



PROGRAMMES ET DÉVELOPPEMENT



L'approvisionnement en hydrogène d'un aéroport comparable à celui de Roissy Charles de Gaulle ne sera pas sans poser des défis d'ampleur.

PHOTO: AFP/GETTY

AVION DÉCARBONÉ

LES DÉFIS DE LA FILIÈRE HYDROGÈNE

LES DÉFIS ET AUTRES FREINS QUE LES FUTURS AVIONS À HYDROGÈNE DEVRONT CONTOURNER NE SERONT PAS FORCÉMENT D'ORDRE TECHNOLOGIQUE, MAIS BIEN LOGISTIQUE. C'EST CE QUI RESSORT D'UNE ÉTUDE RÉALISÉE PAR LE CABINET IAC PARTNERS, QUI S'EST FOCALISÉ SUR CE SUJET.

Le premier avion propulsé par le biais de l'hydrogène a déjà volé, à l'époque de l'URSS, sous la forme du Tu-155, soit une version modifiée de l'appareil de transport commercial Tu-154. « Le Tu-155 fit son premier vol le 15 avril 1988. L'un des deux turbo-réacteurs de l'avion était modifié pour pouvoir être alimenté par hydrogène liquide en vol, mais également avec du gaz naturel liquéfié. Quelques démonstrations furent réalisées, mais le programme fut mis en

sommeil à la fin de l'Union soviétique », commente Olivier Saint-Esprit, qui pilote les études sur les sujets hydrogène chez IAC Partners.

Loin d'être un avion commercial certifié, le Tu-155 démontre néanmoins que l'avion à hydrogène ne relève pas de la science-fiction. L'intérêt de l'hydrogène dans l'aviation est de contribuer à la réduction des émissions polluantes, de CO₂, et à la transition énergétique. « Il est donc légitime au préalable de comparer cette technologie avec

d'autres, concurrentes, notamment les batteries. Aujourd'hui, clairement, il n'est pas envisageable de propulser un avion de type A320 avec des batteries, s'agissant d'un problème de densité énergétique. Même avec des batteries lithium-ion disposant d'une densité énergétique trente fois supérieure à leurs valeurs actuelles, un Airbus A320 ne pourrait embarquer qu'environ 50 % de sa charge utile actuelle, et ce sur une distance qui serait d'environ un cinquième de son autonomie actuelle », analyse Olivier Saint-Esprit.

KÉROSÈNE DE SYNTHÈSE.

Autres concurrents, les e-fiouls, ou kérosènes de synthèse, qui sont produits, entre autres, à partir de CO₂ et d'hydrogène. Ces carburants sont très intéressants

parce qu'ils ont des propriétés équivalentes à celles des kérosènes issus d'énergie fossile. Il existe actuellement des procédés en phase de déploiement, des projets d'investissement significatifs ont été annoncés pour produire en quantités importantes ces kérosènes de synthèse. « Leur coût reste néanmoins important, ils sont par ailleurs sujets à controverse puisqu'il s'agit de relâcher dans l'atmosphère du CO₂ », ajoute Olivier Saint-Esprit.

Les piles à combustible sont le troisième grand procédé concurrent de l'aviation à l'hydrogène. Elles visent à produire de l'électricité, de l'énergie, à partir d'hydrogène, qu'il soit gazeux ou liquide. Ce procédé nécessite d'embarquer une pile à combustible dans l'avion, qui représente une masse importante. Aujourd'hui, au regard



de la puissance embarquée nécessaire à la propulsion d'un avion, ce procédé semble réservé à des appareils destinés à un petit nombre de passagers sur une distance réduite. « Dans le cadre d'un Embraer 175, un avion régional d'environ 80 places, il faut ajouter 20 t au titre de la pile combustible pour produire l'énergie nécessaire à la phase ascensionnelle de l'avion. Quand on compare les 20 t de surpoids dus à la pile à combustible par rapport à la masse représentée par les deux turboréacteurs actuellement employés sur l'E175, soit environ deux tonnes, on comprend que l'alourdissement de l'avion pose un problème majeur », commente Olivier Saint-Esprit.

La propulsion par hydrogène se présente aujourd'hui comme la solution technologique la plus viable pour réduire de manière importante les émissions polluantes de l'aviation commerciale et la faire évoluer vers une aviation entièrement décarbonée.

QUATRE FAMILLES.

Il existe quatre grandes familles d'applications industrielles de l'hydrogène. D'abord sur le plan historique : l'hydrogène a été utilisé comme matière première par l'industrie chimique pour produire de l'ammoniac ou des engrais. Trois grands domaines d'application se font jour ces dernières années et sont en pleine effervescence. Celui de la « grid balance » pour commencer, qui représente l'application hydrogène comme vecteur de stockage de l'énergie. L'hydrogène est utilisé pour stocker l'énergie produite par les éoliennes la nuit, à un moment où il n'est pas intéressant de la réinjecter sur le réseau électrique. La production d'hydrogène est réalisée par électrolyse. Lorsqu'il devient intéressant de réinjecter de l'énergie électrique sur le réseau, par une réaction inverse, on consomme l'hydrogène produit pour réinjecter de l'électricité. Le secteur

de la mobilité annonce sa transition vers l'hydrogène à des niveaux différents, notamment dans le secteur automobile et des transports en commun. En Allemagne circulent environ 500 voitures à l'hydrogène, tandis qu'à Pau une ligne de bus emploie des piles à combustible fonctionnant à l'hydrogène pour son fonctionnement. De nombreux débats sont en cours concernant la maturité de l'aviation à l'hydrogène.

« Les commutateurs et avions régionaux mettront plutôt en œuvre des piles à combustible. Cette technologie est aujourd'hui relativement mature, en tout cas plus mature que la propulsion hydrogène via turboréacteurs. Positionnée à TRL 6, cela signifie que ces avions n'existent pas aujourd'hui, n'ont pas encore été certifiés. On peut toutefois envisager des développements dans des délais assez courts. En ce qui concerne les moyens et long-courriers de l'aviation commerciale, clairement l'avion hydrogène n'existe pas et les technologies nécessaires à leur mise en œuvre sont peu matures, de l'ordre de TRL 4. Les différents experts du secteur positionnent cette maturité entre TRL 2 et 6 avec une appréciation assez variée de cette maturité », commente Olivier Saint-Esprit.

ANNONCES ÉTATIQUES.

L'hydrogène a fait l'objet d'annonces étatiques importantes de la part des grands acteurs des pays industrialisés ces dernières années. Plusieurs Etats ont annoncé des plans d'investissements dans les écosystèmes de l'hydrogène, à coups de dizaines de milliards de dollars. « A notre connaissance, la France est le seul pays à avoir réellement annoncé une volonté de développer une aviation hydrogène. Tous les autres pays ont annoncé des plans visant à développer des écosystèmes de l'hydrogène, principalement à destination des véhicules

terrestres, propulsés par pile à combustible. Les Etats-Unis n'ont pas annoncé de plan d'investissement significatif, mais les acteurs privés sont très actifs, avec des capitalisations boursières importantes », précise Olivier Saint-Esprit.

En ce qui concerne les applications de l'hydrogène dans



« Les Etats-Unis n'ont pas annoncé de plan d'investissement significatif, mais les acteurs privés sont très actifs, avec des capitalisations boursières importantes. »

Olivier Saint-Esprit

l'aviation, il existe potentiellement trois grands domaines à trois horizons différents de temps. « A court et relativement moyen terme, il sera possible d'utiliser des e-fiouls qui ne nécessiteront pas de modifications majeures, tant au niveau des avions que des infrastructures aéroportuaires. Utilisés de manière vertueuse, ces kérosènes de synthèse permettront de réduire les émissions de CO₂. A horizon 2030, il sera possible d'alimenter via des piles à combustible un certain nombre d'équipements auxiliaires de l'avion, en remplacement de l'APU (groupe auxiliaire de puissance) et donc de réduire dans une certaine proportion la consommation de kérosène. A

un horizon qui n'est pas envisageable avant 2040 – la date annoncée par le gouvernement français en 2035 étant très difficile à tenir –, des piles à combustible pour les commutateurs seront possibles, mais au prix d'investissements très lourds, car il faudra revoir entièrement le câblage, installer un moteur électrique qui entraînera l'hélice. Pour les appareils à partir du moyen-courrier, la propulsion à hydrogène liquide en remplacement du kérosène sera alors envisageable, avec des modifications moindres par rapport aux commutateurs », poursuit Olivier Saint-Esprit.

Il est également important de comprendre quels sont les grands enjeux qui conditionnent la transition de l'aviation vers la propulsion hydrogène. Le premier enjeu est celui de l'avion, puisqu'il va falloir concevoir et développer de nouveaux avions, qui auront inévitablement certaines différences par rapport à ceux qui sont actuellement employés au sein des compagnies aériennes. Le second enjeu est celui du coût de cette aviation, de son impact sur le prix du billet d'avion et en conséquence de l'acceptabilité du passager. Le troisième enjeu est celui de la production d'électricité, nécessaire à la production d'hydrogène, en quantités très importantes. La mise à disposition de cet hydrogène dans toutes les infrastructures aéroportuaires notamment, fera l'objet d'un enjeu de supply chain.

CRYOPLANE.

L'avion à propulsion hydrogène n'a pas encore été étudié en profondeur par les grands avionneurs. Un projet Cryoplane a été lancé au cours de la décennie 2000 par Airbus, mais il n'a pas été poussé à un stade avancé. Il faudra prévoir de grands réservoirs, qui puissent embarquer le LH2 (hydrogène liquide), avec un rapport volumique multiplié par 4 comparé aux avions actuels.



L'hydrogène liquide occupe en effet quatre fois plus de place à quantité équivalente d'énergie. « L'hydrogène ayant la particularité de s'évaporer, on parle de "boil-off", il faudra envisager les formes les plus cylindriques possibles pour ces réservoirs et éviter celles que l'on connaît aujourd'hui, dans les ailes. Selon les études les plus récentes, le positionnement des réservoirs qui fait consensus est celui sur le dos des avions, puisqu'il vaut mieux que l'hydrogène s'évapore au-dessus des passagers. Il va falloir concevoir ce nouvel avion qui sera de formes et de volumes augmentés par rapport aux avions actuels. Il faudra également envisager un certain nombre de systèmes pour l'injection de cet hydrogène, pouvoir vidanger et purger cet hydrogène et remplir les réservoirs. Mais il ne sera pas nécessaire de modifier de manière majeure le turboréacteur qui utilisera ce carburant pour propulser l'appareil qui l'équipera. C'est donc un avion qui reste à concevoir, avec des technologies qui ne sont pas toutes recensées actuellement, mais avec des modifications relativement mineures sur le moteur, comme le démontre le démonstrateur russe Tu-155. Finalement, le défi n'est pas tant au niveau de l'avion à proprement parler », analyse Olivier Saint-Esprit.

Le niveau d'écologie de la production d'hydrogène fait débat. Les deux procédés principaux sont des procédés de conversion thermochimiques, mettant en œuvre principalement des énergies fossiles et le procédé dit d'électrolyse. Cette dernière est marginale, elle ne représente à l'heure actuelle que 2 % en termes de production, mais elle est amenée à se développer de manière forte. On obtient trois grandes familles de production d'hydrogène, l'hydrogène gris, le bleu et le vert. L'hydrogène gris est obtenu par des procédés thermochimiques, à partir d'énergies fossiles. Ce procédé serait plus polluant pour l'aviation que la mise en œuvre de kérosène. « Si l'on considère que l'intérêt exclusif de l'hydrogène repose sur la transition énergétique, l'hydrogène gris n'a donc aucun intérêt. L'hydrogène bleu est produit par thermochimie, mais en sortie de procédé le CO₂ est capturé et non relâché dans l'air. Il s'agit de procédés CCS, soit Carbon Capture & Storage ("captation de carbone et stockage"), qui sont plus vertueux que l'hydrogène gris. L'hydrogène vert, qui permettrait d'assurer une transition énergétique quasi parfaite et, virtuellement, sans générer aucune émission polluante, serait obtenu par électrolyse à partir d'énergies renouvelables,

soit du photovoltaïque et de l'éolien. Evidemment, les coûts associés à chacun de ces procédés sont différents et plus l'hydrogène sera vert, plus le coût d'obtention en sera élevé. Pour un voyage sur un appareil de type 737-A320, le surcoût à prévoir sera de 10 à 20 % pour une aviation totalement verte », indique Olivier Saint-Esprit.

DÉFI ÉNERGÉTIQUE.

Le défi énergétique est probablement celui qui revêt la plus grande ampleur. En simulant le cas d'un aéroport comme celui de Roissy-Charles de Gaulle qui ne mettrait en œuvre que des avions propulsés avec de l'hydrogène obtenu par électrolyse via des énergies renouvelables, il serait nécessaire de générer 1 500 t d'hydrogène pour assurer l'ensemble des rotations journalières. « Il faudrait, pour produire cet hydrogène, 4 gigawatts d'énergie électrique. Si cette dernière était produite par le biais du nucléaire, il faudrait pour assurer les seuls besoins de l'aéroport Charles de Gaulle 2,5 autres centrales nucléaires de type EPR Flamanville 3, avec des montants d'investissements théoriques élevés, de l'ordre de 9 Md€. Dans le cas d'une production par éoliennes de 5 MW, il ne faudrait pas moins de 3 200 éoliennes réparties sur

une superficie de 2 000 km², soit un champ occupant tout le nord de Paris. Il est dès lors aisé de comprendre le pourquoi des discussions relatives au nucléaire. Si l'on veut réussir la transition hydrogène, il va falloir prévoir des moyens de production électriques très conséquents dans les années à venir », explique Olivier Saint-Esprit.

SUPPLY CHAIN.

Le défi de la supply chain sera également majeur, puisqu'il faudra disposer de procédés qui garantissent la sécurité et des débits de remplissage suffisants pour ne pas ralentir le trafic aérien. Tous ces maillons de la chaîne de valeur sont aujourd'hui l'objet de l'attention d'une grande variété d'acteurs qui cherchent à prendre position sur des emplacements où ils envisagent de générer des revenus dans le futur. « Quatre familles d'acteurs sont aujourd'hui actives. Total, acteur historique de la production d'énergies fossiles, voit naturellement l'hydrogène comme une menace, mais dispose d'actifs importants en termes d'investissements et se voit légitime comme acteur majeur de la transition hydrogène. Air liquide, qui est le spécialiste historique français et mondial des gaz, souhaite être très actif dans la production et tous les maillons de la chaîne de valeur de l'hydrogène. Cette société se voit parfaitement armée et équipée pour approvisionner demain les aéroports en hydrogène. Les acteurs de l'énergie comme Engie voient d'un très bon œil l'intérêt de l'hydrogène et se développent activement dans ce domaine, notamment en ce qui concerne le stockage temporaire. Les acteurs spécialisés dans les équipements et technologies de production de l'hydrogène comme Nel, acteur nordique, se positionnent via des acquisitions pour prendre place sur la chaîne de valeurs », conclut Olivier Saint-Esprit.

■ Antony Angrand

En adoptant l'hydrogène liquide comme carburant, la silhouette des avions de ligne va évoluer en vertu du repositionnement des réservoirs.

