Occitanie (Crédit photo : Antoine FERAUD).

D'un point de vue humain (outil qui rapproche les peuples) ; d'un point de vue technique (dans l'aviation ou le spatial comme dans d'autres domaines, l'industrie est la solution aux problèmes de décarbonation) ; d'un point de vue professionnel également (diversité des métiers et des évolutions professionnelles possibles) ; et ce pour les hommes et les femmes (la question de la féminisation de nos métiers reste prégnante). Mais aussi, et c'est trop souvent passé sous silence, convaincre dans une situation où tous les métiers cherchent à attirer et où la démographie est un enjeu. D'autres métiers décarbonent, d'autres métiers informent et promeuvent, et cela face à un public de moins en moins nombreux, si l'on excepte les métropoles. Or, si le bassin toulousain accueille en Occitanie la majorité des acteurs de ces deux filières, ils sont nombreux à être présents sur l'ensemble de la région. Le Lot et l'Aveyron, au cœur de la « Mecanic Vallée », sont des terres aéronautiques au même titre que les Hautes-Pyrénées. Mieux encore, la région développe, sur son côté est, une filière de nanosatellites à Montpellier, et la base aéronautique de Nîmes Garon est source de promesses pour l'avenir autour de l'aéronautique liée à la sécurité civile. Bref, il nous faut convaincre partout, alors que les ressources humaines se font rares et que le temps nécessaire pour former dans nos métiers est par nature un temps long.

Collégiens, lycéens, prescripteurs familiaux ou dont c'est le métier (je pense notamment aux Maisons de la Région en Occitanie), tous les publics doivent être visités partout, de Mendes à Bagnères-de-Bigorre pour faire une grande diagonale en Occitanie. Nous le faisons, notamment avec un *escape game* spécial aéronautique, et nous essayons d'aller plus loin encore en apportant du rêve et de l'émotion. À ce titre, nous avons mené avec le soutien d'Airbus et d'ATR une opération symbolique lors du dernier Salon du Bourget. Ce sont 50 jeunes, issus de toute la région et de tous niveaux scolaires, que nous avons emmenés visiter le Salon en

ATR sur une journée. Parmi eux, deux n'avaient jamais pris l'avion. Ce qui peut être vu comme une anecdote est en fait un symbole fort, celui que la filière est ouverte à tous, ce qui est malheureusement trop méconnu.

La demande ne faiblit pas : il apparaît essentiel de proposer des formations adéquates pour l'aéronautique et le spatial. Au niveau national, le GIFAS dénombre ainsi environ 4 480 entreprises regroupant près de 263 000 salariés pour les filières aéronautique et spatial, et, après une baisse de 7 % sur les deux années de crise 2020 et 2021, observe une reprise des embauches en 2022, et prévoyait 16 000 recrutements pour 2023 en France et des perspectives importantes sur la décennie. L'aéronautique est l'une des principales forces de la France en termes de commerce extérieur (elle exportait 64 milliards d'euros en 2019 et après le trou d'air du Covid, est en train de reprendre avec un niveau de commandes historique pour Airbus) comme d'industrie.

Le spatial quant à lui implique 1 704 sociétés qui emploient 33 200 salariés pour leur activité spatiale (dont un tiers en Occitanie), avec un chiffre d'affaires de 10,8G€. L'accord de Séville début novembre 2023 a permis de conforter le financement de l'Ariane, tout en renforçant la concurrence (fin du monopole de lancement européen) ce qui implique d'avoir des formations d'excellence pour l'avenir dans un domaine crucial pour la souveraineté, les télécoms, l'atténuation de l'effet de serre...

L'Occitanie est la première concernée : la filière aéronautique y emploie 40 % de ses emplois industriels (environ 90 000 emplois), une part importante de sa valeur ajoutée et 70 % de ses exportations. La région est aussi la première pour le spatial avec 15 000 salariés. Enfin, l'Occitanie emploie environ 50 000 salariés dans la R&D, en premier lieu dans l'aérospatial. Les

enquêtes de l'ORCI Occitanie¹ ainsi qu'une étude de l'OPCO recensent les besoins de la filière².

Le campus contribue à cet effort : il recensait récemment 1 855 scolaires, 244 apprentis, et 2 en formation permanente.

Entrainer une dynamique commune

Jamais le rapprochement entre l'école et l'entreprise n'a été aussi fort. C'est vrai de manière générale – depuis deux ans, en Occitanie, nous n'avons jamais eu autant de demandes de collèges et de lycées pour visiter des entreprises industrielles et découvrir nos métiers –, et cela l'est encore plus concernant les sujets de l'aéronautique et du spatial. Pour autant, et quel que soit le nombre de conventions que nous signerons, nous avons tous besoin de mieux nous connaître, et cela ne peut se faire qu'individuellement. Qui sait mieux la réalité (attentes, connaissance, savoir-être) des élèves, nos futurs salariés, que les professeurs des collèges et lycées, et les formateurs des CFA de l'Industrie ? En miroir, qui sait mieux que le dirigeant de PME, le RH d'une entreprise plus grande, le chef d'équipe, quels sont les attendus réels de tels ou tels postes dans les matières scientifiques, techniques, mais également rédactionnelles ? S'il est à peu près acquis pour tous que les élèves changent, *quid* de l'entreprise ? Ses codes, son fonctionnement, son organisation, tout est dans une évolution perpétuelle qu'il nous faut expliquer. Oui, l'entreprise a besoin de jeunes curieux, cultivés, aptes à se remettre en question pour répondre aux défis que l'on connaît (digitalisation, IA) et ceux que l'on découvrira demain. Notre chance ?

¹ www.orci-occitanie.fr

² https://www.orci-occitanie.fr/wp-content/uploads/2021/03/BDO-BIPE_Enquete_besoins_en_competences_aero_en_Occitanie_OPCO21_Rapport_20201230_Charte.pdf

Peu de métiers comme ceux de l'industrie demandent autant de formation tout au long de la vie professionnelle. Concrètement, cela se traduit par des « vis ma vie » emmenant les professeurs en entreprise et les salariés en collège ou lycées. Cela permet ensuite une meilleure orientation avec une connaissance plus fine des prérequis nécessaires pour tel ou tel métier. Mieux informer professeurs et professionnels de l'entreprise en amont réduit les risques d'erreurs d'orientation et donc de déceptions partagées.

Si, sur ce champ de la promotion, les activités sont nombreuses et notre limite le temps disponible pour chacun, le grand défi d'aujourd'hui porte sur l'adéquation des formations aux besoins des entreprises, territoire par territoire. Sait-on former à un besoin spécifique correspondant à une entreprise d'un bassin d'activités donné et sur une période courte ? Techniquement oui, mais la réalité est un peu différente. Méconnaissance des besoins et délais des uns et des autres, travail inter-organismes de formation pour amener une réponse rapide, tout reste à industrialiser pour que nos réussites réelles ne soient pas que l'œuvre de bonnes volontés ponctuelles. En réunissant tous les publics, sous une bannière neutre et fédératrice, le campus doit être le creuset qui permet cette réussite.

Enfin, je ne saurais finir cet article sans aborder le thème de l'international. Il doit être un de nos chevaux de bataille pour permettre à la filière de faire valoir son attrait. Le formidable réseau d'implantations mondiales des entreprises de l'aéronautique et du spatial doit nous permettre demain d'accueillir et de faire voyager, et cela quel que soit le niveau des études suivies, l'ensemble de nos étudiants et apprentis. La découverte d'autres cultures, d'autres modes de travail, d'autres façon d'enseigner nous permettra d'offrir un monde plus vaste, plus ouvert, aux futurs salariés des industries aéronautiques et spatiales. Cet engagement professionnel est aussi notre engagement citoyen pour l'avenir.

The aeronautics industry faced with the challenges of competition and climate change

Introduction

Stéphane Molinier

Continuing the human adventure of air transport and offering the same travel opportunities to future generations, with the challenge of carbon neutrality in 2050, requires all stakeholders in the aeronautical sector to make massive investments in the production chain and in decarbonizing, against a backdrop of traffic growth and tension in the value chain resulting from health and geopolitical crises.

Achieving carbon neutrality by 2050 will require the mobilization of a number of levers: fleet renewal with more powerful, lighter, more efficient aircraft; the quest for sobriety and performance through technological progress; electrification; the development of alternative fuels to kerosene: sustainable aviation fuels and hydrogen; optimization of ground and in-flight operations; regulatory incentives; compensation for residual emissions; adaptation of the industry's skills; and finally, consumer involvement.

Markets and the impact of regulations

The challenges of traffic growth and ecological transition

Damien Cazé

The year 2023 confirmed the rebound in air traffic since its sudden halt in March 2020 caused by the health crisis. The announced return to pre-pandemic levels has only served to increase the criticism levelled at air transport by its detractors, who accuse it of being one of the main contributors to climate change. Yet considerable technological progress has been made in building aircraft whose fuel consumption per passenger kilometer carried and associated CO₂ emissions have been reduced by around 80% compared with the aircraft of the 1960s. Today, air transport accounts for 2.5% of human-made CO₂ emissions worldwide.

In view of the continuing growth in traffic over the coming decades, the air transport sector is mobilizing to achieve its objective of net-zero emissions by 2050. The International Civil Aviation Organization has defined a global strategy; the European Union's Green Deal includes an intermediate target of reducing CO₂ emissions from aviation by 55% by 2030; and France has drawn up a roadmap for sustainable aviation fuels, with the ambition of designing a low-carbon aircraft.

Global aerospace market outlook, decarbonization, and Airbus strategy

Guillaume Faury

The Covid-19 pandemic created an unprecedented crisis for global air transport, leading many observers to believe that aviation would never return to the growth of precedent years, and might even experience a certain decline.

This was to forget that air transport has become an irreplaceable asset of modern society, transporting goods and linking people, cultures, and territories – all factors in development and progress.

Following strict sanitary measures, air transport has gradually returned to its 2019 level, with growth now appearing to be picking up at a rate of around 3.6% a year. This strong demand is putting a strain on the production lines of Airbus and its subcontractors, weakened by the crisis. But the main challenge is to ensure sustainable growth in air transport, compatible with the objectives of the Paris Climate Agreement. This is the challenge that Airbus has set itself, with the ambition of pioneering totally carbon-free aviation, thanks to increasingly efficient aircraft in terms of emissions, disruptive technologies, such as hydrogen-powered aircraft, and the massive use of sustainable fuels.

And all this for sustainable aviation, but also for a safer, more united world.

Regulations, certification, and their impact

Luc Tytgat

The article discusses the challenges and transformative efforts needed in the aeronautics industry to address competition and climate change. It highlights the necessity for the industry to adopt sustainable aviation fuels (SAF) and explore electric, hybrid, and hydrogen aircraft technologies to reduce carbon emissions. The European Union's Green Deal and initiatives like ReFuelEU Aviation are mentioned as key strategies to decarbonize aviation by encouraging SAF integration. The European Union Aviation Safety Agency (EASA) plays a crucial role in overseeing this transition, ensuring safety, and adapting regulatory frameworks to support innovation and environmental sustainability. Collaboration among industry stakeholders, research institutions, and regulatory bodies is emphasized as essential for achieving a carbon-neutral future in aviation.

Air Traffic Management (ATM)

Raúl Medina

This paper provides a high-level overview of some of the principal challenges facing Air Traffic Management (ATM). It explains that air traffic control is a natural monopoly that nevertheless facilitates competition among the various actors in the air transport industry. ATM provides airspace capacity to meet traffic demand. The paper provides the latest historical and forecast air traffic statistics, confirming that it will take seven years for European air traffic to fully recover from the pandemic.

Airspace capacity must be provided in a safe, secure, cost-efficient, and sustainable manner to meet demand. Doing so is complex and becomes particularly challenging in the face of external events, such as Russia's invasion of Ukraine, whose impact on ATM is described. The long-term challenges of the decarbonization and digitalization of ATM are addressed, as well as the impact of Artificial Intelligence (AI), with some examples provided of how ATM is adapting.

The development of air traffic, airlines and the effects of their concentration

Pierre Cavé

With world GDP growth strongly correlated with air traffic growth, 2023 caught up with the 2019 level in passenger. Dynamics remain contrasted regarding to world areas: Europe stands out with a recovery driven by Southern European countries; North America shows a pre-crisis traffic level almost recovered; and Asia-Pacific remains dynamic with a third of world traffic. Airlines have not restored the net margins pre-COVID, but the aeronautic demand remains strong: Airbus maintains its leadership for the 5th consecutive year. In the long term, traffic should continue to grow, with environmental challenges to be met, coupled with an evolution in pre-crisis customer bases.

Decarbonizing air travel as part of a new economic paradigm

Augustin de Romanet

Since the 1970s, the air transport sector has enjoyed tremendous growth, slowed only by a global health crisis in 2020. However, the pandemic is not the only reason why the sector is now being called into question: for some years now, public opinion has been concerned about global warming, and air transport has become the ideal scapegoat. While the judgement is harsh, it does have the merit of having considerably accelerated the commitment of the airline industry to the fight against climate change. Since 2019, measures to reduce its carbon footprint have multiplied: fleet renewal, improved operations, deployment of disruptive technologies, use of sustainable aviation fuels.... As a major player in this far-reaching transformation, the ADP Group has adopted an ambitious roadmap to meet a major challenge: to remain a central player in mobility, but one that is reasoned and, above all, carbon-free.

Decarbonizing the industry and boosting competitiveness

DGE (Directorate General for Enterprise) support for the aeronautics industry

Thomas Courbe

Still reorganizing after the crisis triggered by the pandemic, the French aerospace sector is facing the triple challenge of ecological transition, innovation, and reducing its dependencies. In response to each of these challenges, the French Directorate General for Enterprise (DGE) is supporting the sector, as part of the reindustrialization policy supported by the "France Relance" recovery Plan and the "France 2030" investment plan. The support we provided during the health crisis enabled us to initiate a dynamic transformation of the sector, by speeding up the modernization of production facilities, from subcontractors to major principals. We are continuing to support the industry by promoting innovation, securing critical supplies, and building the value chain for carbon-free aircraft in France.

ATR designs tomorrow's responsible air connectivity today

Nathalie Tarnaud Laude

With globalization, aviation has taken on a predominant role in the world's economic activities. Ensuring accessibility to the most remote areas, regional aviation contributes to territorial cohesion, and opens up prospects for economic development.

At a time when climate change is forcing us to completely rethink our lifestyles, aircraft are often heavily criticized for their contribution to greenhouse gas emissions. But what about regional aviation? What are the challenges and prospects for this unique form of aviation? As the world leader in regional aviation, ATR has adopted an ambitious, yet realistic approach to maintaining responsible regional connectivity.

General aviation, a laboratory for decarbonizing air transport

Didier Kayat

As the world's seventh-largest general and business aviation manufacturer, Daher, heir to the legendary Morane-Saulnier company founded in 1911, is the world's oldest aircraft manufacturer still in business. Building on this pioneering spirit, Daher is now taking a proactive approach to decarbonizing its own aircraft, and making a significant contribution to the decarbonization objectives of its aircraft and engine manufacturer customers.

Hybrid propulsion for VTOLs: A solution that combines performance and low emissions

Jean-Christophe Lambert

To achieve carbon neutrality by 2050, aircraft manufacturers, leading OEMs (original equipment

manufacturer) and aeronautical start-ups are working together to develop more sustainable aircraft. Among the solutions they have chosen is the VTOL (vertical take-off and landing), a vertical take-off and landing aircraft positioned as an alternative to the helicopter and for new advanced air mobility. Powered by a hybrid electric motor, it reduces carbon emissions and noise, and offers a range of 400 km. Beyond its use, this helicopter-plane is a formidable technological catalyst for the decarbonization of the sector.

The challenges of carbon-free aircraft propulsion

Thibaud Normand & Éric Dalbies

The airline industry's commitment to achieving carbon neutrality by 2050 calls for an unprecedented effort in aircraft energy efficiency, in addition to the use of sustainable fuels. This challenge is at the root of a profusion of innovations currently underway in the field of aircraft propulsion. Electric and hybrid propulsion, in a variety of forms, will be used in all aircraft segments, with general aviation serving as a testing ground for technologies that will help reduce fuel consumption in future commercial aircraft engines. From a climate standpoint, the main challenge lies in the propulsion of the next generation of short-to-medium-haul aircraft, succeeding the Airbus A320neo and Boeing 737 MAX. Safran and its partner GE Aerospace are preparing for this through the RISE technology program, which covers the development of a number of breakthrough innovations, and is helping to mobilize the entire industry.

High-power propellers: High-performance solutions for responsible aviation

Jean-François Chanut

Long overshadowed by the faster, post-World War II revival of jet aviation, turboprops are poised to make a comeback on the aeronautical scene, against a backdrop of decarbonization of the sector and, more broadly, commitments to the environment. Indeed, they have many advantages to offer in terms of the mission profiles best suited to them, whether in commercial or military aviation. Collins Aerospace's Ratier-Figeac entity, located in the heart of the Lot department, has been investing for decades in the improvement of high-power propeller systems, both in existing aircraft and in the architecture of future platforms. Aerodynamics, efficiency, comfort, reliability, repairability, and recyclability – every aspect of a propeller's life is optimized to reduce the impact of systems on the environment, while guaranteeing operators the best possible operating costs. In addition to reducing the impact of the equipment it manufactures, the company is committed to reducing its local environmental footprint, notably by transforming infrastructures, and promoting soft mobility.

The aerospace industry on the road to carbon-free aviation

Frédéric Parisot

Although air transport is only responsible for around 2.5% of man-made CO₂ emissions, the issue must nevertheless be addressed to ensure that air travel remains accessible to as many people as possible, in complete safety. The aeronautical industry, federated by GIFAS, is committed to reducing this environmental impact in order to achieve carbon neutrality by 2050. The sector's players – manufacturers, airlines, and airports – have decided to take up the challenge of decarbonization together, being the first sector worldwide to have made precise and ambitious commitments in this direction.

Decarbonization thus represents a new revolution in the history of aviation, and relies on a number of complementary levers over time, detailed here. It is the sector's capacity for innovation that will enable aviation to decarbonize and become a means of transport that is safe, accessible to all, and sustainable.

Aerospace Valley and carbon-free light air transport

Philippe Lagarde

In the field of carbon-free aviation, Aerospace Valley considers that the development of technologies on the scale of light aviation, governed by CS23 certification, will be more rapid with aircraft entering commercial service in the next few years, and will therefore serve as a springboard for carbon-free commercial aviation (CS25), whose first achievements will not appear until the next decade.

The vast majority of aircraft currently in service were produced in the 1970s; the fleet is therefore aging, and the question arises of how to renew it. Making light aviation more eco-responsible and more acceptable to the public also means opening the way to new uses. This is all the more true, given that the operating costs targeted by manufacturers are drastically reduced (by a factor of 4) by the introduction of new technologies. Thus, the replacement of the existing fleet and the challenge of training future pilots point to the existence of a significant market, provided that the new aircraft are climate-friendly. In addition, Europe's high density of airfields and airports opens up new markets for passenger and freight transport, as well as opening up certain regions.

Several propulsion technologies are contributing to the decarbonization of light aviation: electric, hybrid electric, fuel cell... They are complementary, and many parameters are involved in their choice. The development of solutions adapted to small general aviation airfields is a prerequisite for the success of light aviation. Here too, Aerospace Valley has a role to play in connecting and federating the entire ecosystem!

Technological breakthroughs in the decarbonization of air transport

Airbus pioneers sustainable aviation for an open, environmentally-friendly world

Alain De Zotti & André Bourdais

Being a source of inspiration is deeply rooted in Airbus' DNA, and today our goal is to pioneer sustainable aerospace for a safe and united world. For more than 50 years, we have valued innovation to reduce the environmental footprint of our products and activities.

A tremendous effort has been made to promote the renewal of airlines' fleets towards new generation aircraft that are more fuel-efficient and environmentally friendly.

We are committed to developing and bringing to maturity the required technologies for decarbonization, particularly with research on new thermal propulsion engines, or more revolutionary like the use of hydrogen; flight testing will start soon on one of our flight test aircraft. Another important asset is the growing use of sustainable aviation fuels to achieve the objectives of reducing carbon emissions from air transport by 2030. A strategic partnership was recently signed between Airbus and TotalEnergies in order to accelerate their deployment; those fuels supplied by TotalEnergies should make it possible to reduce CO₂ emissions by up to 90% over the entire lifecycle, compared to their fossil equivalent.

Finally, "Being a pioneer in sustainable aeronautics" means, for us, fulfilling our responsibility as a recognized leader in our industry to create long-term value for our stakeholders and for society. Our ambition includes strong commitments to reduce our environmental impacts and footprint, by adopting a lifecycle perspective. This environmental responsibility starts from the design phase, continues during the manufacturing process and after delivery, and is also visible in each employee's daily life, in our industrial operations and the one of our supply chain.

All these key technological developments, coupled with the transformation of our company, make Airbus a major player in society with stimulating challenges to carry on.

CORAC: The Civil Aviation Research Council

Pierre Moschetti

The French civil aeronautics industry is recognized worldwide for its technological and industrial excellence. However, it faces major challenges, notably reducing its environmental footprint and its dependence on fossil fuels.

It was to meet these challenges that the original CORAC model was created in 2008, a government-industry consultation body dedicated to setting up the industry's national research program. This model has since been imitated many times, both in France in other industrial sectors (space, automotive, etc.) and abroad.

CORAC's strength lies in its ability to act as an effective and creative collective, driving the entire industry forward, in a continuous and concerted drive for innovation.

CORAC brings together all the stakeholders in the air transport and aeronautics industry, both institutional and industrial, to discuss the sector's major orientations in terms of innovation, decarbonization, and public support.

Decarbonizing aviation requires research!

Bruno Sainjon

ONERA – the French Aerospace Lab (ONERA for Office national d'études et de recherches aérospatiales) –, like the rest of the aeronautics industry, has not waited until recent years to work on reducing the environmental impact of aviation. Since the 1960s, aircraft efficiency gains over the decades are estimated at 80%. A key player in aeronautics, space, and defense research, ONERA, under the supervision of the French Ministry of the Armed Forces, is also a state expert for official bodies, such as the DGAC (the French Directorate General of Civil Aviation), notably on the subject of decarbonization, and is involved in numerous European projects as part of the "Clean Aviation" program (Horizon Europe).

ONERA is at the heart of the French, European, and international aeronautics industry, partnering leading manufacturers, such as Airbus, Dassault, Safran, and Thales. It boasts test facilities that are unique in the world, and essential to the development of carbon-free aviation.

Sustainable aviation fuels (SAF), an essential lever for decarbonizing the aviation sector

Florence Delprat-Jannaud, Jean-Philippe Héraud & Julie Lhomme-Maublanc

Sustainable aviation fuels (SAF) are an essential lever for decarbonizing air transport, whether they are sustainable biofuels produced from residues and waste that do not conflict with food use, or electrofuels produced from CO₂ and H₂. Not only do they present an opportunity to reduce CO₂ emissions and increase energy sovereignty, they also offer new outlets for the agricultural and forestry sectors by recovering waste products. Although SAF production processes are now being rolled out, there are still challenges to be met if we are to reach the targets set by the regulations.

With a world-leading aeronautics industry, low-carbon fuel production technologies developed by French players, and abundant lignocellulosic resources, France has many assets to play a leading role in SAF.

The challenges of electrification

Thomas Delsol, Lionel Bourgeois, Denis Descheemaeker & Magali Vaissière

In a statement released by the Air Transport Action Group (ATAG) in 2022, the aviation industry has committed to "net zero carbon emissions from international

civil aviation flights by 2050, through accelerated efficiency improvements, energy transition and innovation across the sector and in partnership with governments worldwide". The FILAE ("FILièrE Aéronautique Électrique") R&T project, supported by the French Institutes of Research and Technology (IRT), is part of this decarbonization process, addressing the key technological barriers to the electrification of aviation.

The ZEROe hydrogen aircraft: Technological challenges and impact on the ecosystem

Karine Guénan

Aviation, as a symbol of mobility and connection, must reinvent its future, to meet the requirements of carbon neutrality by 2050.

Hydrogen is a promising solution for decarbonizing many industries. However, its adoption in aeronautics will require major advances, from the large-scale production and distribution of green hydrogen, fueled by renewable energies, to the design of secure cryogenic tanks, and the adaptation of airport equipment and infrastructure.

Airbus is positioning itself as a champion of this transition, working with partners who are world leaders in their respective fields to make this ambition a reality. The innovative concepts of the ZEROe hydrogen aircraft, powered by fuel cells or hydrogen combustion engines, promise a significant reduction in CO₂ emissions.

The objective is clear: to transform the aeronautical industry, for a more sustainable, safe, and united future.

Electric hybridization to decarbonize the air transport industry

Régine Sutra-Orus, Dr. Christophe Viguier, Dr. Pierre-Alain Lambert, Dr. Stéphane Azzopardi, Dr. Thierry Lebey & Dr. Bertrand Revol

The air transport industry is resolutely committed to a decarbonization trajectory which will lead it to carbon neutrality in 2050. Since the advent of jet propulsion, the increase in the energy efficiency of transport aircraft has been considerable and for a large part driven by propulsion system technologies. Thermal propulsion technologies still have room for progress, but these must now be supplemented by reinforced action on all other available levers: introduction of disruptive concepts further reducing consumption through the use of electrification in particular; optimization of flight operations; use of substitute fuels for fossil hydrocarbons. Safran's action extends across all these areas simultaneously, but the article will develop some challenges to be addressed in the context of greater electrification, in particular the electric hybridization of engines.

Reducing aircraft energy consumption

Alain Cassier

Like all sectors of the economy, the air transport industry faces the challenges of reducing its greenhouse gas emissions.

In this context, finding ways to reduce its energy consumption is essential, and increasing its efficiency in terms of the energy needed per passenger and per kilometer travelled is a must, in order to prevent that this reduction is obtained only by limiting traffic. This improvement in energy efficiency can be sought at the level of aircraft operation (optimization of routes, aircraft filling, traffic management), but primarily at the level of the energy efficiency of the aircraft itself (i.e. by reducing the energy required to fly).

The main research programs currently underway to reduce aircraft fuel consumption in Europe and the USA are "Clean Aviation" supported by the European Commission, "Transonic Truss Braced Wing" supported by NASA, and "Jetzero Z5 BWB" supported by the US Air Force. This article analyzes the changes in airframe design that could result from those programs as well as the corresponding energy efficiency improvements.

"Cybersecuring" aviation: An essential challenge

Yannick Assouad

The world in which we live is increasingly connected, and aviation is no exception to this trend. Whether in the cockpit, in the cabin or on the ground, connectivity brings whole new dimensions to flight safety, airline operational efficiency, and passenger comfort and enjoyment. However, with these new capabilities come critical cybersecurity concerns, which need to be factored into the heart of the design of new products and systems, as well as throughout their operational life-cycle. In this article, Yannick Assouad, EVP Avionics at Thales Group, details the cybersecurity challenges associated with the rise of digital technology in aviation, outlines the regulatory framework in the making, and stresses the vital importance for players in the aeronautics sector to deliver equipment that is "cybersecure by design".

Playing together to boost our competitiveness through digital technology, and win together

Pierre Faure

Growth and the creation of wealth and jobs are possible in industry; all it takes is the will to play a collective game within the strategic sector committees (CSF in French), and to launch ambitious programs that will enable all sectors to embrace the digital revolution.

In a world where interconnection and collaboration are essential levers of competitiveness, innovation, and sovereignty, the digital transition has become a vital necessity to ensure the development of our industrial fabric and its ecological transition.

In twenty years, the Aerospace & Defense industry has succeeded in positioning itself as a world leader in the digitization of its sector, thanks to the BoostAeroSpace collaborative platform and the digital standards developed with the help of AFNeT.

This example illustrates the urgency and necessity of adopting a collective approach between CSF, major groups, SMEs and public authorities, to meet contemporary challenges.

Impact and usage of AI in aerospace

Pascal Tea et Guillaume Soulé

The aviation industry has been leveraging data for a long time, but it is only through a governed data landscape and a semantic data model (ontology for example) that operations can be optimized, and AI fully leveraged. AI has been used for advanced applications, such as predictive maintenance, quality issue analysis, and personalized customer experience, among others, but was successful only with the right data journey before. Large Language Models (LLMs) in AI are already transforming the airlines industry, but potential risks like error propagation and security must be addressed moving forward.

Skills & talents

Adapting training and research to the needs of the aviation industry, in a global context of ecological transition

Olivier Lesbre

This article looks at how training and research can be adapted to the needs of the aeronautical industry, in a context of ecological transition. It highlights the role of ISAE-SUPAERO and the ISAE Group in training engineers capable of contributing to the decarbonization of aviation. Emphasis is placed on the need to develop sustainable engineering skills, and on the importance of technological innovation to meet environmental challenges. Specific projects, such as the Mermoz UAV and research initiatives aimed at decarbonizing the sector, are also discussed.

Facing up to the urgency of the aeronautics industry: Boosting synergies so that all players adopt a common, shared vision

Francis Massé

The air transport sector must change in the face of evolutions in its environment, *i.e.* the transitions presented by ecology with climate change, energy, geopolitics, economic and social, societal and political developments, the digital revolution, and AI. The answers lie in transforming all the stakeholders of this complex ecosystem – and as much as possible in harmony.

The unique professional training “University of Air Transport - UTA”, with its specific educational format called “Logotique”, aims to promote these transformations, innovations, and technological breakthroughs by focusing on human resources.

UTA brings together high-potential individuals from each of the stakeholders in the sector (aircraft manufacturers, engine manufacturers, aeronautical supply chain, ground handling, airlines, airports, and relevant public administrations). To unite, to create a unique and shared vision on a common diagnosis of realities, to enrich everyone’s skills, and to build a common future in the service of society within the framework of a public-private partnership.

“Campus des métiers et des qualifications” (or campuses for professions and qualifications) and their contribution to aeronautics

Christophe Meyruey

Federating, convincing, training, organizing – these are the key words in the vocation of the “Campus des métiers”. The one I have the honor of chairing in the region Occitanie brings together companies in the aeronautics and space industries, two of the driving forces behind the French economy, and symbols (among others) of our country’s industrial excellence. These two major industries, particularly aeronautics, are at a crossroads.

In a world tempted to turn in on itself, they are, to varying degrees, being called into question. It’s up to us not to let this insidious little tune get the better of us, but rather to demonstrate that everything is in place to ensure that, technologically speaking, these sectors can invent a carbon-free future. To do this, we need to explain and convince the young and not-so-young to join them, and invent the training courses that will be indispensable in the future.

More immediately, we need to help ramp up deliveries of aircraft that are cleaner than those of previous generations. To meet this challenge, we need to provide training that is as close as possible to the needs of the industry’s large and small companies.

When, in order to achieve this, we need to bring together and train our forces so that, together, they grow stronger, we understand that this campus is a vocation for those who have the privilege of being part of the adventure.

Issue editor: **Stéphane Molinier**

Ont contribué à ce numéro



Yannick ASSOUAD

est ingénieure diplômée de l'Institut national des sciences appliquées de Lyon et de l'Illinois Institute of Technology de Chicago (1985).

En 1986, elle rejoint Thomson-CSF, où elle est recrutée en tant qu'ingénieur au sein de l'activité Radar et Contre-Mesures, avant d'être nommée responsable du

D.R.

département Thermique, puis responsable du département Thermique et Ingénierie Mécanique. En 1998, elle rejoint la SECAN (Société d'Études et de Constructions Aéronavales), filiale française d'Honeywell spécialisée dans les systèmes de conditionnement d'air des avions, en qualité de directrice technique, puis de directrice générale. En 2000, elle prend la présidence de la SECAN, où elle redresse l'activité de l'entreprise aéronautique.

En 2003, elle rejoint Zodiac et se voit confier la direction des activités services de la filiale Intertechnique. En 2007, elle intègre le comité exécutif de Zodiac Aerospace et crée la branche Services, commune aux différentes activités du groupe. En 2010, Yannick Assouad reprend la branche Aircraft Systems de Zodiac, qu'elle redéveloppe en menant une politique d'innovation offensive, notamment menant à bien l'acquisition de la société IMS en Californie, spécialisée dans l'*in-flight entertainment*. En 2015, elle prend la direction de la branche Cabine et est nommée membre du directoire de Zodiac. En 2016, elle devient directrice générale de Latécoère.

Depuis 2020, elle est directeur général adjoint du groupe Thales, en charge de la Global Business Unit Avionique. Elle est par ailleurs présidente du comité de pilotage du CORAC, le Conseil pour la recherche aéronautique civile, depuis 2023.

Yannick Assouad est également administratrice indépendante du groupe Vinci depuis 2013 et administrateur référent depuis 2018, administratrice indépendante du Groupe Mécachrome depuis 2022, et administratrice indépendante de l'École Nationale d'Aviation Civile (ENAC) et présidente de la commission des finances, depuis 2018.



Dr Stéphane AZZOPARDI

est titulaire d'un diplôme d'ingénieur de l'Institut National des Sciences Appliquées (INSA) de Toulouse, ainsi que d'un diplôme d'étude approfondi (DEA) de l'Université Paul Sabatier de Toulouse, obtenus en 1993. En 1998, il accède au titre de docteur en électronique de l'Université des

D.R.

Sciences et Technologies de Bordeaux, ayant travaillé sur le fonctionnement des IGBT à haute température dans des conditions électriques conventionnelles et anormales pour des applications automobiles. Après un post-doctorat consacré à l'évaluation des IGBT en commutation dure et douce, qui s'est déroulé à l'Université Nationale de Yokohama (Japon) en collaboration avec Mitsubishi Power Semiconductor, en 2003, il devient maître de conférences à l'École Nationale Supérieure d'Électronique, Informatique et Radiocommunication de Bordeaux, et est rattaché au laboratoire du CNRS sur l'intégration du matériau au système (IMS). Il a mené des recherches sur l'évaluation de la fiabilité des modules de puissance pour les IGBT silicium et les semi-conducteurs de puissance SiC. En 2013, il obtient son habilitation à diriger les recherches de l'Université de Bordeaux.

En septembre 2015, il rejoint le Centre de Recherche et Technologie du groupe Safran (Safran Tech) à Paris, et prend la responsabilité de l'équipe de recherche « Électronique de puissance » avec un focus spécifique sur les thématiques de l'Avion Plus Électrique et de la Propulsion Plus Électrique. En tant qu'expert groupe sur les modules de puissance, ses recherches se concentrent sur les composants à semi-conducteurs de puissance à large bande interdite et les solutions d'assemblages de puissance en rupture pour la prochaine génération de modules de puissance destinés aux applications aéronautiques.



André BOURDAIS

est responsable de l'ingénierie de fabrication (*manufacturing engineering*) chez Airbus Avions Commerciaux (Airbus Commercial Aircraft).

D.R.

À la tête de la communauté de l'ingénierie de fabrication d'Airbus depuis mars 2023, il est responsable du co-développement et de

la fourniture d'un système industriel durable et résilient, pour les opérations d'aujourd'hui et de demain.

Il rejoint Airbus en 2000 et commence sa carrière au sein du bureau d'études en ingénierie systèmes. Il déménage au Royaume-Uni avec sa famille quatorze ans plus tard, pour rejoindre l'usine Airbus de Broughton et diriger l'équipe locale d'ingénierie de fabrication. Quelques années plus tard, il revient en France pour un rôle central dans les systèmes industriels, avant de rejoindre l'équipe de Conception, fabrication et services numériques d'Airbus (DDMS - Digital Design, Manufacturing & Services) pour déjà promouvoir le co-développement par la continuité numérique. Enfin et avant d'occuper son poste actuel, André Bourdais a été nommé chef de projet peinture A350, où il a joué un rôle

crucial dans la résolution de l'une des crises majeures récentes d'Airbus.

Mais André Bourdais est bien plus qu'un simple professionnel. Il est marié et père de deux enfants âgés de 7 et 10 ans. Il est un grand fan de sport (en particulier de football !) et aime courir. Il se décrit comme un homme ambitieux et humble ; enthousiaste et pragmatique ; ouvert et déterminé à relever les défis de demain et à assurer un avenir radieux pour son entreprise Airbus.



D.R.

Lionel BOURGEOIS,

diplômé de l'École nationale supérieure d'électrotechnique, d'électronique, d'informatique, d'hydraulique et des télécommunications en tant qu'ingénieur, réalise un DEA en Automatique, Informatique Industrielle et Traitement du signal à l'Institut national polytechnique de Toulouse en 1990 et obtient un Master of Science en communication par satellite à l'Université de Surrey, à Guildford, Angleterre en 1991.

Sa carrière débute en tant qu'ingénieur d'études au sein du groupe Renault dans le département « Énergies de substitution » de la direction de la recherche, en charge de la motorisation du véhicule électrique. Il a ensuite passé cinq ans en qualité de responsable de la conception chez Technofan, ancien Safran Ventilation Systems, avant de rejoindre la société TRONICO (groupe ALCEN) sur un poste de directeur technique. Il retourne chez Safran Ventilation Systems et occupe les fonctions successives de directeur des programmes, puis directeur technique de 2004 à 2016, puis intègre Safran Electrical & Power en tant que vice-président R&T et audit technique.

Fort de près de trente ans d'expérience dans le domaine de l'ingénierie, Lionel Bourgeois rejoint l'IRT Saint Exupéry en 2019, et prend la responsabilité de la direction du domaine aéronef plus électrique, devenu depuis l'une des quatre directions technologiques et scientifiques de l'IRT, en charge de l'Axe Technologies plus Vertes. À l'initiative de nombreux projets, il porte notamment le programme emblématique FILAE (FILière Aéronautique Électrique) pour la décarbonation de l'aviation.



D.R.

Alain CASSIER

est diplômé de l'École nationale supérieure de l'aéronautique et de l'Université de Princeton aux États-Unis (Master of Science).

Il a débuté sa carrière en 1973 à la division Hélicoptères d'Aérospatiale devenue ensuite Eurocopter, où il a exercé des responsabilités techniques et de direction de programme, notamment

chef des études d'avant-projet, chef de programme Tigre, directeur technique.

En 2001, il a rejoint la branche Avions d'Airbus où il a été ingénieur en chef du Programme A400M, puis chef de Programme A350-1000.

Il est maintenant retraité et membre honoraire de l'Académie de l'Air et de l'Espace, dont il est le président de la Commission de l'aviation civile.



D.R.

Pierre CAVÉ

est spécialiste de la conduite de missions stratégiques relatives au transport aérien et au domaine aéroportuaire. Depuis plus de quinze ans dans le conseil, il accompagne les décisionnaires privés ou publics dans les secteurs de l'aviation incluant les aéroports, les compagnies aériennes ou l'industrie aéronautique. Il est associé en charge de l'activité Aviation de BDO.



© D. Bascou/DGAC

Damien CAZÉ

est né le 21 juillet 1967 à Vernon dans le département de l'Eure. Diplômé de l'IEP Paris et ingénieur civil des ponts et chaussées en 1991, il est également diplômé de l'ESSEC en 1996 et ancien élève de l'ENA (promotion Victor Schoelcher 1994-1996).

En 1996, il entre à la Cour des comptes, est promu conseiller référendaire en 1999, puis conseiller maître en 2012. En 2002, il est appelé en qualité de conseiller technique d'Hervé Gaymard, ministre de l'Agriculture, et devient l'année suivante celui de Jean-Pierre Raffarin à Matignon. En 2005, il intègre le ministère de l'Agriculture au poste de directeur des Pêches maritimes et de l'Aquaculture. Puis, il devient directeur des Affaires maritimes au ministère de l'Écologie, de 2008 à 2010.

En 2010, il est nommé directeur général délégué d'Universcience. Il rejoint ensuite en 2015 la Cour des comptes et est nommé rapporteur général d'une enquête sur la fiscalité de l'environnement. En mai 2017, il est nommé chef de pôle au cabinet du Premier ministre, Édouard Philippe, en charge des questions relatives à l'Écologie, aux Transports, à l'Énergie, au Logement et à l'Agriculture.

Damien Cazé est nommé par décret du 16 septembre 2020 directeur général de l'Aviation civile.



D.R.

Jean-François CHANUT

est un chef d'entreprise expérimenté, avec plus de trente ans d'expérience dans l'industrie aéronautique, notamment chez Honeywell, Collins Aerospace ainsi que chez d'autres fournisseurs de systèmes. Tout au long de sa carrière, il a travaillé et développé

des relations avec des clients majeurs tels que ATR, Airbus Group, Dassault, Boeing, Bombardier, Comac ou encore Embraer.

Il possède une grande expérience des systèmes aéroportés et des technologies avancées, notamment des systèmes mécaniques et électriques, des hélices, de l'avionique, des structures composites, des moteurs et des groupes auxiliaires de puissance. Il a occupé des postes à responsabilité croissante dans les domaines de l'ingénierie, du support, des ventes, de la stratégie, de la gestion de programme et de la direction d'affaires.

Il a rejoint Ratier-Figeac, partie intégrante du groupe Collins Aerospace, en février 2015 en tant que General Manager de Propeller Systems, le *leader* mondial dans la conception et la fabrication d'hélices fortes puissances pour les avions de transport commerciaux et militaires. La renommée et l'expertise de l'entreprise s'étend également aux équipements de cockpit et de cabine, aux THSA et vis à billes, aux pièces critiques pour hélicoptères ainsi qu'aux services MRO.



D.R.

Thomas COURBE, ingénieur général de l'Armement, débute sa carrière en 1995 au ministère de la Défense comme responsable de programmes d'avions de combat en service, puis chef de cabinet du directeur des programmes aéronautiques.

Il rejoint la direction générale du Trésor en 2002, où il occupe successivement les fonctions d'adjoint au chef du bureau Asie, chef du bureau Afrique-Maghreb, chef du bureau Affaires aéronautiques, militaires et navales, secrétaire général du club de Paris, et sous-directeur Relations économiques bilatérales.

En 2010, il est nommé directeur de cabinet du secrétaire d'état chargé du Commerce extérieur (Pierre Lellouche) et directeur adjoint de cabinet des ministres de l'Économie, des Finances et de l'Industrie (Christine Lagarde puis François Baroin). En 2012, il revient à la direction générale du Trésor où il occupe les fonctions de secrétaire général, puis de directeur général adjoint à partir de 2015.

Depuis juillet 2018, Thomas Courbe est directeur général des Entreprises.

Il est chevalier de la Légion d'honneur et officier de l'ordre national du Mérite.



D.R.

Éric DALBIÈS rejoint Snecma en 1992 au sein de la division Moteurs spatiaux de Vernon. Jusqu'en 2005, il occupe plusieurs postes dans les métiers de l'ingénierie et des programmes au sein de Snecma (aujourd'hui Safran Aircraft Engines). En 2005, il est nommé directeur des systèmes d'information de Turbomeca

(aujourd'hui Safran Helicopter Engines) avant de devenir en 2008 adjoint au président, également en charge des démarches de progrès. En 2013, il devient directeur de la Stratégie de Safran et, en 2015, il prend également en charge les fusions et acquisitions (M&A) du groupe.

Depuis 2018, Éric Dalbiès était directeur général adjoint de Safran Helicopter Engines ainsi que directeur général de Safran Power Units. En juillet 2021, il est nommé directeur de la Recherche, de la Technologie et de l'Innovation de Safran. Il est par ailleurs président du conseil d'administration d'ArianeGroup, co-entreprise entre Airbus et Safran.

Éric Dalbiès est diplômé de l'École polytechnique (1987) et de l'ISAE SUPAERO (1992).



D.R.

Florence DELPRAT-JANNAUD

est directrice du centre de résultats Produits énergétiques à IFPEN depuis janvier 2023.

Physicienne de formation, issue de l'École normale supérieure de Cachan et docteure en sciences de la terre de l'Université Paris Sud (Paris XI), elle a débuté sa carrière en géophysique, développant une expertise en imagerie sismique. Elle s'est vu confier la coordination de projets de recherche, couvrant des domaines transversaux en géosciences. Elle a reçu le trophée des Étoiles de l'Europe 2014 pour la coordination du projet européen SiteChar, dédié à la caractérisation des sites de stockage de CO₂. Elle a également dirigé en 2016 le groupement d'intérêt scientifique Géosciences franciliennes, réseau d'établissements de recherche en sciences de la terre et sciences du numérique dans le domaine de l'énergie, des ressources et de l'environnement.

En 2017, elle est nommée responsable de programmes au sein du centre de résultats Ressources énergétiques, en charge des ressources et usages du sous-sol pour la transition énergétique ainsi que du captage et du stockage du CO₂.

Elle préside également le Club CO₂, qui réunit les acteurs français de la chaîne du captage, stockage et valorisation du CO₂.



D.R.

Thomas DELSOL

obtient son diplôme d'ingénieur à Télécom Physique Strasbourg ainsi qu'un DEA de physique de la matière à l'Université Louis Pasteur en 1997. Il réalise ensuite une thèse sur la fabrication de cellules solaires CIGS par dépôt électrolytique à l'Université de Sheffield Hallam au Royaume-Uni.

En 2002, il débute sa carrière au laboratoire Cirimat en région toulousaine, en qualité d'ingénieur Matériaux et Procédés, et intègre Thales Alenia Space, un an plus

tard, pour coordonner les activités d'assurance produit pour le développement, la production et les tests d'équipements électroniques embarqués. En 2005, il occupe le poste de responsable HQSE au sein de la société de production de panneaux solaires SunPower Corporation, avant de prendre les fonctions de responsable R&D et projets.

Il rejoint l'IRT Saint Exupéry en 2016, où il occupe successivement différentes fonctions : chef de projet, responsable du Programme Métal et Surfaces, responsable du Pôle Surfaces et Assemblages Innovants et du Pôle Composites, Surfaces et Assemblages, à la suite de la fusion des activités Composites, Surfaces et Assemblages dans un pôle unique. Depuis 2021, il est responsable du programme emblématique FILAE (FILière Aéronautique Électrique) visant à contribuer à décarboner l'aviation avec la mise en place d'un programme scientifique multi-filières / multipartenaires.



Denis DESCHEEMAER,

après l'obtention de son diplôme d'ingénieur des hautes études industrielles à Lille, a commencé sa carrière internationale pour Airbus à Singapour au Support Clients avant de rejoindre le bureau d'études à Toulouse pour rapidement être nommé adjoint de l'Ingénieur en chef des Systèmes de l'A380. Il a ensuite été chargé

D.R.

de mission pour le responsable du bureau d'études des Systèmes, mettant en place notamment le démarrage du développement de l'A320 NEO (*new engine option*).

Il part ensuite à Bristol en Angleterre pour gérer un département en charge des conditions environnementales et la qualification de l'ensemble des équipements des programmes Airbus. Il y a initié de multiples projets de transformation, de la simplification du référentiel technique d'Airbus jusqu'à la mise en place d'un programme de gestion de la performance individuelle avec les ressources humaines. Enfin, il a rejoint la direction de la Recherche, au niveau Groupe Airbus, en tant que responsable des Technologies émergentes et du ProtoSpace, un réseau interne de 19 fablab qu'il a triplé en trois ans, disséminé sur les sites principaux d'Airbus dans le monde. Il a été impliqué dans plusieurs événements internationaux relatifs à l'Innovation, pour leur organisation et / ou en tant que conférencier. Il rejoint l'IRT Saint Exupéry en 2019 en tant que directeur général, et œuvre à son rayonnement.



Alain DE ZOTTI,

ingénieur aéronautique, diplômé de SUPAÉRO, est responsable du service chargé de l'Architecture Avion et de son Intégration, au sein de la Division Engineering d'Airbus. À ce poste, il est responsable des activités de certification des produits Airbus à l'échelle multi-programmes et supervise les

D.R.

équipes avant-projets, responsables de la conception des avions de nouvelle génération, à fort impact écologique ; il s'occupe également de la formation et du développement des ingénieurs « Architectes avions » et des futurs ingénieurs en chef.

En 1991, il débute sa carrière au sein de l'équipe des avant-projets en tant qu'ingénieur en charge des performances-avion ; à partir de 1994, il prend part à la formidable aventure de l'A380 en s'impliquant fortement dans la conception de cet avion, ainsi qu'à toutes les étapes majeures du programme : développement, essais en vol et certification.

De 2007 à 2014, il occupe divers postes d'ingénieurs en chef sur des programmes tels que l'A380 et l'A330 / A340. Dans ce dernier rôle, il sera un acteur majeur du lancement de l'A330neo. D'octobre 2014 à juillet 2018, il est l'ingénieur en chef du programme A350 XWB. À ce poste, il est en charge de la flotte d'A350-900 en service dans le monde, ainsi que du développement, de la certification et de l'entrée en service du tout nouvel avion : l'A350-1000.

Le défi actuel lié à la décarbonation de l'aviation est aussi un sujet qui lui tient profondément à cœur. Sa récente intégration au sein du comité de pilotage du GIFAS en tant que représentant Airbus pour soutenir la croissance de l'industrie aéronautique et contribuer à une aviation sûre et durable est un atout pour accompagner les changements au sein d'Airbus.



Pierre FAURE,

ingénieur civil des mines et docteur-ingénieur en géologie à l'École des Mines de Paris, commence sa carrière chez Dassault Aviation en 1984, où il guide l'entreprise vers des systèmes d'information ouverts et développe sa stratégie *e-business*. Responsable au sein du département d'informatique

D.R.

scientifique jusqu'en 1992, il devient en 1993 adjoint au directeur de l'informatisation généralisée. De 1995 à 1998, il dirige la migration du système d'information vers les nouvelles technologies ouvertes.

En 1995, il est élu président de l'AFNeT (alors AFUU, Unix & Systèmes ouverts, pionnière de l'Internet en France), s'engageant dans l'évolution numérique et la promotion de la compétitivité industrielle par le numérique. Il ouvre la voie de l'entreprise étendue numérique chez Dassault Aviation en 2000, développant en tant que directeur *e-business* & CRM des portails pour employés, clients et fournisseurs, et initiant des services connectés pour la maintenance.

À partir de 2003, sous l'égide de l'AFNeT et du GIFAS, il pilote des projets de transformation numérique pour l'industrie Aerospace & Défense, comme e-PME, BoostAero et SEINE, et assure la coordination technique dès 2006 du plan d'action TIC&PME 2010 de la DGE. En 2009, il conçoit puis dirige le projet BoostAeroSpace pour le GIFAS, standardisant les modes de travail numériques PLM et logistiques, pour assurer la

continuité numérique de la *supply chain* aéronautique des donneurs d'ordre aux PME.

Président de BoostAero International AISBL dès 2006, président puis directeur général de BoostAeroSpace de 2010 à 2019, Pierre Faure œuvre à la standardisation intersectorielle en lançant et dirigeant le Programme ATLAS de 2020 à 2023. Il préside le comité de programme de la conférence Boost-Industrie de 2013 à 2022.

Son engagement pour la transformation numérique de l'industrie est récompensé en 2019 par la Légion d'honneur, soulignant son rôle crucial dans la compétitivité, l'innovation et la souveraineté de l'industrie française grâce au numérique.



©Airbus SAS 2022
Jean-Baptiste Accariez - Master Films.

Guillaume FAURY

est le président exécutif (CEO) d'Airbus depuis avril 2019.

Il a précédemment dirigé l'activité avions commerciaux d'Airbus et aussi celle d'Airbus Helicopters. Il a aussi été responsable de la recherche et du développement du constructeur automobile Peugeot de 2009 à 2013. De 1998 à 2008, il a tenu de nombreux postes à responsabilité dans l'ingénierie, les programmes et les tests en vol, chez Airbus Helicopters. Il a commencé sa carrière en 1992 comme ingénieur en vol du programme Tigre d'Eurocopter à la direction générale de l'Armement (DGA).

Il est diplômé de l'École polytechnique de Paris et de l'École nationale supérieure de l'Aéronautique et de l'Espace à Toulouse.

Il dispose d'un brevet de pilote privé et d'ingénieur en vol hélicoptère avec 1 300 heures de vol.

Il est né en 1968 à Cherbourg. Il est marié et a trois enfants.



D.R.

Karine GUÉANAN

est vice-présidente écosystème ZEROe d'Airbus : elle dirige le déploiement de l'écosystème hydrogène nécessaire à la mise en service du premier avion à hydrogène ZEROe d'ici 2035.

Auparavant, elle était vice-présidente Financement et Garanties du groupe, coordonnant les activités de financement clients, financements structurés et projets d'Airbus, avec une attention particulière au suivi de l'exposition hors bilan du groupe ainsi qu'à la supervision d'Airbus Financial Services à Dublin et d'Airbus Bank à Munich.

Karine Guénan a précédemment occupé plusieurs postes de vice-présidente dans le domaine commercial, en tant que vice-présidente *leasing*, marché secondaire et cargo, puis de financement des ventes chez ATR (une co-entreprise entre Airbus et Leonardo).

Avant de rejoindre le Groupe Airbus, elle était responsable du financement des projets d'infrastructure et de la trésorerie pour la division Ingénierie et Construction d'Air Liquide, à Paris.



D.R.

Jean-Philippe HÉRAUD

est responsable de programmes biocarburants au centre de résultats Produits énergétiques à IFPEN depuis février 2023. Ingénieur chimiste spécialisée dans les carburants, il a participé au développement des technologies de production de biocarburants portées par IFPEN, Fischer-Tropsch, BioTfuel®, Vegan® et FuturoL® et notamment à l'exploitation des unités pré-industrielles de ces différentes technologies.



D.R.

Didier KAYAT,

diplômé de l'École Supérieure de Commerce de Paris (ESCP) en 1987, commence sa carrière dans le marketing et la vente dans des multinationales (Henkel, S.C. Johnson, Saatchi).

En 1993, il crée un cabinet de conseil en stratégie et en organisation (Ylios), qui comptait Daher parmi ses clients. Il rejoint Daher en 2007 en qualité de directeur Marketing et Développement, puis directeur de la Stratégie et du M&A dès 2009. Il est nommé, en 2012, directeur général adjoint du groupe et président des pôles Nucléaire & Énergie et Biens d'équipement. En janvier 2015, il est nommé directeur général délégué. Il devient directeur général de Daher le 1^{er} avril 2016.

Aux côtés de Patrick Daher, Didier Kayat a participé au développement international de Daher, et à son *leadership* dans les industries de hautes technologies.

Philippe LAGARDE,

63 ans, occupe la fonction de chargé de mission mobilité aérienne légère et décarbonée au sein du pôle de compétitivité Aerospace Valley. Retraité de chez Safran Helicopter Engines, il y a assuré la fonction de responsable programme R&T, et a contribué notamment à définir et mettre en œuvre la feuille de route de la propulsion hybride électrique pour le groupe Safran.

Philippe Lagarde est aussi expert auprès de la BPI.



D.R.

Jean-Christophe LAMBERT

possède un diplôme d'ingénieur de l'Université Technologique de Compiègne et un Master en Business à HEC et ISAE-SUPAERO. Il possède plus de quinze ans d'expérience dans le domaine aérospatial et défense

dont dix passés chez Airbus, où il a occupé des fonctions de *business développement*, responsable d'offres, responsable d'équipe et chef de cabinet avant de s'investir pleinement dans le développement de l'aviation durable. L'une de ses plus grandes réussites a été le succès de la traversée historique de la Manche par l'E-Fan – l'un des premiers avions électriques au monde –, en tant que chef de programme. Il a ainsi pris la mesure de l'impact des technologies électriques et hybrides dans l'aviation, et de l'ampleur des défis à relever sur toutes les questions liées à leur certification, leur industrialisation et leur commercialisation.

Depuis 2018, Jean-Christophe Lambert est cofondateur et CEO d'Ascendance Flight Technologies, qui propose des solutions et technologies permettant de réduire l'empreinte environnementale de l'aviation. La société développe en parallèle STERNA, un système de propulsion hybride électrique innovant, et un avion VTOL (à décollage et atterrissage vertical) équipé de cette même technologie, baptisé ATEA. Il a reçu récemment le prix High Five Award, décerné par le programme européen Clean Sky et récompensant cinq personnalités de l'aéronautique œuvrant à rendre l'industrie plus durable.



Dr Pierre-Alain LAMBERT

est diplômé de Centrale Paris et docteur en énergétique. Il débute sa carrière comme aérodynamicien chez Snecma, puis rejoint la SEP (aujourd'hui ArianeGroup) où il intervient sur la modélisation des systèmes de propulsion à liquides spatiaux puis en tant que responsable de l'Unité Turbomachines. Il rejoint

D.R.

Safran SA en 2013 à la création de Safran Tech comme directeur du Pôle Énergie & Propulsion, en charge d'un programme technologique axé sur l'étude de concepts aéronautiques et de systèmes énergétiques pour la décarbonation du transport aérien. Depuis 2023, il est directeur des programmes Hydrogène de Safran.



Dr Thierry LEBEY

a obtenu un doctorat en génie électrique en 1989 et une habilitation à diriger la recherche en 1997. En 1990, il rejoint le Centre national de la recherche scientifique (CNRS), d'abord en tant que chargé de recherche puis en tant que directeur de recherche. Il est l'auteur de près de 100 articles dans des revues scientifiques

D.R.

internationales, de plus de 200 articles dans des conférences internationales – dont une cinquantaine en tant qu'invité –, et de plus de 20 brevets.

Après près de trente ans au CNRS, durant lesquels il a encadré une trentaine de thèses et été directeur du laboratoire LAPLACE, (unité mixte du CNRS et de l'Université de Toulouse), il est aujourd'hui expert

émérite et responsable de recherche sur la haute tension embarquée et les technologies associées, au sein du Pôle E&E de Safran Tech.



Olivier LESBRE,

après ses études d'ingénieur à l'École polytechnique, SUPAÉRO et Stanford, rejoint la délégation générale pour l'Armement (DGA) en 1990, comme ingénieur d'étude dans le domaine du guidage des missiles stratégiques. De 1994 à 2000, il se consacre aux programmes de missiles de croisière français, d'abord comme directeur

D.R.

technique, puis comme directeur des programmes à partir de 1997. Il contribue en particulier au lancement du programme Scalp / Storm Shadow en coordination avec les Britanniques.

En 2001, après avoir participé à la mise en place de l'OCCAR, agence européenne d'acquisition d'armement, il y devient directeur adjoint du programme d'avion de transport Airbus A400M et participe directement à son lancement définitif par sept pays en 2003, après plus de dix années de travaux préparatoires.

Il rejoint en 2006 l'Ambassade de France à Londres comme attaché d'armement. Il y met en place une nouvelle instance bilatérale, le « groupe de haut niveau », qui redynamise la coopération d'armement entre les deux pays. Son action débouchera en particulier sur les traités de Lancaster House et les prémices du programme FCAS.

De 2009 à 2014, il dirige DGA Maîtrise de l'information (ex-CELAR), centre d'expertise de plus de 1 000 personnes implanté près de Rennes. Il y conduit la fusion avec le Laboratoire de recherches balistiques et aérodynamiques (LRBA), centre d'expertise de 350 personnes implanté à Vernon, et le lancement d'une nouvelle activité de cyberdéfense.

Depuis le 1^{er} septembre 2014, il dirige l'Institut supérieur de l'aéronautique et de l'espace (ISAE-SUPAÉRO), leader mondial de l'enseignement supérieur aérospatial avec plus de 650 ingénieurs, masters et docteurs diplômés chaque année.

À ce titre, il participe au conseil des membres de l'Université fédérale de Toulouse Midi-Pyrénées, et siège aux conseils d'administration de l'Institut de recherche technologique Saint Exupéry, du pôle de compétitivité Aerospace Valley, de l'École des Mines d'Albi-Carmaux, de l'ENSTA-Bretagne, de la Fondation de Recherche pour l'Aéronautique et l'Espace, et de l'Association Aéronautique et Astronautique de France (3AF).

Ingénieur général de l'armement, Olivier Lesbre est chevalier de la Légion d'honneur et officier de l'ordre national du Mérite. Marié et père de trois enfants, il est également pilote privé (1 200 h de vol), marin et montagnard.



D.R.

Julie LHOMME-MAUBLANC

est responsable marketing stratégique au sein du centre de résultats Produits énergétiques à IFPEN. Diplômée de Sciences Po Bordeaux, elle a été en charge des affaires européennes à IFPEN de 2010 à 2021. En 2016, au sein de la direction scientifique d'IFPEN, elle prend la responsabilité de l'équipe accompagnant le montage des projets collaboratifs à soutiens publics. De 2021 à 2022, pour l'Institut Carnot Ressources énergétiques d'IFPEN, elle est également en charge des partenariats avec les PME. Début 2023, elle rejoint le centre de résultats Produits énergétiques.



D.R.

Francis MASSÉ

est président de MDN Consultants.

Conférencier, chroniqueur, formateur, et essayiste, il est aussi un ancien secrétaire général de la DGAC (2006-2014). Ancien élève de l'ENA, diplômé de Sciences-Po Bordeaux, de la faculté de droit de Bordeaux ; ancien auditeur de l'IHEDN et CHEE.

Il a parcouru divers organismes et administrations publiques : Transport maritime, Inspection des finances, cabinets ministériels, Écologie, Radio France Internationale, Aviation civile.

Il a contribué à diverses réformes et politiques publiques ; réformes structurelles et conduite du changement, réforme portuaire notamment, gestion des ressources humaines, finances ; négociations sociales, interministérielles et internationales.

Fondateur et directeur pédagogique de l'Université du transport aérien à l'ENAC.

Il est formateur au management et aux stratégies des organisations complexes (ENA/INSP, HEIP, IGS/ESAM, INSEEC CESEGH, etc.) et conseil : transmission d'expériences, de réflexions et de conseils pour aider étudiants et professionnels à tracer leur voie, à construire le futur et à manager humain.

Il est membre fondateur et ancien secrétaire général du Cercle de la Réforme de l'État, membre du comité éditorial de la *Revue française d'administration publique* (RFAP) et membre du Centre d'étude et de prospective stratégique – CEPS.



D.R.

Raúl MEDINA

is Director General of EUROCONTROL, a post he took up on 1 January 2023.

Raúl Medina was previously Director General of Civil Aviation at the Spanish Ministry of Transport, Mobility and Urban Agenda, and

President of the Spanish Aviation Safety and Security Agency (AESA), between 2015 and 2022.

During those years, he was also member of the Boards of Directors of ENAIRE (Spanish Air Navigation Service Provider), SENASA (Services and Studies for Air Navigation and Aeronautical Safety) and INTA (National Institute for Aerospace Technology), as well as member of the ENAIRE Foundation, which works to promote aviation culture. At international level, Raúl Medina was Vice-President of ECAC (the European Civil Aviation Conference) and a member of the ECAC Coordinating Committee. He was the President of the ICAO Technical Commission during the last ICAO Assembly. He has also worked as a consultant for the World Bank's Sustainable Development Department in Washington DC and as a Systems Engineer for Siemens.

Raúl Medina was born in Madrid, Spain. He holds a Master's degree in Aeronautical Engineering (MS) from the Polytechnic University of Madrid, and a Master's degree in Public Administration (MPA) from Columbia University, New York City, with a specialization in Economic Policy Management. He was the recipient of a Fulbright scholarship for his studies at Columbia.

He has received the Great Cross of Aeronautical Merit, awarded by the Spanish Ministry of Defence, and the Order of Civil Merit, awarded by the Spanish Ministry of Foreign Affairs, European Union and Cooperation.



© Pascaline Hofmann

Christophe MEYRUEY,

diplômé de l'ESCP et père de trois enfants, est marié à une professeur de français enseignant en collège. Il a débuté sa carrière à la CCI de Paris au sein de la direction de la Communication pour y faire du contrôle de gestion et travailler sur la politique de marque. Il a ensuite rejoint en 2001 le Medef et l'UIMM de Haute-Savoie afin de prendre

en charge l'animation du réseau des adhérents. Après dix ans à ce poste, il a rejoint une autre UIMM, celle du Languedoc-Roussillon, pour y exercer les fonctions de secrétaire général.

C'est en 2017 qu'il est devenu délégué général de l'UIMM MP-Occitanie, avant de prendre en 2020 la responsabilité du poste de délégué général de l'UIMM Occitanie, couvrant ainsi deux UIMM territoriales et coordonnant sur les sujets régionaux l'action des quatre existant dans la région. Il est membre du Campus aéronautique et spatial d'Occitanie depuis 2017, et président depuis 2022.



D.R.

Stéphane MOLINIER

est ingénieur général des mines, ancien auditeur du cycle des hautes études européennes. Il est membre permanent du Conseil général de l'économie depuis 2021 et siège au conseil d'administration de l'ISAE-SUPAERO.

En 2024, il rejoint le réseau des ambassadeurs PME de la Commission européenne.

Il a occupé, de 1989 à 1999, plusieurs postes chez France Télécom dans le domaine du système d'information de gestion du réseau longue distance.

En 2000, il a rejoint les DRIRE comme chef de division développement industriel, d'abord en Midi-Pyrénées, en charge notamment de l'accompagnement de la filière aéronautique, puis en Île-de-France.

De 2005 à 2021, détaché en région Midi-Pyrénées, puis Occitanie, il a piloté dans un poste de directeur général délégué un large éventail des politiques publiques mises en œuvre par les régions : développement économique et innovation, agriculture, enseignement supérieur et recherche, éducation et formation, environnement et énergie, tourisme, transport ferroviaire, aménagement du territoire, coopération et développement international, gestion des fonds FEDER, FSE et FEADER.

Titulaire d'un brevet de pilote privé avion, il totalise plus de 800 heures de vol.



Pierre MOSCHETTI,

ingénieur général des ponts, eaux et forêts, est en charge de la sous-direction de la construction aéronautique de la direction générale de l'Aviation civile (DGAC) depuis 2010. Cette sous-direction d'une trentaine de personnes anime le dialogue avec la filière aéronautique au sein des instances du Conseil pour la recherche aéronautique civile (CORAC) et opère, instruit et conventionne, pour le compte de l'État, les soutiens à la filière aéronautique mis en place, notamment, depuis 2020, dans les plans France Relance et France 2030.

D.R.

Né en 1969, diplômé de l'École polytechnique en 1991 et de l'École nationale supérieure des Techniques Avancées, il intègre la direction générale de l'Armement (DGA) en 1993 en tant qu'ingénieur de l'armement. Après divers postes traitant de la préparation de l'avenir dans le domaine de l'aviation civile et militaire, il assure de 2003 à 2006 la direction du montage et du lancement en coopération internationale du programme de démonstrateur technologique de combat (UCAV) furtif Neuron, dont le chef de file industriel est Dassault Aviation.

De 2006 à 2010, il est chargé de la sous-direction sectorielle « Aéronautique, Missiles, Espace » du service des Affaires Industrielles de la DGA, en charge de la tutelle de la Base Industrielle et Technologique de Défense.

Il rejoint la DGAC en 2010 et sera intégré comme ingénieur en chef des ponts, eaux et forêts en 2016.

Au titre de ses fonctions actuelles, il est également administrateur représentant le ministère en charge des Transports, et vice-président du conseil d'administration de 2015 à 2021, puis à compter de 2021, représentant du ministère en charge des Transports au Haut

Conseil Scientifique de l'Office National d'Études et de Recherches Aérospatiales (ONERA).



Thibaud NORMAND

débute sa carrière au sein du service de la prévention des risques de la DREAL Provence-Alpes-Côte d'Azur en tant qu'adjoint puis chef du service. Il occupe ensuite la fonction de chef du bureau de la production électrique auprès du ministère de la Transition écologique et solidaire. De 2017 à 2020, il est conseiller technique

D.R.

pour l'énergie auprès du président de la République et du Premier ministre.

Il rejoint le groupe aéronautique Safran en 2020 en tant que chargé de mission auprès du directeur de la stratégie, puis y prend la tête en 2021 d'une nouvelle direction Climat, chargée de l'ensemble des problématiques de décarbonation de l'entreprise. En 2023, il rejoint la filiale Safran Nacelles où il occupe un poste de directeur de programme. Thibaud Normand est ingénieur en chef des mines.



Le général de corps aérien (2S) **Frédéric PARISOT** est délégué général du Groupement des Industries Françaises Aéronautiques et Spatiales (GIFAS) depuis le 1^{er} août 2023. Il a terminé sa carrière dans l'armée de l'Air et de l'Espace comme Major général après trente-sept ans de service.

D.R.

Au cours de sa carrière, il a occupé des postes opérationnels et en état-major. Il a débuté comme pilote de chasse à Orange sur Mirage 2000 et au Canada sur CF18. Il totalise plus de 3 000 heures de vol et 81 missions de guerre en territoire hostile.

En état-major, il a occupé des postes en administration centrale à Paris et aux États-Unis au Pentagone au sein de l'équipe "Checkmate" de l'US Air Force. Il a servi à l'état-major particulier du président de la République entre 2013 et 2017, puis au sein de l'état-major de la coalition internationale contre Daech en Irak entre 2017 et 2018 comme représentant principal français et directeur des opérations civilo-militaires pour l'opération "Inherent Resolve".

Le général Parisot est breveté du Collège Interarmées de défense, du Centre des Hautes Études Militaires, et auditeur de l'Institut des Hautes Études de Défense Nationale à Paris.

Dr Bertrand REVOL

est né en 1976 en France. En juin 2000, il obtient son diplôme d'ingénieur en génie électrique de l'ENSIEG/INPG (Institut National Polytechnique de Grenoble, France). Depuis novembre 2003, il est titulaire d'un



D.R.

doctorat en génie électrique de l'Université Joseph Fourier, traitant de la compatibilité électromagnétique (CEM) en électronique de puissance. Ses principaux domaines de recherche concernent la CEM des convertisseurs d'électronique de puissance et la modélisation des structures et des composants.

Entre 2004 et 2018, il est nommé maître de conférences à l'École normale supérieure Paris-Saclay (ENS-PS), France, et mène ses recherches au laboratoire SATIE-CNRS sur des problématiques liées à la CEM, la modélisation pour l'optimisation et l'intégration en électronique de puissance. Depuis septembre 2018, il est détaché à Safran Tech, le centre de recherche en technologie du Groupe Safran en tant qu'expert senior en CEM des systèmes électriques.



D.R.

Augustin de ROMANET, né en 1961, est diplômé de l'Institut d'études politiques de Paris et ancien élève de l'École Nationale de l'Administration.

Il a été nommé par décret du 29 novembre 2012 président-directeur général d'Aéroports de Paris, et renouvelé dans ses fonctions par décrets en date du

24 juillet 2014 et du 29 mai 2019.

Directeur général de la Caisse des Dépôts et Consignations, de mars 2007 à mars 2012, Augustin de Romanet présidait également le Fonds stratégique d'investissement de 2009 à 2012. Auparavant, il avait exercé la fonction de directeur financier adjoint du Crédit Agricole SA, membre du comité exécutif. Précédemment, il fut secrétaire général adjoint de la présidence de la République, de juin 2005 à octobre 2006, et avait exercé des responsabilités au sein de différents cabinets ministériels. Entre 2002 et 2005, il fut notamment directeur du cabinet d'Alain Lambert, ministre délégué au Budget ; directeur adjoint du cabinet de Francis Mer, ministre de l'Économie, des Finances et de l'Industrie ; directeur de cabinet de Jean-Louis Borloo, ministre de l'Emploi, du Travail et de la Cohésion sociale ; et directeur adjoint de cabinet du Premier ministre, Jean-Pierre Raffarin.

En ce qui concerne ses mandats actuels au sein du groupe ADP, Augustin de Romanet est président et administrateur de Média Aéroports de Paris (SAS, co-entreprise avec JC Decaux), membre du conseil de direction de Relay@ADP (SAS, co-entreprise avec Lagardère) et membre du conseil d'Extime Duty Free Paris, ex-Société de Distribution Aéroportuaire (SAS, co-entreprise avec Lagardère). Depuis février 2021, il est membre du conseil d'administration de GMR Airports Limited (société par actions de droit indien). Il est également président de la Fondation d'Entreprise Groupe ADP.

Concernant ses autres mandats, il est administrateur à la Régie autonome des transports parisiens (RATP), établissement public à caractère industriel et commercial ; membre du conseil de surveillance de la société Le Cercle des économistes, SAS ; président du conseil d'administration de l'établissement public du domaine national de Chambord (France) ; membre fondateur et administrateur du fonds de dotation dénommé « Institut pour l'Innovation Économique et Sociale » (2IES) ; président du conseil d'administration de Paris EUROPLACE ; et administrateur de l'association FONDACT pour la gestion participative, l'épargne salariale et l'actionnariat de responsabilité. Il est administrateur et vice-président du conseil d'administration de la société européenne cotée SCOR, et également président du Comité de développement durable et membre des Comités stratégique, des comptes et de l'audit, des risques et de gestion de crise. Depuis mars 2022, il est administrateur du conseil d'administration de la société Qualium Investissement.

Augustin de Romanet est chevalier de la Légion d'honneur et détenteur de la médaille de la défense nationale.



D.R.

Bruno SAINJON

est X 82 et ENSTA 87. Il a occupé plusieurs postes au sein de la DGA dont celui de directeur des opérations, de janvier 2009 à mai 2014.

Au sein des services du Premier ministre, il a été de mars 1996 à juin 1997 directeur des affaires économiques et de l'animation de la délégation interministérielle à

la coupe du monde de football de 1998. Il a également été directeur adjoint des technologies et transferts sensibles du secrétariat général de la Défense nationale (SGDN), d'août 2003 à septembre 2005.

Conseiller technique, puis conseiller pour les Affaires économiques, financières et budgétaires du ministre de la Défense de juillet 1997 à février 2000.

De mars 2000 à décembre 2002, directeur de la stratégie et du développement du domaine Matériaux énergétiques du groupe SNPE. Il a occupé simultanément les fonctions de président-directeur général de CELERG et CELERG International (devenu Roxel) de mai 2001 à mai 2002, et de secrétaire du comité exécutif de SNPE de février à novembre 2002.

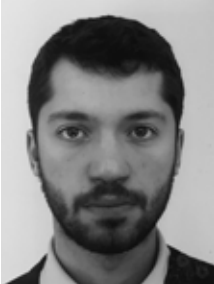
Depuis le 30 mai 2014, Bruno Sainjon est président-directeur général de l'ONERA. Son mandat a été renouvelé en juillet 2015, puis en 2020.

Il est aussi membre du conseil d'administration du CNES depuis 2015.

Il a été élu président de l'EREA, association des établissements de recherche européens dans l'aéronautique, de 2015 à 2016 ; puis président de l'ESRE, association européenne des centres de recherches du domaine spatial de 2020 à 2022. Il a été élu, le 1^{er} novembre 2021, vice-président de l'IFAR, forum international pour

la Recherche aéronautique qui regroupe vingt-sept établissements publics de recherche sur les cinq continents, puis président en octobre 2023

Il est commandeur de la Légion d'honneur et de l'ordre national du Mérite.



Guillaume SOULÉ,

ingénieur *data & machine learning* formé à Télécom ParisTech et à la National University of Singapore, est spécialisé dans les problématiques autour de l'application opérationnelle de la donnée et de l'IA à des enjeux métiers. Il a travaillé dans plusieurs *start-up* avant de rejoindre Palantir Technologies

D.R.

comme Deployment Strategist, pour déployer des modèles d'IA à différents clients dans les domaines bancaires, industriels et de service. Il dirige depuis deux ans le projet Skywise pour Airbus, qui propose un écosystème de travail entre Airbus, diverses compagnies aériennes et d'autres acteurs de l'aviation.



Régine SUTRA ORUS

a obtenu son diplôme d'ingénieur en électrotechnique automatique à l'ENSEEIH en 1988. Dès l'obtention de son diplôme, Régine Sutra Orus a travaillé en tant qu'ingénieur de recherche pour Airbus, afin de préparer les futures architectures systèmes et technologies électriques du futur A380.

D.R.

Après un détachement de trois ans en Espagne où elle était en charge de l'interface entre le moteur et l'avion, de retour en France, elle est devenue chef du service Systèmes Électriques, en charge du développement des systèmes électriques des avions en cours de développement tels que l'A380 et l'A400M, mais aussi en charge du support de tous les avions en service. Elle rejoint Zodiac en 2009 en tant que responsable des Relations avec Airbus France. À ce poste, elle est également en charge du support aux chaînes d'assemblage pour l'ensemble des systèmes fournis par le groupe Zodiac.

Riche de cette expérience en support industriel, elle est revenue vers une activité de recherche en 2014 en tant que responsable du Domaine Aéronef Plus Électrique de l'IRT Saint Exupéry, détachée par Zodiac Aerospace, puis a rejoint le centre de recherche centralisé de Safran, en 2019, en tant que directrice du pôle Systèmes électriques et électroniques.

Nathalie TARNAUD LAUDE

a été nommée par l'assemblée des membres d'ATR, composée d'Airbus et de Leonardo, en tant que présidente exécutive, à compter du 17 septembre 2022.



D.R.

Depuis son entrée dans le groupe Airbus en 2005, elle a occupé divers postes au sein de l'industrie de l'aérospatial et de la défense. En octobre 2019, elle a été nommée à la tête du programme NH90 pour Airbus Helicopters, et présidente de NHIndustries, en charge des principales activités du programme NH90. Celles-ci comprennent notamment le développement et la certification, l'industrialisation et la production, le support et les services, les achats et les fournisseurs, la commercialisation, les offres et le marketing, et la finance. L'objectif étant de livrer le NH90 dans les délais impartis, selon les coûts attendus et au niveau de qualité exigé, aux clients (série et rétrofit), et d'accélérer la transition de la production à la phase de mise en service, avec une initiative dédiée en ce sens.

Auparavant, Nathalie Tarnaud Laude était directrice de la trésorerie chez Airbus Helicopters, et directrice des Opérations New Technology Ventures au sein de l'organisation CTO du groupe Airbus, en charge de missions variées incluant notamment la négociation et le suivi des principaux partenariats technologiques dans les domaines de la propulsion hybride électrique, de l'analyse de données, de l'intelligence artificielle, etc., mais également le support stratégique, commercial et financier du projet de développement de l'E-Fan 2.0 (avion tout électrique de deux sièges), et la gestion des opérations des entités Testia (filiales de contrôle non destructif du groupe Airbus).

De 2005 à 2013, elle a mené toutes les transactions de fusions et acquisitions des divisions du groupe Airbus, et notamment la tentative de regroupement avec BAE Systems en 2012 (valeur > 35 milliards €). Elle était auparavant analyste en recherche action auprès de Aurel Leven Securities à Paris, et gestionnaire de risques de produits dérivés financiers pour CCF Securities à Paris.

Elle est titulaire d'un MBA de la London Business School, d'un master en finance de l'École supérieure de Commerce de Paris, et d'un diplôme SFAF (Société française des analystes financiers). Elle a également suivi une formation de l'INSEAD en Transition au Management général en 2013. Elle parle français et anglais couramment.



D.R.

Pascal TEA,

ingénieur en conception logicielle formé à l'École centrale de Nantes et l'Institut Royal de Technologies de Stockholm, dirige de larges programmes de transformation autour du numérique et de la donnée. Il a occupé différents postes de direction tant en informatique qu'en excellence opérationnelle au sein d'un grand groupe français d'assurances, avant de rejoindre Palantir.

Il dirige le partenariat avec Airbus depuis cinq ans, ainsi qu'avec d'autres partenaires industriels.



D.R.

Luc TYTGAT

a été nommé directeur exécutif par intérim de l'Agence Européenne de la Sécurité Aérienne (EASA) le 1^{er} septembre 2023. Son rôle est de diriger l'Agence de manière stable, en assurant la continuité de la mission de l'EASA et en maintenant des relations solides avec les parties prenantes et le conseil d'administration de l'EASA.

Il a rejoint l'EASA en janvier 2015 en tant que directeur de la Stratégie et de la Gestion de la Sécurité. Dans ce rôle, il a réussi à augmenter le niveau d'analyse en matière de sécurité, et à développer un cadre réglementaire plus agile et amélioré. Il a défini la direction stratégique pour les principaux défis auxquels le secteur est confronté, tels que la nécessité de renforcer le rôle de l'Agence dans la lutte contre le changement climatique et les risques de sécurité émergents tels que la cybersécurité, les zones de conflit et la santé. Les activités de recherche et d'innovation de l'EASA se sont également considérablement développées sous sa direction.

Avant cela, il a été directeur du directoire du Ciel Unique Pan-Européen à EUROCONTROL depuis 2011, ayant précédemment travaillé pendant vingt ans dans le domaine du transport aérien et de l'espace à la Commission européenne et dix ans dans l'armée de l'air belge.

Luc Tytgat est diplômé de l'Académie Militaire Belge en tant qu'ingénieur en aéronautique, et détient également un master en gestion publique de la Solvay Brussels School of Economics and Management



D.R.

Magali VAISSIERE,

ingénieure diplômée de Télécom ParisTech en 1980, décroche à la suite de ce premier diplôme une maîtrise universitaire « Sciences en génie électrique » de l'Université de Stanford (1981). En parallèle de son activité professionnelle, elle effectue également une maîtrise en administration des affaires au Centre de perfectionnement aux affaires (1995).

Après un parcours de vingt-quatre années dans l'industrie (neuf ans au sein de Thomson-CSF, puis quinze ans chez Matra Espace/MMS/EADS-Astrium Satellites), elle entre en 2005 à l'Agence Spatiale Européenne où elle dirige le département des télécommunications basé à Noordwijk (Pays-Bas). En 2008, elle devient directrice des télécommunications et applications intégrées, puis en 2013 prend la responsabilité complémentaire de directrice du Centre Européen des Applications Spatiales et des Télécommunications à Harwell (Royaume-Uni).

Magali Vaissière reçoit en 2007 le prix Irène-Joliot-Curie dans la catégorie parcours femme entreprise. Entre 2009 et 2013, elle est membre du Haut Conseil de la Science et de la Technologie. Elle est également membre de l'Académie des technologies depuis 2014. Le 24 mars 2021, elle est élue présidente de l'IRT Saint Exupéry pour un mandat de trois ans, puis nommée en 2022 en tant que membre du comité ministériel de pilotage sur le spatial de France 2030.



D.R.

Dr Christophe VIGUIER

a obtenu un master recherche en génie électrique de l'Université Toulouse III en 2001. En 2005, il a reçu son doctorat en génie électrique de l'Institut National Polytechnique de Toulouse sur des travaux réalisés au sein du Laboratoire LAPLACE en partenariat avec l'hôpital de la Pitié Salpêtrière de Paris. Pendant plus

de dix ans, il a été ingénieur R&D et chef de projet en conception de machines électriques et actionneurs électromécaniques dans la société NOVATEM SAS autour de projets innovants pour l'aéronautique, l'automobile et le biomédical.

En 2017, il rejoint Safran Tech, centre R&T du groupe, pour travailler sur des sujets liés à l'électrification et l'hybridation de la propulsion et des aéronefs en tant qu'architecte systèmes électriques, adjoint de la directrice du pôle Systèmes électriques et électroniques (E&E), puis responsable de l'équipe Machines électriques du pôle. Il est également considéré comme un expert sénior en machines électriques.