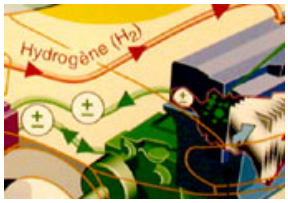

L'économie hydrogène

Publié le février 2003

Nous sommes à la veille d'une course dont personne n'ose donner le coup de départ. Une compétition dont la ligne d'arrivée profile une nouvelle ère énergétique basée non plus sur les énergies fossiles mais sur l'hydrogène. En fait, nous sommes actuellement dans une situation de redistribution des cartes liés à cette nouvelle économie qu'est "l'économie hydrogène". Les solutions sont bien là (cf ci-dessous) et il est urgent que nos responsables mettent en place une nouvelle politique en matière de transport et d'énergie.

Les enjeux ne sont plus sur des positions géopolitiques et stratégiques dominantes sur les pays producteurs de pétrole. Qui c'est si cela ne pourrait pas nous éviter une guerre dans le golfe ?

En tout cas la fiction décrite par Jeremy Rifkin dans son livre "l'économie hydrogène" que nous évoquions le mois dernier laisse quand même rêver. (édito janvier 2003)

Table des matières :

Production et utilisation de l'hydrogène
- Production
- Utilisation

Extraction
- Carburants fossiles
- Electrolyse et énergies renouvelables
- Energie solaire
- Energie éolienne
- Hydraulique
- Biomasse

Stockage
- Stockage sous forme comprimé
- Stockage sous forme liquide (cryogénique)
- NaBH4 : Hydrogen on demand TM
- Hydrures métalliques
- Charbon actif, Nanofibres et Nanotubes en carbone

Transport

Découvert par Cavendish, "l'hydrogène" doit son nom au français Lavoisier. Celui ci avait découvert qu'en approchant une bougie allumée près d'une éprouvette, on provoquait l'apparition d'une flamme et que la combustion de ce gaz provoquait la formation d'eau sur les parois de l'éprouvette.

Antoine Lavoisier décida alors d'appeler ce gaz hydrogène, du grec "hydro" : eau et "gene" (producteur, créateur). Bien qu'on le trouve en abondance dans l'univers, il n'existe pas à l'état naturel : on le trouve plutôt lié à d'autres atomes (C, O), par exemple sous forme d'eau ou de méthane. Il est donc nécessaire de le produire soit à partir de l'électrolyse de l'eau, soit à partir du reformage d'hydrocarbures.

Le salon de l'automobile de Paris (Octobre 2002) présente de nombreux prototypes de véhicules fonctionnant à l'hydrogène : le Hy-wire de GM, le rouge véhicule pour pompiers H2O de PSA, et même un scooter et un vélo.

Déjà on rêve d'une "Economie de l'hydrogène", où l'hydrogène remplacerait les carburants usuels et serait la source de l'électricité produite, mais un tel rêve est il vraiment fondé ?
En effet, cette idée suppose que toute l'infrastructure inhérente soit créée : production, transport, stockage, distribution... Cela suppose que les problèmes techniques soient résolus et que cette solution soit économiquement viable.

De même que les piles à combustible, l'hydrogène fascine : carburant du futur, possibilité de résoudre les problèmes environnementaux (effet de serre), la dépendance vis à vis des carburants fossiles et les réserves limitées de ceux ci. Il pourrait être la clef de l'utilisation des énergies renouvelables, en particulier l'énergie solaire ou éolienne, en permettant le stockage de cette énergie sous une forme chimique pour une utilisation ultérieure. La combustion de l'hydrogène avec l'oxygène ne produit que de l'eau et fait donc de l'hydrogène un carburant propre.

Haut de page

Production et utilisation de l'hydrogène

Production
La production de l'hydrogène représente aujourd'hui 500 Milliards de Nm3 (Normo-mètre cube), soit 6,5 EJ (exa Joule). Or la demande mondiale en énergie primaire est de 400 EJ, dominée majoritairement par le pétrole et le charbon. Ce qui signifie que la production actuelle ne couvrirait que 1,5% de la demande, il y a donc beaucoup à faire du côté de la production pour que l'hydrogène atteigne une part significative, surtout avec une demande énergétique mondiale en pleine croissance.

L'hydrogène est produit en majeure partie à partir du reformage d'hydrocarbures. Les méthodes de production sont :

- vaporeformage (gaz, naphta),
- oxydation partielle (naphta, charbon, hydrocarbures lourds..),
- électrolyse,
- co-produit dans la fabrication d'éthylène. Les deux premières techniques correspondent à près de 95% de la production totale, seulement 2% de l'hydrogène est produit par électrolyse.

De grands groupes sont spécialisés dans la production d'hydrogène : Air Liquide, Air Products, Linde Gas, Messer Griesheim.

Utilisation

Si l'hydrogène joue un rôle important dans l'industrie, il n'est presque pas utilisé comme vecteur d'énergie (sauf pour les fusées). Classiquement, il est utilisé surtout dans :

- l'industrie chimique et pétrochimique (synthèse d'ammoniac, de méthanol, production de colorants, d'eau oxygénée),
- l'industrie verrière,
- électronique (puces d'ordinateurs),
- alimentaire (corps gras insaturés),
- en métallurgie,
- dans la production de carburants à faible teneur en soufre. C'est la production d'hydrogène en vue d'utilisation énergétique qui semble avoir le plus d'avenir, que ce soit avec les piles ou les moteurs à combustion interne. La production d'ammoniac représente actuellement près de 50% de la consommation d'hydrogène, suivie par les utilisations dans la pétrochimie, et pour la synthèse de produits chimiques (méthanol, amines, eau oxygénée). Mais dans ces cas, les coûts liés à l'hydrogène sont absorbés dans le coût de production des produits finis, d'autant que celle ci est souvent centralisée sur un seul site. Aucune considération énergétique n'entre en compte.

Haut de page

L'hydrogène, utilisé comme source d'énergie première, nécessite une chaine de production qui va de "l'extraction" à la distribution en passant par le transport et le stockage.

Extraction

Pour produire de l'hydrogène, plusieurs possibilités sont étudiées, certaines sont déjà arrivées à maturité technologique et d'autres sont encore au stade du développement :

- à partir de **carburants fossiles** par vaporeformage, oxydation partielle. Le carburant privilégié est le gaz naturel
- à partir de l'**électrolyse de l'eau**. Pour cela, l'électricité utilisée pourrait venir des énergies renouvelables
- à partir de **biomasse**.

Trois options se présentent pour l'infrastructure de production :

- Une production centralisée de l'hydrogène suivie d'une distribution aux utilisateurs par pipelines, camions...,
- Une production de l'hydrogène décentralisée par électrolyse ou par reformage avec une consommation de l'hydrogène sur site ou à proximité,
- Une production intégrée dans les piles à combustible avec un reformage interne à partir de gaz naturel, méthanol, essence...

Les deux premières options requièrent la mise en place d'une infrastructure pour le stockage, le transport et la distribution, la troisième est plus complexe (surtout pour un reformage embarqué) mais l'infrastructure de distribution des carburants existe.

Carburants fossiles

La production d'hydrogène à partir de carburants fossiles est actuellement la plus répandue, mais elle ne constitue pas une solution à terme puisque toutes ces carburants ont une durée de vie limitée. Elle pourrait constituer une solution pour le début pour des petites quantités. Si l'efficacité est de 85-90%, cette technique génère du CO_2.

On distingue trois procédés :

- le vaporeformage,

- l'oxydation partielle et
- reformage autotherme.

Electrolyse et énergies renouvelables

L'utilisation des énergies renouvelables serait intéressante dans la mesure où la production d'électricité par ce moyen n'est pas simultanée aux besoins. L'hydrogène permettrait de stocker l'électricité sous forme chimique et de réutiliser plus tard l'hydrogène. L'efficacité de l'électrolyse approche 65%, quoiqu'en théorie on puisse atteindre 80 ou 85% mais son coût est bien supérieur à celui du reformage en raison du coût de l'électricité. Pour que le procédé soit rentable, il faut une électricité à faible coût.

Mais l'intérêt est la production sur place supprimant tout problème de transport.

Production et utilisation d'hydrogène produit à partir d'énergies renouvelables

- Energie solaire
On distingue dans l'énergie solaire le solaire thermique et le solaire photovoltaique. Le premier n'est pas intéressant dans l'optique qui nous intéresse (trop bas niveau de température pour le thermique classique, cher dans le cas du thermique "haute température"). En revanche, le photovoltaique permet de produire de l'électricité. Cette technique dépend encore des progrès technologiques et de diminution de coût à faire dans la fabrication des cellules. De plus, cette technique n'est intéressante que dans les pays profitant d'un fort ensoleillement : Sahara, Australie, Arabie, Californie...

- Energie éolienne
L'énergie éolienne est actuellement en plein développement en Europe : en Allemagne, en France... Les éoliennes ont une puissance autour de 1 à 2,5 MW. Des systèmes ont été proposés qui conjuguent une éolienne alimentant des habitations en électricité, fabricant de l'hydrogène par électrolyse quand la production est supérieure à la demande et alimentant le village en électricité générée par une pile dans le cas inverse.

- Hydraulique
L'hydraulique est l'énergie renouvelable la plus économique, mais tous les pays ne sont pas égaux. En France, elle représente environ 17% de l'électricité produite, mais cette capacité arrive à saturation. En revanche, d'immenses réserves existent en Amérique du Sud et en Asie.

Une chose est néanmoins à prendre en compte avec l'utilisation des énergies renouvelables : il ne faut pas qu'on doive davantage utiliser d'énergie pour transformer l'hydrogène et l'utiliser que la quantité d'énergie qu'on récupère à la fin...

Biomasse

La biomasse, elle aussi considérée comme énergie renouvelable, peut aussi permettre de produire de l'hydrogène, mais aucun procédé n'est encore mûr techniquement. On peut penser à la biomasse pour produire de l'électricité qui permettra ensuite de produire l'hydrogène par électrolyse. Plusieurs méthodes existent actuellement :

- transformation en alcool (éthanol, méthanol) ou méthane suivi de reformage,
- pyrolyse et gasification de la biomasse suivi de reformage,

- production directe via des bactéries.

La fermentation de la biomasse permet de produire des alcools tels le méthanol ou l'éthanol, on peut aussi obtenir du biogaz contenant du méthane. Ceux ci peuvent être ensuite reformés suivant les procédés vus ci dessus.

Une autre possibilité réside dans les algues vertes. En effet, au cours de la photosynthèse, les plantes vertes dissocient l'eau en hydrogène et oxygène. L'hydrogène sera combiné au CO_2 pour construire des tissus végétaux tandis que l'oxygène est libéré dans l'atmosphère. Ce type de procédé pourrait être au point techniquement d'ici 2 ans, et sur le marché d'ici 5 à 8 ans.

Haut de page

Stockage

Il existe de multiples modes de stockage de l'hydrogène(liste non exhaustive) :

- comprimé,
- liquéfié,
- $NaBH_4$,
- hydrures métalliques,
- charbon actif, nanofibres et nanotubes en carbone,
- fullerènes...

Si les deux premiers modes de stockage sont actuellement les plus utilisés, ils sont loin de satisfaire par leurs performances ; aussi les autres modes sont également étudiés. L'évaluation de ces performances se fait surtout par les densités volumétriques et gravimétriques (de l'hydrogène et de l'ensemble avec le stockage) et les conditions générales de stockage et de déstockage de l'hydrogène (efficacité, vitesse, appareils annexes nécessaires..).

Stockage sous forme comprimé

Le stockage sous forme comprimée est l'un des plus utilisé actuellement (PSA, Nissan, DaimlerChrysler) : la pression va de 200-350 à 700 bars. Des stations services existent déjà : notamment celles de Munich, Chicago, Détroit ou Hambourg.

Procédé

La compression nécessite de l'énergie, l'évaluation de celle ci dépend du processus considéré : le processus de compression isotherme n'est pas réalisable, le processus adiabatique est plus proche de la réalité.

Une compression à plusieurs étages avec un refroidissement entre chaque étage permet de se rapprocher du mode isotherme : l'énergie dépensée se situe entre ces deux limites. Lors d'un remplissage rapide, on assiste à une augmentation de température. On peut évaluer à 10% du PCI l'énergie nécessaire pour comprimer H_2 de 1 à 700 bars.

Réservoir

H2 peut être stocké dans des bouteilles de 10 L jusqu'à des réservoirs de 10.000 m3. Les bouteilles commercialisées actuellement permettent des pressions jusque 350 bars.

Il existe des réservoirs ronds ou cylindriques : les premiers sont peu adaptés aux applications automobiles pour des raisons de place, les seconds rendent une adaptation de la géométrie du véhicule nécessaire.

Thiokol a développé des réservoirs elliptiques pour réduire le volume. Le réservoir est fait de métal très résistant à la corrosion, souvent de l'aluminium renforcé par des fibres en carbone (pour des raisons de poids). Pour réduire davantage le poids, on tente d'introduire des polymères dans la structure.

Avantages

On bénéficie de la maîtrise de la technologie et de la rapidité du remplissage.

Inconvénients

Cette technique souffre encore de multiples inconvénients :

- une faible densité volumétrique,
- la nécessité de réservoirs résistants aux chocs et adaptés aux véhicules pour les applications automobiles,
- et surtout une technologie à améliorer pour les hautes pressions avec l'adaptation de tous les auxiliaires : valves, capteurs, détendeurs.

Constructeurs

Mannesman, Dynetek, Thiokol, Quantum.

Stockage sous terrain

De même que le gaz naturel, il est possible de stocker l'hydrogène sous terre sous forme comprimée : aquifères, cavernes salées (salt cavern)... peuvent et sont déjà utilisés. En Allemagne, la ville de Kiel stocke du gaz de ville depuis 1971, en France, GdF stocke un mélange riche en hydrogène et au Royaume Uni, la société ICI (Imperial Chemical Industries) le stocke dans les mines de sel. Cette méthode n'est intéressante que pour les quantités importantes d'hydrogène.

Stockage sous forme liquide (cryogénique)

Dans cette méthode, l'hydrogène est stocké sous forme liquide à -253âÆ~C.

Réservoir

Le réservoir a souvent une double paroi, avec entre les deux un espace sous vide (pour éviter les pertes thermiques par convection) ou avec des super isolants ou rempli d'air liquide (Linde Gas). Il est en acier mais on tente d'utiliser des matériaux composites. On atteint des densités énergétiques de 22 MJ/kg (rapporté au réservoir).

Avantages

Le réservoir nécessite peu de place, d'où le choix de BMW, Opel et DaimlerChrysler pour ce type de stockage. Le remplissage est une technologie maîtrisée avec des stations services spécialisées comme celles de Munich.

Inconvénients

Au vu de la faible température, les pertes thermiques sont inévitables de même que l'évaporation d'une partie de l'hydrogène (phénomène de boil off). Néanmoins, les progrès techniques ont permis d'amener ce boil off à 1% d'évaporation/jour. Il faut aussi amener l'hydrogène à cette température et le liquéfier, ce qui nécessite 30% du PCI de l'hydrogène.

Constructeurs

Air llquide, Linde Gas, Messer Griesheim.

NaBH4 : Hydrogen on demandTM

Cette méthode de stockage est celle mise au point par Millenium Cell, qui envisage ce type de stockage pour des applications portables, stationnaires et automobiles.

Déjà DaimlerChrysler avec la Necar 5 et PSA avec son prototype H2O utilisent cette méthode de stockage. Daimler étudie la faisabilité du projet visant une autonomie de 300 miles avec un plein de 35 gallons de mélange au lieu de 50 gallons.

Procédé

Il se base sur la réaction entre le borhydrure de sodium NaBH4 et l'eau donnant de l'hydrogène (et du borate de sodium NaBO2), cette réaction nécessite la présence d'un catalyseur qui peut être à base de cobalt ou de ruthenium. Quand on a besoin d'hydrogène, on pompe la solution pour qu'elle entre en contact avec la catalyseur.

Avantages

Ce procédé permet l'utilisation d'un fluide non toxique, non inflammable, facilement manipulable qui peut être utilisé dans les applications automobiles ; il peut d'ailleurs être stocké dans des réservoirs traditionnels. Cette technologie offre aussi l'avantage d'être à température ambiante et faible pression et surtout de produire un hydrogène totalement pur de CO et autres impuretés.

Inconvénients

Des challenges technologiques doivent encore être relevés : il faut éviter des émissions spontanées d'hydrogène, trouver un catalyseur moins cher que le ruthenium (le cobalt requiert une température plus élevée). De plus, il faut recycler NaBO2.

Hydrures métalliques

Certains éléments ont la propriété de former des liaisons (covalentes ou ioniques) avec H2, permettant ainsi le stockage, puisque le phénomène est réversible. Toyota a déjà réalisé un prototype avec ce type de stockage.

Procédé

Certains métaux ou alliages peuvent stocker des atomes d'hydrogène entre leurs atomes et créer des liaisons chimiques. Il s'agit par exemple du Palladium Pd, du Magnesium Mg, de ZrMn2, Mg2Ni ou d'alliages comme Mg-Mg2Ni. Il existe deux classes d'hydrures : les hydrures haute et basse température. Le stockage s'effectue à haute pression avec apport de chaleur. La pression de dissociation est fonction de la température : pour des

températures entre 0 et 100âÆ~C, les pressions se situent entre 2 et 10 bars, mais elles atteignent 30 à 50 bars avec des températures plus élevées.

Le déstockage a lieu à basse pression avec évacuation de chaleur. Les densités énergétiques sont faibles pour les hydrures basse température : 1,5 MJ/kg ; elle augmente cependant pour les hydrures haute température : 4 MJ/kg (3,5% massique). Ovonics avance même des chiffres autour de 8 MJ/kg (7% massique).

Avantages
Cette méthode est sûre et déjà utilisée. Les pressions mises en jeu sont faibles. L'hydrogène obtenu est très pur.

Inconvénients
La densité énergétique est encore limitée, ce qui donne des réservoirs trop lourds. De plus la cinétique de remplissage doit être améliorée, à basse température. Certains hydrures restent trop chers.

Constructeurs
Ovonics, HERA (GfE, Hydro Quebec, Shell Hydrogen).

Charbon actif, Nanofibres et Nanotubes en carbone

Charbon actif
Le stockage de l'hydrogène dans du charbon actif est connue depuis longtemps. Le remplissage se fait par adsorption. A température et pression ambiante, on atteint des densités énergétiques de 0,5% (masse), mais à très basse température (-186âÆ~C) et haute pression (60 bars), on peut atteindre des densités de 8% massique. Plus récemment, on a découvert des méthodes de stockage dans les nanofibres et les nanotubes en carbone qui semblent beaucoup plus efficaces. **Nanofibres en carbone**
Nanotubes en carbone
Dans ces deux derniers cas, les résultats prometteurs donnés par la littérature n'ont pas été reproductibles. Ce mode de stockage reste à l'état de recherche.

Haut de page

Transport

On peut envisager de reproduire le modèle adapté de l'énergie fossile qu'est le pétrole, mais ce serait ridicule.

On transporte si le lieu de production est éloigné du lieu de consommation. Or l'hydrogène peut être produit là ou on trouve de l'eau dans le cas de l'électrolyse et des énergies renouvelables.

Haut de page

Distribution

C'est bien là que le bas blesse. On peut très bien envisager, comme l'ont réalisé certains constructeurs automobile, des systèmes de productions autonomes ou bien l'utilisation de réservoirs que l'on va remplir chez son distributeur habituel.

- Le premier nécessite une redistribution des cartes économiques et un sacré bouleversement de l'industrie pétrolière.
- Le second est l'évolution la plus "naturelle" que nous pourrions prendre sans les pots cassés de la première.

Post-scriptum : Auteur :* Anne Sophie Corbeau