

## L'hydrogène : solution pour des transports automobiles inscrits dans une politique de durabilité?

Grandjean Jonathan, L3 Géosciences, Jonathan.Grandjean-Dias@e.ujf-grenoble.fr

Daly James, L3 Géosciences, James-Louis.Daly@e.ujf-grenoble.fr

### Abstract

Hydrogen, through the use of fuel cells, is one of the possible solutions to answering the need for an environmental-friendly means of producing energy for transportation. The use of such technology would provide numerous environmental improvements in this field. However, several aspects which stem from the hydrogen's life-cycle prove to have a negative environmental impact, in particular, the production stage, storage, and routing of hydrogen. Therefore, transportation means making use of hydrogen-powered fuel cells are not a miracle solution to global warming and worldwide oil depletion.

**Mots Clefs:** hydrogen, energy, environmental impact, transportation

### 1 Introduction

L'explosion de la demande énergétique, l'épuisement des ressources fossiles et le réchauffement climatique imputable aux activités humaines sont des tendances lourdes auxquelles la société actuelle est confrontée. Pour y répondre, il se met progressivement en place une « logique durable », qui prend en compte les enjeux environnementaux généraux de la planète. Tous les secteurs sont concernés, cependant les efforts fournis jusqu'à aujourd'hui ne permettent pas de répondre à ces problématiques.

Si depuis 20 ans, la pollution atmosphérique industrielle a baissé de près de 50%, la pollution due aux transports a augmenté de plus de 30%, la cause principale étant l'accroissement du trafic automobile. C'est en milieu urbain que la situation est préoccupante, une voiture consomme en ville quatre fois plus que sur autoroute. Au niveau mondial, le secteur des transports est le deuxième secteur émetteur avec 7 Gt de CO<sub>2</sub> émis en 2005, derrière le secteur de l'énergie comprenant la production d'électricité et de chaleur. Les projections de l'Agence Internationale de l'Energie indiquent que ces émissions vont augmenter jusqu'à atteindre 18Gt en 2050 dans le scénario de référence [1]. Réduire l'impact environnemental des transports est donc un objectif primordial.

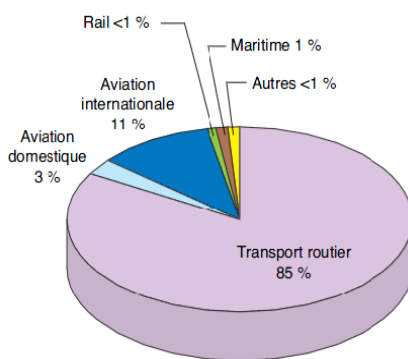
Plus particulièrement, ce sont les transports routiers qui représentent la plus grosse part des émissions de CO<sub>2</sub> liées aux transports : en France ils comptaient pour 85% du total des émissions en 2005. Les industriels de l'automobile

l'ont compris, et produisent déjà des modèles toujours moins gourmands en carburant. Cependant, cela ne suffit pas, et n'affranchit pas les transports de leur dépendance des énergies fossiles. Il s'avère donc nécessaire de trouver de nouvelles sources d'énergie qui permettent de répondre à la demande tout en améliorant le bilan environnemental.

L'un des concurrents potentiels des moteurs à usage automobile fonctionnant grâce aux énergies fossiles est la pile à combustible. Il en existe différents types pouvant être alimentées en méthanol, en gaz de synthèse, ou en hydrogène. Cet article s'intéresse à la pile à combustible ayant l'hydrogène en tant que vecteur énergétique.

Le principe des piles à combustible est de transformer de l'énergie chimique en énergie électrique par une réaction d'oxydoréduction, de la même façon qu'une pile traditionnelle. Elle se compose de deux électrodes séparées par un électrolyte assurant la diffusion des protons H<sup>+</sup>. Ceux-ci passent par l'électrolyte et les électrons e<sup>-</sup> passent eux par les plaques bipolaires, et l'on peut récupérer une énergie électrique. Un véhicule fonctionnant à l'hydrogène est donc un véhicule électrique alimenté par une pile à hydrogène au lieu d'une batterie.

Les mérites de l'hydrogène sont souvent vantés, mais l'on doit se poser la question de savoir quel est le réel impact de cette technologie lorsqu'elle est associée aux transports, et si elle peut effectivement contribuer à l'amélioration de la situation environnementale globale. En somme : les modes de transports à



Source : Statistiques de l'OCDE

**Figure 1:** Les émissions françaises de CO<sub>2</sub> dans les transports en 2005

hydrogène s'inscrivent-ils dans une logique durable?

## 2 Méthodologie

Cet article a été réalisé grâce à un travail de recherche bibliographique. L'hydrogène et ses différentes applications sont connus et étudiés depuis longtemps, ce qui nous a permis de trouver facilement des documents traitant du sujet. Cependant, très peu d'entre eux n'abordaient les différentes étapes du cycle de vie de l'hydrogène tout en prenant en compte la notion de développement durable.

Nous avons donc effectué des recoupements dans l'ensemble des informations que nous avons obtenues à partir de livres, de sites scientifiques ou industriels, de magazines de vulgarisation scientifique, d'articles techniques, ainsi que de rapports scientifiques.

## 3 Etude

### 3.1 Aspects positifs de l'hydrogène

La pile à combustible présente de nombreux avantages lorsqu'elle consomme de l'hydrogène.

La pollution directement rejetée par la pile à combustible ne se compose que de vapeur d'eau, il n'y a pas de rejets particuliers ou de gaz dangereux lors de son utilisation. Cet argument est très souvent employé par les acteurs pro-hydrogène, c'est notamment l'argument de choc des industriels face au public. Si ce type de système devient généralisé aux modes de transports urbains, ceci présente l'avantage de réduire à zéro la pollution intra-muros et de l'exporter aux zones de production d'hydrogène.

Le système est aussi très peu encombrant. Ceci laisse entendre la possibilité de développer un système de transfert de la pile à combustible d'un véhicule à un autre, ce qui a pour résultat d'augmenter la durée de vie du produit et de réduire le nombre d'unités produites en usine et donc les infrastructures de recyclage potentielles.

	Densité énergétique (MJ/kg)	Densité énergétique (MJ/L)
Hydrogène	120	0,01
Essence	42,7	31,2
Diesel	41,9	36,5
Gaz Naturel	50,4	0,04
Méthanol	19,9	39,77

**Tableau 1:** Densité énergétiques de carburants, à pression atmosphérique et température normale [2]

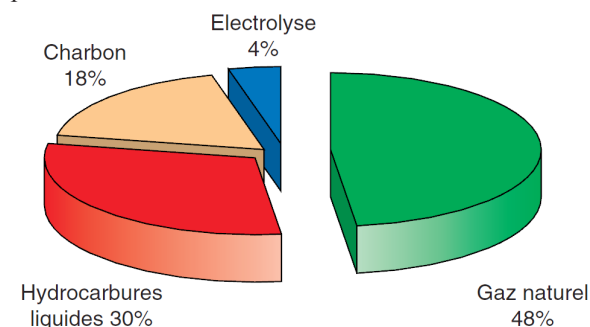
L'hydrogène possède une densité énergétique massique importante : un kilogramme d'hydrogène contient trois fois plus d'énergie que l'essence ou le diesel. La pile à combustible dispose également d'un rendement énergétique très élevé : entre 40% et 70%,

contre 20% à 30% pour un moteur à essence (rendement limite du cycle de Carnot) [3]. Cela se traduit par un transfert efficace d'énergie vers le moteur.

Ces caractéristiques tendent à indiquer que l'hydrogène peut permettre l'existence de véhicules propres, et l'idée d'une voiture dont le moteur ne rejette que de l'eau est séduisante. Pourtant, cela ne permet pas de déclarer l'hydrogène comme étant la panacée écologique, car l'étude est incomplète : c'est le cycle de vie complet de l'hydrogène qui doit être pris en compte, de la production jusqu'à l'utilisation.

### 3.2 La production de l'hydrogène

L'hydrogène est un des éléments les plus abondants, cependant il n'existe nulle part sur notre planète sous une forme directement exploitable, contrairement au cas des combustibles fossiles. Il faut donc utiliser une matière première contenant de l'hydrogène et utiliser un procédé industriel pour le séparer des autres atomes, ce qui implique de dépenser de l'énergie qui peut être d'origine renouvelable ou pas. Plusieurs procédés de fabrication existent.

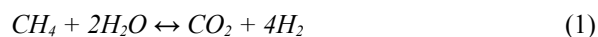


**Figure 2:** Principales origines de l'hydrogène produit aujourd'hui dans le monde

#### 3.2.1 Les technologies thermo-chimiques de production

Aujourd'hui, l'hydrogène est produit principalement à partir de carburants fossiles. Ces techniques ne sont pas viables sur le long terme en raison de la durée de vie limitée des stocks.

-Le vaporeformage de gaz naturel. Cette méthode est la plus utilisée dans l'industrie. Le gaz naturel est majoritairement composé de méthane. Le procédé de vaporeformage se compose de deux réactions : la première est la réaction du méthane avec l'eau qui produit du CO et de l'hydrogène, la seconde est la réaction de Water Gas Shift entre l'eau et le CO qui produit du CO<sub>2</sub> et du H<sub>2</sub>. Ces procédés sont aujourd'hui bien maîtrisés, des unités produisant de 20 à 100.000 m<sup>3</sup>/h existant déjà [4],[5]. Le bilan des deux réactions s'écrit :



- L'oxydation partielle. Ce processus de production est aussi maîtrisé, il consiste en la réaction entre un carburant (gaz naturel, hydrocarbures, charbon) et de l'oxygène. Suite à la présence de monoxyde de carbone, celle-ci est suivie d'une purification du gaz. Les deux technologies majeures au niveau industriel sont les procédés Shell et Texaco.

- La gazéification du charbon. Ce processus un temps abandonné retrouve de l'intérêt à cause de l'augmentation du prix du pétrole. Il est aussi intéressant car il y a co-production d'électricité, d'hydrogène et de carburants liquides. Il y a mélange du charbon avec de l'eau et de l'air à 1000°C et sous haute pression, ce qui permet d'obtenir un gaz contenant en majorité du CO et de l'hydrogène [4],[5]. La réaction générale de gazéification s'écrit :



### 3.2.2 La décarbonisation et le piégeage du CO<sub>2</sub>

La production d'hydrogène à partir de matières fossiles nécessite donc de l'énergie. Les rendements d'efficacité sont environ de 72% à partir du gaz, 76% à partir du pétrole, et de 60% à partir du charbon. Cependant, pour une unité de chaleur produite, la combustion directe du combustible fossile génère moins de CO<sub>2</sub> que de produire de l'hydrogène à partir de ce combustible.

La décarbonisation des combustibles ne réduira pas significativement les rejets CO<sub>2</sub> dans l'atmosphère. La séquestration du CO<sub>2</sub> est une possibilité pour rendre ces procédés moins polluants. Les techniques de piégeage dans les sols ou dans l'océan pourraient donc réduire

efficacement l'impact environnemental des procédés thermochimiques de production d'hydrogène. Cependant, ces techniques ne sont pas encore abouties.

### 3.2.3 La purification de l'hydrogène

Les différentes méthodes de production aboutissent à un mélange de dihydrogène et d'autres gaz, certains pouvant gêner le fonctionnement des piles à combustibles. Il faut donc purifier ce mélange, ce qui implique une consommation d'énergie, cependant, nous n'avons pas réussi à obtenir de valeurs pour quantifier celle-ci. Différents procédés existent et permettent d'obtenir une pureté allant jusqu'à 99,999% en volume [6].

### 3.2.4 L'électrolyse de l'eau

Le principe de l'électrolyse de l'eau est le suivant : l'action d'un courant électrique décompose l'eau en dioxygène et en dihydrogène. Cette réaction se produit dans une cellule électrolytique constituée de deux électrodes d'un générateur d'une électrolyte (souvent une membrane échangeuse de protons), et est l'inverse de celle qui a lieu dans une pile. Le rendement énergétique est de l'ordre de 70%, mais peut théoriquement atteindre 85%. [7]. La réaction générale de la décomposition de l'eau s'écrit :



L'utilisation de l'eau comme carburant semble tenir de l'utopie. Pourtant, l'électrolyse de l'eau est le plus ancien procédé de fabrication d'hydrogène. Cependant, cette technique est très gourmande en énergie. Cette consommation élevée en électricité en fait une méthode coûteuse et polluante, elle ne représente que 4% de la production globale et n'est aujourd'hui utilisée que dans quelques installations particulières. Pour avoir un intérêt d'un point de vue environnemental, il faudrait donc que l'électricité utilisée soit d'origine renouvelable. Il faut donc augmenter la part de ces énergies dans la production électrique totale [8]. De petites installations produisant leur propre énergie solaire ou éolienne constituent une alternative intéressante, cependant les coûts trop élevés de l'hydrogène ainsi produit ne justifient pas encore le développement de cette filière [9].

Concernant le futur de cette technologie, les avis des experts divergent. Certains y voient la seule solution viable à long terme une fois perfectionnée pour

produire de l'hydrogène tout en présentant la possibilité de réduire les émissions de CO<sub>2</sub> à zéro. D'autres au contraire y voient une technologie trop peu mature et inadaptée à une production

massive dans un futur proche, ne permettant donc pas de résoudre le problème de la production d'hydrogène assez rapidement, et ne faisant que déplacer le problème de la pollution.

A l'heure actuelle, seul le nucléaire se présente comme source énergétique potentielle pour une production massive d'hydrogène par électrolyse. Ceci implique d'autres problèmes d'ordre environnemental, mais ne produit pas de gaz à effet de serre. Mais, le nucléaire ne constituerait pas une solution à long terme : en ne

Matière première	Consommation énergétique (en kJ)	Emissions de CO <sub>2</sub> (en kg)	Rendement énergétique (en %)
Gaz naturel	2562	0,8	72 à 82
Hydrocarbures liquides	3100	1,7	53 à 67
Charbon	3570	1,6	48
Electrolyse	11800	0	70 en moyenne

**Tableau 2:** Caractéristiques énergétiques des modes de production de l'hydrogène [3]

représentant que 5% de l'approvisionnement énergétique mondial, la durée de vie du nucléaire actuel à base de fission d'uranium ne dépasse pas un siècle et demi. Cette solution ne peut donc être que temporaire.

### 3.2.5 Les procédés photolytiques

De nombreux chercheurs travaillent sur des procédés photobiologiques de production d'hydrogène. Certains microbes photosynthétiques produisent en effet de l'hydrogène à partir d'énergie solaire au cours d'activités métaboliques. Grâce à des catalyseurs, le rendement de production d'hydrogène a pu atteindre 24% en laboratoire, et pourrait s'avérer meilleur encore dans les décennies à venir [6].

## 3.3 Le stockage de l'hydrogène

Malheureusement, la production n'est pas le seul facteur empêchant l'utilisation à grande échelle de l'hydrogène. En effet, le deuxième inconvénient majeur rencontré est celui du stockage et du transport. Nous parlerons des principales méthodes de stockage connues à ce jour, ainsi que leurs avantages et inconvénients, puis nous aborderons le sujet concernant le transport de l'hydrogène.

### 3.3.1 Le stockage sous pression

Le stockage sous pression est une technique utilisée dans l'industrie depuis très longtemps sous 200 bars. Aujourd'hui, des réservoirs spéciaux pour travailler sous 350-700 bars ont été créés. La compression de l'hydrogène nécessite de l'énergie, plus ou moins importante en fonction du processus utilisé. Généralement, on procède à une compression en plusieurs paliers en refroidissant le système à l'aide d'azote liquide, car un remplissage rapide entraîne une augmentation de température.

Le grand avantage du stockage hyperbare est qu'il consomme assez peu d'énergie primaire pour densifier le gaz : environ 9% sous 350 bars et 13% sous 700 bars [10], de plus c'est une technologie qui est déjà maîtrisée. Cependant, il est encore impossible de réaliser des réservoirs répondant aux critères d'étanchéité, de résistance aux chocs, et de volume, qui leur permettrait d'être adaptés à des automobiles par exemple.

Sur le plan économique, il est estimé que pour la prochaine décennie, le coût d'un réservoir mobile pressurisé devrait s'établir à moins de 60 euros l'unité (sur la base d'une production de masse).

Pour envisager une autonomie énergétique voisine de celle des véhicules actuels (soit environ 500 km), le réservoir devra avoir un volume minimal de 125 litres environ pour alimenter une pile à combustible et environ 250 litres pour un moteur à combustion interne (sans tenir compte des enveloppes de la

protection et des systèmes auxiliaires) [10], ce qui est bien plus important que les réservoirs équipant les véhicules actuels. Modifier les véhicules existant pour leur permettre d'utiliser des réservoirs avec un volume aussi important entraînerait énormément de changements (modification des normes, taille et puissance du véhicule, et donc des infrastructures, voiries...) qui pourraient avoir un grave impact environnemental. C'est pourquoi les autres modes de stockage sont plus attirants que le stockage hyperbare, ce dernier étant néanmoins très utile pour le stockage statique.

### 3.3.2 Le stockage cryogénique

Cette méthode consiste à stocker l'hydrogène sous forme liquide. Cela le rend plus facile à manipuler que l'hydrogène sous pression, et il prend moins de place pour la même quantité d'énergie fournie, ce qui pourrait le rendre viable dans l'industrie automobile (BMW, Opel, et DaimlerChrysler ont opté pour ce type de stockage).

Les réservoirs possèdent deux parois, séparées par un espace vide afin d'éviter les pertes thermiques par convection. Ils doivent répondre aux critères d'étanchéité à l'hydrogène ainsi que de résistance au froid, ce qui est difficile.

Malheureusement, il y a encore de nombreux désavantages : la liquéfaction se fait à 77 °K (soit -193°C) et consomme de 30 à 40% de l'énergie primaire disponible [11]. De plus, le phénomène d'évaporation entraîne une perte massique évaluée entre 0,1 et 4% par jour de stockage. Des tests effectués sur des réservoirs sphériques ont montré qu'un réservoir de 1000 Litre perd 1% d'Hydrogène par jour, tandis qu'un réservoir de 150 Litres en perd 2%, et qu'un réservoir de 3400 m<sup>3</sup> (au centre spatial de la NASA) seulement 0,05% [12]. Enfin, les risques sont encore mal connus.

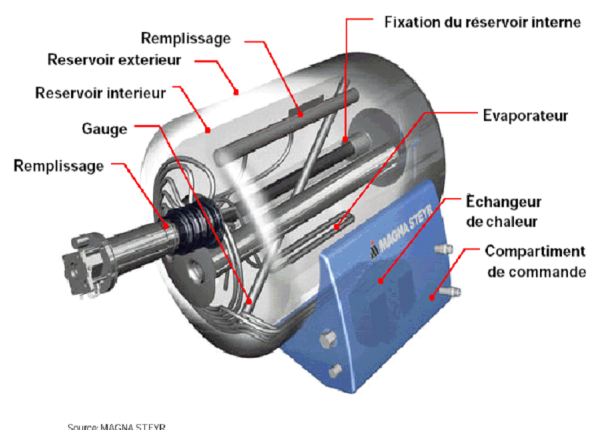


Figure 3: Concept de réservoir à hydrogène liquide

Des réservoirs cryogéniques ont été expérimentés en Europe pouvant embarquer 5 kg d'hydrogène liquide,

ce qui correspond à environ 400 Km d'autonomie. Ces réservoirs, composés de parois entièrement métalliques, pouvaient peser jusqu'à 150 Kg. De plus, les stations de distributions d'hydrogène liquide nécessitent des équipements auxiliaires et de sécurité coûteux, comme la connectique et conduits de remplissage, un système de re-conditionnement du gaz évaporé...

Cette technologie présente l'avantage de pouvoir être adaptée à des modèles « mobiles » tels que les voitures. Cependant, la consommation d'énergie nécessaire à la liquéfaction est encore trop importante pour être durable. Les défis à venir consisteraient à trouver un moyen de réduire cette consommation d'énergie primaire, ainsi que d'alléger les réservoirs, par l'utilisation de nouveaux matériaux, afin de pouvoir les adapter aux véhicules existants sans nécessiter une consommation accrue de carburant à cause du poids élevé du véhicule.

### 3.3.3 Le stockage solide

Certains matériaux poreux sont connus pour leur excellente capacité à adsorber les gaz moléculaires ou atomiques grâce au principe de Van Der Waals, tels que le charbon actif.

Aujourd'hui, les nanostructures optimisées de carbone présentent les meilleures performances à température ambiante et pression normale, de l'ordre de 1 à 2% massique. Avec certains matériaux, tels que des nanofibres de carbone, et à très basse température (-186°C) et haute pression (60 bars) on peut atteindre des densités d'environ 8% massique.

Une autre méthode consiste à stocker l'hydrogène dans des hydrures métalliques, entre leurs atomes. Certains alliages permettraient de stocker 150 kg d'hydrogène par m<sup>3</sup>, ce qui correspondrait à des réservoirs de

26 litres pour avoir les 4 kg d'hydrogène nécessaires à l'autonomie d'une voiture. Cependant, les réservoirs ne répondent pas au critère de mobilité, ils sont bien trop lourds. De plus, le coût prohibitif des nanocarbones et de certains hydrures est un obstacle majeur à une production de masse.

Cette technologie de stockage en est encore à ses débuts, mais pourrait se révéler prometteuse.

### 3.3.4 Le stockage hybride

Cette méthode consiste à confiner en réservoir pressurisé (200 à 350 bars) les meilleures hydrures lourds (alliages dits BCC ou cubiques à corps centré), ainsi on les sature d'hydrogène jusqu'à leur capacité limite, soit environ 3,7% massique actuellement, de plus le volume laissé entre les grains permet de stocker encore plus de gaz à haute pression. Le stockage obtenu peut se révéler viable (>6% massique [10]) pour certains constructeurs automobiles.

Cependant, il reste encore à tester les réservoirs afin de voir si ils répondent aux critères de résistance mécanique et thermiques nécessaires pour ce type de stockage.

## 3.4 Le transport de l'hydrogène

Pour que l'hydrogène puisse répondre aux critères d'un développement durable, il faut également se pencher sur le problème du transport, qui entraîne une consommation d'énergie. Nous allons passer en revue quelques modes de transports existants.

### 3.4.1 Le transport de l'hydrogène hyperbare

Le principal souci rencontré est le faible pouvoir calorifique de l'hydrogène (10,8 MJ/Nm<sup>3</sup>) par rapport au gaz naturel (36,8 MJ/Nm<sup>3</sup>), soit trois fois moins d'énergie par unité de volume par rapport au gaz naturel, et jusqu'à quinze fois moins par rapport au pétrole. Il faudrait donc trois fois plus de camions pour transporter la même quantité d'énergie qu'avec du gaz naturel, sachant que les réservoirs haute-pression d'hydrogène sont également bien plus lourds, ce qui entrainerait encore d'avantage de pollution.

Il existe bien le transport d'hydrogène par pipe-line, mais ce dernier coûte environ 50% plus cher que celui

		Unités centralisées	Unités décentralisées
Stockage	Compression entre 20 et 80 MPa	10 à 15 %	
	Liquéfaction	30,00%	150,00%
	Hydrures	20 à 50%	
Transport	Camions	100% pour 500km	
	Hydrures	1 à 4 %	
	Sur place		40 à 75%

**Tableau 3:** Récapitulatif des pertes d'énergie liées au transport et au stockage de l'hydrogène [14]

du gaz naturel, et il est responsable de fragilisation intergranulaire des matériaux si il est pur (les impuretés présentent dans l'hydrogène gazeux

permettent de passer outre ce problème), ce qui nécessite d'adapter les tuyaux pour leur permettre de résister [13].

### 3.4.2 Le transport de l'hydrogène liquide

Ce type de transport est plus indiqué pour la route, l'hydrogène liquide occupant moins d'espace que

l'hydrogène hyperbare. Mais d'importants problèmes persistent. En effet, l'hydrogène liquide doit rester à une température de 77 °K, il y a donc de l'évaporation, ce qui peut entraîner des pertes plus ou moins importantes en fonction de la distance à parcourir et du volume transporté.

Actuellement, le transport de l'hydrogène par les routes n'est pas du tout une solution viable, les risques d'accidents sont élevés et la perte de l'hydrogène liée à la distance de transport est loin d'être négligeable. Les gazoducs présentent un taux de perte relativement faible, qui nous permettrait de privilégier cette option. Cela nous obligerait cependant à créer de nombreuses installations afin de pouvoir transporter l'hydrogène sur de longues distances, en plus d'adapter les tuyaux avec des matériaux résistants à ce gaz.

C'est pourquoi la meilleure solution semble être la création d'installations décentralisées, ce qui diminuerait les besoins de transport, et donc les pertes liées à ce dernier.

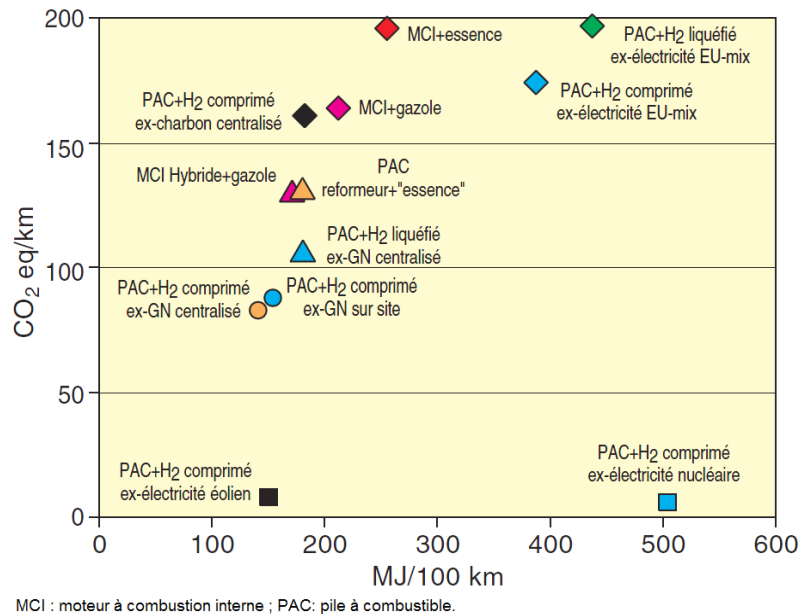
#### 4 Conclusion

L'hydrogène présente indéniablement des avantages, en termes de rendements et d'émissions de gaz à effet de serre, ce qui pourrait participer à sa généralisation dans un contexte de souci croissant concernant le réchauffement climatique et le tarissement des sources d'énergies fossiles. Cependant, sa place dans les systèmes énergétiques n'est pas à surestimer.

Il existe une grande dépendance des émissions de gaz à effet de serre vis-à-vis de la technologie utilisée pour la production, et celle-ci est actuellement basée sur des méthodes exploitant des sources non-renouvelables, notamment le gaz naturel. Des outils existent, ou sont en cours de développement tel que la séquestration de CO<sub>2</sub> afin de rendre ces méthodes plus « propres », mais sont coûteuses et ne peuvent encore s'appliquer à une production de masse, de plus ces outils ne permettent pas de s'affranchir des sources d'énergie fossiles. Le mode de production à privilégier serait donc l'électrolyse, mais uniquement s'il est associé à des énergies renouvelables ou nucléaire. Le nucléaire n'a pas la capacité de fournir assez d'énergie pour une production à grande échelle et a une durée de vie limitée. Les infrastructures existantes dans le renouvelable sont quant elles aussi largement insuffisantes, il faudrait donc continuer le développement de ce secteur.

La question du stockage est aussi un frein à l'utilisation de l'hydrogène, et il n'existe pas de solution unique. Certaines technologies sortent du lot dans le cas d'une possible utilisation dans le domaine automobile, telle que la cryogénie, qui présente à la fois des performances intéressantes ainsi que des dimensions acceptables, malgré un coût énergétique trop important à l'heure actuelle, ainsi que des risques nécessitant du matériel spécifique.

La Figure 4 synthétise ces aspects, de la production à l'utilisation, et on observe effectivement que dans l'état actuel des connaissances, la pile à combustible fonctionnant à l'hydrogène ne permet de gains significatifs sur le plan des émissions que si l'hydrogène est le produit d'une électrolyse grâce à de l'énergie nucléaire ou renouvelable.



MCI : moteur à combustion interne ; PAC : pile à combustible.

Figure 4: Résultats « du puits à la roue » des principales filières hydrogène [15]

Ces aspects nous amènent à conclure que l'hydrogène n'est pas inscrit dans une optique de durabilité, du moins pas pour le moment. Cependant, ces avantages et inconvénients sont relatifs à la période actuelle, et le potentiel de ce vecteur énergétique et les résultats encourageants laissent entrevoir que toutes les possibilités de recherche n'ont pas encore été découvertes. Il est cependant probable que l'émergence de l'hydrogène dans le secteur des transports soit relativement lente, et cette technologie ne sera probablement pas exclusive, c'est-à-dire que l'hydrogène cohabitera avec d'autres vecteurs énergétiques.

### Références

- [1] Energy Technology Perspectives, Agence Internationale de l'Energie, 2008
- [2] <http://www.hydrogen-planet.com>
- [3] L'actualité Chimique, L'hydrogène, carburant de demain?, 2001
- [4] Production d'hydrogène à partir de combustibles fossiles, Association Française de l'hydrogène, P. Marion, S. Vinot, 2009
- [5] Générateurs Electrochimiques, P. Mayé, 2010
- [6] CLEFS-CEA n°50/51 Hiver 2004/2005
- [7] Hydrogen Fuel Cells for Road Vehicles, P. Corbo, F. Migliardini, O. Veneri, 2011
- [8] Production d'Hydrogène par électrolyse de l'eau, applications à des systèmes de petite capacité, TOTAL, 2004
- [9] Développement des marchés de l'hydrogène : Demande prospective dans l'industrie (Demande prospective dans l'industrie, production par énergie éolienne, stockage massif et distribution aux véhicules en région), Résumé public, ADEME, 2010
- [10] Problématiques du stockage d'énergie, Y. Brunet, 2009
- [11] <http://www.annso.freesurf.fr/StockH2.html>
- [12] L'énergie, C. Ngô, 2008
- [13] [http://www.cea.fr/jeunes/themes/les\\_nouvelles\\_energies/l\\_hydrogene/distribution\\_et\\_stockage\\_de\\_l\\_hydrogene](http://www.cea.fr/jeunes/themes/les_nouvelles_energies/l_hydrogene/distribution_et_stockage_de_l_hydrogene)
- [14] [http://www.enpc.fr/fr/formations/ecol\\_virt](http://www.enpc.fr/fr/formations/ecol_virt)
- [15] Well-to-Wheels analysis of future automotive fuels and powertrains in the European context, EUCAR, JRC, CONCAWE, 2003