

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.