

# DÉCARBONATION DE L'AÉRONAUTIQUE CIVILE

**Atteindre la neutralité carbone en 2050 est un immense défi technologique pour l'aéronautique civile, tout particulièrement pour les vols long-courriers qui représentent la moitié des émissions de gaz à effet de serre du trafic aérien. Des efforts importants sont entrepris pour progressivement introduire de nouveaux biocarburants. A plus long terme, plusieurs concepts s'appuyant sur de nouvelles technologies de propulsion sont actuellement examinés, avec des stratégies plus variées pour les vols court et moyen-courriers.**

## QUELQUES CHIFFRES

L'aéronautique civile moderne commence son essor précisément le 2 mai 1952, avec le premier vol commercial entre Londres et Johannesburg réalisé avec un avion à réaction, un quadrimoteur De Havilland Comet 1 de la British Overseas Airways Corporation, devenue depuis British Airways.

Le trafic aérien n'a jamais cessé de croître depuis, un doublement du trafic prévu tous les 15 ans, en dépit de nombreux événements qui sont restés conjoncturels. On montre ainsi sur les figures 1 et 2 la fréquentation des 10 premiers aéroports internationaux en 2018 et en 2022 respectivement. On observe clairement la reprise du trafic, avec un retard en Asie lié au déconfinement plus tardif après l'épidémie du Covid19. On peut également examiner les dix lignes les plus fréquentées, et noter que ce sont toutes des lignes intérieures, la dixième étant la liaison Pékin – Shanghai avec 6,3 millions de passagers, à comparer à la première liaison internationale entre Londres et New-York avec 2,8 millions de passagers par an.

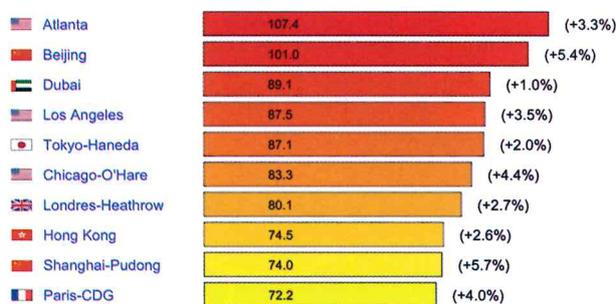


Fig. 1 : trafic passager (embarquement, débarquement, passagers en transit comptés une fois) des dix premiers aéroports en 2018.

Le transport aéronautique contribue globalement pour 1,9% des émissions de gaz à effet de serre, et pour 2,5% des émissions de gaz carbonique. L'aviation commerciale (trafic passager et fret) représente 88%, les activités militaires 8% et les vols privés 4%. Ce secteur comme tous les autres, doit profondément évoluer pour réduire son empreinte carbone d'ici l'objectif 2050 de la neutralité carbone à l'échelle planétaire. On identifie au moins trois grands axes pour cela : le volume du trafic aérien, le type de carburant ou d'énergie utilisé pour la propulsion, et les

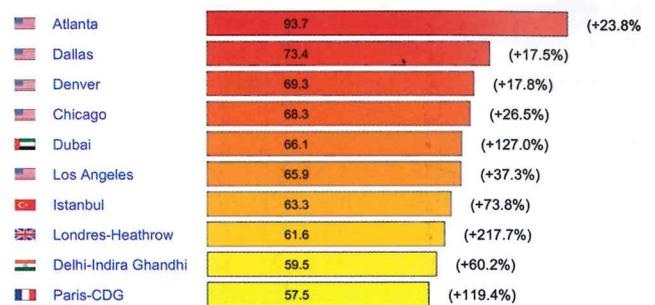


Fig. 2 : trafic passager des dix premiers aéroports en 2022.

gains en efficacité énergétique des avions. Le premier levier n'est pas de notre ressort mais tout à chacun peut mesurer les infrastructures et la politique publique à proposer pour promouvoir l'intermodalité par exemple. Les deux autres sont liés à notre capacité à développer de nouvelles technologies et architectures d'avion.

## NOUVEAUX CARBURANTS ET ÉNERGIE PROPRE

Quelques mots d'abord sur les nouveaux carburants, à commencer par l'hydrogène liquide. L'application la plus connue est certainement le spatial avec le moteur-fusée cryogénique Vulcain qui a équipé le lanceur spatial Ariane 5 et équipera Ariane 6. La technologie à mettre en œuvre pour maîtriser la combustion oxygène liquide - hydrogène liquide est extraordinairement pointue. L'hydrogène liquide est un carburant plus performant pour la propulsion (pouvoir calorifique presque trois fois supérieur au kérosène pour une même masse), mais son volume est quatre fois plus grand, même sous forme liquide. Son utilisation sur des longs courriers, typiquement pour des distances supérieures à 4000 km pour faire simple, est inenvisageable en termes de contrainte de stockage. Les enjeux sur la sécurité requièrent des mesures drastiques. Il sera aussi nécessaire de modifier les infrastructures aéroportuaires à l'échelle mondiale, et de pouvoir distribuer de l'hydrogène vert. Plusieurs projets sont actuellement en développement, nécessitant de repenser en profondeur l'architecture de l'avion. L'avion électrique existe déjà, avec des petits avions biplaces pour apprendre à piloter dans les aéroclubs, possédant une autonomie de presque une heure (voir la figure 3). Il existe également un certain nombre de prototypes, avec des



Fig. 3 : Le Pipistrel Velis Electro est le premier avion électrique certifié au monde, destiné à la formation des pilotes.

architectures à décollage et atterrissage vertical par exemple. Le poids des batteries est un élément dimensionnant critique, qui ne permet pas à l'heure actuelle d'imaginer des avions de grande capacité même sur des vols court et moyen-courrier, sauf à remplacer tous les passagers par des batteries (environ 250 Wh/kg pour la densité d'énergie d'une batterie, contre 12000 Wh/kg pour le kérosène et 33000 Wh/kg pour l'hydrogène). Il y a par contre des développements pour installer une propulsion hybride, sur les hélicoptères par exemple en transformant un des deux moteurs thermiques en moteur électrique, avec un pilotage à repenser suivant les phases de vol.

L'utilisation de biocarburants SAF (Sustainable Aviation Fuel) fabriqués à partir de résidus et déchets biosourcés, reste l'option la plus réaliste à très court terme. Ils peuvent directement s'intégrer au kérosène sans modification de la motorisation pour des taux inférieurs de 30% à 50%, avec donc une très grande souplesse opérationnelle pour les compagnies aériennes. On observe cependant qu'il existe une concurrence d'usage pour la biomasse, une crainte sur le changement possible d'affectation des sols même s'il existe un encadrement assez strict en Europe pour le moment. La production des SFA a triplé en deux ans, mais on estime que l'on ne pourrait couvrir que 20% des besoins en aéronautique d'ici 2050. Un certain nombre de carburants alternatifs sont en parallèle étudiés, comme les carburants de synthèse, ou l'ajout d'hydrogène liquide à la biomasse.

On aura compris avec ces quelques éléments que la décarbonation de l'aéronautique s'avère une tâche peu facile, et sans solution technologique unique. Ce qui est développé à petite échelle pour l'électrique ou l'hydrogène peut difficilement se généraliser aux long-courriers (rayon d'action de plus de 4000 km) qui représentent la moitié des émissions des gaz à effet de serre. Les biocarburants n'apporteront qu'une réponse partielle. On ne réduirait pas non plus les traînées de condensation, sans que l'on sache pour le moment bien caractériser leur contribution par ailleurs.

## EFFICACITÉ ÉNERGÉTIQUE DES SYSTÈMES PROPULSIFS

La troisième voie, non exclusive des deux premières, consiste à augmenter significativement la performance énergétique des systèmes propulsifs. Beaucoup d'avant projets plus ou moins futuristes ont vu le jour ces dernières années, des architectures avec des moteurs en partie encastrés dans le fuselage à l'arrière de l'avion, ou l'incontournable aile volante.

Des réductions significatives de consommation sont obtenues en augmentant l'importance du flux secondaire dans les turboréacteurs, ce qui se traduit par une soufflante de plus en plus grande à l'entrée du moteur. Ces moteurs à très haut

taux de dilution (UHBR, le taux de dilution traduisant l'importance du flux secondaire) embarquent de nombreuses technologies innovantes dans presque tous les domaines de sciences de l'ingénieur, mais tout particulièrement en mécanique des fluides et en acoustique. L'aboutissement ultime dans cette course aux grands taux de dilution est le non carénage du moteur, et le retour aux hélices. La figure 4 montre un exemple d'open fan avec une hélice d'un diamètre de l'ordre de trois mètres (la seconde roue est fixe ici, à distinguer des hélices contrarotatives). Le gain en termes de consommation et de réduction des émissions des gaz à effet de serre est estimé à 20%, ces motorisations seront aussi complètement compatibles avec l'utilisation de carburants d'aviation durable.



Fig. 4 Projet OFELIA (Open Fan for Environmental Low Impact of Aviation) coordonné par Safran Aircraft Engines de soufflante non carénée, actuellement testée en soufflerie pour l'aérodynamique et l'acoustique par l'ONERA à Modane-Avrieux (Savoie).



Fig. 5 Image d'artiste d'un Airbus A380 équipé d'un open fan pour les premiers essais en vol, avec une mise en service prévue à l'horizon 2035.

CO2 ?

## POUR CONCLURE

La décarbonation de l'aéronautique, au moins pour les vols long-courriers, ne peut reposer pour le moment sur de nouvelles technologies de propulsion, et cela souligne de fait l'importance des travaux de recherche à mener sur l'évolution des systèmes propulsifs actuels. Il faut aussi observer que sur ce sujet de la décarbonation, l'aéronautique occupe dans l'idéologie dominante de la société une position quelques fois disproportionnée par rapport à son impact environnemental, ce qui n'exonère en rien ce secteur d'activité des efforts à fournir, comme j'espère l'avoir illustré avec ce texte.

Le LMFA est pleinement impliqué dans ces programmes de recherche, mais aussi dans la production de connaissances, de modèles physiques, de technologies innovantes, de simulations numériques comme celles présentées dans un précédent numéro de Technica. Nous avons lancé notre troisième chaire industrielle avec l'Agence Nationale de la Recherche et Safran Aircraft Engines. Le lecteur aura aussi compris que le projet IMPACT, porté par la direction de l'Ecole Centrale de Lyon, est pour notre Laboratoire d'une importance capitale afin de pouvoir accueillir toutes nos activités d'enseignement et de recherche, contribuant en particulier à la décarbonation de l'aéronautique.

[1] Gössling S. & Humpe A., 2020, The global scale, distribution and growth of aviation: Implications for climate change, *Global Environmental Change*, 65, 102194, 1-12.

[2] Kärcher B., 2018, Formation and radiative forcing of contrail cirrus, *Nature Communication*, 9, 1824, 1-17.

[3] Académie des technologies, 2023, La décarbonation du secteur aérien par la production de carburants durables.

[4] Académie de l'Air et de l'Espace, 2023, L'hydrogène liquide comme carburant des avions : est-ce une bonne piste pour réduire les émissions de

*Une première version des enjeux de la décarbonation pour l'aéronautique a été présentée à l'occasion des 30 ans de Centrale Innovation le 21 novembre 2023, à l'initiative de Bénédicte Martin (Directrice de Centrale Innovation) et Christophe Corre (Directeur de la Recherche et de l'Innovation de l'Ecole Centrale de Lyon).*



### Christophe BAILLY (90)

Christophe Bailly (ECL 1990) est Professeur des Universités à l'Ecole Centrale de Lyon et directeur du Laboratoire de Mécanique des Fluides et d'Acoustique (CNRS, Ecole Centrale de Lyon, Université Claude Bernard Lyon 1, INSA Lyon ; LMFA UMR5509). Il est docteur de l'Ecole Centrale Paris (1994), membre junior de l'Institut Universitaire de France (2007), éditeur associé de l'*American Institute of Aeronautics and Astronautics Journal* depuis 2005. Il a reçu l'*Aeroacoustics Award 2020* décerné par le CEAS (Council of European Aerospace Societies) et la médaille française de la Société Française d'Acoustique en 2023.