



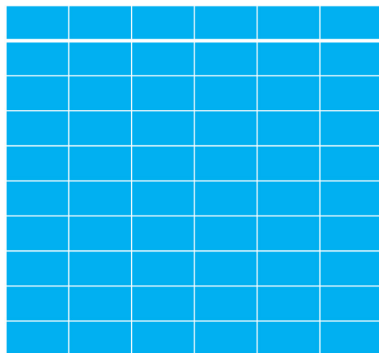
L'électrification des aéronefs

(état mai 2020)

1. Les moteurs électriques en aéronautique

La recherche de solutions afin de diminuer les émissions de CO₂ et le bruit a déjà débouché sur la conception d'avions légers à propulsion électrique. L'étape suivante consisterait à électrifier les avions lourds, surtout si l'on songe qu'à haute altitude les moteurs électriques ne rejettent aucune substance nuisible pour le climat. Vu le grand intérêt que suscite l'électrification des avions, qu'en est-il au juste de sa faisabilité ? C'est ce que nous allons voir ci-après compte tenu des dernières connaissances scientifiques en la matière.

L'énergie nécessaire pour un vol doit être stockée sous une forme appropriée à bord de l'avion dès avant le départ. Pour être en mesure de transporter des passagers et du fret ainsi que le carburant embarqué sur des liaisons long-courriers, les avions doivent afficher une efficacité énergétique telle que la quantité d'énergie embarquée suffise pour tout le vol. Cela signifie en particulier que le stock d'énergie embarquée ne doit pas être trop lourd puisque chaque kilo supplémentaire doit être compensé par un supplément de poussée. Les avions de ligne et cargo électriques commerciaux se heurtent aujourd'hui à la faible densité d'énergie (énergie par unité de masse ou de volume) des batteries qui seraient nécessaires pour assurer le vol. La grande puissance électrique motrice requise par les gros-porteurs de même que la nécessité de charger rapidement de très grandes quantités d'énergie constituent également des défis de taille. De plus, l'écobilan dépend de la durée de vie des batteries, de leur fabrication, de leur recyclage et de l'impact environnemental de la production d'électricité alimentant ces batteries.



Énergie emmagasinée dans un 1 kg de kérosène



Énergie emmagasinée dans un 1 kg de batterie haute performance

1.1. Densité d'énergie des batteries

La densité massique d'énergie désigne la quantité d'énergie par unité de masse emmagasinée dans un agent énergétique. Ce facteur est important eu égard au poids total d'un avion, à l'énergie nécessaire et à son rayon d'action (plus une batterie sera lourde, plus il faudra d'énergie pour le vol et le nombre de

passagers et la quantité de fret transportables seront réduits d'autant). Un kilo de kérosène contient env. 12 kWh¹.

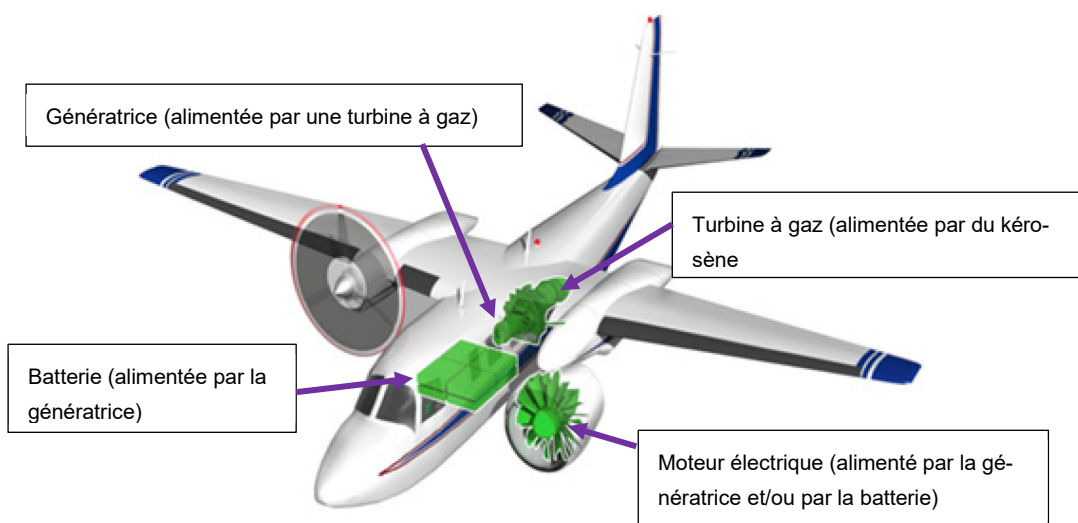
Les batteries rechargeables utilisées dans les prototypes d'avions électriques (avions légers de 600 kg au maximum) atteignent une densité d'énergie réelle équivalant à 0,2 kWh par kilo². En d'autres termes, l'énergie contenue dans un kilo de batterie ne représente que le soixantième de l'énergie contenue dans un kilo de kérosène. Par contre, le rendement d'un avion électrique serait théoriquement deux fois plus élevé environ pour un poids identique³.

Même en admettant que l'on parvienne à multiplier l'énergie emmagasinée dans les batteries haute performance, on serait encore loin du compte pour le transport de passagers et de fret, vu la très faible densité d'énergie des batteries actuelles par rapport à la masse (voir le raisonnement théorique ci-après, point 4.1).

La place requise par l'accumulateur a une incidence sur le volume de l'avion et donc sur l'énergie dont il a besoin et son efficacité. Raison pour laquelle il faut non seulement considérer la densité d'énergie massique mais aussi la densité d'énergie volumique. Une batterie haute performance actuelle emmagasine env. 0,35 kWh par litre⁴. Par comparaison, il faut un volume de kérosène 20 fois moins important pour livrer la même énergie. Non seulement un avion électrique utilisant la technologie des batteries actuelles serait beaucoup plus lourd qu'un avion traditionnel, mais de surcroît ses « réservoirs » seraient nettement plus volumineux. Il faudrait sacrifier le compartiment de fret pour y loger les batteries ou augmenter notablement la taille du fuselage, ce qui se traduirait par de grosses pertes d'efficacité du transport.

2. Propulsion hybride (combinaison de propulsion électrique et de turbine à gaz)

La propulsion hybride, qui allie kérosène, batteries d'appoint et turbines électriques, est celle qui a le plus de chance de se concrétiser ces prochaines années. Le croquis ci-dessous montre un système hybride monté « en série » où une turbine conventionnelle entraîne une génératrice pour produire de l'énergie électrique. La poussée est générée par les moteurs électriques qui tirent leur énergie soit de la batterie tampon, soit de la génératrice ou des deux simultanément. Un paquet de batteries relativement petit est suffisant pour créer un tampon et permettre à l'avion d'effectuer les phases de roulage, le début de la manœuvre de départ et l'atterrissage sans utiliser la turbine à gaz. En croisière, les moteurs électriques sont alimentés par la génératrice elle-même entraînée par la turbine à gaz. Autrement dit, l'avion utilise le kérosène pour la majeure partie du vol. L'avantage de ce type d'avion réside dans l'optimisation de la turbine à gaz, dont la dimension pourrait être réduite puisqu'elle ne serait utilisée en principe qu'en



¹ <https://www.chemie.de/lexikon/Kerosin.html>

² Dans le cadre du financement spécial du trafic aérien (art. 87b Cst.), l'OFAC subventionne un essai grandeur nature d'un avion électrique biplace destiné à la formation de base des pilotes et dispose de données empiriques sur la meilleure des techniques de propulsion électriques aujourd'hui certifiable.

³ Le rendement thermique des réacteurs (kérosène → rotation de la soufflante) dépasse 50 % en vol de croisière. Le rendement électrique (batterie → rotation de la soufflante) dépasse 90 %.

⁴ http://www.hiu-batteries.de/fileadmin/user_upload/Dokumente/Broschueren/lithium_batterien.pdf

croisière, l'assistance électrique étant engagée au décollage. La turbine à gaz pourrait de ce fait avoir encore un meilleur rendement que les turbines actuelles, ce qui permettrait de réduire la consommation de carburant en dépit des pertes causées par la génératrice et le poids plus important du système. Il en résulterait également une réduction de la pollution et du bruit⁵ et très probablement des émissions hors CO₂ ayant une influence sur le climat aux altitudes de vol usuelles aujourd'hui. Toutefois, plus la distance à parcourir est grande, plus le poids des systèmes d'appoint (notamment les batteries) s'accroît, de sorte que les économies de carburant tendent à s'amenuiser.

L'électrification pose également un autre défi, celui de la maîtrise d'éléments électriques très puissants à bord des avions. Le niveau de tension électrique à bord est limité physiquement de manière à éviter les court-circuit et à protéger l'équipage et les passagers. Limiter de cette manière le niveau de tension exploitable exige cependant des courants électriques élevés et des câbles épais et lourds.

Un propulseur électrique connaît aussi des pertes de rendement. Vu les puissances élevées requises, même un petit pourcentage de pertes se traduit par de grandes quantités de chaleur, qui doivent être évacuées, y compris par des éléments du fuselage. En même temps, ces éléments de fuselage doivent être petits et légers. Un casse-tête supplémentaire !

Dans le but de mieux jauger le potentiel et les limites des systèmes hybrides, Airbus et Rolls-Royce ont planché jusqu'au printemps 2020 sur un projet de groupe propulseur hybride d'une puissance de 2 MW⁶ (projet E-Fan X)⁷. Il est prévu que le moteur hybride équipe un vieil avion court-courrier de type BAE-146, l'un des quatre réacteurs étant remplacé par un moteur électrique d'une puissance de 2 MW. Le premier vol était prévu pour 2021. Cela dit, une puissance de 2 MW ne représente qu'une petite fraction de la puissance dont un avion de ligne de la série des A320 ou des Boeing B737 embarquant 180 passagers a besoin pour décoller, qui est d'au moins 30 MW⁸. Se réfugiant derrière le secret d'entreprise, Airbus et Rolls-Royce n'ont pas donné de détails sur les difficultés techniques qui ont conduit à l'arrêt du projet E-Fan X.



Prototypé d'avion dans le cadre du projet E-Fan x (source : Airbus)

⁵ Mission Definition, Analysis and Operation Potential of a Hybrid-Electric Aircraft based on the Do228 Design, Curdin Babst, Master Thesis, May 2018, https://www.researchgate.net/publication/328335594_Mission_Definition_Analysis_and_Operation_Potential_of_a_Hybrid-Electric_Aircraft_based_on_the_Do228_Design

⁶ 2 mégawatts = 2000 kW (soit environ 2600 Ch)

⁷ www.airbus.com → Innovation → Future technology → Electric flight → E-Fan X

⁸ Source: OFAC. Cette valeur peut être inférée à partir de la poussée nécessaire, des équations de Navier-Stokes ou de la consommation de carburant et du rendement des moteurs.

On voit donc que l'électrification des avions de ligne sur la base d'une solution hybride n'en est encore qu'à ses balbutiements et qu'il faudra intensifier considérablement la recherche pour assister à une percée de ces systèmes. À court et moyen terme, il est peu probable que la flotte d'avions existante soit remplacée par des avions à motorisation hybride.

3. Taxis volants électriques

Le développement de taxis volants électriques constitue une tentative de trouver une application aux aéronefs tout-électriques. Problématique dans le cas des avions de ligne, la densité d'énergie des batteries actuelles devrait être *a priori* suffisante pour couvrir de petites distances. Le bruit des taxis volants provient essentiellement des rotors ou des hélices. Ils sont identiques en cela aux hélicoptères. Au lieu d'être pourvus d'un grand rotor, la plupart des modèles imaginés utilisent plusieurs petites hélices dont le régime se doit d'être élevé. Autrement dit, même équipés de moteurs électriques, ces aéronefs occasionneront d'importantes nuisances sonores. En ce sens, la circulation de taxis volants en milieu urbain devrait obéir aux mêmes exigences et contraintes que celles appliquées à l'exploitation d'hélicoptère. Parce que le taxi volant n'est en définitive qu'un moyen de transport supplémentaire qui ne se substituera que marginalement aux moyens de transport terrestres et qui plus est aura besoin de ressources et d'énergie supplémentaires, il est peu probable qu'il contribue à la diminution des émissions de CO₂ de l'aviation.

4. Perspectives d'avenir

4.1. Admettons que... Un petit raisonnement théorique sur l'électrification des avions de ligne à partir d'un exemple fictif

Hypothèse : On parvient à doubler d'ici 2030 la densité d'énergie volumique et massique des batteries. Ces batteries auront fait leurs preuves et auront une durée de vie et une vitesse de chargement suffisantes pour l'usage qui en est fait. Leur fabrication ne sera pas excessivement dommageable pour l'environnement. De plus, le problème décrit précédemment dans la partie consacrée aux modes de propulsion hybrides s'agissant de la compatibilité entre puissance électrique très élevée et éléments compacts relativement légers est techniquement résolu. Les coûts ne sont pas pris en compte.

Exemple fictif et raisonnement : La Norvège envisage d'électrifier son transport aérien d'ici 2040. Il faut aujourd'hui 24 heures pour rallier Oslo en train au départ de Zurich alors que le même trajet ne prend que quelques heures en avion. Les avions qui desservent cette ligne sont des Airbus séries A320 et des Boeing B737 et embarquent d'ordinaire entre 150 et 180 passagers, plus le fret. En moyenne, ces avions brûlent 5,8 tonnes de kérosène entre Zurich et Oslo⁹, soit près de 69 000 kWh.

Les moteurs d'un avion tout-électrique auraient en principe besoin de moins d'énergie pour satisfaire la même prestation de transport puisqu'ils ont un meilleur rendement. Vu le trajet choisi et la taille des avions de référence, l'énergie nécessaire ne serait toutefois pas significativement moindre, en raison du poids élevé : on l'estime à un peu moins de la moitié, soit 34 000 kWh (sans prendre en compte les réserves de route). En prenant pour hypothèse une densité d'énergie massique de 0,4 kWh par kg, le poids total des batteries seules atteindrait déjà 85 tonnes. En prévoyant une réserve de route, le vol Zurich – Oslo exigerait 44 000 kWh, ce qui augmenterait l'énergie nécessaire et le nombre de batteries nécessaires. Par comparaison, un avion de ligne conventionnel fonctionnant au kérosène pèse près de 65 tonnes au décollage.

Compte tenu des hypothèses optimistes retenues pour un avion tout-électrique, rien que le poids des batteries serait nettement supérieur au poids d'un avion conventionnel actuel à pleine charge et avec le plein de kérosène. À noter que pour calculer la quantité d'énergie électrique nécessaire, on a considéré que le poids de l'avion électrique était identique à celui de l'avion conventionnel. Mais comme il apparaît que l'avion électrique serait en réalité nettement plus lourd, il faudrait stocker encore davantage d'énergie à bord ce qui a pour effet d'alourdir encore l'appareil. À court et moyen terme, il en sera donc

⁹ Consommation réelle moyenne déduite des enregistreurs de vol (OFAC)

pas facile de remplacer les avions de lignes court- et moyen-courriers conventionnels engagés en Europe par des modèles tout-électrique.

4.2. La production d'énergie électrique

Électrification ou pas et quel que soit le moyen de transport, les longs trajets exigent une très grande quantité d'énergie. En admettant, abstraction faite des conclusions du point précédent, qu'il soit possible de construire un avion tout-électrique aux caractéristiques identiques à celles des avions desservant aujourd'hui la ligne Zurich-Oslo (sa taille serait sensiblement plus grande et il embarquerait moins de passagers) et que l'énergie nécessaire estimée pour le vol s'élèverait à 34 000 kWh, il faudrait encore résoudre la question suivante : dans quelle proportion la consommation d'énergie électrique de la Suisse augmenterait s'il fallait, par exemple, recharger quotidiennement un grand nombre d'avions de ce type à l'aéroport de Zurich ? La consommation quotidienne d'électricité de la ville de Zurich se monte aujourd'hui en moyenne à 8 GWh¹⁰. S'il fallait recharger quotidiennement 50 avions au départ de Zurich vers des destinations européennes correspondant au vol retenu comme exemple, il faudrait prévoir 1,7 GWh supplémentaire, soit une augmentation de 20 % de la consommation de la ville. La recharge de 20 long-courriers ferait quant à elle carrément plus que doubler la consommation d'électricité de la ville de Zurich.

À cela s'ajoute la nécessité d'avoir une grande capacité d'alimentation électrique pour que la recharge des batteries s'effectue rapidement. Pour l'avion de référence, deux cas de figure se présentent :

- Échange des batteries : cette solution est moins gourmande en puissance car la recharge pourrait s'effectuer sur une plus longue période. Par contre, il faudrait préparer plusieurs jeux de batteries par avion, ce qui entraînerait une augmentation drastique des ressources.
- Recharge rapide des batteries pendant le temps d'escale entre deux vols, soit en règle générale une demi-heure : les lois de la physique et de la chimie rendent cette éventualité très improbable. Mais en admettant que cela soit possible, il faudrait une puissance de 68 000 kW (ou 68 MW) pour charger 34 000 kWh en une demi-heure. Or, la puissance électrique des centrales nucléaires suisses oscille entre 400 et 1000 MW. Si l'on implantait à proximité de l'aéroport une centrale nucléaire de ce type à laquelle les avions seraient directement branchés, elle ne pourrait alimenter qu'une dizaine d'avions à la fois à plein régime. Dans le même ordre d'idée, il faudrait 4 km² de panneaux solaires à condition qu'ils fonctionnent de jour, sous un ciel serein et à midi.

4.3. Les ressources nécessaires pour fabriquer les batteries

L'électrification du transport aérien est motivée par la volonté de diminuer les émissions de CO₂ d'origine fossile et d'autres gaz à effet de serre. En supposant que l'on soit en mesure de produire l'énergie électrique destinée aux avions en temps utile et presque entièrement à partir d'énergies renouvelables avec relativement peu d'émissions de CO₂ fossiles, encore faut-il prendre en considération les émissions de CO₂ et la pollution dues à la fabrication et à la fourniture des batteries et au fait qu'elles doivent être régulièrement remplacées. Ce point est central puisque les émissions de CO₂ ont un effet sur le climat quel que soit l'endroit sur la Terre où elles ont lieu. Si la solution technique qui permet aux avions de ne pas rejeter de CO₂ en vol a elle-même un mauvais bilan carbone, alors elle ne contribue pas à la réduction des effets sur le climat. Cette réflexion essentielle vaut pour n'importe quelle solution technique, même si nous l'appliquons ici aux batteries. Selon les estimations, la fabrication et la fourniture des batteries haute performance les plus courantes nécessitent de 100 à 180 kWh d'énergie et rejettent 100 à 200 kg de CO₂ par kWh de capacité de stockage¹¹. Ces valeurs sont susceptibles de se modifier sensiblement à l'avenir selon le mode d'obtention et le type de matière première, le transport, le lieu et le procédé de production, les sources d'énergie utilisées et la durée de vie des batteries. Ce qui explique la controverse qui entoure ces données. Nous nous référons ici aux valeurs relatives aux batteries utilisées dans les projets d'avions électriques en cours. Reprenons notre avion qui dessert la ligne Zurich-Oslo. Pour assurer ce trajet (en incluant les réserves de vol), la production et la fourniture du jeu de batteries nécessaire rejettent 8000 tonnes de CO₂. Par comparaison, un avion conventionnel fonctionnant au kérosène rejettera près de 18 tonnes de CO₂ sur un vol Zurich-Oslo. En incluant la production

¹⁰ https://www.stadt-zuerich.ch/gud/de/index/umwelt_energie/energie-in-zahlen/endenergiebilanz.html

¹¹ <https://edison.handelsblatt.com/erklaren/elektroauto-akkus-so-entstand-der-mythos-von-17-tonnen-co2/23828936.html>
<https://www.energie-experten.ch/de/mobilitaet/detail/wie-stark-belastet-die-batterieherstellung-die-oekobilanz-von-elektroautos.html>

et la fourniture du kérosène¹², ce vol rejettera 25 tonnes de CO₂ par vol. Autrement dit les rejets de CO₂ occasionnés par la production et la fourniture du jeu de batteries précité est équivalent aux rejets de CO₂ de 300 vols Zurich-Oslo assurés par un avion conventionnel. Et avec deux jeux de batteries, les émissions de CO₂ correspondraient aux émissions de 600 vols. Le bilan carbone et environnemental dépend également de la durée de vie des batteries. Les expériences faites jusqu'à présent avec les batteries haute performance équipant les avions électriques semblent montrer que leur capacité baisse après une relativement courte durée d'utilisation, et ce plus fortement que ce n'est le cas avec les batteries équipant les véhicules. Chez ces derniers, la capacité de batterie effectivement utilisable est limitée électroniquement¹³, ce qui permet de rallonger significativement la durée de vie au prix toutefois d'un net surplus de poids. En laissant de côté les ressources exigées par des batteries « surdimensionnées », le poids des batteries installées représente un facteur moins important dans le cas des véhicules électriques que dans le cas des avions. Dans le cas des avions, les batteries, en raison de leur piètre densité d'énergie, doivent être utilisées au maximum de leur capacité ce qui en accélère le vieillissement. Les tests réalisés à ce jour montrent qu'au bout de 1000 cycles de charge-décharge (et encore), et d'à peine 500 heures de vol, la capacité des batteries est tellement dégradée que l'avion est incapable d'effectuer ne serait-ce qu'un circuit d'aérodrome et que les batteries doivent être remplacées¹⁴. Rapporté à notre cas fictif, un jeu de batteries dernier cri durerait moins d'une année, qui plus est sans entraîner la moindre diminution des émissions de CO₂, de la pollution ou du gaspillage des ressources.

Les matériaux entrant dans la composition des systèmes électriques sont également problématiques : puisque la plupart des batteries haute performance qui équipent les véhicules ou les avions recourent à des matières relativement rares, en particulier du lithium dont l'extraction présente des points communs avec l'extraction des énergies fossiles et l'utilisation des biocarburants : l'exploitation des matières premières est souvent synonyme d'impact sur l'environnement local, d'injustice sociale et de dépendance géographique, économique et politique.

4.4. Perspectives

À moins d'énormes avancées techniques dans les prochaines décennies, les avions tout-électrique capables de transporter des passagers et du fret sur les mêmes distances que les avions de ligne actuels continueront d'être irréalistes. La contribution de l'électrification du transport aérien de passagers et de fret à une réduction réaliste de l'effet du transport aérien sur le climat dépend en particulier du volume, du poids et du mode de production de l'énergie embarquée nécessaire pour assurer le vol. Sans compter que de nouvelles solutions techniques exigeraient de revoir la conception des avions avec en corollaire de longues études et analyses (s'étalant sur plusieurs années) afin de s'assurer qu'ils répondent aux normes de sécurité. Agir sur la production de kérosène constitue un moyen plus rapide d'aboutir à des réductions des émissions de CO₂ (voir le document « Vers une aviation zéro fossile ») puisque le kérosène synthétique peut d'ores et déjà être utilisé par les avions existants.

¹² Considérations de l'OACI concernant les émissions de CO₂ durant le cycle de vie du kérosène conventionnel

¹³ La documentation technique d'un fabricant d'automobiles offrant huit ans de garantie sur les batteries précise que lorsque la capacité 100 % s'affiche, cela correspond effectivement à 80 % de la capacité de la batterie ; de même lorsque la capacité 0 % s'affiche, la capacité effective de la batterie est de 20 %. Cela permet de rallonger la durée de vie de la batterie.

¹⁴ L'OFAC subventionne des tests dont le but est avant tout la réduction du bruit et de la pollution locale. A priori, les émissions de CO₂ seront ans l'ensemble plus importante que celles des moteurs à essence.