



Académie des technologies

Pour un progrès raisonné, choisi et partagé

10

questions sur l'hydrogène

Jean Dhers

Mars 2005

10

questions sur l'hydrogène

Jean Dhers*

* Président du Centre de recherches en Électrotechnique et en Électronique de Belfort (CREEBEL), Membre fondateur de l'Académie des technologies.

Introduction

Les questions que se pose le public sur l'énergie et sa relation avec l'environnement portent sur les avantages et inconvénients de chacune des sources et sur les zones incertaines, notamment celles qui nécessitent de la recherche et du développement plus ou moins longs avant que des réponses puissent être apportées. Le rapport de synthèse de la Commission Energie et Environnement" « *Prospective sur l'énergie au XXI^e siècle* » aborde l'ensemble de ces questions.

L'Académie des technologies a cependant souhaité qu'à côté de ce rapport de synthèse, des sujets spécifiques soient abordés sous une forme plus courte de « 10 questions sur... », ces questions pouvant porter sur une énergie particulière : charbon, pétrole, gaz, biomasse, hydrogène... ou sur un aspect particulier de la relation énergie-environnement, par exemple les déchets nucléaires ou le développement des véhicules hybrides.

C'est le sujet de l'hydrogène qui est abordé dans ce dossier.

La prise de conscience de la raréfaction prochaine des ressources pétrolières, et de la nécessité d'aller vers des combustions propres n'émettant pas ou peu de CO₂ pour accompagner le développement inéluctable des transports, donne de l'ampleur aux recherches visant à développer d'autres carburants, parmi lesquels l'hydrogène (ou des dérivés de l'hydrogène).

L'explosion des recherches sur l'hydrogène-énergie est mondiale, assortie de budgets impressionnants et donne lieu à des accords de coopération internationale, dont le dernier en date IPHE (***International Partnership For Hydrogen Economy***) est une proposition américaine de coopération mondiale pour accélérer l'entrée dans ce que certains appellent déjà "*l'économie de l'hydrogène*". L'hydrogène n'est pas une ressource énergétique, on ne trouve pas d'hydrogène dans la nature comme on trouve du charbon, du pétrole ou du gaz naturel. L'hydrogène est tellement réactif qu'il n'existe pas sous forme de corps simple, mais seulement combiné à d'autres, comme l'oxygène dans l'eau, ou des combinaisons d'oxygène et de carbone dans les hydrocarbures ou à des métaux dans les hydrures. Il faut donc l'extraire de ces combinaisons en dépensant l'énergie nécessaire pour vaincre les liaisons chimiques correspondantes, en général le stocker et le transporter, puis l'utiliser ultérieurement dans des réactions qui libéreront des quantités d'énergie thermique, mécanique, électrique infiniment supérieures à celle nécessaire à son extraction.

L'hydrogène est donc un vecteur d'énergie comme l'est l'électricité. Certains le voient comme vecteur énergétique essentiel du futur, utilisable pour une motorisation propre des véhicules ou pour la génération de chaleur et d'électricité résidentielle à travers des piles à combustibles ou en combustion directe, ou encore comme élément de base de la synthèse

de carburants liquides. Est-ce un rêve ? Sa médiatisation n'est-elle pas excessive ? Cet attrait mérite d'en analyser un peu plus en détail les différentes facettes.

En demandant à M. J. Dhers de répondre à "10 questions", la Commission Energie & Environnement de l'Académie des technologies entend proposer aux citoyens qui souhaitent être éclairés sur ce sujet des informations à jour et objectives, lui permettant de se construire une opinion étayée sur ce thème d'avenir, en se projetant vers 2030/2050.

10 questions sur l'hydrogène

- 1. L'hydrogène peut-il être une nouvelle technologie de l'énergie dans le contexte du développement durable ?**
- 2. L'hydrogène est-il vraiment un vecteur d'énergie ?**
- 3. Quels seraient les avantages de l'hydrogène dans les applications énergétiques ?**
- 4. Pourquoi avoir attendu tant de temps pour s'intéresser à l'hydrogène ?**
- 5. A quelle date aura-t-on besoin du vecteur hydrogène ?**
- 6. Dans le cadre du développement durable, sait-on produire économiquement l'hydrogène pour les besoins énergétiques, en particulier pour le transport terrestre ?**
- 7. L'hydrogène est-il le vecteur d'énergie le mieux adapté aux transports terrestres pour le futur ?**
- 8. Comment distribuer l'hydrogène pour les besoins du transport terrestre ?**
- 9. Quelles sont les difficultés du stockage de l'hydrogène pour l'application transports terrestres ?**
- 10. Comment s'articulent les grands programmes de recherche sur l'hydrogène ?**

1. L'hydrogène peut-il être une nouvelle technologie de l'énergie dans le cadre du développement durable ?

L'hydrogène est un gaz dans les conditions normales de température et de pression, il n'est ni toxique ni polluant. Ce n'est pas une énergie primaire¹ et il est fort utilisé pour ses propriétés physiques et surtout chimiques dans l'industrie, pour laquelle il est produit à partir des hydrocarbures par vapoc cracking ou par reformage. La production mondiale est de 5 millions de tonnes et rentre pour 50% dans la fabrication d'ammoniac et d'engrais, pour 30% dans le raffinage des carburants et pour 20% dans des usages divers en chimie.

Sur terre, l'hydrogène n'existe qu'à l'état combiné dans de nombreux composés très répandus dont l'eau, les hydrocarbures, les substances organiques, la biomasse, les hydrures etc., d'où il faut l'extraire en consommant beaucoup d'énergie (ce qui est la conséquence de sa grande réactivité).

Néanmoins on doit rappeler que l'hydrogène est dans l'Univers (dont il constitue 98% de la masse) la principale ressource en énergie qu'il dispense dans les étoiles non pas par combustion avec de l'oxygène comme sur Terre, mais par fusion nucléaire de ses noyaux pour former de l'hélium. Il est donc à l'origine de l'énergie solaire qui, sur Terre, est ou a été créatrice de toutes les ressources énergétiques utilisables, fossiles, renouvelables intermittentes ou non comme la biomasse.

Si on s'intéresse aux caractéristiques thermiques de l'hydrogène (pouvoirs calorifiques inférieur et supérieur) on constate que son contenu énergétique est 5 fois celui du charbon ou 2 fois celui du gaz naturel. On peut donc lui faire jouer un rôle dans le contexte énergétique et puisque il n'est ni polluant, ni toxique et que sa combustion dans l'air ne produit que de l'eau, alors on peut théoriquement envisager de l'utiliser dans le cadre

¹ Une énergie est communément dite primaire lorsqu'elle est directement issue d'une ressource (énergétique) existante sur certains sites de la planète (charbon, gaz naturel, énergie hydraulique, éolienne, géothermique, solaire, biomasse), dont on peut l'extraire par une transformation chimique (oxydation de combustion pour charbon, pétrole, gaz, biomasse, mécanique pour l'hydraulique et l'éolien), thermique pour le géothermique et le solaire thermique, ou de physique électronique pour le solaire photovoltaïque.

L'électricité et l'hydrogène ne sont pas des ressources existant naturellement sur la planète et ne sont donc ni des ressources énergétiques, ni des énergies primaires.

Ainsi, dans le contexte énergétique actuel, tout reste à établir (technologies à utiliser, actionneurs, domaine d'applications, analyses de la valeur, échéancier et contexte d'utilisation, sécurité, normalisations, acceptation par le public etc.) pour utiliser l'hydrogène à des fins énergétiques.

Néanmoins il sera intéressant de comparer les facteurs de mérite des vecteurs électricité et hydrogène.

L'hydrogène a des propriétés énergétiques qui ressemblent à celles du gaz naturel : un pouvoir calorifique massique de 119 930 kJ/kg soit 2 fois celui du gaz (50020 KJ/kg), une température de flamme de même ordre de grandeur à savoir 2 318 K pour l'hydrogène et de 2 148 K pour le gaz, une chaleur spécifique 14 266 J/kg, autrement dit sa combustion dégage beaucoup d'énergie. Par contre sa densité est très faible, l'hydrogène gazeux à la température ambiante a une densité de 0,090 kg/Nm³, celle du gaz est de 0,65 kg/Nm³, à -253°C la densité à l'état gazeux est 1,34 kg /m³ et la densité à l'état liquide est de 70,8 kg/m³. Si les limites d'inflammabilité et de détonation sont sensiblement les mêmes, légèrement plus fortes pour le gaz, l'énergie minimale d'inflammation et l'énergie explosive sont respectivement 15 fois et 3 fois plus faible pour l'hydrogène que pour le gaz.

du développement durable. Reste à démontrer que c'est technologiquement réalisable, économiquement acceptable par comparaison avec les solutions traditionnelles, et que l'ensemble des opérations à mettre en œuvre pour produire, manipuler, utiliser l'hydrogène dans cette fonction énergétique nouvelle soit exempt de création de gaz à effet de serre et acceptable par la Société.

Utiliser aujourd'hui l'hydrogène à des fins énergétiques revient à créer une filière industrielle nouvelle pour laquelle la technologie reste à développer.

2. L'hydrogène est-il vraiment un vecteur d'énergie ?

Comme tout vecteur, il a une origine qui est l'exploitation de la ressource à partir des composés dont on l'extrait, eau, hydrocarbures, hydrures, et une autre extrémité qui est la mise en œuvre de l'actionneur (moteur thermique, pile à combustible, réacteur de synthèse).

Il y a aussi un contexte dont il faut tenir compte. Ce contexte peut être défini comme l'accès à la ressource, puis comme l'ensemble des pollutions, risques, déchets engendrés sur la totalité du parcours et son environnement, depuis sa production jusqu'en sortie de l'actionneur, y compris l'acceptation sociale de l'usage de ce vecteur résultant de l'analyse des risques, des pollutions, des coûts, des servitudes, voire des fantasmes qu'il suscite auprès des populations.

Du point de départ au point d'arrivée on doit analyser, évaluer, caractériser de façons différentielle puis globale les performances, les coûts, les rendements, les natures des pollutions, les risques ; il importe donc de faire des choix parmi les solutions possibles de fabrication, de transport, de stockage, d'utilisation pour optimiser un vecteur d'énergie donné.

L'hydrogène semble correspondre à ces critères : on sait l'extraire de diverses façons, le transporter, le stocker en grande mais aussi en faible quantité, en phase gazeuse plus ou moins comprimé à 100, 200, 350, 700 bars, ou en phase liquide (cryogénique à -253C), le convertir d'une phase dans l'autre, l'utiliser à la demande pour les besoins actuels de l'industrie chimique.

Cependant l'usage intensif de l'hydrogène dans le domaine de l'énergie est un problème différent et d'une autre ampleur.

L'hydrogène seul n'est pas aujourd'hui utilisé en tant que vecteur d'énergie, car cet emploi ne se justifie pas face à l'existant et pour des raisons de prix. L'usage lui préfère les hydrocarbures pour les transports, sauf en tant que propergol pour les fusées et engins spatiaux et le vecteur électricité pour les applications stationnaires.

3. Quels seraient les avantages de l'hydrogène dans les applications énergétiques ?

L'hydrogène peut donc être utilisé dans des procédés de combustion en lieu et place du gaz et on sait par ailleurs qu'il est le carburant idéal pour les piles à combustible.

En plus l'hydrogène a un certain nombre d'avantages de natures différentes, citons-les, sans ordre préférentiel.

Avantages stratégiques

On peut fabriquer l'hydrogène à peu près n'importe où sur la planète, de diverses façons, et donc s'affranchir des difficultés naturelles et géopolitiques d'approvisionnement et de transport rencontrées avec les produits pétroliers ou à un degré moindre avec le gaz naturel.

Avantages écologiques

Parmi les façons de produire et d'utiliser l'hydrogène dans le domaine énergétique, il en existe de nombreuses et non des moindres qui évitent la production de gaz à effet de serre (CO_2 , CH_4), de composés oxygénés de l'azote, et autres composés volatiles. Il faut (et il suffit de) retenir ces solutions.

Dans ces conditions l'hydrogène est un vecteur d'énergie.

Souplesse d'emploi

Cette souplesse rappelle celle du gaz naturel. L'hydrogène peut être transporté et mis en oeuvre soit à l'état gazeux (à des pressions diverses de quelques centaines de bar mais à température ambiante) soit à l'état liquide (à -253°C). Mais dans les deux cas ces opérations consomment de l'énergie.

Avantages technologiques

L'hydrogène peut être utilisé de plusieurs manières:

* dans des procédés de combustion :

- comme carburant pur à la façon d'un propergol d'engin spatial, il peut servir de carburant dans des moteurs à combustion de véhicules terrestres en bénéficiant alors de températures de combustions élevées pouvant conduire à de hauts rendements.

- comme moyen de produire un hydrocarbure de synthèse liquide (extrait de la biomasse et auquel il faudra rajouter plus ou moins de carbone).

- mélangé au gaz naturel afin de lui donner plus de densité énergétique. Cette utilisation dans un futur proche pourrait être vue comme une étape progressive et intermédiaire entre l'utilisation du gaz naturel et celle de l'hydrogène pur.

* dans les piles à combustibles à haute ou à basse température, en tant que carburant :

- On rappelle qu'une pile à combustible est un générateur statique d'électricité et de chaleur, alimenté par un carburant

qui est l'hydrogène et un comburant qui est l'oxygène. Il s'y opère une réaction catalytique exothermique qui synthétise de l'eau (qui est le déchet rejeté) en provoquant un déplacement interne d'ions (donc un courant électrique continu) qui est utilisable extérieurement aux bornes de la pile.

- Une pile à combustible fournit simultanément chaleur et électricité.

- Une pile à combustible dimensionnée pour une puissance donnée est un assemblage de piles élémentaires montées en série et en parallèle.

- Une pile à combustible alimentée en **hydrogène et oxygène purs** est donc un générateur statique de chaleur et d'énergie électrique en courant continu, à émission nulle de produits polluants : **le produit rejeté dans l'atmosphère est de l'eau pure !**

Donc, embarquée sur un véhicule, une pile à combustible alimentée en hydrogène et oxygène purs fournissant de l'énergie à un moteur électrique pour la propulsion assurerait un fonctionnement sans émission de gaz à effet de serre, sans rejet de particules ni d'ozone au niveau du sol.

Cette propriété est mise en défaut si hydrogène et/ou oxygène ne sont pas purs.

- L'hydrogène peut être utilisé comme vecteur d'énergie pour des applications stationnaires en cogénération chaleur électricité dans l'habitat individuel et dans l'habitat collectif grâce à l'utilisation de piles à combustibles à haute température (à oxydes solides SOFC - solid oxide fuel cell-).

- L'hydrogène peut être utilisé comme vecteur d'énergie dans les transports en tant que carburant de piles à combustible basse température (à membranes polymères solides PEMFC -proton exchange membrane fuel cell-) dans des véhicules électriques (hybrides série par exemple).

Dans ce cas précis, sont particulièrement concernés les véhicules terrestres (voitures particulières, transports de masse urbains et de banlieue) et certains transports maritimes.

L'implantation d'une pile à combustible sur un véhicule ne se conçoit qu'avec un stockage à bord d'hydrogène ou d'un carburant intermédiaire dont on extraira l'hydrogène en amont de la pile par un reformeur embarqué.

On utilise aussi de l'air et non de l'oxygène pur, ce qui implique la présence d'azote.

Dans ce cas, contrairement à l'usage de l'hydrogène et de l'oxygène purs qui garantit des véhicules à émission nulle, l'usage de carburant intermédiaire et le reformage occasionnent des émissions de CO₂ et des

pollutions par les oxydes d'azote. Ces émissions et pollutions sont à prendre en compte.

De plus, la chaleur produite au niveau de la pile devra être en grande partie éliminée car indésirable sur un véhicule.

L'utilisation de piles à combustibles embarquées sur véhicule pour la production d'énergie de traction implique une propulsion par moteur électrique, par exemple hybride série (*range extender*) dans laquelle la pile recharge en permanence une batterie fournissant l'énergie aux roues et récupérant l'énergie de freinage.

En résumé, l'hydrogène pourrait se substituer au gaz et au pétrole pour la production d'énergie électrique, d'énergie thermique, d'énergie mécanique dans un certain nombre de créneaux, dont la technologie et la rentabilité restent encore à étudier car on est loin de connaître les optimums technico-économiques. Il ouvre une voie nouvelle qui est celle de la production et de l'utilisation de l'électricité au travers de piles à combustibles par exemple pour la motorisation électrique dans les transports et pour la cogénération chaleur-électricité dans les applications stationnaires (habitat) ou mobiles (véhicules et transports de banlieue).

L'hydrogène est donc un vecteur d'énergie bivalente pour les applications stationnaires et mobiles.

4. Pourquoi avoir attendu tant de temps pour s'intéresser à l'hydrogène ?

L'hydrogène a été utilisé sans accidents notables pendant de nombreuses années jusqu'à la fin de la dernière guerre mondiale pour enrichir le pouvoir calorifique du gaz pauvre et du gaz de ville (essentiellement utilisé pour l'éclairage) mais cette utilisation a disparu avec l'arrivée du gaz naturel, mieux adapté aux usages domestiques (chauffage) et industriels. Peu de gens s'en souviennent, par contre la mémoire collective retient les risques d'explosion en cours de manipulation de l'hydrogène liés à son extrême inflammabilité et illustrés par quelques accidents qui lui furent faussement attribués de façon directe tels l'explosion du zeppelin Hindenburg et plus récemment celle de la navette Challenger. L'usage de l'hydrogène fait peur comme celui du nucléaire car il n'est pas compatible avec la notion de risque zéro ancrée dans l'opinion publique.

L'abondance actuelle des carburants primaires dans les stations services, l'orientation du marché de l'automobile vers des voitures de plus en plus performantes et confortables, la non prise en compte par l'opinion publique des conséquences de la pollution atmosphérique sur la santé publique et des gaz à effet de serre sur la planète n'ont pas conduit à une prise de conscience collective sur la nécessité de pousser les scientifiques

à s'intéresser à des solutions énergétiques différentes de celles existantes dont le gaz et le pétrole.

La situation semble commencer à changer sous l'impulsion des écologistes et des politiques. Des efforts sont faits par certains industriels de l'automobile pour faire des voitures moins gourmandes en énergie et moins polluantes en termes de grammes de CO₂ émis au kilomètre parcouru, y compris le filtrage des fines particules contenues dans les gaz d'échappements des diesels.

Néanmoins, depuis 1995 le monde scientifique, les industriels des transports (pétroliers, constructeurs automobiles), plus récemment l'état et l'Union européenne ont pris la mesure de l'intérêt potentiel de la solution hydrogène. Ils s'y intéressent avec le souci écologique de voir réduire les pollutions atmosphériques, de préparer dans le cadre du développement durable des solutions aux problèmes que vont poser la raréfaction prochaine puis la disparition des énergies primaires fossiles en particulier dans le secteur des transports terrestres.

Les médias en parlent comme si tout était fait.

Malheureusement les recherches sur les piles à combustibles réalisées dans le monde entier, le peu d'études consacrées à la fabrication industrielle à grande échelle d'hydrogène exempte de pollutions n'ont donné lieu qu'à des solutions prototypes, économiquement inacceptables et non industrialisables ; tout ceci conduit le grand public à se poser la question non sans raison: **hydrogène mythe ou réalité?**

5. A quelle date aura-t-on besoin du vecteur hydrogène ?

Certainement pas avant les pics pétroliers et gaziers c'est-à-dire les dates à partir desquelles le pétrole d'abord puis le gaz 20 à 30 ans après, commenceront à manquer et leurs prix se mettront à flamber. Donc pas d'utilisation courante de l'hydrogène dans le domaine de l'énergie avant 2030 au minimum.

Il est difficile de donner une date précise car l'utilisation de l'hydrogène dépendra de plusieurs facteurs :

- de l'orientation du marché : vers quelles applications: stationnaires ? mobiles ? ou vers les deux ?
- de l'évolution progressive des motorisations automobile et des carburants associés,
- de l'évolution des techniques de production de l'hydrogène face au mixe énergétique.

Par contre, dès maintenant de nombreuses expérimentations de solutions techniques dans les domaines du chauffage, de la cogénération chaleur et électricité, des transports terrestres sont faites dans les pays avancés et

de façon plus ou moins coordonnée, pour évaluer l'intérêt des diverses solutions et définir des stratégies.

Orientation du marché de la cogénération chaleur/électricité dans l'habitat:

L'utilisation de piles à combustible dans l'habitat particulier et collectif aura-t-elle un sens après 2030 ?

On ne peut pas raisonner dans la continuité des techniques et besoins de chauffage actuels.

Face aux nombreuses solutions qui seront proposées à cette échéance, en particulier le chauffage thermique solaire et les techniques dérivées de l'utilisation de la biomasse, les systèmes de récupération de chaleur inexistantes aujourd'hui mais que l'on veut développer, les géothermies, la réduction des besoins en chaleur due à l'utilisation des matériaux de construction nouveaux et donc des réductions des besoins d'énergie dans un habitat rajeuni, l'utilisation de solutions thermodynamiques locales décentralisées, la concurrence de l'électricité produite de façon centralisée, aura-t-on vraiment besoin d'installer des piles à combustibles dans l'habitat individuel ou collectif fournissant chaleur **et** électricité?

Si « oui » le marché de l'hydrogène se substituera à celui du gaz naturel ; si « non » l'emploi de l'hydrogène se limitera aux applications du transport terrestre.

C'est une question fondamentale, celle de la nécessité de la cogénération dans l'habitat, qui mérite réponse.

Evolution progressive des motorisations dans l'automobile et des carburants associés:

L'utilisation de l'hydrogène dans le transport automobile a fait l'objet d'études aux Etats-Unis d'une part et dans la Communauté européenne d'autre part, par des commissions d'experts de l'automobile et de l'industrie du pétrole en tenant compte des évolutions vraisemblables des motorisations et des carburants dans le futur.

Ces études sont à peu près convergentes et montrent une évolution progressive des motorisations vers des structures hybrides parallèles biénergie thermiques/électriques à partir de 2010 (combustion à essence aux Etats-Unis, diesels en Europe), des modifications du moteur thermique en combustion directe pour l'utilisation de carburants de synthèse riches en hydrogène, et enfin vers 2040 et généralisation en 2050, de véhicules électriques hybrides série, à piles à combustibles [solution *range extender* dans laquelle tout moteur thermique a disparu, la pile à combustible recharge la batterie qui délivre l'énergie au(x) moteur(s) électrique(s) entraînant les roues].

Par conséquent, vers 2050 l'hydrogène, en tant que carburant des piles à combustible pourrait devenir le vecteur d'énergie pour les transports.

À cette date comment fabriquer l'hydrogène ?

C'est là une des grosses difficultés du dossier hydrogène.

6. Dans le cadre du développement durable, sait-on produire économiquement l'hydrogène pour les besoins énergétiques, en particulier pour le transport terrestre ?

Pour l'industrie chimique, comme indiqué précédemment, on dispose des technologies nécessaires à la fabrication de l'hydrogène à la mesure des besoins, à partir de divers hydrocarbures, à son transport, à son stockage, à sa distribution, à son utilisation en phase gazeuse et en phase liquide. Actuellement cette fabrication restitue dans l'atmosphère des gaz à effet de serre (dioxyde de carbone et méthane).

En ce qui concerne le transport terrestre, on ne sait pas à ce jour produire les quantités d'hydrogène nécessaires à ses besoins, par contre on sait le faire pour une consommation limitée à partir du gaz naturel et à titre expérimental, par exemple, pour l'alimentation d'une flotte captive de véhicules dans une grande ville (quelques lignes d'un réseau urbain d'autobus).

Pour créer une production de masse d'hydrogène qui éviterait de rejeter des gaz à effet de serre, il faut imaginer d'autres filières.

Deux filières sont techniquement envisageables combinant plusieurs procédés possibles, mais il reste à en évaluer les coûts et les rendements globaux (du puits à la roue), à les classer par ordre de mérite et à trouver les combinaisons optimales de ces procédés.

- **La première filière**, déduite de celle qui est actuellement utilisée en chimie, est basée sur l'utilisation comme matière première **d'hydrocarbures d'origines diverses ou même de charbon** que l'on traite suivant des procédés catalytiques différents nécessitant des apports d'oxygène ou de vapeur d'eau.

Les produits sortant de cette filière sont d'abord du gaz de synthèse - mélange de monoxyde de carbone et d'hydrogène-, puis de l'hydrogène et du CO₂ séparés, ensuite par traitements de synthèse complémentaires des carburants liquides. Comme le gaz de synthèse peut être brûlé directement dans des turbines à gaz (dédiées à cet usage) de centrales thermiques de cogénération chaleur/électricité, **la filière hydrocarbure peut produire in fine de l'hydrogène pur, de l'électricité, de la chaleur et des carburants de synthèse de grande qualité** (par exemple par le procédé Fischer-Tropsch).

Cette filière suppose 3 conditions remplies:

- **de disposer d'hydrocarbures en tant que matière première** (cas actuel),
- **de savoir faire la séquestration (capture, transport, stockage géologique) du CO₂,**

- la finalisation des développements des procédés de fabrication et de purification de l'hydrogène actuellement en cours d'étude.

Cette filière semble aujourd'hui la plus rapide à mettre en oeuvre, la plus économique, elle suppose que l'on sache relever le défi de la séquestration du CO₂. Elle s'éteindra avec la disparition des hydrocarbures naturels.

Dans cette filière, on retrouve certains procédés que l'on devra mettre en oeuvre pour exploiter les futures centrales thermiques au charbon ou au gaz naturel avec séquestration du CO₂, plus d'autres concernant la purification de l'hydrogène et la synthèse d'hydrocarbures liquides: [Coal To Liquid (CTL) ou Gaz To Liquid(GTL)].

• **La seconde filière** est basée sur **l'utilisation de l'eau comme matière première**, eau que l'on va décomposer en ses deux constituants l'hydrogène et l'oxygène. On voit tout de suite qu'il y a deux sous-filières : l'électrolyse de l'eau, d'une part, la décomposition indirecte de l'eau d'autre part (puisque la décomposition directe est impossible). Elle remplira les conditions du développement durable si on évite en tout point de son domaine l'utilisation d'énergie ayant provoqué la formation de gaz à effet de serre.

L'électrolyse de l'eau à basse température par un courant électrique continu suppose que ce courant soit fourni par des centrales électriques ne générant pas de gaz à effet de serre: centrales à énergies renouvelables (hydrauliques), centrales thermiques équipées de dispositifs de séquestration du CO₂, et évidemment centrales nucléaires. L'intérêt théorique de l'électrolyse est grand, en pratique l'ensemble des procédés successifs mis en oeuvre fait que le rendement énergétique global de l'obtention de l'hydrogène par cette voie est faible, de l'ordre de 22%.

L'électrolyse de l'eau à haute température permet d'obtenir des rendements meilleurs, elle se heurte à des difficultés de comportement thermique des matériaux constituant les électrolyseurs en présence de vapeur d'eau à haute température; de plus aujourd'hui elle semble peu économique.

La décomposition de l'eau en ses deux constituants par cycles thermochimique² semble prometteuse pour une production de masse d'hydrogène et a, de ce fait, de nombreux partisans car son rendement global est élevé de l'ordre de 50%.

Elle ne sera pas opérationnelle avant de nombreuses années (2050 ?). La difficulté réside dans le fait que les réactions de dissociation sont

² Les cycles thermochimiques sont des procédés constitués de suites de réactions chimiques effectuées entre 500 et 800 C°, la plupart fortement endothermiques (donc nécessitant un apport de chaleur extérieure) qui, en partant de l'eau comme matière première et utilisant des réactifs, permettent de séparer hydrogène et oxygène tout en régénérant les réactifs. Deux procédés semblent présenter de l'intérêt, le procédé UT3 et le procédé Iode/Soufre.

fortement endothermiques et supposent donc de gros apports de chaleur extérieurs.

On pense que seuls des réacteurs à neutrons rapides dédiés à cette fonction seront capables de fournir cette énergie. Reste à démontrer que les coûts de production correspondants ne seront pas prohibitifs dès lors que le besoin s'en fera sentir.

Enfin, citons pour la fabrication locale et décentralisée d'hydrogène, la transformation thermo-chimique de la biomasse, le reformage du méthanol et ultérieurement des productions biotechnologiques directes par des enzymes hydrogénases.

La biomasse est une filière limitée mais fort intéressante pour la production décentralisée d'hydrogène.

7. L'hydrogène est-il le vecteur d'énergie le mieux adapté aux transports terrestres pour le futur ?

De ce qui précède, c'est certainement, sur le plan de la technologie, le vecteur le mieux adapté dans un futur lointain, mais à la longue il devra se défaire de ses concurrents qui sont les carburants de synthèse et le vecteur électricité que l'on trouvera associés dans le véhicule hybride thermique électrique parallèle.

Dans un premier temps, le véhicule hybride parallèle occupera le créneau des véhicules à émission nulle de gaz polluants en ville (marche en mode électrique) et, du fait des progrès faits sur la combustion dans les moteurs thermiques, des émissions de moins de 100 grammes de CO₂ rejetés au kilomètre parcouru pourront être atteintes sur les trajets extra-muros (marches en modes thermique et électrique combinées).

Les performances du véhicule hybride parallèle pourront être améliorées avec les progrès qui sont annoncés sur les batteries, en particulier les batteries lithium Ion/ polymère solide (puissance massique d'au moins 200 Wh/kg soit 3 fois mieux qu'aujourd'hui) néanmoins insuffisantes pour donner à une voiture électrique une autonomie de 500 kilomètres et des temps de recharge acceptables (il faudrait une puissance de batterie de 350 Wh/kg).

Dans un second temps, les carburants de synthèse fabriqués à partir de l'hydrogène permettront de maintenir ces performances de faible pollution sans rien changer au réseau de distribution des carburants.

Enfin, pour généraliser l'utilisation de l'hydrogène pour le transport terrestre, utilisant vers 2050 des véhicules à piles à combustibles, il faudra repenser toutes les infrastructures et la logistique de distribution des carburants actuels, cela demandera des investissements

considérables; il faudra d'ici là résoudre le problème du stockage de l'hydrogène à bord des véhicules.

Sur le plan de la rentabilité, il est encore difficile de dire quelles applications seront économiquement rentables et à partir de quand.

8. Comment distribuer l'hydrogène pour les besoins du transport terrestre?

On peut s'inspirer de 2 modèles existants pour imaginer la distribution d'hydrogène gazeux en vue de son utilisation dans le transport terrestre, en étudiant les performances et les coûts:

* Le réseau maillé de distribution de l'hydrogène gazeux sous pression (100 bars) utilisé par l'industrie chimique constitué de gazoducs à grande distance, de stations de compression, de réservoirs de stockage, de postes de distribution. Une distribution fortement décentralisée par camions citernes de 50 m³ complète le dispositif.

* Le réseau de distribution du gaz naturel de GDF dans lequel des essais ont déjà été faits avec succès pour faire transiter de l'hydrogène entre deux stations en le mixant au gaz dans l'une et en le récupérant dans l'autre.

Des études économiques très sérieuses sont à faire pour optimiser le système de transport car il faut se rappeler que le pouvoir calorifique volumique de l'hydrogène est le tiers de celui du gaz naturel, et que l'hydrogène liquide a une densité volumique de 8,5 Mégajoule/litre à comparer à celle du gazole de 36,3 Mégajoule/litre.

L'hydrogène peut être transporté par camions semi-remorques de 30 tonnes soit sous forme gazeux comprimé à 200 bars (370 Kg d'hydrogène c'est-à-dire 3 400 Nm³), soit de préférence sous forme liquide à -253C° par citernes de 50 m³ (3,5 tonnes d'hydrogène).

Par exemple, si on raisonne sur un transport par camion d'hydrogène liquide, il faut près de 4 camions d'hydrogène pour avoir l'équivalent en énergie de 1 camion de gazole dans les mêmes conditions. Par camion, à quantité d'énergie transportée égale, le transport de l'hydrogène est 3 fois plus cher que celui du gaz naturel et 15 fois plus cher que celui du pétrole.

Une question reste encore sans réponse : pour des raisons technologiques et des raisons économiques, pourra-t-on stocker l'hydrogène dans des réservoirs souterrains, comme on le fait pour le gaz ?

9. Quelles sont les difficultés du stockage de l'hydrogène pour l'application aux transports terrestres ?

Le stockage de l'hydrogène à bord des véhicules est un problème non résolu à ce jour.

La difficulté est due à la disparité des masses entre contenu et contenant ; elle est d'autant plus grande que le volume à stocker est grand (ce qui deviendrait un problème critique dans le cas d'avions longs courriers alimentés en hydrogène).

Il y a 2 possibilités de stockage entre lesquelles il faudra choisir : hydrogène en phase liquide ou gazeuse.

Ce choix dépendra des technologies dont on disposera pour fabriquer des réservoirs de véhicules sûrs et sécurisés et du coût énergétique pour maintenir à bord des véhicules et dans les automates de distribution l'hydrogène à l'état liquide ou à l'état gazeux comprimé. Dans les 2 cas, pour parcourir 500 kilomètres à 120 kilomètres à l'heure, la consommation d'hydrogène d'un véhicule standard serait de l'ordre de 4 à 5 kilogrammes, comme il en résulte d'essais de consommation faits sur plusieurs véhicules prototypes ces dernières années.

Dans le cas de l'hydrogène gazeux comprimé, l'intérêt est d'avoir la pression maximale; il est difficile de dépasser une pression de 700 bars pour des raisons de tenue des matériaux constituant le réservoir. Les cycles de remplissage induisent des phénomènes de fragilisation des matériaux par fatigues alternées ; en particulier s'il s'agit de polymères organiques dont la perméabilité à l'hydrogène croît avec le temps. La durée de remplissage ne doit pas être trop courte pour éviter l'échauffement du réservoir, et la surpression, nécessaire pour compenser la perte de pression au refroidissement qui s'en suivra, doit être limitée.

Compte tenu de cette haute pression les technologies des réservoirs, détendeurs, soupapes de sécurité, fusibles thermiques, ne sont pas actuellement définies. On estime à 100 kilogrammes la masse de ces réservoirs pour stocker 5 kilogrammes d'hydrogène à 700 bars!

D'autres principes de stockage de l'hydrogène gazeux sont à l'étude et paraissent prometteurs : un consisterait à stocker l'hydrogène gazeux par capillarité dans des nano-tubes de carbone activé ; un autre mettrait en jeu des phénomènes d'absorption par des hydrures métalliques.

Dans le cas de l'hydrogène liquide, à -253°C sous 5 ou 10 bars, c'est l'isolation thermique des réservoirs qui pose problème et nécessite beaucoup de maintenance pour éviter l'évaporation de l'hydrogène en cas d'arrêt prolongé du véhicule (taux de fuite admissible 1gr d'hydrogène par kg stocké -1cm³ de gaz à température et pression normales par litre de réservoir et par heure) ; il faut éviter l'accumulation des fuites d'hydrogène dans le cas de garages clos.

Néanmoins, l'usage de l'hydrogène liquide a de nombreux partisans : L'hydrogène liquide a une plus haute densité énergétique que l'hydrogène comprimé à 700 bars (il faudrait le comprimer à 1 200 bars pour avoir l'équivalent), et du fait de la basse pression, on pourra réaliser des réservoirs légers, particulièrement résistants, dont la géométrie pourra s'adapter facilement à la configuration des différents véhicules. Le réservoir d'un véhicule standard sera dimensionné pour une autonomie de véhicule de 500 km, contenant 5 kg d'hydrogène liquide (soit 90 litres) et le temps de remplissage sera de 10 minutes environ.

On compte sur une consommation de 15 à 17 litres d'hydrogène liquide pour 100 kilomètres à 120 km/heure.

Remarque :

Il existe des directives européennes transposées en droit français qui s'appliquent à l'hydrogène dans les applications traditionnelles, à son stockage et à son transport, à la protection des travailleurs.

Il n'y a pas encore de réglementation concernant l'hydrogène dans les applications transport ; par contre une directive européenne est en voie de préparation en s'appuyant sur les travaux du réseau européen HYSAFE (*Hydrogen Safety As Energy Carrier*) mis en place afin de capitaliser les connaissances, partager l'expertise, maîtriser les risques, proposer des recommandations pour l'usage de l'hydrogène en tant que vecteur d'énergie.

En France, les véhicules prototypes fonctionnant à l'hydrogène sont couverts par l'immatriculation provisoire traditionnelle W.

10. Comment s'articulent les grands programmes de recherche sur l'hydrogène ?

En France, de nombreux organismes publics (CEA, CNRS, ADEME, BRGM, IFP) et privés (Air Liquide, EDF/DER, Total PSA, Renault, etc.) travaillent sur les différents aspects du vecteur hydrogène. Certains travaux sont menés de façon individuelle, d'autres sont coordonnés dans le cadre du programme **HyFrance** qui est la partie française du projet européen **HyWays (Hydrogen Pathways)** à savoir l'étude de la pénétration en Europe du vecteur hydrogène dans les différents secteurs économiques.

Rappelons que l'Association Française de l'Hydrogène AFH2 réunit les acteurs français qui promeuvent le développement et l'utilisation de l'hydrogène et que les associations nationales équivalentes se regroupent au sein de l'Association Européenne de l'Hydrogène EHA.

L'Union européenne a mis en place en 2004/2005 « **la nouvelle plate-forme européenne des technologies hydrogène et piles à combustibles** » avec, pour

mission, de faciliter et d'accélérer le développement et le déploiement des technologies applicables aux transports, au stationnaire, aux systèmes portables.

Outre la planification des études, la centralisation puis la diffusion des résultats des recherches et des expérimentations, la fonction de cet organisme est de définir la politique énergétique européenne dans le domaine de l'hydrogène.

Le sixième programme cadre (PCRD 6) (2002/2006) de l'UE prévoit une contribution de 100M€ pour les recherches et de 150M€ pour des réalisations dans le domaine de la production propre, du stockage des matières premières, de la sécurité de l'hydrogène, et de l'étude de la transition vers une économie basée sur l'hydrogène.

L'initiative européenne de relance de l'économie par la croissance soutient deux initiatives consacrées à l'hydrogène dans son programme **Quick Start** à savoir :

- **Hypogen** qui étudie la façon de dé-carboner par l'hydrogène les combustibles fossiles actuels ;
- **Hycom** qui explore la faisabilité, les mesures de sécurité, la rentabilité, la gestion des centres de production d'hydrogène.

Les résultats des études évoqués ci-dessus permettront d'établir les thèmes de recherche qui seront retenus pour le septième programme cadre **PCRD 7**.

Des collaborations ont été établies entre l'Europe, les Etats-Unis, le Japon, la Chine, le Canada.

Citons enfin la participation de l'UE au partenariat international pour l'économie d'hydrogène **IPHE** (*International Partnership for The Hydrogen Economy*) initié par le secrétariat à l'énergie des Etats-Unis en 2004 en vue d'une collaboration internationale pour la résolution des problèmes techniques, économiques, politiques rencontrés dans la mise en place d'une économie basée sur l'usage de l'hydrogène énergie.

Pour en savoir plus (en date de janvier 2005) :

Nous suggérons au lecteur de parcourir les publications récentes suivantes qui émergent du sein d'une littérature pléthorique et forcément redondante :

- **L'hydrogène comme vecteur énergétique : concurrence ou complémentarité avec les combustibles fossiles** (Edouard Freund, IFP, lettre Energies et Matières premières N° 20)

- **Les Défis du Génie des Procédés face à l'Hydrogène-Energie** (résumé des exposés)

VI^e journée CATHALA-LETORT 17 nov. 2004 Maison de la Chimie Paris

- **L'hydrogène, les nouvelles technologies de l'énergie** (ensemble des articles)

CLEFS Hiver 2004-2005 CEA N° 50/51