

L'avion à hydrogène : ambition ou illusion ?

Par **Eric Dautriat**, membre 3AF et vice-président de l'Académie de l'Air et de l'espace

Eric Dautriat est ancien directeur des lanceurs du CNES et ancien directeur exécutif de Cleansky. Il tient à préciser que ses réflexions n'engagent que lui.

La contribution du transport aérien au réchauffement climatique, malgré l'existence déjà ancienne de programmes de R&T destinés à la réduire, a longtemps occupé une place modeste dans l'agenda stratégique des dirigeants politiques et opérateurs (au-delà des habituels « mots-clés » de la communication), comme dans les préoccupations du grand public. Les efforts permanents de compétitivité passant par la réduction progressive de la consommation de carburant semblaient suffire.

Or, depuis peu, voici cette contribution devenue un enjeu politique, à travers une « prise de conscience » de la part d'une partie de la population européenne, et notamment des jeunes ; souvent excessive, et qu'on peut juger disproportionnée. Le transport aérien se voit attribuer le rôle de figure de proue d'une croissance aveugle et sans borne, de symbole arrogant de la mondialisation, voire d'allégorie des inégalités sociales...

Sans se soumettre à ces outrances, il est en tous cas indispensable, pour le secteur aérien, de définir sérieusement les moyens de réduire très fortement son empreinte « carbone » dans les décennies qui viennent, d'autant plus que les analyses prospectives promettent un triplement du trafic d'ici 2050. Promettaient, du moins, car la crise du COVID vient remettre beaucoup de choses à plat — mais c'est un autre sujet, trop important et trop incertain encore pour l'aborder ici en quelques lignes.

Or les moyens de cette « forte réduction » ne sont pas légion, dès lors qu'on veut bien observer quelques règles de bon sens : se focaliser sur ce qui compte vraiment et non sur des détails pittoresques ; considérer l'ensemble des besoins à une échéance donnée au lieu de raisonner « en silo » pour un secteur particulier ; pour une telle question planétaire (le transport aérien et l'effet de serre sont tout aussi « mondialisés » l'un que l'autre !), n'accorder aucun crédit à une approche purement nationale si elle ne contient pas les moyens d'une stratégie mondiale ; et *last but not least*, se poser sans cesse la question des ordres de grandeur.

Ainsi, se focaliser sur ce qui compte vraiment, à savoir l'aviation commerciale (court-moyen-courrier et plus encore, long-courrier) permet d'éviter de se laisser hypnotiser par les solutions attirantes mais marginales que représentent pour longtemps les avions à batteries ou à piles à combustibles, qui ne sont pas près de « jouer dans la cour des grands » (avions).

QUELLES SOURCES D'ÉNERGIE POUR L'AVION DE DEMAIN ?

Les concepteurs disposent encore aujourd'hui d'un certain « panier » d'améliorations possibles de performance, qu'on peut qualifier d'incrémentales, qu'il faut certes encourager car elles seront nécessaires de toute façon ; mais chacun s'accorde à admettre que celles-ci (de l'ordre, au total, de 20 à 30% - la tendance de fond est

asymptotique) resteront très insuffisantes pour apporter une réduction nette satisfaisante des émissions. Il est donc incontournable de considérer de nouveaux carburants. Les biocarburants aujourd'hui envisagés sont généralement fort critiquables si l'on considère leur cycle complet, leur effet total sur la planète, la concurrence avec d'autres cultures ; c'est un débat bien connu. Un long travail reste à faire, sous contraintes souvent contradictoires. Les déchets organiques ont leurs vertus, mais il est difficile d'imaginer une part importante la flotte mondiale volant grâce à ceux-ci. Les carburants de synthèse, « drop-in » c'est-à-dire pourvus à peu près des mêmes propriétés que le kérosène actuel, peuvent constituer une solution intéressante...

... Cependant ce n'est pas elle qui attire actuellement les suffrages, mais l'hydrogène. Carburant de synthèse lui aussi, mais « non-drop-in », c'est le moins qu'on puisse dire, car il nécessite un avion et des opérations radicalement différents. Pourquoi l'hydrogène ? En simplifiant, il présente deux atouts : d'une part, la possibilité au moins théorique d'un cycle totalement décarboné ; d'autre part, un pouvoir calorifique massique élevé, trois fois supérieur à celui du kérosène (un PCI de 120 MJ/kg au lieu de 43). Voilà pour les avantages. Il est à craindre que toutes ses autres caractéristiques soient à ranger parmi les inconvénients ou au moins les difficultés, mais n'anticipons pas.

UN ENGOUEMENT POLITIQUE

Un petit détour est nécessaire par les récentes annonces politiques, qui donnent à l'hydrogène, à vrai dire, un troisième atout (mais dangereux car il est par nature éphémère) : l'engouement médiatique. Celui-ci porte d'abord sur l'hydrogène en général : moyen de stockage de l'énergie intermittente produite par l'éolien et le solaire ; alimentation des piles à combustibles pour véhicules routiers et trains ; vecteur d'énergie vers l'industrie, par exemple les aciéries ; etc. C'est ainsi que l'Allemagne a lancé un plan de 9 milliards d'euros sur le sujet. La France vient de lui emboîter le pas avec 7 milliards. La Commission européenne n'est pas en reste. Bien évidemment, la première question qui se pose – en-dehors des utilisations pour le stockage d'énergie, naturellement, lequel ne constitue pas réellement une « production » - est celle d'une production d'hydrogène « vert », sachant qu'aujourd'hui ce gaz provient à 96% d'hydrocarbures ; les 4% restants le sont par électrolyse de l'eau... avec une électricité qui n'est que bien partiellement décarbonée, au niveau mondial. La Commission a ouvert la porte à un hydrogène dit « bleu » (c'est-à-dire un peu moins vert que vert), issu d'hydrocarbures mais avec séquestration du CO₂ ainsi produit ; procédé encore fort incertain qui, toutes proportions gardées, rappelle les polémiques autour de l'enfouissement de déchets d'autre nature...

Était-il inévitable, dans ces conditions, que l'aviation soit elle aussi touchée par cet engouement ? Sans doute. C'est arrivé assez soudainement (par exemple, fin 2017, dans la liste des applications possibles, le Conseil de l'Hydrogène, organisation internationale de lobbying, ne mentionne même pas l'utilisation propulsive et considère comme improbables les piles à combustible pour l'aviation). En France, l'aide apportée par le gouvernement au secteur aéronautique a été assortie de « l'exigence » de développer un avion à hydrogène pour 2035. Airbus s'est publiquement engagé dans cette voie. Jusqu'à présent il s'agissait de 2050, mais la France veut être la nation de pointe sur ce sujet. Comment la France pourrait-elle aujourd'hui mener à bien seule

la mise en service d'un avion à hydrogène et de son infrastructure, si ce n'est pour des usages confidentiels, on l'ignore... Mais, heureuse conjonction, l'Union européenne promeut également cette même solution, notamment dans l'Agenda Stratégique (SRIA) récemment proposé par l'industrie pour le futur partenariat public-privé Clean Aviation. Ce dernier est conforté par une analyse réalisée par McKinsey, au terme de laquelle la propulsion hydrogène est considérée comme la meilleure solution (vers 2040 pour les courts courriers, à plus long terme pour les moyens et longs courriers). Certes c'était la question posée et McKinsey est un consultant. Son rapport, basé sur un certain nombre d'interviews d'acteurs des secteurs de l'hydrogène, d'une part, de l'aviation, d'autre part, pointe certes un certain nombre de sujets importants à étudier, mais ne décrit pas, à ce stade, un avant-projet global d'avion et d'infrastructure associée. Il est pourtant urgent qu'une étude d'ensemble, cohérente, par nature peu coûteuse, démontre la faisabilité éventuelle du concept. Puisque nous vivons dans un monde rationnel, nul doute qu'elle sera disponible avant d'engager les centaines de millions d'euros couvrant des plans technologiques à haut TRL, allant logiquement jusqu'à des démonstrations en vol. Et contentons-nous, pour le moment, d'une somme de questions ouvertes...

Il existe certes quelques études « dans les cartons ». Ainsi, Cryo plane, financée par l'Union européenne en son 5e PCRD, en 2003, par Airbus (Allemagne) et quelques coopérants. Le rapport est optimiste – c'est la loi du genre. Mais la plupart des sujets, faute de moyens peut-être, ne sont pas traités avec une profondeur suffisante pour convaincre de la faisabilité. Du reste, le thème n'est pas nouveau : on apprend sur le site même de Cryo plane que les premières études d'un avion à hydrogène remontent à 1930. Elles furent suivies de plusieurs autres, classées sans suite.

PRODUIRE ET TRANSPORTER

L'avion à hydrogène utilise de l'hydrogène liquide (LH₂). L'hydrogène pressurisé (à 700 b usuellement) est hors-jeu, conduisant à une masse de structures totalement rédhibitoire. Or l'hydrogène liquide est un produit peu courant industriellement : son principal usage en revient aux lanceurs spatiaux, compte tenu de l'excellente impulsion spécifique apportée par le couple « cryogénique » H₂/O₂.

Mais, avant de considérer la question de l'avion lui-même, tâchons d'abord de produire de l'hydrogène vert en quantité suffisante. Il ne s'agit pas, en effet, de faire voler quelques avions par-ci, par-là, mais de convertir la plus grande partie possible de la flotte mondiale ; faute de quoi, on reste dans l'anecdote et on perd son temps. L'hydrogène liquide a un « rendement » de l'ordre de 30%, c'est-à-dire que pour produire 1 kWh d'énergie stockée en LH₂, il faut environ 3 kWh d'électricité (verte). Or la flotte mondiale d'aujourd'hui a consommé 288 millions de tonnes de kérosène en 2018. Oublions la croissance promise, le triplement d'ici 2050. Cette quantité actuelle, transposée en hydrogène liquide, conduit, tous calculs faits, à un besoin de l'ordre de 10 000 TWh, soit 40% de la production électrique mondiale actuelle. Soit encore, un peu plus que la part « non carbonée » de celle-ci (nucléaire compris).

Encore ce raisonnement fait-il preuve de la vision parcellaire que nous avons dénoncée plus haut : ce qui compte vraiment, ce n'est pas l'hydrogène dont aura besoin l'aviation seule, mais la quantité totale pour tous usages ; idem à plus forte raison pour l'électricité décarbonée. Ce qui éclaire d'un jour un peu inquiétant les «

plans hydrogène » allemand, français et européen... Certes, il faut être optimiste et aller de l'avant ; on ne peut pas tout mettre en série ; mais au moins, n'est-il pas bon d'avoir quelques réponses prospectives sur ce point avant d'engager des financements de R&D considérables pour véhicules terrestres, aciéries, avions et autres ? Cependant, à ce stade, admettons que la chose soit possible, admettons l'avenir lumineux du photovoltaïque (pourquoi pas ?) ou encore, admettons l'hydrogène « bleu », c'est-à-dire produit à partir du méthane avec piégeage du CO₂.

Ensuite, cet hydrogène, il faut le transporter. Par camion-citerne dans un premier temps, propose McKinsey. Mais sautons par-dessus ce premier temps « pionnier », car ce qui nous intéresse est la viabilité à grande échelle – mondiale. Donc, par pipeline pour les grands aéroports. Y faire circuler de l'hydrogène liquide pose des problèmes thermiques rédhibitoires, sur de longues distances. Alors, transporter l'hydrogène gazeux et équiper les aéroports eux-mêmes de moyens (énormes) de liquéfaction ? Il existe encore une autre variante : décentraliser dans les aéroports, non seulement la liquéfaction, mais l'électrolyse elle-même.

A cela il faut ajouter le stockage bien évidemment (à 20K). Pour qu'ils le fassent, il faudrait qu'ils soient convaincus de la supériorité commerciale et de l'avenir brillant de ce concept... En fait, seul un investissement des États, massif, pourrait briser ce cercle vicieux. Voilà encore un sujet qui montre s'il en était besoin qu'une initiative « française » d'hydrogène aéronautique n'a de sens que si elle est accompagnée par (ou si elle sait susciter) une adhésion internationale, au-delà même de l'Europe.

Comme nous l'indiquions plus haut, la principale application « industrielle » du LH₂ est le fait des lanceurs spatiaux. Voilà qui tombe bien : l'Europe, avec la filière Ariane, dispose d'une très bonne expérience de cet ergol. Cependant, la transposition d'un lanceur à un avion commercial est extrêmement malaisée. Enjeux de sécurité (un incident majeur par milliard d'heures de vol), durée de vie des véhicules (60 à 100 000 heures), durée de stockage de l'hydrogène liquide (24/24, 7/7), environnement, architecture, couverture opérationnelle et logistique, tout diffère ; et ne va pas dans le sens, jamais, de conclure à une utilisation avion plus « facile » que sur lanceur spatial. Au moins l'expérience de ce dernier permet-elle de savoir à l'avance quels sont les points les plus durs à considérer. C'est d'un concept d'avion totalement nouveau qu'il s'agit.

COMMENT ASSURER LA SÉCURITÉ ?

La sécurité, au sol et à bord : un sujet central. Outre le nécessaire respect objectif des exigences de certification... à définir, nous vivons une époque où « l'aversion au risque », subjective, de la part du public et des politiques atteint des sommets inégalés. Or ceux-ci découvriront vite que l'hydrogène n'est pas de tout repos. Il possède une très faible masse volumique, 70 kg/m³ ; inconvénient vis-à-vis de la taille des réservoirs (nous y reviendrons), mais aussi, par la petitesse de sa molécule, vis-à-vis des risques de fuite, qui constituent dans le spatial un souci omniprésent. Risques de fuite... et d'explosion, notamment dans une enceinte confinée : la mise en place, à bord, de niveaux d'étanchéité (cryotechnique !) de tous les raccords sans commune mesure avec l'existant, de redondances, de procédures de vérification fréquentes, de nombreux capteurs de détection, voire de systèmes de balayage de certaines enceintes s'imposera. Notons au passage que la zone de lancement d'Ariane est évacuée avant la

« mise en froid » des lignes d'alimentation sol... C'est là une question non seulement pour l'avion, mais aussi pour l'aéroport. Ensuite, quelle que soit l'efficacité des isolations thermiques mises en place, l'hydrogène s'évapore en permanence ; il faut faire avec. Pour un lanceur qui reste quelques heures en zone de lancement et dont le vol dure une demi-heure, ce n'est pas rédhibitoire. Pour un avion, c'est, dans l'état actuel des imaginations, difficile à concevoir. Ces points liés à la sécurité sont majeurs.

DES CHALLENGES TECHNIQUES ET OPÉRATIONNELS D'UNE AMPLEUR INÉGALÉE

Pour un équivalent A320 qui a une capacité de 23 tonnes de kérosène, la même énergie ne requiert que 9 tonnes de LH₂; mais ces 9 tonnes, compte tenu de la faible densité, nécessitent à peu près 150 m³ de réservoir (en intégrant le nécessaire « volume mort ») ; soit un volume plus de quatre fois supérieur à celui du kérosène. Ce stockage ne peut se concevoir dans les ailes : la logique est de l'installer à l'arrière du fuselage, ce qui conduit à un allongement considérable de ce dernier – avec les problèmes de centrage qui en découleront. Quel surcroît de masse en résulte ? Cela dépend entre autres de l'isolation. Les protections thermiques type Ariane (cellulaire de polyuréthane) conduiraient à des épaisseurs rédhibitoires ; il faut en effet, à la différence du lanceur, avoir des réservoirs partiellement remplis en permanence, avec des taux d'évaporation faibles. Il semble plus logique d'aller vers une isolation multicouche sous vide, du type du réservoir hélium liquide d'Ariane 5, ou de celui du satellite infrarouge Herschel... mais dans des dimensions bien plus considérables ! Est-ce faisable sur le plan économique ? Quant à sa masse, il n'est pas pertinent d'en tenter une transposition à l'échelle de l'avion, compte tenu de toutes les différences.

Quelques tentatives ont été faites pour installer des réservoirs d'hydrogène liquide dans l'automobile, à destination de piles à combustibles ou même de moteurs à combustion (BMW), puis abandonnées. Là non plus, aucune transposition ne peut se faire sur un coin de table, compte tenu des différences d'échelle et de conditions.

Quoi qu'il en soit, pour fixer les idées, on peut « craindre », pour l'avion, un ratio de masse de réservoir sur masse d'hydrogène de 5 à 10 ; rappelons que cette masse d'hydrogène pour un équivalent de l'A320 serait de 9 tonnes et que la masse maximale au décollage actuelle de ce dernier est de 79 tonnes. Un effet « boule de neige » s'ensuivrait, conduisant à un redimensionnement complet. De gros progrès sont donc à faire sur la masse des réservoirs... comment ?

Les ballottements du LH₂ liés aux changements d'attitude conduisent à des difficultés de centrage et à des évaporations supplémentaires. Or ces changements d'attitude pour un avion sont très supérieurs (50 degrés) aux modestes braquages des tuyères d'un lanceur. Il faudra prévoir des antiballotants, pour le moins, c'est-à-dire, si cela marche, de la masse supplémentaire.

L'alimentation des moteurs requiert une pression élevée, jusqu'aux alentours de 100 b, sous forme, cette fois, gazeuse. Il faut prévoir des pompes cryotechniques (à débit variable dans une forte plage), et des échangeurs. Une série d'équipements et de lignes cryotechniques sujets au givrage (comme l'isolation thermique du réservoir) ! Comment éviter celui-ci dans la variété de conditions et la durée d'utilisation d'un avion ?

L'avion prêt, il faut le remplir, à partir du stockage au sol. On ne remplit pas un réservoir de LH_2 comme un réservoir d'essence. Il faut une séquence d'assainissement des lignes, de mise en froid, puis le remplissage doit se faire suffisamment lentement pour éviter une trop forte ébullition. Et naturellement à l'écart du public. Au bas mot il faudra compter une ou deux heures pour un avion moyen-courrier. Difficilement compatible avec les taux d'utilisation journaliers des flottes actuelles ! Mais ceux-ci sont-ils appelés à perdurer dans « le monde de demain » ? C'est une autre question.

Citons également le risque de fragilisation hydrogène de certains matériaux, l'incompatibilité avec les élastomères, etc. — d'où un choix de matériaux éventuellement différent de celui d'aujourd'hui, avec là aussi de possibles conséquences économiques. Côté moteur en revanche, si la combustion de l'hydrogène requiert (ou plutôt, permet) un redimensionnement de la chambre (plus courte), elle ne semble pas poser de problème rédhibitoire.

DES COÛTS DIFFICILES À ESTIMER

Au total, à supposer qu'un tel concept puisse effectivement surmonter ces obstacles et voir le jour « techniquement », il convient de s'interroger sur le coût total de possession. Certes le coût final de l'hydrogène liquide n'est pas à comparer avec celui du kérosène pétrolier d'aujourd'hui mais de 2035 ou 2050 : taxes ou raréfaction, tout porte à croire (et même à espérer, sur un plan écologique) que celui-ci sera beaucoup plus élevé qu'aujourd'hui, rendant peut-être ainsi un avion à hydrogène, même complexe, même lourd, « compétitif ». Mais il faut aussi comparer la solution hydrogène à celle que représente le carburant de synthèse, alias e-fuel, produit en deux étapes : hydrogène par électrolyse, puis combinaison de cet hydrogène avec le CO_2 de l'air (ou du CO_2 industriel « piégé », ce qui joint l'utile à l'agréable) ; ce qui fait que le bilan carbone total est neutre. Par définition, l'étape supplémentaire conduit à un coût de carburant encore plus élevé, mais en sortie de ce processus purement industriel, on se retrouve, en entrée d'aéroport si l'on veut, dans les mêmes conditions qu'aujourd'hui. Certes, un tel carburant « drop-in » nécessite essentiellement des investissements dans le secteur de l'énergie, et non dans la R&D aéronautique ; mais naturellement, nul ne songerait à faire de cette différence d'orientation de fonds publics à venir, un argument en faveur de l'une ou l'autre solution.

Enfin des solutions « simili-hydrogène » si l'on peut dire, alternatives, sont citées, comme l'ammoniac ou des hydrures métalliques, sans avoir encore démontré leur viabilité.

UN EFFET CLIMATIQUE FAVORABLE MAIS ENCORE INCERTAIN

Reste à identifier plus précisément les bénéfices de l'hydrogène (ou du carburant de synthèse, ou des biocarburants, etc.) vis-à-vis de l'effet de serre. Il est de plus en plus souligné que l'effet du transport aérien ne se limite pas à celui du CO_2 émis ; les traînées de sillage (contrails), auxquels peuvent s'ajouter les nuages d'altitude (cirrus) qu'elles induiraient, produisent selon certaines études un effet de serre à peu près équivalent au CO_2 ; mais il s'agit de phénomènes très complexes sur lesquels on dispose aujourd'hui de peu de mesures. En outre, il existe une influence des NO_x , complexe, elle aussi, puisque d'une part ceux-ci produisent de l'ozone (effet de serre

accru) et d'autre part, réduisent la présence de méthane (d'où un effet affaibli) : la résultante est quelque peu incertaine encore. En tous cas, l'hydrogène produirait plus de vapeur d'eau, mais pas de particules contribuant à l'agrégation des contrails, donc, au final, un effet relatif sur lequel il est difficile de conclure ; et de même, moins de NO_x grâce à une combustion plus rapide. Au total, l'étude de McKinsey annonce un effet de serre réduit de 50 à 75% (moyennant bien sûr un hydrogène totalement « vert »).

On n'en a pas fini d'étudier et de préciser les conséquences climatiques de l'aviation, ainsi que les réponses technologiques possibles, d'une part par la réduction à l'extrême du besoin d'énergie à travers de nouveaux progrès de l'avion et de son système propulsif, d'autre part par la mise au point d'un carburant non fossile accessible (ou plusieurs), en inscrivant la demande aéronautique dans une approche globale des sources d'énergie primaire. Il y faudra beaucoup de persévérance, d'humilité et d'honnêteté.