



## APPLICATIONS AUX TRANSPORTS TERRESTRES

# Emploi de l'hydrogène pour les véhicules particuliers

Jean-Paul Hermann et Fabien Heurtaux

**Summary** Using hydrogen in the automotive industry

This paper deals with the difficult introduction of a new fuel (hydrogen) in the automotive industry. We compare the advantages and the drawbacks of the use of that fuel, the possible production processes and the various storage technologies on board.

**Mots-clés** Automobile, distribution, hydrogène, perspectives, Renault, stockage, utilisation.

**Key-words** Automotive, distribution, hydrogen, perspectives, Renault, storage, use.

L'hydrogène est connu depuis deux siècles et l'automobile depuis un seul, mais cela n'empêche pas d'envisager leur rencontre dans le futur.

Le but de cet article est d'examiner les avantages mais aussi les problèmes posés par l'emploi de ce carburant gazeux comme vecteur d'énergie à bord d'un véhicule particulier. Nous partons du principe qu'un changement de carburant est une décision technologique, politique, économique et sociétale majeure que nous ne pouvons envisager qu'après avoir soigneusement examiné toutes les faces du problème.

### Les attraits de l'hydrogène comme carburant

Depuis le premier choc pétrolier en 1973, les industriels et les constructeurs automobiles ont entamé une démarche de réduction de la consommation en carburant des véhicules. Cette tendance actuellement vise à s'amplifier avec l'augmentation du nombre de véhicules et les dérèglements climatiques liés aux gaz à effet de serre.

Les pouvoirs publics et les citoyens s'intéressent à la réduction des émissions polluantes dans l'atmosphère, en particulier par les industries et les véhicules. Les normes mises en place depuis 1993 et régulièrement durcies ont porté des fruits indéniables puisqu'on assiste à une amélioration constante de la qualité de l'air des villes.

Ce souci de réduire les teneurs en composés polluants (monoxyde de carbone, hydrocarbures imbrûlés, oxydes d'azote, plomb, soufre...) s'est plus récemment doublé d'une inquiétude croissante concernant les gaz à effet de serre, dont le gaz carbonique CO<sub>2</sub> est le porte-drapeau, mais où la vapeur d'eau et le méthane jouent des rôles prépondérants.

De plus, la diminution des réserves de pétrole et de gaz naturel se profile à l'horizon 2050. Les constructeurs automobiles, les pétroliers et les citoyens doivent commencer à préparer des scénarii de remplacement.

Dans ce contexte, l'hydrogène apparaît comme le carburant idéal dont l'utilisation n'émettrait que de l'eau, si on l'utilise directement dans une pile à combustible, et quelques oxydes d'azote dans un moteur à combustion interne.

Ce raisonnement n'a pas échappé à l'ensemble des constructeurs automobiles qui ont entamé des programmes de recherche, utilisant l'hydrogène dans des piles à combustible pour leur rendement énergétique élevé et l'absence de polluants. D'autres l'utilisent dans les moteurs à combustion interne, ce qui leur permettra d'appliquer ce type de technologie plus rapidement en série. Avant d'envisager une production en grande série, il reste de nombreuses étapes technico-économiques à franchir.

L'utilisation de l'hydrogène pour des flottes de véhicules particuliers est envisagée aux environs de 2008 et pour une utilisation plus massive après 2020.

### Les problèmes posés par l'hydrogène embarqué sur un véhicule

Outre les problèmes de fabrication et de coûts, utiliser de l'hydrogène à bord d'un véhicule particulier présente des problèmes de trois natures :

- La mise en place d'un réseau de distribution grand public demandera d'avoir vu émerger un mode de stockage standardisé, notamment en ce qui concerne les connecteurs de remplissage et la pression de remplissage des réservoirs.

L'investissement financier pour créer ce nouveau réseau sera élevé. Le déploiement d'un tel réseau de distribution pourrait se réaliser de manière similaire à celui du gaz naturel pour véhicules (GNV).

- Le stockage de l'hydrogène à bord du véhicule est actuellement difficile et moins performant, en particulier du point de vue masse et volume comparé aux carburants liquides (essence, gazole). Cette problématique du stockage se rapproche aussi de celle rencontrée avec le GNV.

# APPLICATIONS AUX TRANSPORTS TERRESTRES



Saura-t-on stocker suffisamment d'hydrogène en respectant les contraintes d'intégration véhicule pour assurer une autonomie similaire à celle des véhicules actuels ?

Le mode de stockage devra se rapprocher idéalement des types de stockages de carburants actuels qui sont compacts, sûrs et peu onéreux.

- La sécurité, la fiabilité et l'utilisation des véhicules à hydrogène doivent être du même niveau que nos véhicules à moteur à combustion interne.

Des solutions à ces problèmes sont envisagées, même si le prix de revient n'est pas encore acceptable à ce jour.

## Des technologies pour l'hydrogène dans les véhicules particuliers

### Les filières de production d'hydrogène et les bilans énergétiques et CO<sub>2</sub>

Les constructeurs automobiles n'ont pas pour vocation de produire des carburants. Néanmoins, leur souci est d'évaluer les bilans énergétiques et CO<sub>2</sub> des filières déployées pour la production de carburant. L'approche est dite « du puits à la roue », c'est-à-dire qu'on compare les différentes filières de la production à l'utilisation de l'hydrogène. On comptabilise les émissions de CO<sub>2</sub>, de polluants, en incluant l'extraction de l'énergie primaire (sans oublier l'énergie d'installation des sites), les émissions lors de la fabrication de l'hydrogène, de son transport, de sa distribution et de son utilisation à bord.

Ce bilan a été engagé par la plupart des constructeurs, industriels et organismes spécialisés en analyse du cycle de vie.

Les filières principales de production d'hydrogène sont :

- le reformage à la vapeur de gaz naturel ou de produits pétroliers,
- la gazéification de produits provenant de la biomasse,
- l'électrolyse de l'eau à partir d'électricité d'origine hydraulique ou nucléaire.

Les différents modes de transformation de l'hydrogène en énergie mécanique dans le véhicule ont une influence directe sur les bilans énergétiques, CO<sub>2</sub> et polluants globaux. Une diversité de chaînes de traction utilisant l'hydrogène sont envisagées : mécanique ou hybride avec un moteur à combustion interne ou avec une pile à combustible.

Les tendances suivantes se dégagent :

- Si l'on compare les véhicules fonctionnant à l'hydrogène pur produit à partir du gaz naturel et ceux fonctionnant à l'essence ou au gazole dans des moteurs à combustion interne, on constate que la technologie « pile à combustible » est la mieux placée en matière d'émissions de CO<sub>2</sub>. Le rendement des piles à combustible est meilleur. Il n'est pas limité, comme c'est le cas dans une machine thermique, par le théorème de Carnot.
- Si l'on ne comptabilise que les émissions de CO<sub>2</sub> au niveau du véhicule, l'hydrogène est très intéressant. Il n'y a plus de production de CO<sub>2</sub>, seulement de l'eau. Ce mode de comptabilité ne repose néanmoins sur aucun argument sérieux : l'effet de serre ne connaît pas de frontières. C'est un problème global et l'on se doit donc de le traiter dans sa globalité.
- Si l'on utilise de l'hydrogène sous forme liquide, l'énergie nécessaire à sa liquéfaction est importante et doit être intégrée dans le bilan énergétique et CO<sub>2</sub> global.

Dans tous les bilans, la filière de production de l'hydrogène a un impact décisif sur la demande énergétique globale et la production de CO<sub>2</sub>.

Le choix de la filière est complexe. Il dépend du contexte des ressources énergétiques internes, de la politique énergétique du pays ou de la région, du tissu industriel.

Si l'hydrogène provient d'énergies non fossiles (biomasse, ordures ménagères, etc.), le bilan est attractif. Néanmoins, les technologies requises ne sont pas disponibles aujourd'hui.

### Le stockage de l'hydrogène à bord d'un véhicule particulier

A ce jour, on peut envisager trois types de stockage d'hydrogène à bord d'un véhicule :

#### Stockage sous forme liquide à 20 K ou - 253 °C (LH2)

Cette solution a été testée sur le prototype de démonstration Fever (présenté par Renault en 1998) (figure 1). Le choix de stocker 8 kg d'hydrogène sous forme liquide (LH2) a permis d'assurer une autonomie de 500 km avec une vitesse maximale de 120 km/h. Néanmoins, les volumes et masses des technologies employées n'étaient pas satisfaisantes. On pourrait aujourd'hui grâce à l'allègement et l'évolution des technologies du module de puissance atteindre une consommation de l'ordre de 0,8 à 1,0 kg d'hydrogène pur par 100 km.

Les stockages LH2 actuels présentent un rapport d'environ 10 % entre la masse de l'hydrogène



# APPLICATIONS AUX TRANSPORTS TERRESTRES

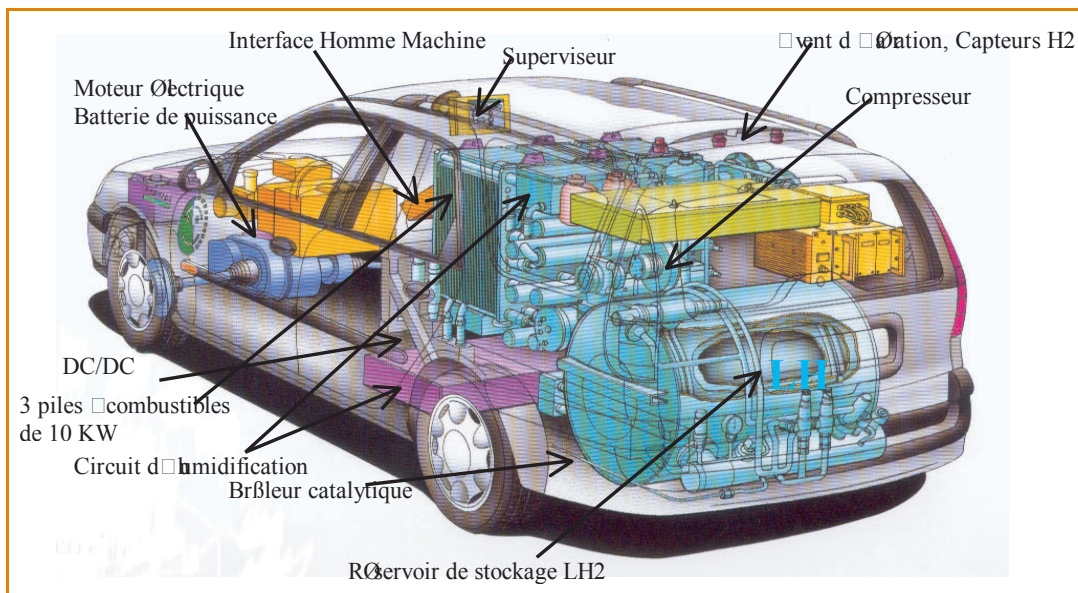


Figure 1 - Prototype de démonstration Fever (Renault, 1998).

liquide et celle du réservoir. Cela est dû à la faible masse volumique de l'hydrogène liquide. L'hydrogène liquide peut être stocké uniquement dans des réservoirs ayant une isolation thermique poussée afin d'éviter l'évaporation (« boil-off »).

Les technologies actuelles permettent d'obtenir des transferts thermiques très faibles (de l'ordre de 1 watt). Un tel réservoir permet d'éviter tout relarguage d'hydrogène pendant 3 à 12 jours. L'évaporation d'hydrogène est ensuite de l'ordre de 1 à 4 % en masse par jour selon l'isolation du réservoir. Cette évaporation de l'hydrogène peut être considérée comme une contrainte pour les conducteurs n'utilisant pas leur véhicule régulièrement. La remise en froid est alors nécessaire, ce qui implique une perte d'hydrogène ou un système de récupération par la station de remplissage.

Des événements permettent l'échappement de l'hydrogène suite à son ébullition permanente et il peut être oxydé catalytiquement pour éviter une accumulation qui serait problématique dans un garage clos.

Les durées de fabrication de ces réservoirs sont augmentées car il faut assurer un vide secondaire entre les deux parois. Un atout des réservoirs cryogéniques est leur durée de vie estimée supérieure à 20 ans. Ceci est dû principalement aux faibles pressions internes (inférieures à 10 bars).

Le remplissage du véhicule prototype en hydrogène a été assuré par une camionnette de ravitaillement sur laquelle on a installé une station prototype de remplissage mobile (figure 2). Des stations fixes de remplissage existent à Munich ou en Californie.



Figure 2 - Système de recharge en hydrogène liquide de Fever.

## Stockage sous forme comprimée (CGH<sub>2</sub>)

Pour avoir de l'hydrogène gazeux avec une densité de 70 g/litre (soit celle de l'hydrogène liquide), il faut le comprimer à une pression d'environ 1 300 bars, soit nettement plus que les pressions actuelles utilisées en gaz naturel comprimé qui sont de l'ordre de 200 à 250 bars.

L'expérience a montré qu'il est très difficile de monter au-delà de 500 bars notamment pour les raisons suivantes :

- Les cycles de remplissage-vidage induisent des phénomènes de fatigue amplifiés à hautes pressions dans la structure du réservoir. Pour augmenter la résistance au cyclage et les durées de vie, les réservoirs sont surdimensionnés.

# APPLICATIONS AUX TRANSPORTS TERRESTRES

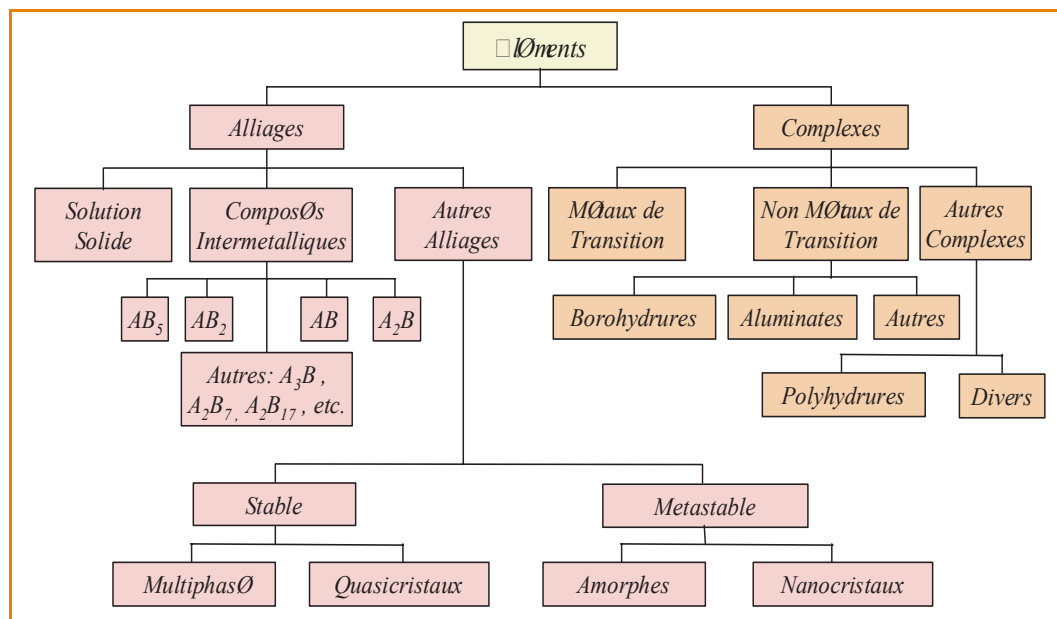


Figure 3 - Arbre généalogique des alliages et composés hydruables [4].

- Les phénomènes de fragilisation par l'hydrogène pour les métaux augmentent avec la pression. Seuls l'aluminium et les aciers austénitiques résistent assez bien. Les polymères organiques voient leur perméabilité à l'hydrogène augmenter avec la pression.
- Les composants hautes pressions (> 500 bars) ne sont pas encore développés pour les contraintes et les coûts de l'industrie automobile : réservoirs, détendeurs, soupape de sécurité, fusibles thermiques, joints d'étanchéité, etc. Ces composants sont actuellement adaptés pour l'industrie chimique où des pressions supérieures à 1 000 bars sont couramment employées (synthèse de l'ammoniac, du polyéthylène...).

En pratique, on envisage une pression de l'ordre de 350 bars, voire 500 bars. Le rapport de masse est alors de 5 kg d'hydrogène pour 100 kg de réservoir, soit moitié moindre que pour l'hydrogène liquide. Seulement au-dessus d'une pression de 80 bars, le rapport masse d'hydrogène/volume extérieur du réservoir est identique entre l'hydrogène liquéfié et comprimé.

## Stockage sur des substrats sous forme adsorbée

Il existe des substances carbonées (nanotubes de carbone, carbones activés) susceptibles de fixer en surface de l'hydrogène dans des nano- ou micropores à température ambiante et sous pression.

Le mécanisme d'emmagasinement de l'hydrogène dans les structures carbonées est de l'adsorption

moléculaire due au phénomène de capillarité, par des forces de Van der Waals [1]. La capacité de stockage en hydrogène des nanotubes est très controversée (entre 2 et 20 % en masse d'hydrogène/masse de substrat) selon les auteurs [2-3].

## Stockage sur des substrats sous forme absorbée

La majorité des métaux sont en mesure de former un **alliage** ou un **complexe** avec l'hydrogène, pour former des hydrures métalliques. On considère comme un **alliage hydrué** un matériau qui présente un changement de structure dû à l'absorption de l'hydrogène (figure 3).

L'avantage des hydrures métalliques réside dans des capacités de stockage importantes dans un faible volume (25 à 250 gH<sub>2</sub>/litre) et des valeurs massiques variant de 0,5 à 7 % H<sub>2</sub>/masse de substrat.

Les conditions de stockage et déstockage de l'hydrogène doivent être améliorées notamment au niveau de la température.

Les substrats retenus sont ceux qui présentent les meilleurs potentiels au niveau des critères suivants :

- rapport masse hydrogène récupérable/volume substrat ou masse de substrat,
- aptitude au cyclage (remplissage-vidange),
- cinétique, températures et pressions de cyclage.

D'autres critères spécifiques à chaque substrat doivent être pris en compte :

- inflammabilité de ces hydrures avec l'air (problème du recyclage),



# APPLICATIONS AUX TRANSPORTS TERRESTRES

- pollution irréversible des substrats par les impuretés présentes dans l'hydrogène,
- non-toxicité des substrats.

Les composés permettant l'adsorption ou l'absorption présentent le plus grand potentiel de découvertes sur le stockage d'hydrogène. On doit considérer l'ensemble de la fonction stockage (réservoir, substrat, conditionnement).

## Utilisation de l'hydrogène dans les piles à combustible ou les moteurs

Les constructeurs automobiles étudient l'utilisation d'hydrogène pur dans les piles à combustible. Cette solution permet d'obtenir un rendement élevé, une forte compacité et un système simple. Le véhicule ne dégage pas de CO<sub>2</sub> ou de polluants localement. Ce n'est pas le cas des carburants réformés à bord du véhicule.

BMW a fabriqué plusieurs véhicules propulsés par des moteurs à explosion et alimentés en hydrogène. Cela correspond à une évolution du moteur à allumage commandé. Il faut prendre quelques précautions pour éviter un retour de flamme vers le collecteur d'admission. On perd de 20 à 25 % en puissance par rapport à un moteur à essence mais le rendement est le même. Il faut choisir des matériaux adaptés à l'hydrogène et aux problèmes de corrosion et de lubrification. Il n'y a pas d'émission de CO<sub>2</sub>, mais quelques oxydes d'azote. Cette alternative peut être utilisée dans des véhicules hybrides.

## Aspects sécurité, distribution et perspectives

En tant que constructeur automobile, les facteurs d'acceptabilité d'un nouveau carburant par les clients doivent être étudiés attentivement.

### La sécurité

Du point de vue sécurité, l'image de l'hydrogène possède un passé négatif :

- une image du Zeppelin LZ-129 « Hindenburg » en flammes à Lakehurst le 6 mai 1937, même si ce n'est pas l'hydrogène qui a initié l'accident ;
- l'hydrogène est très inflammable, même s'il se disperse très rapidement ;
- un risque lié à la réparation non contrôlée par des personnes non formées.

Pourtant, l'hydrogène a été abondamment utilisé par le grand public au début du siècle dans le « gaz de ville » (mélange d'hydrogène et de monoxyde de

carbone). Il n'est pas polluant pour l'environnement et est neutre pour l'homme.

### La distribution

A court terme, l'investissement financier pour développer une infrastructure de distribution d'hydrogène est élevé. De puissants incitatifs seront nécessaires pour permettre l'introduction du carburant hydrogène, par exemple un privilège fiscal ou une obligation aux constructeurs comme celle mise en place par le gouvernement de Californie.

Si au début, le réseau de distribution possède une faible densité, les usagers seront limités dans leurs déplacements et ainsi l'utilisation de ce carburant sera freinée.

### Les perspectives

L'évolution de plusieurs facteurs devrait à moyen terme faire évoluer la situation actuelle et positionner l'hydrogène comme futur vecteur énergétique :

- la raréfaction du pétrole et son utilisation pour des applications privilégiées (chimie, plastiques, textiles...),
- l'utilisation croissante du gaz naturel,
- la réduction de l'effet de serre et des polluants atmosphériques,
- la diversification des énergies et la production d'énergie renouvelable.

### La question économique

Jusqu'ici, nous n'avons intentionnellement jamais abordé la question des coûts, parce qu'il est extrêmement difficile d'apprécier l'effet d'une éventuelle production de masse sur les prix de revient. L'hydrogène, comme d'autres carburants alternatifs, sera utilisé à condition que son coût de production, de distribution et d'utilisation soit compétitif face aux autres carburants. Il doit pouvoir aussi satisfaire la demande.

Néanmoins, il faut bien accepter l'idée qu'un certain nombre de facteurs défavorables devront être levés afin de positionner de manière compétitive l'hydrogène face aux autres carburants automobile :

- le coût de production et de distribution de l'hydrogène,
- le coût des systèmes de stockage sur véhicules,
- les investissements considérables qu'entraînerait une forte rupture technologique en terme de production, réparation de nouveaux composants adaptés à une chaîne de traction utilisant de l'hydrogène.

# APPLICATIONS AUX TRANSPORTS TERRESTRES



## Conclusions

L'utilisation de l'hydrogène comme carburant contribue à réduire les émissions de CO<sub>2</sub> et de polluants. Utilisé directement dans la pile à combustible, il permet d'obtenir un rendement énergétique élevé. Le stockage d'hydrogène à bord du véhicule doit être encore optimisé en terme de masse, volume, sécurité et coût. Sa production peut être réalisée à partir de diverses ressources énergétiques.

L'introduction à grande échelle de l'hydrogène comme carburant impliquera la participation des constructeurs automobiles, pétroliers, industriels, acteurs de l'environnement, mais aussi des politiques et des citoyens.

Des choix de société seront à réaliser par les différents acteurs sur les points suivants :

- Remplacer progressivement le pétrole et le gaz naturel actuellement bon marché par des énergies renouvelables en acceptant leurs coûts et leurs inconvénients ;
- Envisager de produire de l'hydrogène à partir d'énergie nucléaire, hydraulique ou éolienne par électrolyse de l'eau, ce qui serait un moyen intéressant de stocker l'énergie produite en heures creuses ;
- Consacrer un coût croissant à la préservation de la qualité de l'air et de l'environnement ;
- Accepter ou non un rationnement plus ou moins contraignant de l'énergie, avec des conséquences pour l'économie entière d'un pays et sur les modes de vie de ses habitants.

L'hydrogène s'inscrit dans une politique à long terme.

Renault et Nissan se préparent en tant que créateurs d'automobiles à ces hypothèses d'évolution.

## Références

- [1] Dillon et al., *Proceedings of the 1999 US DOE Hydrogen Program Review*, mai 1999.
- [2] Dillon O.C., Chen et al., *App. Phys. Letters*, 1998, 73, p. 2119.
- [3] Yang, *Carbon*, 2000, 38, p. 623.
- [4] Sandrock, *Journal of alloys and compounds*, 1999, 293, p. 877.



J.-P. Hermann

### Jean-Paul Hermann

est secrétaire exécutif au Technocentre Renault\*.



F. Heurtaux

### Fabien Heurtaux

est responsable des stockages de gaz (hydrogène...) et des études de sûreté de fonctionnement des systèmes piles à combustible au sein de la Direction de la recherche dans le Département des systèmes énergétiques de Renault\*\*.

\* E-mail : jean-paul.hermann@renault.com

\*\* E-mail : fabien.heurtaux@renault.com