

L'utilisation de l'hydrogène chez les constructeurs automobiles

Il y a aujourd'hui un fort consensus mondial pour considérer l'hydrogène et la pile à combustible comme « La solution » dans la recherche d'une alternative au pétrole, dans le cadre d'un développement durable, mais aussi, tout simplement, parce que la voiture du futur sera électrique. L'industrie automobile est donc aujourd'hui celle qui tire l'essentiel des recherches dans le monde sur l'hydrogène et la pile à combustible, même si bien d'autres applications sont envisagées. Ces technologies pourraient être compétitives en automobile autour de 2015.

par Pierre Beuzit
*Directeur de la recherche
du groupe Renault*

Hydrogène, pile à combustible, voilà des termes qui reviennent souvent quand on parle d'énergie, d'environnement ou de développement durable. Il ne se passe pas un jour

dans le monde, sans qu'il ne se tienne un colloque, un séminaire, un forum... traitant de ces sujets. Or, si nous regardons autour de nous, nous n'en verrons pratiquement aucune application concrète.

D'autre part, quand on en parle avec des spécialistes des problèmes d'énergie, ils ont sur ces sujets des avis souvent très divers, voire carrément opposés.

Maintenant, si on comptabilise les dépenses de recherche qui ont déjà été faites sur ce sujet de l'hydrogène, on découvre que cela correspond à des sommes considérables : plusieurs milliards d'euros en cumulé au cours des dernières années ; et qu'on s'apprête à en dépenser encore autant avant d'envisager la première véritable application industrielle.

Nous ne sommes pourtant pas habitués à une telle désinvolture, au moins apparente ; d'autant plus que la pile à combustible a été inventée en 1839 par William Grove, un médecin-physicien gallois et qu'on est en droit de se demander pourquoi après tout ce temps nous n'en sommes que là. Ou bien le sujet ne présente aucun intérêt et alors pourquoi ces dépenses ? Ou, dans le cas contraire, pourquoi avoir attendu aussi longtemps ?

La pile à combustible fabrique de l'électricité à partir d'hydrogène et d'oxygène par un mécanisme qu'on peut décrire comme une électrolyse à l'envers ; c'est-à-dire que les ions d'hydrogène et d'oxygène se combinent pour donner de l'électricité, de l'eau et de la chaleur.

L'intérêt d'un tel système est évident puisqu'il fournit une énergie facilement utilisable, de l'électricité et même de la chaleur, sans produire autre chose que de l'eau, produit non polluant et recyclable, et

cela avec un rendement très supérieur à celui d'une combustion directe de ces produits. En fait des difficultés considérables sont associées à sa mise en œuvre, sur lesquelles nous reviendrons. Mais pour comprendre l'intérêt phénoménal que ce système suscite dans le monde entier, et pas seulement dans les pays industrialisés, il faut revenir sur la problématique de l'énergie, telle qu'elle nous apparaît aujourd'hui.

Le problème mondial de l'énergie

Le développement économique se traduit dans tous les pays par une consommation de plus en plus importante d'énergie. Le progrès économique a été marqué par la maîtrise et la consommation de différents types d'énergies : la biomasse, le solaire, l'éolien, l'hydraulique... et maintenant, pour une grande part, le pétrole, qui est d'ailleurs aussi utilisé comme matière première pour l'élaboration de nombreux matériaux.

Le problème vient de ce que notre économie en est devenue très dépendante, particulièrement dans le domaine des transports, et que cette ressource est très mal répartie dans le monde : des pays très développés, ou aspirant à l'être, en sont quasiment dépourvus. Elle est, en outre, en quantité limitée, même si chaque année de nouveaux gisements sont découverts.

Enfin, la combustion des carburants issus du pétrole produit des substances susceptibles d'altérer la santé qu'on appelle polluants ainsi que des gaz à effet de serre, en particulier du dioxyde de carbone, susceptibles de modifier les climats.

Tout ceci rend l'utilisation du pétrole de plus en plus problématique dans le cadre d'un développement économique dit « durable », ce à quoi aspirent tous les pays aujourd'hui. Mais dans cette recherche d'une alternative au pétrole, tous les pays n'ont pas les mêmes priorités.

L'Europe affiche depuis les années 70, comme une priorité, d'éradiquer les émissions de polluants dans l'atmosphère. Ceci s'est fait progressivement (réglementations Euro I, II, III, IV...) tout en continuant à utiliser le pétrole, mais au prix fort, car les technologies, pour satisfaire ces réglementations, sont de plus en plus complexes et coûteuses. Il est donc compréhensible qu'à travers la recherche d'une alternative au pétrole, il y ait le souci de traiter le problème de la pollution d'une manière plus élégante.

Plus récemment, les émissions des gaz à effet de serre sont devenues une forte préoccupation et, dans le monde des transports, nous considérons que leur réduction est la priorité des prochaines décennies.

Pour ce qui concerne la France, le gouvernement a d'ailleurs fixé l'objectif de diviser par quatre ces émissions d'ici 2050. Quand on sait que près de la moitié des besoins énergétiques français sont satisfaits sans émission de gaz à effet de serre, on imagine la pression qu'une telle mesure met sur le monde des transports routiers et aériens.

Enfin, se fait jour la volonté d'abandonner à terme les énergies fossiles (et pas seulement le pétrole) par des énergies dites « renouvelables » : solaire, éolien, géothermique, biomasse...

Les Etats-Unis ont une approche un peu différente. Les deux priorités américaines qui sont, à leurs yeux, à la base du développement économique sont la sécurité d'approvisionnement énergétique et une énergie disponible à un coût assez bas (un baril de pétrole à moins de USD 20). Quand on sait que 98 % des importations de pétrole ser-

vent au transport et que celui-ci se développera encore dans les années à venir, on comprend leur sensibilité à ce problème. La santé reste une forte priorité et les règlements américains ont toujours été en avance sur les règlements européens. En revanche, leur approche du problème des gaz à effet de serre est différente de celle des européens dans la mesure où ils envisagent la réduction des émissions sans impact économique défavorable pour leur industrie.

Le Japon a une position qui se rapproche de celle des Etats-Unis.

La Chine et l'Inde, les futures grandes économies du monde, sont aussi très préoccupées par les problèmes énergétiques - elles disposent de peu de pétrole - et leurs conséquences éventuellement néfastes ; aussi sont elles très attentives à passer le plus rapidement possible à des technologies « durables » et maîtrisables par elles-mêmes.

Tout ceci fait qu'il existe, malgré tout, une bonne convergence objective sur l'hydrogène et la pile à combustible.

Les problèmes de production et de stockage de l'hydrogène

L'hydrogène ne peut pas être considéré comme une énergie primaire dans la mesure où, sur la Terre il n'existe pas à l'état libre. Lorsqu'il est isolé, il est donc considéré comme un vecteur d'énergie. La première difficulté est donc de le « produire », c'est-à-dire de l'extraire d'une molécule dans laquelle il est présent. C'est une opération courante aujourd'hui puisqu'il en est produit environ 500 Milliards de Nm³/an soit de l'ordre de 50 millions de tonnes par an (ce qui représente environ 10 % de la consommation énergétique mondiale par les transports !), essentiellement par vapocraquage du gaz naturel : pour les besoins de l'industrie chimique et en premier lieu la fabrication d'ammoniaque ainsi que l'élimination du

soufre des carburants obtenus par raffinage du pétrole.

Malheureusement ce procédé, parfaitement maîtrisé, conduirait, s'il était utilisé pour produire de l'hydrogène comme carburant, à un coût très supérieur à celui de l'essence et à des émissions de CO₂ fortement augmentées !

Il faut donc trouver un processus nouveau qui ne présenterait pas ces défauts.

Un second problème est posé par son stockage. On peut le faire sous trois formes :

- gazeux, mais compte tenu de sa masse spécifique très faible, il faut le comprimer à 1300 bars pour obtenir une densité énergétique équivalente à celle de l'essence !

- liquide, mais à pression ordinaire il est liquide à - 253°C, ce qui pose quand même un beau problème de cryogénie et un mauvais bilan énergétique ; l'énergie nécessaire à la cryogénie pouvant représenter une part non négligeable et non récupérable de l'énergie contenue dans l'hydrogène ;

- solide, sous forme d'hydrures ou par absorption par un matériau adéquat ; des recherches intenses ne donnent aujourd'hui que des résultats médiocres (ratio massique H₂/support < 2%, alors que pour tenir dans un réservoir conventionnel il faudrait atteindre 8 %).

Le problème de la distribution n'est sans doute pas le plus difficile à résoudre si on se souvient qu'il fut un temps où en France, on distribuait ce qu'on appelait le gaz de ville, qui n'était autre qu'un mélange de monoxyde de carbone et ...d'hydrogène !

La sécurité est un problème dont on doit se préoccuper, mais n'apparaît pas comme une difficulté majeure compte tenu de la capacité de l'hydrogène à se dissoudre dans l'air. En revanche, l'acceptation sociétale demandera sans doute un effort et une communication importants.

Les applications industrielles de la pile

à combustible : un problème de coût

Nous avons dit que l'invention de la pile à combustible était très ancienne et que pourtant il n'y avait pratiquement pas d'applications industrielles. Malgré tout, le champ des applications potentielles est considérable : sont candidats tous les systèmes qui fonctionnent à l'électricité et qu'on ne peut pas raccorder au réseau : le téléphone portable, le micro-ordinateur, les sites isolés, les systèmes de secours, les engins fonctionnant sur batteries... et

naturellement la voiture électrique.

La grande supériorité de la pile à combustible tient à sa puissance massique (et volumique) et à son autonomie comparées à celles des batteries, même les plus modernes : les meilleures batteries au lithium peuvent stocker 120 Wh/kg ; ce qui veut dire que pour une autonomie de 500 km en voiture électrique, il faudrait 450 kg de batterie (et un temps de charge de plusieurs heures) ; le même résultat peut être obtenu avec 100 kg de pile à combustible et 4 kg d'hydrogène.

Les difficultés résident dans les technologies nécessaires pour effectuer le transfert des ions. Aujourd'hui pour un rendement équivalent à celui d'un moteur diesel à injection directe, le coût du kW installé est de l'ordre de 100 fois celui dudit moteur ! La durée de vie d'une pile et sa versatilité, en utilisation transport sont aussi encore aujourd'hui largement inférieurs à ceux d'un moteur à combustion interne.

La recherche est donc principalement focalisée sur la création de nouvelles technologies permettant de réduire drastiquement les coûts, d'améliorer l'efficacité et d'allonger la durée de vie.

L'obstacle majeur à une utilisation commerciale de la pile étant le coût, l'application la plus importante qui est visée est l'automobile, même si c'est la plus difficile, puisqu'elle représente la plus forte puissance installée non rac-

cordée à un réseau de distribution d'énergie. L'industrie automobile est donc aujourd'hui celle qui tire l'essentiel des recherches dans le monde sur l'hydrogène et la pile à combustible ; même si bien d'autres applications sont envisagées. La traction automobile est bien la moins accessible compte tenu des coûts pratiqués (< 50 euros/kW contre 300 à 1 000 euros/kW pour des applications stationnaires), du profil de mission où la demande peut varier du simple au décuple en quelques secondes et des exigences de durabilité associées (5 000 heures).

Toutes les grandes entreprises automobiles ont donc un programme de recherche dans ce domaine. Elles mènent des recherches en interne mais aussi avec des partenaires. Ceux-ci peuvent être des entreprises spécialisées comme Ballard au Canada où DaimlerChrysler et Ford ont investi massivement (plusieurs centaines de millions de USD chacun), Nuvera (USA et Italie), PlugPower... Des partenariats sont aussi de plus en plus nombreux avec des grandes entreprises industrielles comme les pétroliers et particulièrement Shell et sa filiale Shell Hydrogen ; Exxon qui travaille avec GM et Toyota ; BP ; Total... et plus généralement des entreprises impliquées dans la fourniture d'énergie : en France on peut citer EDF et GDF, dans un autre registre Air Liquide et d'autres entreprises impliquées dans les matériaux, la chimie et la catalyse comme Johnson Matthey, Dupont de Nemours, 3M, Asahi... qui espèrent des retombées industrielles et commerciales.

Enfin ces partenariats de recherche concernent évidemment de nombreux laboratoires, citons en France le CEA, le CNRS, l'Institut de Recherche sur la catalyse...

On peut considérer qu'aujourd'hui les six grands groupes automobiles mondiaux mènent des recherches très actives sur la pile à combustible : Toyota et GM (qui ont d'ailleurs certaines recherches en commun), DaimlerChrysler qui a créé un organis-

me commun avec Ford mais chacun menant aussi des recherches en propre, Renault-Nissan qui a engagé un programme très ambitieux en 2001 et enfin Volkswagen. Les autres constructeurs sont aussi engagés dans cette aventure mais à un niveau sensiblement moindre.

Les initiatives publiques pour une « économie de l'hydrogène »

Compte tenu de l'ampleur du problème, des changements considérables (industriels, économiques, sociaux) que le développement de ce qu'on appelle « l'économie de l'hydrogène » va entraîner dans nos sociétés, les pouvoirs publics d'un grand nombre de pays se sont impliqués dans l'organisation de réseaux et au moins pour une part dans le financement de ces recherches.

Dans le cas de la France, en 1999, le gouvernement a pris deux initiatives qui ont structuré la recherche nationale dans ce domaine.

La première a été de créer un réseau regroupant tous les industriels et laboratoires travaillant sur l'hydrogène et la pile à combustible. Ce réseau appelé « PaCO » est doté d'un bureau et d'un comité d'orientation présidés par Roger Ballay, ancien responsable de la R&D d'EDF, auxquels participent des représentants des entités du réseau (industriels, laboratoires, pouvoirs publics). Ses missions principales sont de fédérer les ressources du pays dans le domaine de l'hydrogène et de la pile à combustible, ainsi que de susciter la mise en œuvre de projets de recherche à finalité industrielle impliquant des organismes industriels et académiques. Des fonds publics sont mis chaque année à disposition au ministère de la Recherche, au ministère de l'Industrie et à l'Ademe pour aider à la réalisation des projets labellisés par le réseau. Ils sont de l'ordre de 10 M d'euros par an. Ce réseau est ouvert à toutes les technologies et à tous les types d'applications.

La seconde initiative, qui couvre un large domaine de la recherche technologique a conduit à la création des

centres nationaux de recherche technologique ; celui qui concerne l'hydrogène et la pile à combustible fonctionne et a son centre de gravité à Belfort. Sa mission est surtout expérimentale et consiste à mettre des moyens de test et de mesure à la disposition des projets. Au niveau européen, des initiatives ont été prises en 2002, par les commissaires aux Transports et à l'Énergie (Mme de Palacio) et à la Recherche (M. Busquin), de créer un groupe de réflexion (*High Level Group for Hydrogen Economy*), qui a déposé ses conclusions en juin 2003 sur l'organisation et les orientations qu'il convenait de prendre si on ne voulait pas que l'Europe prenne du retard dans ce domaine. Ces consignes ont été suivies par la Commission européenne qui a créé, fin 2003-début 2004, ce qu'il est convenu d'appeler " une plate-forme technologique " (*European Platform for Hydrogen*). Celle-ci est chargée de proposer et promouvoir des grands programmes de recherche appliquée à vocation industrielle (projets-phares) qui devraient voir le jour à l'échéance du 7^e PCRD en 2006. Une note d'orientation pour sa préparation est prévue en octobre 2004.

Les Etats-Unis sont organisés de longue date sur le sujet. Dans le domaine automobile, qui est le principal secteur visé, le programme *Freedom Car* sur la réduction de consommation, lancé par l'Administration Clinton (qui prenait la suite du programme PNGV sur le même sujet), prévoyait des aides pour des recherches sur l'hydrogène financées par les départements de l'Énergie et des Transports.

L'Administration Bush a considérablement renforcé ces aides en janvier 2003 (portées de 500 millions à 1,2 milliard USD sur 5 ans) faisant de cette recherche une priorité nationale.

Par ailleurs, conscients que l'effort à fournir est considérable et qu'un pays isolé ne peut pas imposer seul un nouveau vecteur énergétique, les Américains ont pris l'initiative de proposer à quinze autres pays de s'associer pour organiser cette recherche à un niveau international. Tous les pays invités ont répondu positivement - dont la France - mais aussi l'Allemagne, l'Italie, la Communauté

européenne, la Russie, la Chine, l'Inde, le Brésil, le Canada, le Japon, l'Islande, la Norvège...

Cette organisation, IPHE (*International Program for Hydrogen Economy*), est dotée d'une structure de fonctionnement qui lui permet « d'orchestrer » les recherches dans tous les domaines concernés.

IPHE comprend deux comités : le *Steering committee* qui gouverne le partenariat, en définit les règles de fonctionnement, entérine les programmes de recherche... et l'*Implementation and Liaison Committee* qui définit les thématiques de recherche et orga-

nise les projets entre les instituts de recherche et les entreprises des pays concernés. Dans chacun de ces comités les pays sont représentés par deux membres des pouvoirs publics ou des organismes d'Etat.

Le Japon s'est doté aussi de plusieurs programmes nationaux. On peut citer le WE-NET (*International Clean Network Using Hydrogen Conversion*) qui a débuté en 1993, était dans sa phase 2 entre 1999 et 2003 et bénéficiait d'une aide d'environ 20 millions d'euros. Ce programme a pour but de développer les technologies nécessaires à la production, le transport et la distribution d'hydrogène avec, en particulier, la mise en place de « station services ».

Le programme JHFC (*Japanese Hydrogen and Fuel Cell*), de 2002 à 2004 aidé par le ministère de l'Économie, du Commerce et de l'Industrie, a pour but l'expérimentation de véhicules à hydrogène et de l'infrastructure associée (la mise en service de neuf stations de remplissage est prévue, utilisant différentes technologies de production d'hydrogène). 21 compagnies incluant les constructeurs japonais et certains constructeurs occidentaux (DaimlerChrysler et GM) ainsi que les principales compagnies pétrolières présentes au Japon sont impliquées dans ce programme.

la voiture du futur sera électrique

La mise en place de ces organisations de recherche à plusieurs niveaux (entreprises, national, européen et international) traduit trois convictions largement partagées : d'abord qu'il est urgent de s'organiser pour assurer au monde un approvisionnement énergétique durable, ensuite que l'effort à faire est tel qu'il faut se regrouper, enfin que nous avons l'espoir de déboucher à un horizon raisonnable pour intéresser des industriels.

Concernant l'industrie automobile, les problèmes engendrés par l'utilisation de l'énergie ont toujours été au cœur de ses préoccupations et de sa recherche. Les dépenses autour

de ce thème représentent plus de 50 % du total des dépenses de recherche.

Il y a aujourd'hui un fort consensus mondial pour considérer l'hydrogène et la pile à combustible comme « La solution » pour les raisons que nous avons évoquées plus haut et tout simplement parce que la voiture du futur sera électrique ; non seulement pour la traction mais aussi pour les fonctions qui la constituent et ce pour des raisons de versatilité, de contrôle, de pilotage et de couplage grandement facilités par l'usage de l'électricité (et par là de l'électronique).

Il est, en revanche, plus difficile d'en prévoir l'échéance. Les puristes diront que si l'hydrogène est la meilleure solution, le plus tôt sera le mieux ; mais en général le mieux est ennemi du bien ! Car, même si techniquement tous les problèmes que nous avons évoqués finiront par avoir des solutions acceptables et industrialisables, il faudra du temps avant qu'une industrie aussi importante que l'industrie automobile soit en mesure de changer aussi radicalement. Le moteur qu'on dit improprement " à explosion " existe depuis plus d'un siècle, est au cœur du véhicule et est en général fabriqué par le constructeur ; il ne peut être abandonné sur une simple décision. Il y a de nouvelles compétences à acquérir, un nouveau réseau de fournisseurs à développer et en fait une nouvelle industrie à créer.

Mais, parallèlement à ces efforts, certes très importants, l'industrie automobile

Quinze pays se sont associés aux Etats-Unis pour organiser la recherche à un niveau international dans le cadre de l'IPHE

(constructeurs et fournisseurs) essaie de faire évoluer la situation actuelle de l'énergie dans les véhicules en suivant des voies plus conventionnelles. Le moteur à combustion interne, qui a déjà beaucoup évolué, a encore une belle marge de progrès. De très nombreuses actions de recherche sont en cours qui conduisent à l'amélioration des rendements et la réduction des émissions polluantes. Citons, dans les réalisations récentes, l'injection directe en diesel puis en essence et, dans les recherches en cours, les taux de compression et les cylindrées variables, le pilotage des soupapes, les turbocompresseurs à hautes performances... Dans le domaine des carburants aussi, des progrès remarquables ont été réalisés, mais de nouveaux types de carburants, non dérivés du pétrole, sont envisageables comme les *gas to liquid* provenant du gaz naturel ou du charbon, comme les carburants issus de la biomasse qui suscitent un grand enthousiasme en Europe qui sont, en fait, des carburants de synthèse dont on pourra ajuster la formulation chimique pour l'adapter au mieux à la combustion.

On connaît aussi le processus d'hybridation du moteur thermique, qui évite de pâtir du mauvais rendement du moteur dans certaines zones d'utilisation, en le complétant par une chaîne électrique. Le principe étant que le moteur thermique va fonctionner le plus souvent possible dans les zones de bon rendement ; quand il fournit plus d'énergie que la demande, le surplus est transformé en énergie électrique et stocké dans des batteries ; dans le cas contraire la batterie fournit sous forme électrique le complément d'énergie

nécessaire. Toyota et Honda commercialisent déjà de tels systèmes.

Toutes ces démarches viennent à court et moyen termes « concurrencer » la voie hydrogène. Leur succès permettra à l'industrie automobile de prendre le temps nécessaire pour faire les transformations imposées par les nouvelles technologies engendrées par l'hydrogène et la pile à combustible. Il est donc difficile aujourd'hui de prédire quand se fera le basculement.

Ce qui est couramment admis quant à l'issue des recherches sur l'hydrogène et la pile à combustible c'est que les technologies pourraient être compétitives en automobile autour de 2015. Le calendrier serait donc :

- recherches et démonstrateurs jusqu'à 2010 ;
- 2010-2015 : production de flottes de véhicules ;
- 2015 : début de productions en grande série.

Ceci, naturellement, si les recherches aboutissent et si, par rapport aux autres voies, l'hydrogène s'impose par ses performances et ses coûts.

A noter une application de moindre envergure, mais sans doute à moins long terme : celle du générateur auxiliaire d'électricité qui remplacerait donc l'alternateur d'aujourd'hui. En effet, avec l'introduction de nouvelles fonctions électriques, le besoin d'énergie électrique croît. Ce besoin est aujourd'hui satisfait par le duo moteur thermique/alternateur dont le rendement est mauvais (de 10 à 20 %) et qui pénalise le fonctionnement du moteur thermique, les demandes de puissance venant de la traction et venant des auxiliaires n'étant pas corrélées. La difficul-

té majeure associée à cette application envisagée en priorité sur les véhicules commerciaux et industriels, est évidemment la génération de l'hydrogène à partir du carburant du véhicule.

De l'hydrogène et de la pile à combustible dépend la pérennité de l'automobile

L'industrie de l'énergie a trouvé dans l'hydrogène et la pile à combustible un sujet exaltant de recherche. Le XXI^e siècle verra, dans le domaine de l'automobile, le passage du pétrole à de nouvelles sources, plus diversifiées ; mais aussi l'abandon de la combustion comme moyen privilégié de transformation de l'énergie, comme cela s'est fait en stationnaire avec le passage du thermique au nucléaire. Evidemment les obstacles sont de taille et les détracteurs virulents, mais nous sommes nombreux à être convaincus que la pérennité de ce moyen fantastique de communication et de développement économique qu'est l'automobile passe par cette transformation, certes douloureuse puisque le moteur à combustion interne est à l'origine de la voiture moderne. C'est au plus l'affaire de deux décennies. ●

