L'HYDROGENE LIQUIDE

Sommaire

1. ***La liquéfaction de l'hydrogène***
2. ***Unités industrielles de liquéfaction de l'hydrogène***
3. ***La liquéfaction de l'hydrogène appliquée à son stockage***
4. ***Transport de l'hydrogène liquide***

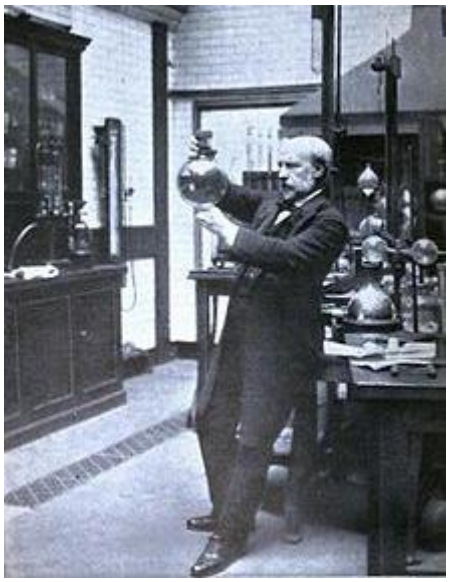
1 – LA LIQUEFACTION DE L'HYDROGENE

Les gaz que nous connaissons à la température ambiante sous la pression atmosphérique se liquéfient tous si l'on abaisse suffisamment leur température en maintenant leur pression constante. Les températures de cette « condensation » sont très différentes suivant la nature du gaz : ainsi l'hydrogène, maintenu à la pression atmosphérique, devient liquide à 20,3 K soit – 252,85 °C Il est alors 700 fois plus dense que le gaz dans les conditions normales de température et de pression (O°C et 1 atmosphère soit 1,013 bar). De ce fait, cette forme liquide présente un intérêt certain pour stocker et transporter l'hydrogène, mais au prix d'un certain niveau de technologie cryogénique à mettre en œuvre à la fois pour le liquéfier et pour le conserver à l'état liquide. C'est pourquoi ce n'est que pour de très grosses quantités que cette forme liquide de l'hydrogène est utilisée. L'aérospatial en est en particulier un utilisateur privilégié puisque les moteurs fusées qui équipent les lanceurs de satellites fonctionnent à partir d'hydrogène liquide (Fiche 5.1.2) alors que la plupart des autres usages se font avec de l'hydrogène gazeux. Pour les faibles quantités stockées comme celles nécessaires aux automobiles à pile à combustible ou à moteur thermique à hydrogène, des expériences ont été tentées (§3 ci-dessous). Mais elles ont été abandonnées devant les bonnes performances du stockage du gaz à la pression de 350 ou de 700 bars dans des réservoirs en matériaux composites, une technologie d'une mise en œuvre plus simple et moins coûteuse que la liquéfaction. Néanmoins, le stockage sous forme liquide pour véhicules a récemment fait sa réapparition avec le projet de camion à pile à combustible à hydrogène « Nikola One » porté par la start-up américaine de construction de poids lourds Nikola Motor. Un projet pour lequel l'hydrogène liquide stocké à bord permettrait une autonomie de près de 2 000 km.

Historiquement, la liquéfaction de l'hydrogène fut définitivement mise au point à la fin du XIX^{ème} siècle par le chimiste et physicien écossais Sir James Dewar. En fait, l'apport de Dewar fit suite aux approches de plusieurs de ses prédécesseurs à propos desquels il écrivait lui-même en 1898[1]:*« Après les belles recherches de Mr. Cailletet et de Mr. Pictet, Wroblewski fit la première expérience nette sur la liquéfaction de l'hydrogène en janvier 1884. Il trouva que le gaz refroidi dans un tube de verre capillaire au point d'ébullition de l'oxygène, et rapidement détendu de 100 à 1 atmosphère, présentait la même apparence d'ébullition soudaine que Mr. Cailletet avait observée dans ses expériences antérieures sur l'oxygène. Aussitôt après qu'il fut publié, Olszewski confirma ce résultat en détendant l'hydrogène depuis 190 atmosphères après l'avoir refroidi par l'évaporation de l'oxygène et de l'azote liquides sous pression réduite. Olszewski déclara, en 1884, avoir vu se produire des gouttelettes incolores, et par détente partielle à partir de 40 atmosphères il vit l'hydrogène liquide couler dans le tube de son appareil. Wroblewski ne put confirmer les résultats d'Olszewski : son hydrogène était toujours ce qu'il appela un*

[1] Extrait des Comptes Rendus de l'Académie des Sciences. *J. de Phys., 3e série, t. VII. (Juillet 1898.).*

liquide dynamique ayant l'apparence d'une mousse instantanée. Les méthodes précédentes n'ayant pas donné de résultats probants, Wroblewski proposa d'amener l'hydrogène à l'état de liquide statique en employant le gaz hydrogène comme corps réfrigérant. Depuis cette époque jusqu'à sa mort, en 1888, Wroblewski employa tout son temps à de laborieuses recherches sur les isothermes de l'hydrogène à basses températures. Les données qu'il avait obtenues lui permirent, au moyen de la formule de Van der Waals, de définir les constantes critiques de l'hydrogène, son point d'ébullition et sa densité liquide ».



Sir James Dewar

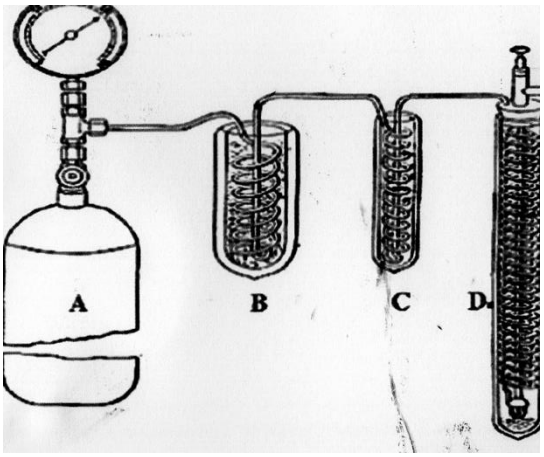


Schéma du liquéfacteur de Dewar
A, cylindre d'hydrogène comprimé ; B serpentin de pré-refroidissement à l'acide carbonique contenu dans un vase Dewar[2] ; C, même dispositif avec de l'air liquide et D, réservoir de liquéfaction par détente de l'hydrogène pré-refroidi.

Figure 1 – James Dewar liquéfie l'hydrogène

Cette liquéfaction par détente développée par Dewar et ses prédécesseurs fut améliorée quelques années plus tard par le français Georges Claude – le fondateur de la société Air Liquide – qui adapta à cette liquéfaction la machine de réfrigération par compression conçue par l'allemand Carl von Linde.
De nos jours, trois procédés de liquéfaction sont appliqués:
► Le cycle de Georges Claude.
• Il consiste d'abord en un pré-refroidissement de l'hydrogène gazeux par un échangeur de chaleur à azote liquide.
• Le gaz froid est alors comprimé et ensuite détendu dans des conditions adiabatiques. La succession de telles compressions–détentes poursuit le refroidissement du gaz dont une partie est utilisée pour contribuer à l'abaissement de la température du système, en d'autres termes, l'hydrogène est en partie son propre réfrigérant.
• Trop poursuivre ce refroidissement conduirait à obtenir de l'hydrogène liquide à l'intérieur même du dispositif à piston effectuant la détente, une présence de liquide qui engendrerait des problèmes mécaniques de ce dispositif. Pour éviter cet inconvénient, la dernière étape, conduisant au liquide, est une détente de Joule-Thomson. Il s'agit d'une détente du gaz à faible vitesse qui n'échange ni travail ni chaleur avec le milieu extérieur : une détente isenthalpique. Elle s'accompagne d'un refroidissement du gaz si la température initiale est inférieure à la température dite d'inversion, au-dessus, à l'inverse, elle produit un réchauffement. Cela qui est le cas pour l'hélium et l'hydrogène à la température ambiante.

[2] Le célèbre vase Dewar en verre à double paroi métallisée avec vide à l'intérieur : il est en fait une amélioration du vase de d'Arsonval qui ne comportait pas de parois réfléchissantes évitant le réchauffement par rayonnement.

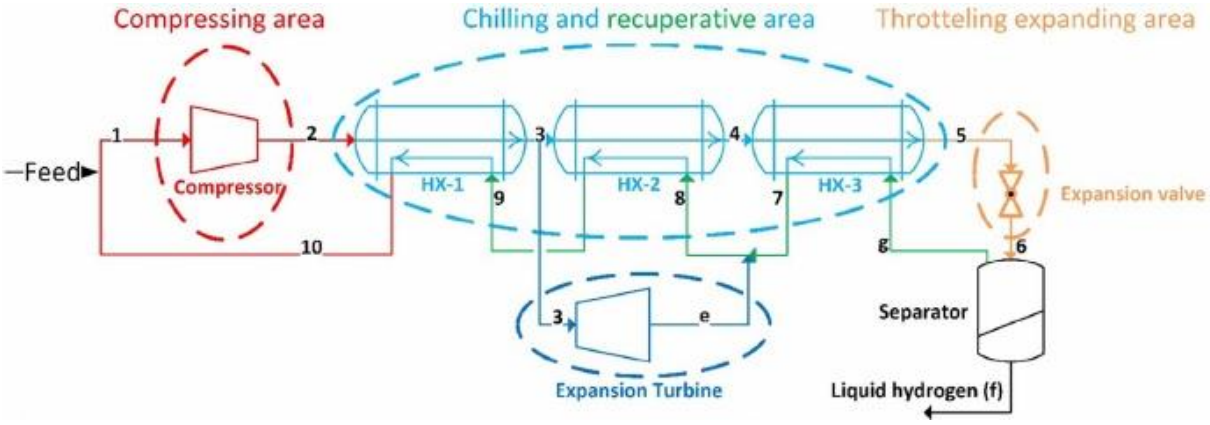


Figure 2 - Schéma du cycle de Claude

► Le cycle de Brayton.

Il utilise un réfrigérant séparé, l'hélium, le seul gaz à se liquéfier à une température plus basse que celle de l'hydrogène. Mais de par sa faible masse moléculaire, l'hélium est mal adapté à la compression-détente aussi est-il souvent mélangé à du néon ou de l'argon pour mieux remplir son rôle réfrigérant lors des cycles de refroidissement. Ce deux derniers gaz, eux, ne peuvent être utilisés seuls car leur température de liquéfaction est au-dessus de celle de l'hydrogène.

► La liquéfaction par effet magnétothermique

Elle repose sur la réfrigération magnétique, un processus lié à la propriété de certains matériaux magnétiques de voir leur température s'élever lorsqu'ils sont soumis à un champ magnétique et s'abaisser lorsqu'on supprime ce champ. Le phénomène dénommé effet magnétocalorique (ou « EMC ») est maximum lorsque la température du matériau est proche de sa température de Curie[3]. Ce procédé de refroidissement est encore, à l'heure actuelle, du domaine du laboratoire et demande de la R&D avant d'être envisageable au niveau industriel.

Le rendement de l'opération de liquéfaction

L'hydrogène à la température ambiante est un mélange de 75% d'ortho-hydrogène et de 25 % de para-hydrogène. Deux composants qui diffèrent par l'orientation des spins[4] des protons qui constituent les noyaux des deux atomes de leur molécule. Ces spins sont parallèles pour l'ortho-hydrogène et anti parallèles pour le para-hydrogène. La proportion entre ces deux variétés varie avec la température: ainsi la proportion 75% – 25% ortho para hydrogène à la température ambiante devient 99.8% de para-hydrogène à l'état liquide. Le passage d'un hydrogène à l'autre est réversible, il est exothermique dans le sens ortho-para et endothermique dans le sens para–ortho. Lors de sa liquéfaction, l'hydrogène normal se conserve tant que celui-ci est gazeux mais une fois liquéfié il se transforme en para-hydrogène avec un dégagement de chaleur qui produit une évaporation supplémentaire à celle que causent les pertes thermiques du récipient cryogénique. Pour remédier à cet inconvénient, la conversion ortho/para-hydrogène est effectuée durant la liquéfaction grâce à un catalyseur approprié.

Selon la thermodynamique, l'énergie théorique W_{th} nécessaire pour liquéfier l'hydrogène est la somme :

- de l'énergie qu'il faut pour refroidir le gaz de la température ambiante à celle de l'hydrogène liquide,
- de l'énergie correspondante à la chaleur de changement de phase gaz-liquide (chaleur latente de liquéfaction),
- de l'énergie mise en jeu lors de la conversion ortho/para-hydrogène.

Le rendement d'un liquéfacteur, est le rapport η de l'énergie théorique précédente W_{th} à l'énergie W_r qu'il faut réellement dépenser pour liquéfier l'hydrogène :

$$\eta = W_{th} / W_r$$

L'énergie théorique de liquéfaction W_{th} est de l'ordre de 3,9 kWh/kg_{LN2} pour de l'hydrogène gaz pris au départ à la pression atmosphérique de 0,1 MPa. Elle est réduite à 2,8 kWh/kg_{LN2} pour de l'hydrogène gazeux à la pression de 3 MPa provenant des colonnes de purification PSA[5] qui équipent la sortie des

[3] Température de la transition critique paramagnétique/ferromagnétique d'un matériau,

[4] Le spin d'une particule est le moment cinétique associé à sa rotation sur elle-même.

[5] Pressure Swing Adsorption, procédé de purification par des cycles d'adsorption sélective des impuretés sur des tamis moléculaires.

unités industrielles de production par reformage vapeur (Fiche 3.1.1). L'énergie réelle W_r, et par suite le rendement η, dépendent en plus de l'isolation thermique du liquéfacteur, de l'efficacité de ses échangeurs de chaleur, et du rendement de ses compresseurs.
Le rendement de la liquéfaction s'améliore avec la taille de l'installation en grande partie car les valeurs des volumes intérieurs mis en jeu augmentent d'un ordre de grandeur par rapport à celles des surfaces des parois avec pour conséquence une diminution des pertes thermiques puisqu'il y a une diminution relative des surfaces d'échange. Ainsi, le rendement qui est de moins de 10% pour les productions inférieures à 1 tonne/jour peut atteindre 40%, voire plus, au-delà d'une production quelques dizaines de tonnes/jour. La perte de pouvoir énergétique de l'hydrogène liquéfié est environ de 100% ou plus pour une liquéfaction de quelques kg/j et de seulement 30% pour une liquéfaction de plusieurs tonnes/j.

2. UNITES INDUSTRIELLES DE LIQUEFACTION DE L'HYDROGENE

Unités de grandes capacités
Les grosses unités de liquéfaction correspondent dans le monde à une production journalière dépassant 200 tonnes. Si une partie de cette production est utilisée par l'industrie (raffinage pétrolier, agrochimie, élaboration de matériaux…) une autre est destinée à l'espace pour lequel en 1960 fut construite la première usine dans le cadre du programme Apollo. Quant à la liquéfaction de l'hydrogène pour alimenter des piles à combustible, si elle reste encore faible, est en constante augmentation.
Dans l'Union Européenne, quatre liquéfacteurs fonctionnent avec une capacité de production totale de 26 t/jour :

- Aux Pays Bas, celui d'Air Products à Rozenburg produisant 5,4 t/j ;
- En Allemagne, ceux de Linde à Ingolstadt, avec 4,4 t/j et à Leuna, avec 5,7 t/j ;

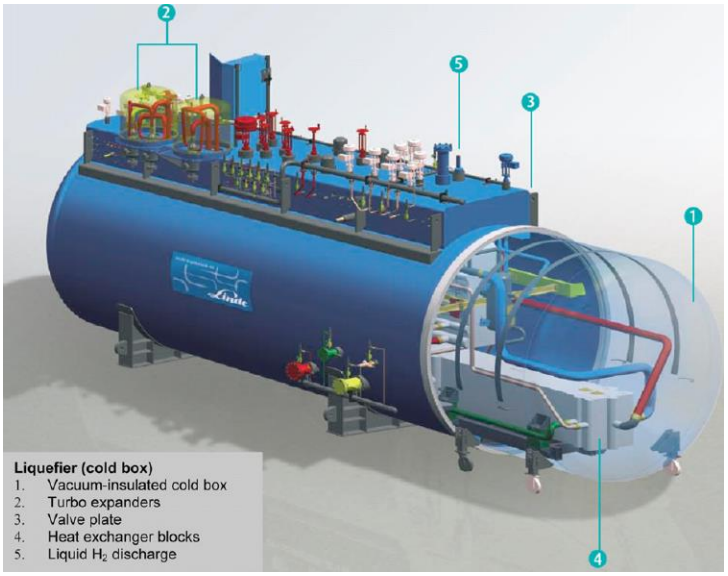


Figure 3 – Liquéfacteur Linde à Leuna

- En France, celui d'Air Liquide sur le site de Waziers dans le département du Nord, une unité produisant 10t/j. Ce liquéfacteur le plus important d'Europe est alimenté en hydrogène gazeux par gazoducs. Sa production est stockée dans 3 réservoirs indépendants d'une capacité totale de 750 000 litres, une production réservée en priorité aux essais du programme Ariane V.

Figure 4 – Site Air Liquide de Waziers

Aux Etats-Unis, la capacité de production est de 182 t/jour dont 54 tonnes sont produites par la seule usine Union Carbide de Sacramento.

Dans le Monde, Air Liquide est pour sa part un acteur important de cette liquéfaction de l'hydrogène qui, depuis 1987, a implanté trois liquéfacteurs:

- en Asie, à Oita au Japon une unité produisant 1,5 t/j ;
- au Canada, à Bécancour une unité produisant 10 t/j ;
- en Guyane française, à Kourou, une unité produisant 2,3 t/j pour la base de lancement aérospatial. Cet hydrogène liquide est l'ergol de l'étage cryotechnique des fusées Ariane IV et Ariane V : Ariane IV emportait respectivement 1,9 t d'hydrogène liquide et 8,8 t d'oxygène liquide. Ariane V emporte 27 t d'hydrogène liquide et 130 t d'oxygène liquide. L'oxygène liquide ainsi que les autres gaz nécessaires au moteur de ces fusées, azote, hélium et air comprimé sont également produits sur ce même site Kourou.

Figure 5 - Liquéfacteur d'hydrogène sur le site de lancement aérospatial de Kourou

Pour la mobilité hydrogène, dans un futur proche, Air Liquide prévoit d'investir plus de 150 millions de dollars américains affectés à la construction en Californie d'une usine d'hydrogène liquide de grande capacité. Cette construction doit démarrer début 2019. Le site produira près de 30 tonnes d'hydrogène liquide par jour, un volume pouvant alimenter quotidiennement 5 000 véhicules électriques à pile à combustible (FCEV). Grâce à cet investissement, Air Liquide contribuera au déploiement à grande échelle de la mobilité hydrogène sur la côte Ouest des Etats-Unis car la mise en service de cette source

d'approvisionnement fiable permettra de servir la flotte de 40 000 véhicules électriques à pile à combustible attendus en Californie en 2022. Cette usine servira également d'autres marchés dans la région en dehors de ceux de la mobilité automobile, comme ceux de la manutention par chariots élévateurs et du transport par poids lourds.
L'hydrogène liquide une fois produit est acheminé vers les lieux de son utilisation par des camions citernes d'une capacité de 15 000 à 53 000 litres (§4 ci-après).

Unités de moyenne capacité
« Hylial » est un récent liquéfacteur Air Liquide pouvant, suivant le modèle, produire par jour de 1 à 2,5 t d'hydrogène liquide pour des besoins de mobilité, de laboratoires, de centres d'essais ou de la microélectronique. Il fonctionne sur le principe des cycles des liquéfacteurs d'hélium avec en particulier un rapport de pression optimisé pour son compresseur, avec des turbo-détendeurs à palier gaz statique, avec un pré-refroidissement du cycle et, pour améliorer la production, une conversion en continu ortho/para de l'hydrogène.
Ce liquéfacteur est utilisé en Chine pour aérospatial sur deux sites de lancement et un centre d'études. Au Canada, il équipe un centre de recherche technologique sur l'hydrogène-énergie.

Figure 6 - Liquéfacteur d'hydrogène Hylial

3. LA LIQUEFACTION DE L'HYDROGENE APPLIQUEE A SON STOCKAGE

Alors que la densité de l'hydrogène gazeux à la pression atmosphérique et à 20°C, est de 0,0838 kg .m^{-3} et de 14,885 kg.m^{-3} à 220 bars dans les bouteilles de gaz commercialisées[6], elle est de 70,9 kg.m^{-3} à l'état liquide. Cette dernière densité peut être atteinte par le gaz à la température ambiante à une pression de 1 820 bars (182 MPa). Une valeur qui n'est pas adaptée à une application pratique en raison des impératifs qu'impose une telle haute pression (épaisseur importante des parois des réservoirs, des tubulures et des vannes). C'est pourquoi, pour atteindre une densité élevée, la liquéfaction de l'hydrogène reste préférable. En fait, pour le gaz, la courbe de compressibilité marque vers 700 bars (70 MPa) une inflexion au-delà de laquelle la densité augmente de moins en moins avec la pression avec pour conséquence qu'au-delà de cette pression le gain en quantité de gaz stocké diminue alors qu'il faut de beaucoup augmenter la résistance mécanique des réservoirs et de leurs accessoires. Pour cette raison, 700 bars a été la pression choisie pour devenir une norme des réservoirs en matériaux composites qui ont été développés pour les véhicules à pile à combustible. A cette pression, la densité du gaz atteint 39,6 kg.m^{-3} soit un peu plus de la moitié de celle du liquide.

[6] Bouteilles B50 d'un volume de 50 litres contenant 10 m^2 de gaz pris dans les conditions normales de température et de pression.

Les deux modes de stockage de l'hydrogène, liquide ou gaz à haute pression, exigent un certain degré de technologie et il est difficile d'établir une hiérarchie de leur dangerosité car l'un et l'autre présentent des risques et entraînent des protocoles de sécurité rigoureux.
Quant à l'énergie nécessaire pour atteindre ces états, elle est importante: 22 $MJ.kg^{-1}$ pour le gaz comprimé à 70 MPa et deux à dix fois plus pour la liquéfaction selon qu'elle est effectuée en grandes ou en petites quantités. Dans les deux cas, le processus de stockage engendre un surcoût significatif de l'hydrogène.
Comme tous les liquides à basse température, dits liquides cryogéniques, l'hydrogène liquide est conservé dans des « cryostats », récipients à double isolation thermique. La première évite les apports de chaleur par conduction directe en maintenant le vide entre la double paroi du cryostat. La seconde, contre les apports de chaleur par rayonnement, est assurée par un empilement de feuilles métalliques réfléchissantes disposées dans cet espace entre les parois.
Autrefois en verre[7], les cryostats sont aujourd'hui, pour la plupart, en acier inoxydable avec une capacité qui peut aller de quelques litres au mètre cube, voire à plusieurs dizaines, centaines et même milliers de mètres cubes comme le sont les unités de stockage et de transport prévues dans certaines applications spatiales ou le transport maritime (§4 ci-après). Ainsi, sur le site de lancement de Kourou (§2 ci-dessus), l'hydrogène liquide est stocké dans cinq réservoirs de 320 m^3 chacun (masse totale stockée de 22 t) dont les performances thermiques limitent l'évaporation à 0,3% de la capacité totale par jour.

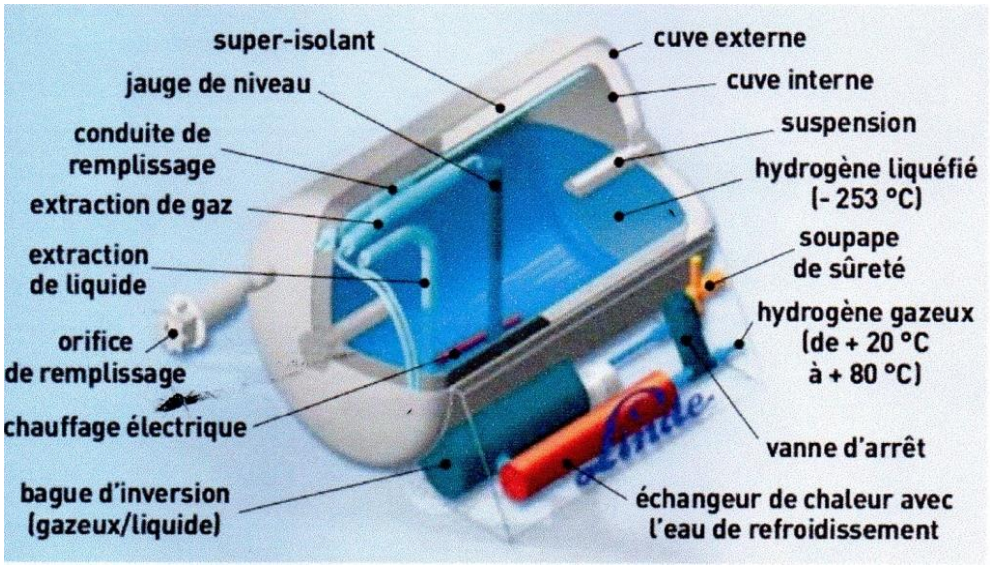


Figure 7 - Schéma de structure d'un réservoir d'hydrogène liquide (LINDE)

[7] Le vase Dewar cité note n°1.

Figure 8 - Cuves de stockage industriel d'hydrogène liquide (Messer)

L'isolation thermique de ces récipients, aussi bonne soit-elle, n'est pas totale[8] avec pour conséquence une légère ébullition de l'hydrogène due aux faibles apports de chaleur correspondants à cette imperfection d'isolation. Un cryostat n'est donc pas étanche afin de permettre un dégagement permanent d'hydrogène gazeux, très précisément de la vapeur d'hydrogène, qui évite un accroissement excessif de la pression. Cette évaporation permanente, qui correspond à une perte en poids de 0,3 à 1% par jour est un des inconvénients majeurs du stockage de l'hydrogène liquide. Pour de grosses installations fixes, on peut imaginer une récupération de cet hydrogène évaporé par cryoadsorption (Fiche 4.4) dans des enceintes supportant la pression et qui, réchauffées à la température ambiante, deviendront des réservoirs d'hydrogène comprimé, sans dépense supplémentaire d'énergie.
Au début des années 2000, ce type de stockage sous forme liquide a été utilisé par des constructeurs automobiles pour équiper certains de leurs prototypes de voiture à hydrogène : Daimler-Chrysler (modèle Necar 4), General-Motors (HydroGen1 et 3), VW (Bora HyMotion), Renault (Fever), BMW (Série7). Ce dernier, BMW, est le constructeur qui a conservé le plus longtemps cette technique pour alimenter son moteur thermique aujourd'hui abandonné. Le réservoir BMW contenait 9,5 kg d'hydrogène liquide et pesait 145 kg, soit un rapport en poids de 6,5 %. Un pourcentage voisin de celui actuellement obtenu avec les réservoirs en matériaux composites évoqués ci-dessus qui équipent les véhicules à pile à combustible et dans lesquels l'hydrogène est comprimé à 350 ou 700 bars. Néanmoins, comme nous l'avons évoqué § 1, ce stockage d'hydrogène liquide pour véhicules est aujourd'hui en passe d'être repris par le constructeur américain Nikola pour équiper son prototype de camion à pile à combustible
Pour de telles applications à l'automobile du stockage d'hydrogène liquide, l'utilisateur ne peut laisser son véhicule dans un lieu non ventilé. Les concepteurs avaient trouvé une parade partielle en mettant en œuvre des réservoirs cryogéniques résistant à une certaine pression ce qui permet d'éviter toute évaporation pendant deux à trois jours avec des réservoirs résistant à des pressions de 0,5 à 0,8 MPa (5 à 10 bars), comme ceux qui ont équipé certains prototypes de la firme BMW (735i ; 750hl ; Mini Cooper et 745h). Une amélioration qui toutefois conduit à un surcoût pour un réservoir déjà très coûteux.
Une variante fut apportée par BMW pour mieux gérer l'évaporation de l'hydrogène liquide, elle consistait à utiliser une structure composite étanche permettant de récupérer et de conserver un certain temps (quelques heures) cet hydrogène gazeux évaporé. Le dispositif faisait que, lorsque la pression dans ce

[8] En d'autres termes, des conditions parfaitement adiabatiques n'y sont pas sont totalement réalisées ce qui d'ailleurs n'est matériellement pas possible.

réservoir de gaz augmentait au-delà d'une certaine limite (par exemple 10 bars), une soupape libérait l'excès d'hydrogène qui n'avait pas été utilisé par le moteur.

Une autre utilisation possible de l'hydrogène liquide concerne les turbines aéronautiques pour la motorisation des aéronefs (Fiche 5.1.2). Depuis un demi-siècle, de telles turbines ont été mises au point et essayées dans diverses parties du monde et, dans tous les cas, c'est de l'hydrogène liquide qui était embarqué. Les premiers réservoirs étaient en nacelles accrochées à l'extrémité des ailes comme le sont les réservoirs supplémentaires de kérosène. Une autre solution avait été retenue pour le projet « Cryoplane »[9] , un projet européen d'avion à hydrogène dérivé de l'Airbus A 300 dont les études de faisabilité ont été menées de 2000 à 2002. Un réservoir cylindrique était placé au-dessus de la cabine pressurisée, il avait une forme la plus allongée possible pour réduire la section du maître couple. Si, pour une réserve d'énergie équivalente[10], la masse d'hydrogène représente 30 à 35 % de celle du kérosène, le volume correspondant est en revanche près de quatre fois plus important d'où ce choix de l'emplacement le plus approprié, au-dessus de la cabine. Ce projet n'a toutefois pas dépassé la première phase démontrant sa faisabilité technique car il avait, entre autres, le très grave inconvénient de rejeter de grandes quantités de vapeur d'eau qui formaient d'importants nuages pouvant perturber les conditions atmosphériques au sol.

Figure 9 - Le projet Cryoplane (2000-2002)

Sur un plan différent, ces dernières décennies, ont été mis au point des aéronefs à hélices entrainées par des moteurs électriques à pile à combustible à hydrogène. La plupart d'entre eux sont de petits modèles non habités avec des réservoirs à hydrogène comprimé. Mais pour de plus gros appareils embarquant des passagers et ayant en plus une plus grande autonomie de vol, l'intérêt de réservoirs à hydrogène liquide deviendra évident. Une remarque : l'eau rejetée par les piles à combustible présente l'avantage d'être entièrement récupérable contrairement à ce qui est le cas pour les turbines dont le principal inconvénient se trouve ainsi éliminé.

Mais, répétons-le, c'est dans le domaine de l'aérospatial que l'hydrogène liquide est aujourd'hui le plus utilisé comme combustible pour la propulsion des fusées. Ainsi, la dernière version de la fusée Ariane (V) est munie de deux réservoirs d'hydrogène liquide : l'étage principal embarque 28 t d'hydrogène et l'étage supérieur 14,7 t .

Transfert de l'hydrogène liquide

Pour transférer de l'hydrogène liquide d'un cryostat à un autre, que ce soit d'une unité de production à la citerne cryogénique d'un camion pour son transport, de la réserve d'une station de recharge au réservoir d'un véhicule ou du remplissage des réservoirs de fusées. Il existe deux méthodes : la

[9] Voir : http://www.fzt.haw-hamburg.de/pers/Scholz/dglr/hh/text_2001_12_06_Cryoplane.pdf

[10] A titre d'exemple, pour un vol de 10 000 km à Mach 0,85 emmenant 400 passagers il faut prévoir 26 t d'hydrogène ou 85 t de kérosène.

surpression dans le cryostat ou la pompe mécanique. La première est le système habituel de transfert des liquides cryogéniques : l'enceinte à vider est rendue étanche et est légèrement pressurisée par un apport d'hydrogène gazeux à faible pression. Un tube plongé dans le liquide, dit canne de transfert, se prolonge à l'extérieur jusqu'au récipient récepteur et permet l'écoulement. Un résultat équivalent est obtenu par un léger chauffage qui en provoquant une ébullition supplémentaire génère cette surpression d'hydrogène gazeux assurant l'écoulement du liquide L'inconvénient de ces deux derniers procédés est de soumettre le cryostat à une surpression ce qui n'est pas avec la seconde méthode mettant en jeu une pompe cryogénique à piston comme celles qui assurent le transfert de l'hydrogène liquide en aérospatial (Fiche 5.1.2).

4 – TRANSPORT DE L'HYDROGENE LIQUIDE

4-1 – Transport par route

Quand il est utilisé en très grande quantité comme substance chimique de base nécessitant le plus souvent un apport continu (industrie du raffinage pétrolier, synthèse de l'ammoniac, métallurgie et élaboration de matériaux) l'hydrogène est en général acheminé par gazoduc (Fiche 4.1). Le transport sous forme liquide par camion étant plutôt réservé à des applications nécessitant des quantités moindres, comme c'est le cas pour l'industrie électronique, l'aérospatial et des stations de recharge pour la mobilité terrestre. L'hydrogène liquide est alors contenu dans des réservoirs cryogéniques cylindriques à l'image des camions citernes transportant des liquides. Ces véhicules peuvent transporter jusqu'à 3.5 t d'hydrogène liquide pour un poids total de 40 t. C'est ainsi par exemple que la flotte d'Air Liquide est de 12 camions en Europe et de 75 en Amérique du Nord.

Figure 10 - Camion-citerne pour le transport de l'hydrogène liquide
(*alimentation d'une station de recharge*)

4–2 - Transport par mer

Le fait que l'hydrogène liquide soit dense et que les réservoirs cryogéniques le contenant puissent avoir de très importantes capacités suggère assez naturellement le transport par mer depuis les lieux pouvant avoir une grande capacité de production à ceux de forte consommation. C'est ce qu'avaient prévu les projets japonais « WE-NET » et euro-québécois « Hydro-Hydrogen Pilot Project, EQHHPP ».

Le prototype japonais consistait en un cargo pouvant transporter 14 000 t d'hydrogène liquide contenu dans quatre réservoirs cryogénique sphériques.

L'idée de base du projet euro québécois EQHHPP (1991 - 1995) était de transporter par mer vers l'Europe, de l'hydrogène produit au Québec par électrolyse de l'eau et liquéfié grâce aux importantes ressources hydroélectriques de ce pays. Il était prévu que cet hydrogène liquide soit contenu dans de

grands réservoirs cryogéniques sphériques à double paroi d'une capacité de 3 000 m^3 fixés sur des barges adaptées à la haute mer.

En fait, ces projets étaient l'adaptation à l'hydrogène liquide ce qui se fait pour le gaz naturel liquéfié.

Si à l'époque, un tel transport maritime de l'hydrogène en est resté à l'état d'études de faisabilité ce n'est plus le cas aujourd'hui pour ce qui concerne le Japon qui a repris cette idée pour s'approvisionner en énergie décarbonée. Le projet consiste à importer de l'hydrogène liquide produit en Australie par reformage de lignite dont ce pays possède d'importants gisements. Mais c'est là une production particulièrement émettrice de CO_2 aussi il est annoncé que ce CO_2 serait stocké par la technique dite CCS, Carbon Capture and géological Storage. A ce jour, il n'y a pas d'exemple d'installation qui stocke ainsi de très grandes quantités de CO_2 car tous les projets d'envergure semblent abandonnés à la fois en raison des surcoûts qu'ils entrainent, de la chute de rendement global qu'ils induisent et de la difficulté à trouver un stockage souterrain qui sur le plan de la sécurité soit acceptable (cf. Fiche 3.1.2).

En négligeant les pertes par évaporation au cours du transport et les émissions du navire transporteur, un kg de cet hydrogène australien, compte tenu des rendements, produira au Japon ~15 à 20kWh d'électricité. Pour ce qui la concerne une très bonne pile à combustible donnera 17 kWh/kgH_2 alors que des cycles combinés à gaz (turbine à gaz + turbine à vapeur) avec des rendements supérieurs à 60%, permettent d'atteindre 20 kWh/kgH_2 avec une émission totale de 28 kg de CO_2..

La Figure 11 montre le prototype de navire prévu par ce projet principalement porté au Japon par la société Kawasaki Heavy Industries. Il devrait entrer en service en 2019 avec une prévision de développement sur dix ans de cette importation d'hydrogène liquide.

Figure 11 - Projet de navire japonais pour le transport d'hydrogène liquide en provenance d'Australie (*capacité 2500 m^3*)

Sources

Thierry Alleau - EDP Sciences, *«* L'Hydrogène, énergie du futur**? »**, *Collection Bulles de Sciences,* décembre 2007

Raymond Drnevich/Praxair - Hydrogen Delivery – Liquefaction & Compression.– Strategic Initiatives for Hydrogen Delivery Workshop – Mai 2003
http://www1.eere.energy.gov/hydrogenandfuelcells/pdfs/liquefaction_comp_pres_praxair.pdf?pagewanted=all

DOE Hydrogen Program FY 2005 Progress Report 437 – Liquefaction - Combined Reverse-Brayton Joule Thompson Hydrogen Liquefaction Cycle -
http://www.hydrogen.energy.gov/pdfs/progress05/v_e_1_shimko.pdf

https://www.sauvonsleclimat.org/fr/base-documentaire/hydrogene-japon

Takashi FUKANO, Urs FITZI, Karl LÖHLEIN, Isabelle VINAGE - Efficiency of Hydrogen Liquefaction Plants – 2003

https://advancedtech.airliquide.com/fr/liquefacteurs-hydrogene-hylial

http://www.linde-kryotechnik.ch/public/fachberichte/efficiency_of_hydrogen_liquefaction_plants.pdf

« *Encyclopédie des Gaz* » - L'Air Liquide, 1985.

Philippe Buffet - « Propulsion spatiale: L'hydrogène, un carburant léger pour lanceurs lourds » - L'actualité Chimique, Décembre 2001.