

VI. STOCKAGE DE L'HYDROGENE

Il a déjà été souligné le rôle déterminant que joue le stockage dans la viabilité d'un système d'énergie. A ce propos, plusieurs références [11] montrent bien que cela constitue le point décisif de choix d'un système d'énergie basé sur l'hydrogène.

Les techniques de stockage utilisées dans le cas des gaz naturels et industriels, peuvent être envisagées pour celui de l'hydrogène. Ces techniques consistent d'une part, en la liquéfaction de l'hydrogène en vue d'un stockage dans des réservoirs cryogéniques et, d'autre part en la compression de l'hydrogène en vue d'un stockage à haute pression. Une autre solution consiste à utiliser le phénomène d'adsorption de matériaux poreux carbonés ou d'hydrures métalliques pour contenir l'hydrogène.

VI.1 Stockage de l'hydrogène liquide

La liquéfaction utilise l'importante variation de densité entre les états gazeux et liquide (à température adéquate pour une pression du liquide proche de la pression atmosphérique). Parmi les cycles de liquéfaction de l'hydrogène les plus simples, nous pouvons citer celui de Linde ou la détente Joule-Thompson.

La liquéfaction par le cycle de Linde exige un refroidissement préalable au moyen d'azote liquide ou bien l'utilisation d'une turbine pour refroidir la vapeur à haute pression.

Le cycle de Claude ainsi que celui de Haylandt sont aussi utilisés; ils utilisent des échangeurs de chaleur supplémentaires et davantage de compresseurs et de turbines pour diminuer le travail de liquéfaction.

A cause de la très basse température de liquéfaction de l'hydrogène (20 K sous la pression atmosphérique), le stockage de l'hydrogène liquide est peu économique (à titre d'exemple, le prix de l'hydrogène liquide envisagé comme combustible de transport est deux fois supérieur à celui de l'hydrogène produit à l'état gazeux). Les raisons sont d'une part, le coût élevé de l'énergie consommée pour la liquéfaction (il faut fournir 3.228 kWh/kg pour liquéfier l'hydrogène contre 0.207 kWh/kg pour la liquéfaction de l'azote par exemple); d'autre part, le coût important des réservoirs aptes à contenir l'hydrogène pour de longues périodes. Ce coût découle du fait que le stockage de l'hydrogène liquéfié nécessite des réservoirs cryogéniques performants, éventuellement munis d'une paroi remplie d'azote liquide. Ces réservoirs ont une forme généralement sphérique afin de minimiser le rapport surface sur volume et réduire du même coup le transfert de chaleur. Cependant, une isolation thermique optimale est insuffisante car une génération interne de chaleur peut avoir lieu dans le réservoir: Lorsque l'hydrogène est liquéfié, la température passe rapidement de 300 K à 20 K,

corrélativement, la conversion de l'ortho- hydrogène en para-hydrogène nécessite, en l'absence de catalyseur, un temps plus long (plusieurs jours) avant d'atteindre l'équilibre. De fait, la conversion se poursuit après entropôt de l'hydrogène dans le réservoir et équivaut à une génération interne de chaleur entraînant l'évaporation d'une quantité importante de liquide (plus de la moitié de la quantité initiale). Pour éviter ces pertes on dispose dans le liquéfacteur un catalyseur performant (du charbon actif ou de l'oxyde ferrique) qui absorbe la chaleur dégagée lors du refroidissement, en général par l'azote liquide. Cette étape supplémentaire dans la préparation de l'hydrogène liquide se répercute sur le coût global du stockage par liquéfaction.

VI.2 Stockage par compression

Le stockage par compression est le procédé par lequel le gaz est conservé, pressurisé dans des réservoirs plus ou moins robustes. Ce procédé est plus aisé à mettre en oeuvre que le stockage par liquéfaction, toutefois la densité de l'hydrogène obtenue reste très inférieure de celle de l'hydrogène liquide. Ainsi, à une pression de 1 bar, la masse volumique de l'hydrogène liquide à 20 K est de 71.1 kg/m^3 ; pour l'hydrogène à 293 K, elle est de 0.0827 kg/m^3 à 1 bar, de 14.49 kg/m^3 à 200 bars et 23.66 kg/m^3 à 350 bars. Par conséquent, pour avoir une énergie disponible par m^3 importante, il est nécessaire d'augmenter les pressions de stockage et par conséquent le travail de compression. Cependant, des pressions de stockage élevées entraînent davantage de contraintes appliquées au réservoir. Incidemment, la résistance du réservoir implique une augmentation de son poids à vide, ce qui limite le poids supplémentaire d'hydrogène à stocker.

La situation a radicalement changé avec la technologie des structures en fibre bobinée (verre, aramide, carbone) et résine (thermodurcissable ou thermoplastique) qui permettent de travailler à des pressions beaucoup plus élevées tout en réduisant la masse et en évitant les risques de rupture explosive indépendamment des agressions externes sévères. C'est ainsi que 35MPa est pratiquement devenu le standard actuel mais les recherches et les développements visent à mettre sur le marché des capacités certifiées pour une pression de service de 70MPa. On notera que ce niveau de pression correspond du point de vue de la masse à un optimum lié aux caractéristiques de compressibilité de l'hydrogène.

Si l'état liquide s'impose indiscutablement quand le besoin se chiffre en tonnes voire dizaines de tonnes, le stockage à l'état gazeux sous pression présente de nombreux avantages quand les quantités mises en jeu ne dépassent pas quelques kilogrammes ou dizaines de kilogrammes. Cela fait du stockage par compression un procédé réservé à des quantités relativement modérées d'hydrogène [11].

VI.3 Stockage par adsorption

Certains matériaux poreux ont la propriété d'adsorber les gaz de manière efficace. Ces matériaux peuvent être des structures en charbon ou des hydrures métalliques.

VI.3.1 Stockage dans les structures en carbone

Ces structures sont constituées par des microcristaux de graphite dont l'enchevêtrement forme un réseau de pores ayant des diamètres de l'ordre du nanomètre (Fig. 3). Lorsqu'elles sont cumulées, les surfaces latérales des pores représentent une surface considérable de plusieurs centaines à plusieurs milliers de m^2 par gramme de charbon actif. C'est sur cette surface que peuvent venir s'adsorber les molécules d'hydrogène se diffusant à travers le réseau de pores constitué [11].

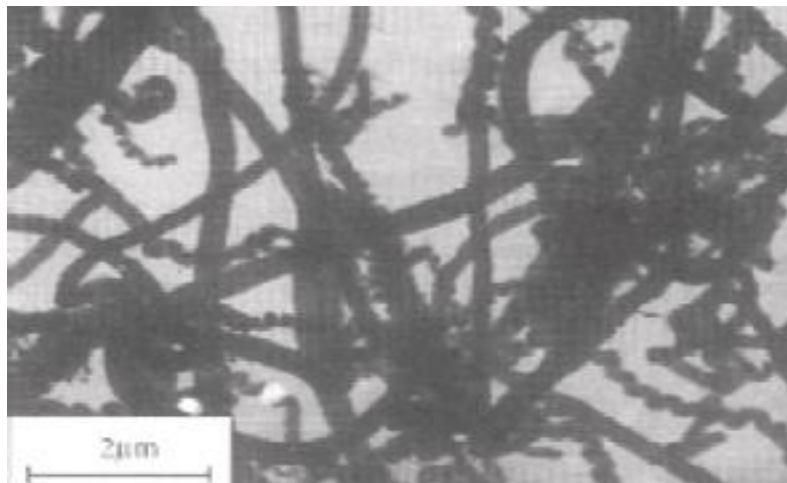


Figure VI.1: Nano fibres avant le processus d'adsorption



Figure VI.2: Représentation schématique d'un faisceau de nanotubes

VI.3.2 Stockage de l'hydrogène sous forme d'hydrures

Quelques métaux et alliages ont la propriété de fixer réversiblement de l'hydrogène, en formant des hydrures solides, par réaction exothermique. Des variations de températures et de pression permettent de déplacer l'équilibre. Quelques hydrides métalliques sont disponibles commercialement et constituent une bonne solution pour le stockage de l'hydrogène quand le facteur poids n'est pas un problème. Les plus prometteurs semblent être:

- Le Mg_2Ni , permettant une bonne capacité de stockage (1 kWh/kg), mais nécessitant une température de 265 °C pour assurer une pression d'hydrogène de 1 bar.
- Le Fe-Ti (0.5 kWh/kg), assurant une pression d'hydrogène de plusieurs bars à la température ambiante.

Pour les véhicules, le problème de l'hydride métallique est son poids élevé compte tenu de la quantité d'hydrogène stocké. Le problème du poids n'a pas encore été résolu en dépit des efforts

importants de recherche. Les chercheurs ont donc essayé de réfléchir dans d'autres directions en tentant d'utiliser des alliages et en recherchant des méthodes d'obtention de concentrations en hydrogène plus élevées.

VI. 4. UTILISATIONS DE L'HYDROGENE

La viabilité d'un système d'énergie à hydrogène solaire repose pour une certaine part sur les perspectives d'utilisation de l'hydrogène solaire, une fois produit et stocké, i.e. la faisabilité d'une conversion rentable et non polluante de son énergie chimique en énergie utilisable. Les machines concernées par cette conversion sont les piles à combustibles ainsi que les moteurs thermiques à hydrogène. Nous présentons ci-après un aperçu sur ces machines.

VI.4.1 Pile à combustible H_2 [11]

Les piles à combustibles font actuellement l'objet de programmes importants de Recherche & Développement dans le cadre de l'utilisation de combustibles écologiques comme l'hydrogène solaire. En effet, les piles à combustibles permettent une production d'énergie électrique et thermique à partir de l'énergie chimique emmagasinée dans l'hydrogène. Leur utilisation est alors envisagée dans des applications comme le stationnaire (centrale de production d'énergie), le transport (automobile) ou le spatial et cela, conjointement ou non, aux moteurs thermiques.

VI.4.2 Moteurs thermiques à hydrogène

Du seul point de vue de la thermodynamique, tous les moteurs alternatifs (cycles Diesel, Otto ou à allumage commandé) ainsi que les turbines à vapeur et à gaz peuvent être convertis à l'hydrogène.

Au niveau des véhicules automobiles, des moteurs thermiques bi-carburants ont été développés, utilisant aussi bien l'hydrogène que l'essence comme combustible. L'hydrogène utilisé est stockée sous forme liquide à bord du véhicule et alimente le moteur. Des prototypes de

moteur à hydrogène de type V8 et V12 ont récemment été développés et présentés ; ceux-ci peuvent fournir une puissance utile supérieure à 135 kW pour une vitesse de pointe du véhicule de 215 km/h. L'autonomie est de 300 km pour 120 l d'hydrogène liquide embarqué, ce qui correspond à 8 kg de ce carburant.

Dans le domaine aéronautique, l'utilisation de l'hydrogène dans les turbines à gaz date déjà de près d'un demi-siècle. Plusieurs modèles de turboréacteurs ont été modifiés, puis essayés au sol pour valider ces modifications, et ce, afin d'en mesurer les performances. Les travaux américains (Lewis Flight Propulsion Laboratory) menés depuis 1955 montrent qu'il est possible de trouver rapidement des solutions d'adaptation satisfaisantes.