

HYDROGÈNE, OPTIMISATION ÉNERGÉTIQUE ET SOBRIÉTÉ : L'AVENIR DE L'AVIATION

Pierre Labarbe

Parties des programmes de physique-chimie et d'enseignement scientifique associées :

Programme d'enseignement de spécialité de physique-chimie de terminale générale : Constitution et transformation de la matière – 3. Prévoir l'état final d'un système, siège de transformation chimique

Programme d'enseignement scientifique de terminale générale : Thème 1 – Sciences, climat et société ; Thème 2 – Le futur des énergies

Programme de physique-chimie et mathématiques de terminale STI2D : Énergie – Énergie chimique ; Matière et matériaux – Oxydoréduction : piles, accumulateurs et piles à combustible

Programme de physique-chimie et mathématiques de terminale STL : Énergie, conversions et transferts – Énergie électrique ; Transformations de la matière – Réactions d'oxydoréduction

Mots-clés : pile à combustible, électrolyse, oxydo-réduction, hydrogène, matériaux, transition écologique, conversion d'énergie, enjeux énergétique, aviation, climat, société

INTRODUCTION

Pendant combien de temps encore pourra-t-on prendre l'avion ? Cette question peut sembler provocatrice. Elle touche aux libertés individuelles : les voyages en avion se sont largement démocratisés ces cinquante dernières années. Elle renvoie aussi à de forts enjeux économiques, en particulier en France : le trafic aérien génère des revenus élevés dans les aéroports, la filière aéronautique fait vivre de nombreuses entreprises. Pourtant, le dérèglement climatique ne fait (presque) plus débat et la raréfaction des énergies fossiles non plus. Cet article explore les pistes susceptibles de rendre compatibles les enjeux économiques et individuels associés à l'aviation avec les défis climatique et énergétique.



Figure 1 – Les scientifiques d'ARC-Nucléart ont pour mission d'étudier et de consolider des objets en matériaux organiques (bois, cuir...).

Source : Arc-Nucléart.

OBJECTIF : RÉDUIRE LES ÉMISSIONS DE GAZ À EFFET DE SERRE

Il y a désormais consensus, il est nécessaire de diminuer les émissions de gaz à effet de serre pour limiter le réchauffement climatique et ses conséquences. Pour le limiter à +2 °C, objectif fixé par l'Accord de Paris lors de la COP21, il faudrait, d'après les simulations du GIEC, réduire nos émissions de manière à atteindre 2 tonnes équivalent CO₂ par personne et par an d'ici à 2050. L'empreinte carbone annuelle des Français en 2018 était de l'ordre de 8 tonnes par personne, 11 si on inclut les autres gaz à effet de serre dans ce bilan.

Nos émissions de CO₂ doivent donc être réduites de manière drastique. Cet effort est considérable, il faut donc diminuer ces émissions dans tous les secteurs, notamment le transport aérien. Pour fixer les idées, la masse de dioxyde de carbone émise au cours d'un aller-retour Paris-New-York en avion, effectué par une personne en classe économique, est de l'ordre de 1,8 tonne. Autrement dit, un seul voyage long-courrier, et votre budget CO₂ est (quasi) épuisé (Figure 2) ! Et si vous voulez passer des vacances à Tahiti, il vous faudra envisager une longue hibernation à votre retour pour compenser... À la rigueur, pour satisfaire votre besoin d'évasion, vous pourriez éventuellement prévoir quelques vols en France ou en Europe. Mais cela entamerait aussi rapidement votre budget. Prendre l'avion semble donc incompatible avec des objectifs ambitieux de réduction de bilan carbone à l'échelle individuelle.

Il est souvent dit que le transport aérien, bien qu'intrinsèquement très émetteur de CO₂, ne représente que 2 % des émissions mondiales et 2 % des émissions françaises. On pourrait alors penser que des efforts de sobriété dans ce domaine seraient peu efficaces. On peut aussi se dire que, compte tenu de l'ambition de l'objectif, toute économie d'émission est bonne à prendre. De plus, ce chiffre de 2 % est souvent discuté. En fonction du mode de calcul (prise en compte des vols internationaux, de la contribution des autres gaz, etc.), il peut monter à 5 % au niveau mondial et plus de 15 % pour la France. Par ailleurs, la contribution de l'aérien aux émissions mondiales de GES (gaz à effet de serre) cache de profondes inégalités. Parmi le 1 % des personnes les plus aisées, la part de l'aérien monte à 21 %. Pour un Parisien, elle est estimée à plus de 7 %. Toute économie dans ce secteur pourrait donc contribuer à limiter les émissions globales et à réduire les inégalités de contribution à ce bilan.

VERS DES PROGRÈS DE « L'AVIATION FOSSILE »

Plusieurs pistes peuvent être envisagées pour réduire les émissions des avions à propulsion thermique.

Perfectionner les moteurs

Dans un premier temps, le progrès technique avait occasionné une forte augmentation des émissions de GES par les avions. En effet, en passant du moteur à hélice au moteur à réaction, la vitesse a considérablement augmenté, engendrant une surconsommation. Depuis, des progrès dans la conception des turboréacteurs ont permis de diminuer les émissions des avions modernes de 15 à 20 %. Il reste encore des avions n'ayant pas bénéficié des derniers progrès en matière de motorisation, il y a donc quelques pourcents à gagner avec le renouvellement de la flotte. Les gains espérés restent cependant faibles car ils sont associés à une augmentation considérable des coûts (comme ce qui se passe dans le secteur automobile) et à d'autres impacts climatiques : une augmentation des traînées de condensation et de l'émission d'oxydes d'azote.

Améliorer l'aérodynamique

Diminuer les traînées parasites et réduire les pertes par frottements est encore possible en rendant les avions plus lisses, en améliorant les entrées d'air et en ajoutant des appendices en bout d'aile (les « sharklets »)

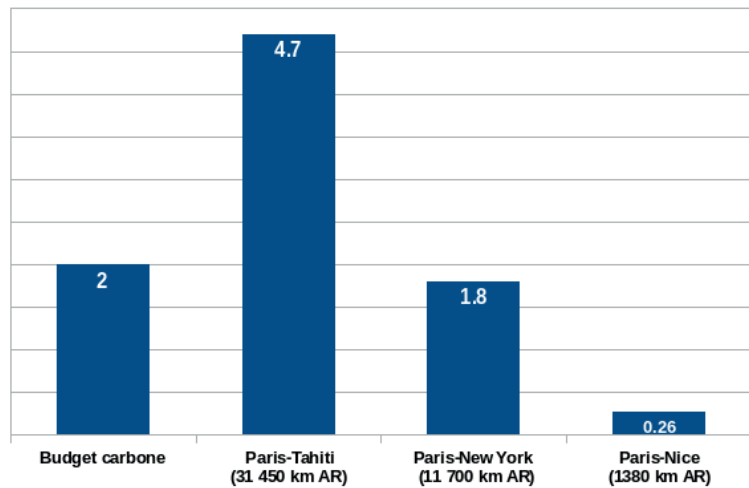


Figure 2 – Budget carbone annuel cible et émissions de CO₂ par personne pour différents trajets aller-retour en avion (en tonnes équivalent CO₂).

D'après le simulateur de l'ADEME.

pour réduire les turbulences (Figure 1). Cet ajout sur l'A320 NEO apporte un gain de consommation de 3,5 %, ce qui permet une diminution des émissions de CO₂ de 700 tonnes par an et par avion. De nouveaux profils aérodynamiques permettant des écoulements laminaires ; entraînant donc moins de frottements au niveau des ailes, ils sont par ailleurs disponibles en laboratoire et en cours d'industrialisation. Des améliorations de ce type devraient cependant être associées à des diminutions de vitesse de croisière des avions, ce qui pourrait induire des coûts pour les compagnies aériennes supérieurs aux économies de carburant réalisées.

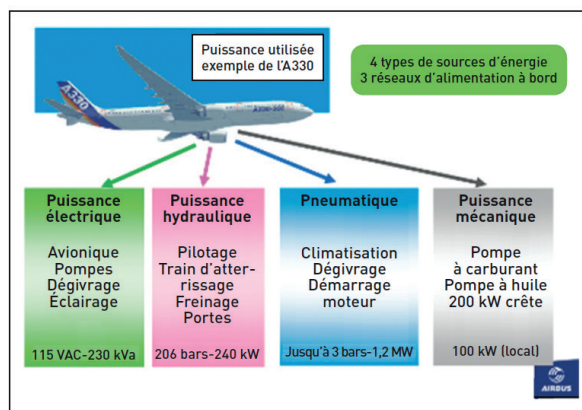


Figure 3 – Les différentes formes d'énergie dans un avion et leurs utilisations.

Alléger

Plus un avion est lourd, plus la puissance nécessaire pour le faire décoller et le faire voler est élevée. Il faut donc tenter de diminuer sa masse, tout en préservant – voire en améliorant – ses caractéristiques essentielles : résistance mécanique, tenue à la foudre, confort des passagers, etc. L'emploi de matériaux intrinsèquement de haute performance (comme le titane) ou composites (assemblage de plusieurs matériaux non miscibles et dont les propriétés se complètent) se généralise, mais il y a encore un certain potentiel de gain.

Optimiser la production d'énergie à bord

Une partie de l'énergie thermique est utilisée pour produire de l'énergie électrique. Cette énergie électrique peut être utilisée directement, par exemple, pour l'éclairage ou les instruments de navigation. Mais elle peut aussi être à son tour, convertie pour d'autres usages comme le dégivrage de certaines parties des ailes (Figure 3). L'amélioration du rendement de ces diverses conversions est une piste de réduction de la consommation.

Décarboner les opérations au sol

Une partie des véhicules utilisés au sol pour la maintenance des avions, leur ravitaillement, l'acheminement des passagers est déjà électrifiée ou en train de l'être. En revanche, il reste à s'occuper du « taxiing » des appareils, c'est-à-dire de leur déplacement du point d'embarquement ou de débarquement jusqu'aux pistes.

Abandonner certaines idées ?

D'autres pistes de réduction des émissions sont ou ont été explorées ; certaines manquent parfois d'efficacité. On peut par exemple citer l'optimisation des trajectoires aériennes, qui nécessiterait une forte coordination internationale. Certaines procédures sont cependant déjà en cours comme les RNP (*Required Navigation Performance*). On peut aussi penser à l'usage de biocarburants. Cette piste est cependant à explorer avec prudence car la généralisation de biocarburants de deuxième génération (dont la production n'entrerait pas en concurrence avec l'agriculture vivrière) n'est pas encore d'actualité (voir fiche n°2, Vers les biocarburants de 2^e génération : l'exemple de l'isobutène biosourcé, Pierre Labarbe).

L'émergence de nouvelles architectures d'appareils pourrait quant à elle conduire à des économies significatives. Elle nécessiterait cependant des ruptures sur l'ensemble de la chaîne, de la production à l'exploitation (y compris au niveau de l'aménagement des aéroports si on développait des avions de grande envergure par exemple).

Ces diverses améliorations dans le domaine de l'avion à propulsion thermique restent ainsi limitées. D'après Denis Chapuis, ex-vice-président d'Airbus et consultant en aéronautique, les gains les plus optimistes seraient de 20 à 25 %, loin du facteur 5 à 6 évoqué plus haut. Il faut donc explorer d'autres voies.

FOCUS SUR L'AVION ÉLECTRIQUE

Les promesses de l'avion à hydrogène

Une autre voie de « décarbonation » du secteur aérien existe, qui nécessite qu'on s'y attarde. Il s'agit de l'avion électrique et plus précisément, à hydrogène ou plutôt, à dihydrogène. C'est en effet la voie que souhaite

explorer la France : son développement à l'horizon 2035 a été annoncé en juin 2020, milliards d'euros à l'appui. Les seules émissions d'un tel avion – en vol – seraient constituées d'eau. Un autre avantage de ce type d'appareil serait son silence.

Par ailleurs, une propulsion électrique pourrait permettre d'envisager des architectures nouvelles, notamment celles dites « à propulsion distribuée ». Il s'agit de pousser l'avion non pas en deux points comme c'est le cas avec les moteurs thermiques, mais en de multiples endroits [Figure 4]. Cela permettrait d'optimiser l'efficacité de la propulsion et de réduire significativement la consommation énergétique. Cela réduirait par ailleurs les risques en cas de panne d'un réacteur. Une telle répartition des propulseurs est impossible avec des réacteurs classiques, ce serait notamment trop complexe et inefficace en termes de transmission. Il faudrait a minima, convertir à bord la puissance thermique en puissance électrique. Cette conversion pourrait être évitée si l'électricité était produite par hydrogène. Cela nécessite cependant de relever bien d'autres défis techniques.



Figure 4 – Spector, le laboratoire volant de la NASA pour l'étude de la propulsion distribuée qui vise à diviser par 5 la consommation de carburant.
Source : NASA

La pile à combustible

L'énergie électrique au sein de tels avions serait produite par des piles à combustible. Il s'agit d'une invention qui n'est plus tout à fait récente puisqu'elle a désormais plus d'un siècle. À la manière des autres types de piles, une pile à combustible est constituée d'une anode et d'une cathode, généralement en carbone [Figure 5]. Elles sont séparées par une membrane qui fait office d'électrolyte, constituée d'un matériau appelé Nafion®. L'anode est balayée par un flux de dihydrogène qui perd ses électrons pour former des protons H⁺. La cathode est alimentée en air contenant du dioxygène (O₂) qui réagit avec ces protons ayant traversé la membrane électrolytique. Il s'agit d'une réaction d'oxydo-réduction, dont l'équation est 2H_{2(g)} + O_{2(g)} → 2 H_{2O(l)}. Elle nécessite un catalyseur : le platine. Elle génère une tension de l'ordre de 0,7 Volt. Pour obtenir des tensions supérieures, il faut les mettre en série. Dans le domaine automobile, on sait réaliser des moteurs électriques à piles à combustible dont la puissance est de 70 kW.

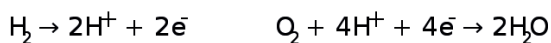
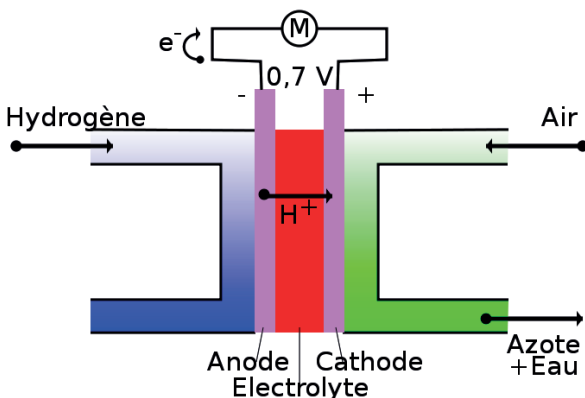


Figure 5 – Principe de la pile à combustible : à l'anode, l'hydrogène libère un électron. Le proton H⁺ alors formé traverse la membrane électrolytique (en rouge). À la cathode, le dioxygène de l'air réagit avec les protons pour donner de l'eau. La circulation des électrons libérés à l'anode aboutit à la production d'un courant électrique.
Source : Wikipedia – https://fr.wikipedia.org/wiki/Pile_à_combustible, Harry Handige

Le stockage de l'hydrogène

On peut envisager de stocker l'hydrogène sous forme gazeuse, liquide ou solide (par des procédés dits « d'adsorption » sur une matrice par exemple). Compte tenu du volume occupé par un gaz, il est difficile d'envisager cette forme de stockage pour l'aviation. Des avancées conséquentes ont en revanche été faites en matière de stockage sous forme liquide, grâce à l'utilisation de l'hydrogène dans le domaine spatial : c'est le combustible des navettes spatiales et des fusées. C'est par exemple, la société Air Liquide qui fournit les réservoirs de la fusée Ariane actuellement [Figure 6]. Un niveau d'expertise très élevé a ainsi déjà été atteint qui permet d'envisager une utilisation dans le domaine de l'aviation.



Figure 6 – Réservoirs sphériques développés par la société Air Liquide, susceptibles de stocker l'hydrogène liquide des futurs avions.

Parmi les défis déjà relevés, il y a par exemple, celui de la gestion de l'état physique du dihydrogène : les réservoirs sont à la température de -253 °C (20 K) quand ils sont chargés dans les fusées, mais ils se réchauffent rapidement... ce qui entraîne une ébullition du combustible et nécessite donc une évacuation des vapeurs et une maîtrise de la quantité de combustible nécessaire. Une autre difficulté maîtrisée est le comportement du combustible en apesanteur, qui forme des bulles de gaz ! Ce dernier point ne concernera cependant pas les avions. D'autres défis spécifiques pourraient cependant concerner l'aviation en vol, comme la résistance à la foudre.

Au sol, le défi du stockage concernerait surtout le volume. À énergie délivrée constante, le dihydrogène

liquéfié occupe en effet trois fois plus de place que le kérosène. Cela nécessiterait donc des aménagements spécifiques dans les aéroports et dans le circuit logistique. En vol, une motorisation et un réservoir d'hydrogène seraient légèrement plus volumineux qu'une chaîne de propulsion thermique, mais le facteur multiplicatif serait « seulement » de l'ordre de 1,5 (et la masse serait à peu près identique). C'est aussi l'architecture des avions qui nécessiterait d'être modifiée, ne serait-ce que par la forme des réservoirs. La propulsion hydrogène est en effet améliorée si le réservoir est sphérique.

La production d'hydrogène

En admettant que les solutions aux problèmes précédents aient été trouvées, peut-on produire suffisamment d'hydrogène pour satisfaire aux besoins de l'aviation ? Cela n'aurait d'intérêt que si cet hydrogène était produit de manière renouvelable. Dans cette perspective, l'Europe s'est fixée comme objectif en juillet 2020 de produire 10 000 000 tonnes de dihydrogène par électrolyse alimentée en électricité d'origine éolienne ou solaire d'ici à 2030. Cela serait-il suffisant ?

Le pouvoir calorifique du dihydrogène est très élevé (c'est une des raisons pour lesquelles il est choisi dans le domaine spatial) : sa « combustion » ou son oxydation dans une pile à combustible libère de l'ordre de 120 MJ/kg soit 33 kWh/kg . La production de 10 millions de tonnes de dihydrogène pourrait ainsi fournir 330 TWh.

Cette production se ferait par électrolyse. Compte tenu du rendement de ce processus, qui est de l'ordre de 60 à 70 %, il faudrait une quantité d'énergie électrique supérieure. De plus, la liquéfaction de l'hydrogène pour son stockage implique elle aussi de l'énergie électrique, à hauteur d'environ $1/3$ de l'énergie fournie par H_2 . La production de ces 330 TWh d'hydrogène nécessiterait donc la production d'au moins 600 TWh d'énergie électrique renouvelable. À titre de comparaison, la production électrique annuelle de l'Union européenne est de l'ordre de 3300 TWh. La production d'énergie électrique à destination de l'hydrogène représenterait donc 20 % de sa capacité de production actuelle. Il faudrait donc réduire la consommation électrique dans d'autres domaines de manière considérable, ou augmenter les capacités de production d'énergie renouvelable européenne, ce qui nécessiterait là aussi des efforts inédits.

CONCLUSION

Il reste ainsi de nombreuses pistes pour réduire la consommation énergétique dans le domaine de l'aviation, qu'il faut continuer à explorer. Le développement de la filière hydrogène est aujourd'hui acté et il reste désormais à transposer au secteur aérien l'expertise déjà acquise dans d'autres domaines. Les ordres de grandeurs sont cependant tels qu'il n'existe pas une solution unique pour répondre aux enjeux climatiques et énergétiques. Il sera encore possible – et peut-être même souhaitable ? – de prendre l'avion. Mais il sera probablement aussi nécessaire d'en réguler l'usage ou de modifier certaines habitudes.

SOURCE PRINCIPALE

Chimie, aéronautique et espace, EDP Sciences, 2018, ISBN : 978-2-7598-2283-6, « Demain l'aviation plus verte et plus autonome » par Denis Chapuis et « La propulsion des fusées et des futurs avions chez Air Liquide ! » par Pierre Crespi.

POUR EN SAVOIR PLUS

- Site Médiachimie :

- Demain, l'aviation plus verte et plus autonome, Denis Chapuis, novembre 2017

http://www.mediachimie.org/sites/default/files/Espace_p43.pdf

- La propulsion des fusées et des avions chez Air Liquide, Pierre Crespi, novembre 2017

<http://www.mediachimie.org/ressource/la-propulsion-des-fusées-et-des-futurs-avions-chez-air-liquide>

- Sur le même sujet

- Calculer les émissions de carbone de vos trajets (ADEME)

<https://www.ademe.fr/particuliers-eco-citoyens/deplacements/calculer-emissions-carbone-trajets>

- L'empreinte carbone des Français reste stable - Commissariat général au développement durable – janvier 2020

<https://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/sites/default/files/2020-01/datalab-essentiel-204-l-empreinte-carbone-des-francais-reste-%20stable-janvier2020.pdf>

- The unequal distribution of household carbon footprints in Europe and its link to sustainability, Diana Ivanova et Richard Wood, université de Cambridge, juin 2020

https://www.cambridge.org/core/services/aop-cambridge-core/content/view/F1ED4F705AF1C6C1FCAD477398353DC2/S205947982000125a.pdf/unequal_distribution_of_household_carbon_footprints_in_europe_and_its_link_to_sustainability.pdf

- Bilan des émissions de gaz à effet de serre, Ville de Paris, janvier 2020

<https://cdn.paris.fr/paris/2020/02/06/dc2edb10d13ae050815850f721f5a837.pdf>

- Crise(s), climat : préparer l'avenir de l'aviation, The Shift project, mai 2020

https://theshiftproject.org/wp-content/uploads/2020/06/2020-05-27_Préparer-lavenir-de-laviation_Propositions-de-contreparties.pdf

- Bruxelles présente sa feuille de route sur l'hydrogène - www.euractiv.fr - 9 juillet 2020

<https://www.euractiv.fr/section/energie/news/bruxelles-presente-sa-feuille-de-route-sur-lhydrogene/?fbclid=IwAR1kX-GjQxKJQqKpx039GqRuPegAYfpeTqz5yRLVvbRFBdo5Ks55pfhMUUho>

- Filière hydrogène : de la production au stockage, Jean-Marie Tarascon, Collège de France, 23 février 2011

https://www.college-de-france.fr/media/jean-marie-tarascon/UPL58650_hydrogenecollege.pdf

Pierre Labarbe est professeur agrégé de physique-chimie

Comité éditorial : Danièle Olivier, Jean-Claude Bernier, Grégory Syoen