

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'émouvoir 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)