Journées d’Aussois 2021

Dominique Valentian 19/10/2021

Hydrogène liquide pour avions (Air Liquide)

Si rien n’est fait, la consommation de l’aviation commerciale passera de 1 à 2 milliards de tonnes de kérosène en 2050. L’objectif est de passer en dessous de 325 millions de tonnes, l’essentiel du gain étant obtenu en passant à des carburants radicalement nouveaux (synthèse, LH2).

Les moyens courriers représentent 90 % du trafic (en nombre de vols) et seulement 27 % de la consommation, les longs courriers 10% et 73 % de la consommation.

Air Liquide développe un réservoir d’hydrogène liquide pour un motoplaneur bi-fuselage utilisant une pile à combustible (développement DLR). Les réservoirs haute pression - trop lourds : 160 kg - sont remplacés par le réservoir d’hydrogène liquide isolé sous vide. Le premier vol est prévu en 2023. La capacité est de 228 litres pour une masse sèche de 4 kg par kg d’hydrogène. L’ensemble présente la même masse que le kérosène fournissant la même énergie. Les pertes thermiques sont inférieures à 25 W.

Air Liquide produit 1,2 million de tonnes d’hydrogène par an. L’essentiel est livré par gazoducs (950 km de lignes en Europe). La production de LH2 n’est que de 5000 tonnes / an.

La plus grande usine de liquéfaction est située aux USA, elle produit 30 tonnes par jour.

La plus grande unité d’électrolyse (à membranes PEM) consomme 20 MW, elle est alimentée en hydroélectricité. Air Liquide prévoit une unité de 100 MW en 2022 et d’offrir une capacité de 3 GW en 2030.

L’hydrogène vert sera compétitif avec l’essence pour un prix de 5 EURO / kg dans quelques années ; à 2 EURO / kg, il sera compétitif avec le kérosène, ce qui devrait être atteint en 2030.

Il faut se méfier des idées reçues. Produire de l’hydrogène par électrolyse en Europe (France exceptée) est une mauvaise idée : le rejet de CO2 est de 25,2 kg par kg d’hydrogène (à cause des centrales thermiques). Il n’est « que » de 11 kg / kg pour le reformage de CH4. Cette valeur tombe à 3 kg / kg si le CO2 est séquestré.

L’électrolyse en France « coûte » 3 kg / kg et 1,5 kg / kg au Québec. Enfin le reformage de méthane issu de la biomasse avec séquestration a un bilan positif de 5 kg / kg.

L’hydrogène sera d’abord utilisé pour les transports terrestres : 100 kg / jour pour un semi-remorque, 20 kg pour un bus , 100 kg / jour pour une station-service voitures, 150 kg / jour pour un train, 1 tonne /jour pour un ferry, 10 tonnes /jour pour un paquebot.

Il faudra des usines de liquéfaction de grande capacité. L’expérience acquise sur les liquéfacteurs hélium servira dans ce domaine : turbines de détente, échangeurs de chaleur, boîtes froides sous vide. Des réfrigérateurs d’hélium ayant une capacité de 100 kW à 4,2 K sont en projet. Traduit en capacité d’hydrogène, cela donnerait 500 kW à 20 K. Des améliorations comme l’utilisation de compresseurs centrifuges au lieu de compresseurs vis lubrifiés et de récupération d’énergie sur les turbines de détente permettront de passer le rendement de 25% à 33 % de Carnot (sur un cycle hélium servant de réfrigérant à l’hydrogène).

La distribution et le stockage du LH2 conduisent actuellement à des pertes de 12 à 14 %. Il faudra impérativement réduire ces pertes (re-condensation du « boil-off » par cryo-réfrigérateur sur le stockage). Le taux d’évaporation passive est inférieur à 1 % par jour.

Les semi-remorques routières ont une capacité de 3000 kg en Europe et 4000 kg aux USA (législation routière plus favorable).

L’approche concernant l’aéronautique civile :

Airbus, Air Liquide et Vinci aéroports ont créé un partenariat visant à promouvoir le rôle de l’hydrogène liquide dans l’aviation commerciale. Total Energie en fait aussi partie.

Au début, les aéroports seront alimentés par des semi-remorques. Il faudra rapidement passer à un liquéfacteur par aéroport (alimenté par gazoduc).

Ce liquéfacteur, ainsi que le stockage liquide, devront être conçus en fonction des contraintes de hauteur de l’aéroport.

L’approche concernant l’avitaillement prévoit une configuration identique à la situation actuelle : plein par camions de piste au pied de l’aérogare.

Il est clair qu’il faudra faire évoluer la législation actuelle pour que cela soit possible. La législation française est l’une des plus sévères (distance de sécurité pour une station-service hydrogène 4 fois plus importante qu’en Allemagne). Aux USA, la législation est propre à chaque ville.

L’avitaillement pourra aussi s’effectuer par lignes liquides superisolées et enterrées.

Le retour d’hydrogène gazeux froid sera de préférence effectué par lignes souterraines (aboutissant à une torchère ou à l’usine de liquéfaction).

Pour un aéroport de la taille de Francfort, il y aura 150 décollages d’avion LH2 par jour soit 150 tonnes par jour. Cela correspond à une usine de liquéfaction de 400 MW. Il faudra 10 à 20 camions de piste (un pour 10 avions à avitailler), 15 à 20 minutes pour refaire le plein. C’est un objectif ambitieux quand on sait qu’il faut plusieurs heures pour faire le plein de l’étage supérieur d’Ariane 5 (mais il est vrai que le réservoir est initialement à température ambiante alors que celui de l’avion sera froid).

Pour 100 à 300 aéroports équipés, il faudra 5 à 10 millions de LH2 par an (1000 fois la production actuelle d’Air liquide).

Il pourrait y avoir 10 000 avions consommant du LH2 en 2050.

Le programme Airbus Zéro E.

Airbus vise 3 cibles :

* Avions régionaux à turbopropulseurs
* Ailes volantes
* Avions type A 320.

Les avions alimentés en hydrogène liquide sont actuellement développés par ZeroAvia (monomoteurs 3ème niveau) et le prototype Dornier 328eco (Airbus).

Airbus mène le projet ASCEND visant à essayer une chaîne de démonstration au sol pour une puissance de 500 kW.

La tension de fonctionnement n’est que de 500 V pour éviter les problèmes d’isolation à haute altitude. L’utilisation de câbles supraconducteurs permet d’éviter les pertes ohmiques et de masse de câblage de la solution classique à 1000 A.

Le démonstrateur comprend une ligne supraconductrice de puissance, un limiteur de courant supraconducteur, une électronique de conversion partiellement supraconductrice un câble de puissance supraconducteur en courant alternatif et un moteur électrique supraconducteur (fourni par SAFRAN Tech / Université de Nancy – Green), formant quatre Work Packages séparés. L’objectif est d’atteindre 98 % de rendement. Les lignes électriques de puissance sont abritées dans un cryostat flexible de 60 mm de diamètre, 10 m pour la ligne continue et 2 m pour la ligne en courant alternatif.

Le premier avion à moteur supra conducteur est développé en Russie par SuperOx sur YAK 40).

L’objectif visé par SAFRAN est de 10 kg / kW, 99% de rendement (3 phases, 5000 t/min).

Pour les avions n’embarquant pas d’hydrogène liquide, il est prévu d’embarquer un cryo-réfrigérateur. L’objectif est d’atteindre une puissance massique de 3 kg / kW avec un rendement de 30 % de Carnot. C’est extrêmement ambitieux. On sait faire 10 à 30 kg/kW et 20% de Carnot. Absolut System (Grenoble) réalise un démonstrateur de turbo Brayton inverse de 1 kW à 25 / 65 K.

Le démonstrateur sera installé chez EADS à Ottobrunn. Les essais devraient commencer en 2023.

Après la phase 1 (ASCEND) il est prévu une phase 2 de maturation avion (intégration effective) puis une phase 3 de réalisation du prototype et d’essai en vol.

Moteurs électriques supraconducteurs pour avions :

Le laboratoire Green (université de Lorraine) a réalisé pour Safran un moteur supraconducteur original à modulation de flux. Les parties actives (bobine supraconductrice, inducteur) sont fixes et le rotor est passif . Il comprend 5 pastilles supraconductrices en YBaCuO qui assurent la modulation de flux. Les supraconducteurs sont tous « haute température » 65 ou 25 K.

Le modèle actuel (projet RESUM) atteint 50 kW à 5000 t/min pour une masse de 52 kg. Dimensions Diamètre = 552 mm, Epaisseur = 200 mm (cryostat). L’induit en cuivre est refroidi par air.

Le deuxième prototype doit fonctionner en 2022. Pour la même taille et masse, il doit fournir 200 kW. Le fil de bobine est plus performant ainsi que les pastilles du rotor. L’inducteur utilise un fil de Litz plus fin (le fil de Litz permet de diminuer les pertes par courant de Foucault dans l’induit).

Le premier prototype sera modifié en 2022, il doit fournir 150 kW en refroidissant l’induit à l’azote liquide au lieu d’air ou d’huile.

L’objectif final est de fournir 3 MW à 3000 t/min et 20 kW / kg.

Bras articulés pour le déchargement des navires d’hydrogène liquide.

Dans un futur où l’utilisation de l’hydrogène liquide sera importante, le transport par bateaux deviendra une nécessité, comme elle l’est aujourd’hui pour le GNL.

Nexans a construit pour le Japon des bras de chargement / déchargement pour le navire à hydrogène liquide qui effectue des rotations entre l’Australie (site de production) et le Japon. Le bras est très semblable à un bras de déchargement de méthanier mais il utilise une ligne flexible isolée sous vide au lieu des raccords tournants des méthaniers. La ligne actuelle a une longueur de 17 m et existe en 50 et 300 mm de diamètre. Le débit est de 400 m3/h (liquide) et 28000 m3/h pour le retour des vapeurs.

Des lignes plus grandes sont prévues pour faire face à la production de la future usine en Australie : 770 tonnes / jour de LH2 au lieu de 10 aujourd’hui.

Hâtons-nous lentement : l’histoire derrière la transition énergétique

L’orateur montre les trois transitions qui restent encore en usage aujourd’hui :

* Le charbon a commencé à remplacer le bois au 19ème siècle.
* Le pétrole a progressivement remplacé le charbon au 20ème siècle.
* Le gaz naturel.

On remarque que chaque transition prend de plus en plus de temps (sur les graphiques présentés par l’auteur). En effet, le pétrole demande une technologie plus élaborée que celle du charbon (puits, pipe-lines, raffineries) et c’est encore plus vrai par le gaz naturel. En contrepartie, chaque nouvelle énergie est plus facile à utiliser que la précédente.

Un effet pervers : la mise en place de la nouvelle énergie implique un pic de consommation de l’énergie précédente. Il faut bien construire les nouvelles infrastructures. On l’observe actuellement pour le soutien aux renouvelables apporté par le charbon et le gaz.

Une autre tendance est la concentration de l’énergie sur le site de production. Or les renouvelables produisent une énergie très peu dense (moins de 1 W/m2 pour les éoliennes) et dispersée.

Remplacer en moins de trente ans les énergies actuelles par des énergies dispersées et intermittentes est un défi sans précédent. Il a fallu 50 ans pour passer progressivement du pétrole au gaz naturel sans le remplacer totalement.

Références :

13èmes journées de Cryogénie et de Supraconductivité. Aussois. 12 – 15 octobre 2021

Hydrogène liquide pour mobilité. Pierre Crespi, ALAT (Air Liquide)

Transport électrique et hydrogène. Christian Eric Bruzek, ASG

Projet ASCEND / SCRYPT (avion électrique supraconducteur) et chaine cryogénique associée. Alexandre Colle, AIRBUS

Terminaux H2 JO Tokyo Arnaud Allais, Nexans

Moteur supraconducteur pour aéronautique. Jean Lévêque, GREEN

Hâtons-nous lentement : l’histoire derrière la transition énergétique. Greg De Temmerman, Zenon Recherche.